

Elektrisk trevekst i ekstrudert Polypropylen (PP) kabelisolasjon

Ketil Stokland

Master i energi og miljø
Oppgaven levert: Juni 2010
Hovedveileder: Erling Ildstad, ELKRAFT

Oppgavetekst

Polypropylen er et ekstruderbart polymermateriale med høy elektrisk holdfasthet og lave dielektriske tap. Til nå har ikke PP vært benyttet som høyspennings kabelisolasjon, dette skyldes først og fremst PP materialets høye smeltepunkt og elastisitetsmodul, som gjør fremstillingen mer krevende og kabelen blir mekanisk stivere enn en tradisjonell PEX eller EPR isolert kabel. Nye typer PP materialer, som for eksempel syndiotaktisk polypropylen (sPP), samt økt behov for kabelisolasjon egnet for høytemperatur anvendelser gjør det nå svært aktuelt å undersøke muligheter og begrensinger knyttet til PP som høyspennings kabelisolasjon.

Diplomoppgaven er en del av et NFR/industri støttet prosjekt ved NTNU/SINTEF Energi, der målsettingen er å utvikle design kriterier for PP kabelisolasjon. Hovedformålet med oppgaven er å studere dannelsen av elektriske trær i ulike PP materialer.

Oppgaven vil gå ut på å:

1. Gi en redegjørelse/litteraturoversikt av hvordan partiell utladningsaktivitet fører til dannelse av elektriske trær og gjennomslag. Det skal spesielt fokuseres på hvordan material karakteristikk, som for eksempel mekanisk styrke og tracking-motstand, vil kunne innvirke på trærnes form og tid til elektrisk gjennomslag.
2. Bygge og utprøve målekretser for eksperimentell undersøkelse av i) sammenhengen mellom partiell utladningsaktivitet og trevekst, ii) elektrisk ledningsevne av trestruktur.
3. Foreta eksperimentell kartlegging av dannelsen av elektriske trær fra innstøpte nåler i syndiotaktisk og isotaktisk polypropylen, med hensyn på ac spenningsnivå og utladningsaktivitet.
4. Drøfte resultatene i lys av resultater fra litteraturen samt høstens prosjekt oppgave.

Det detaljerte prøveprogrammet fastlegges i samarbeid med veilederne.

Oppgaven gitt: 19. januar 2010
Hovedveileder: Erling Ildstad, ELKRAFT

Forord

Denne oppgaven er en avsluttende masteravhandling ved NTNU i sivilingeniørstudiet Energi og Miljø med fordypningsområde Elektrisk Energiteknikk, og er full studiebelastning i tiende semester. Som del av et overordnet forskningsprosjekt under NTNU/SINTEF Energi for tekniske løsninger i subsea elektrifisering av olje og gassektoren søker denne oppgaven å belyse egenskapene til syndiotaktisk polypropylen (sPP) til bruk som isolasjonsmateriale i høyspentkabler. I den relasjon er fokuset elektrisk trevekst ved sammenligning med isotaktisk polypropylen (iPP).

Teksten er skrevet med tanke på en leser med teoretisk elektrofaglig bakgrunn, slik at grunnleggende fagterminologi vil antas å være kjent. Videre vil den ivrige leser henvises til bakgrunnsmateriale fordelt på tre vedlagte DVDer. På disse finnes alt av bilder og video av treveksten, samt Excel regneark med samling av informasjon fra dette materialet.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til professor Erling Ildstad og ph.d.-student Jorunn Hølto for all veiledning og hjelp både teoretisk og praktisk med denne oppgaven. Også en takk til mine foreldre og min Elin for all støtte og hjelp. En spesiell takk til førsteamanuensis Frank Mauseth og resten i Kabelgjængen, inkludert alle på kontoret for fantastisk godt selskap, gode samtaler og faglige diskusjoner.

Trondheim, juni 2010



Ketil Stokland

Sammendrag

Denne oppgaven søker å undersøke egenskapene til det nye isolasjonsmaterialet syndiotaktisk polypropylen (sPP) knyttet til elektrisk trevekst ved sammenligning med det mer brukte materialet isotaktisk polypropylen (iPP). For å belyse temaet er det gjort en bakgrunnsstudie av elektrisk trevekst knyttet til partielle utladninger (PD), treform, overflateutladninger (tracking) og mekanisk belastning. Undersøkelsermetoder som har blitt utformet og benyttet er spenningssetting av nål-plategap med digital filming av treveksten, og høyspent måling av resistiviteten til ulike trekanaler i sPP og iPP. Hovedpunkter for undersøkelsene har vært initieringstid, vekstrate, tid til jord og tid til gjennomslag, samt definering av tretype, og resistivitet.

Datamaterialet er basert på i alt 64 tester og det finnes til sammen ca 290 timer med video- og bildeopptak av elektrisk trevekst i iPP og sPP.

Følgende hovedkonklusjoner kan trekkes fra studien:

- Betydningen av hulrom ved nålespissen for nål-plategap prøveobjekt er antydning at være typen trevekst i form av tykkelse på trekanalene. Resultatene tyder på en middels sterk sammenheng mellom denne parameteren sammen med spenningsnivå som definerende for type trevekst i form av en eller flere trekanaler i kontakt med jord ved gjennomslag.
- Hulrom ved nålespissen har vist en sterk tendens til å påvirke antall trekanaler mot jord for 9 og 11kV, men ikke 7 og 13kV, altså gjelder det i kombinasjon med spenningsvariasjoner. Det er ikke avdekket noen tydelig sammenheng mellom omfanget av jordveksten og hulrom.
- Hulrom ser ikke ut til og nevneverdig påvirke tid til jord og tid til gjennomslag i sPP, om noe så ved å forlenge levetiden noe.
- Resultatene viser ingen tydelig sammenheng mellom hulrom og initieringstid i sPP.
- Initieringstiden i sPP tenderer mot å være lengre enn i iPP.
- Den gjennomgående tendensen i resultatene er at elektrisk trevekst vokser raskere i sPP enn i iPP. Dette gjelder både tid til treveksten når jord, og tid til gjennomslag.
- I motsetning til nevnte tendens har sPP vist generelt bedre verdier ved 9kV enn iPP.
- Resultatene fra resistansmålingene av trekanaler i sPP var inkonsekvente. Forsøksmetoden krever videre utvikling og større prøvemengder.

Innhold

Forord.....	V
Sammendrag	VII
Innhold	IX
Figurliste	XI
Tabelliste	XIII
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Hypoteser	2
2. Teori.....	3
2.1 Polypropylen.....	3
2.2 Partielle utladninger (PD)	7
2.3 Kommentarer til hypotesene	7
2.4 Elektrisk trevekst	8
2.4.1 Initieringsfasen	8
2.4.2 Propageringsfasen.....	10
2.4.3 Gjennomslaget	10
2.4.4 Innvirkning av spenning	10
2.4.5 Ulike typer trevekst.....	11
2.4.6 Innvirkning av mekaniske krefter.....	13
2.5 Overflateutladning.....	14
2.6 Levetidsfunksjoner	16
3. Metode.....	17
3.1 Bakgrunn for valg av prøveobjekt	17
3.2 Produksjon av prøveobjekt.....	19
3.3 Spenningsprøving	20
3.4 Behandling av måledata	22
3.5 Konduktivitet i trekanaler.....	23
4. Resultater	27
4.1 Prøveobjektene	27
4.2 Betydning av hulrom ved nålespiss	27
4.3 Beskrivelse av treform	29
4.4 Initieringstid.....	34
4.5 Vekstrate.....	35
4.6 Tid til gjennomslag.....	37

4.7	Levetidsfunksjon	40
4.8	Konduktivitet test	41
4.8.1	Prøveobjektene	41
4.9	Andre resultater	43
4.9.1	Betydning av sfærelitter	43
4.9.2	Gjennomslagskanal	43
4.9.3	PD-måling under trevekst	44
5.	Diskusjon	47
5.1	Produksjon av prøveobjektene	47
5.2	Betydningen av hulrom	47
5.3	Treform	48
5.4	Initieringstid	49
5.5	Vekstrate	50
5.6	Tid til gjennomslag	50
5.7	Gjennomslagskanal	52
5.8	Levetidskurve	52
5.9	Konduktivitetstest	52
5.10	PD-målinger	53
5.11	Feilkilder	53
6.	Konklusjon	57
6.1	Videre Arbeid	57
7.	Bibliografi	59
8.	Vedlegg	61

Figurliste

Figur 1 - a) Isotaktisk PP, b) syndiotaktisk PP, c) ataktisk PP molekyler	4
Figur 2 - Sfærulett dannet av parallellbundne polymerkjeder. Oppstår i forskjellige størrelser og mengde avhengig av avkjølingshastighet[7]	5
Figur 3 - Smeltetemperatur avhengig av syndiotaktisk pentad fraksjon, eller grad av syndiotaktisitet for sPP[8]. X-aksen er benevningsløs.	6
Figur 4 - Elektrisk holdfasthet for sPP, iPP og XLPE (PEX) ved 25 °C og 90 °C.[5]	6
Figur 5 - PD utvikling i sfærisk hulrom til elektrisk trevekst. [11]	9
Figur 6 - Oppbrytning av mellomkrystallinske bindinger i PE. [4]	9
Figur 7 - Gjennomsnittlig vekstrate for elektriske trær i LDPE ved 30°C [15]	11
Figur 8 – Trevekstklassifisering på grunnlag av lengdeutvikling per tid. Lengde kan presenteres både med enhet μm , og som prosent av total lengde til jord.[16]	12
Figur 9 – Trevekstklassifisering på grunnlag av vekstkoefisienten $D = \text{bredde} / \text{lengde}$, og utvikling per tid.[16]	12
Figur 10 - Mekaniske spenninger i PEX, etter gjennomslag, vist ved doble polarisatorer	14
Figur 11 – a) Øvre del av kompositthus der overflaten er kraftig korrodert som følge av overflateutladninger(tracking) initiert av vann. b) overflateutladninger i fremkant av endeavslutning som har kraftig erodert PEX-isolasjon. [18]	15
Figur 12 - Simulert elektrisk felt for et nål-plategap. Feltlinjer i rødt, og ekvipotensiallinjer i farger.	18
Figur 13 - Laplace felt ved nålespisser med spissradius angitt langs x-aksen[12]	19
Figur 14 - Prøveobjekt med mål	20
Figur 15 – Testoppsett	20
Figur 16 - Skadeomfang i sPP ved 7kV, med hhv 200kohm (til venstre) og 400kohm (til høyre) i serie ut fra transformatoren.	21
Figur 17 - Mikroskop med prøvestativ og underbelysning	22
Figur 18 - Prøveoppsett for konduktivitetstest	24
Figur 21 - Korrelasjonsfaktor mellom hulrom og type trevekst ved ulike spenningsnivå for iPP, sPP og begge samlet	28
Figur 19 – Trevekst ved 9kV i prøve a) sPP5-004 med hulrom, og b) sPP5-007 uten hulrom	28
Figur 20 - Trevekst ved 9kV i prøve a) iPP1-006 med hulrom, og b) iPP2-012 uten hulrom	28
Figur 22 - Vekstkoefisienten ($D = \text{bredde} / \text{lengde}$) til trevekst som funksjon av tid, ved ulike spenningsnivå sPP.	29
Figur 23 - Vekstkoefisienten ($D = \text{bredde} / \text{lengde}$) til trevekst som funksjon av tid, ved ulike spenningsnivå iPP.	30
Figur 24 - Fraktal dimensjon ved gjennomslag for ulike spenningsnivå, sPP og iPP.	30
Figur 25 - Gjennomsnittlig bredde til treveksten i sPP for ulike spenningsnivå gitt per tid.	31
Figur 26 - Gjennomsnittlig bredde til treveksten i iPP for ulike spenningsnivå gitt per tid	31
Figur 27 – Gjennomsnittlig breddevekst gitt av prosentvis avstand til jord – sPP	32
Figur 28 – Gjennomsnittlig breddevekst gitt av prosentvis avstand til jord – iPP	32
Figur 29 - Gjennomsnittlig trelengde i sPP i prosent av total lengde til jord per tid, gitt for ulike spenninger	33

Figur 30 - Gjennomsnittlig trelengde i iPP i prosent av total lengde til jord per tid, gitt for ulike spenninger.	33
Figur 31 - Gjennomsnittsverdier for initieringstid for elektrisk trevekst i sPP og iPP. Y-aksen er gitt i sekunder fra spenningssetting.	34
Figur 32 - Gjennomsnittlig vekstrate gitt per spenningsnivå	35
Figur 33 - Vekstrate per tid for 7kV	36
Figur 34 - Vekstrate per tid for 9kV	36
Figur 35 - Vekstrate per tid for 11kV	37
Figur 36 - Vekstrate per tid for 13kV	37
Figur 37 – (Øverst) Tid til gjennomslag vist som tre punkter for hver graf; minste tidsmåling, gjennomsnittlig verdi, og lengste tid til gjennomslag i sPP-prøver.	38
Figur 38 – (Nederst) Tid til gjennomslag vist som tre punkter for hver graf; minste tidsmåling, gjennomsnittlig verdi, og lengste målte tid til gjennomslag i iPP-prøver.	38
Figur 39 – (Øverst) Tiden fra spenningssetting til treet når jord i sPP-prøver, presentert som minimum-, gjennomsnitt- og maksimumverdier.	39
Figur 40 – (Nederst) Tiden fra spenningssetting til treet når jord i iPP-prøver, presentert som minimum-, gjennomsnitt- og maksimumverdier	39
Figur 41 - Gjennomsnittlig tid til gjennomslag per gjennomsnittlig estimert E-felt i logaritmisk skala.	40
Figur 42 - sPP6-004 uten hulrom, spenningsatt på 9kV og stoppet etter 59min.	41
Figur 43 - sPP7-002 med hulrom, spenningsatt på 9kV og stoppet etter 68min	41
Figur 44 - Lekkstrøm i trekanal under trinnvis stigende DC-spenning	42
Figur 45 - Resistans i trekanal for trinnvis økende spenning	42
Figur 46 - iPP prøve før (bilde a til venstre) og etter (bilde b til høyre) treinitiering. Trevekstens gang i grensesjiktet mellom sfærulittene er tydelig.	43
Figur 47 - Korrelasjon mellom tilstedeværelse av hulrom, og om første jordgren blir gjennomslagskanal eller ikke.	43
Figur 48 - Akkumulert PD fra 0-2min for sPP6-004 uten hulrom, testet på 9kV. Bildet er tatt før treinitiering. Den gule grafen er referansespenningen, og den grønne representerer de partielle utladningene. Oppløsningen er 20mV/divisjon for grønn graf.	44
Figur 49 - Akkumulert PD fra 7-9min for sPP6-004 uten hulrom, testet på 9kV. Bildet er tatt ikke lenge etter treinitiering.	45
Figur 50 - Faseplott av PD-aktivitet fra 0-2min etter spenningssetting. Alle de målte verdiene for hvert spenningsnivå er plottet.	46
Figur 51 - Faseplott for PD aktivitet fra 0-2min etter spenningssetting. Gjennomsnittsverdier for hvert spenningsnivå er plottet.	46
Figur 52 - Tid fra trekanalene når jord, til gjennomslaget inntreffer. Viser hvor lenge eventuell jordvekst pågår.	51

Tabelliste

Tabell 1 – Materialelegenskaper ved sPP og iPP hentet fra databladene [Vedlegg A]	5
Tabell 2- Målte strekkeegenskaper av sPP og PEX[14]	13
Tabell 3 - Resultater fra støv-tåke test angående motstandsdyktighet mot overflateutladninger[4].	15
Tabell 4 - Geometriske størrelser i nål-plategap prøveobjekter	17
Tabell 5 - Bestemmende strømverdier for strømbegrensende motstand	24
Tabell 6 - Gjennomsnittlige geometrisk mål for prøveobjektene fordelt på spenningsnivå og materiale	27
Tabell 7 - Initieringstid med differanser	34

1. Innledning

Denne hovedoppgaven ved Sivilingeniørstudiet ved NTNU tar utgangspunkt i undertegnede prosjektoppgave fra andre semester i 2009 "Elektrisk trevekst i polypropylen (PP) og tverrbundet polyetylen (PEX) kabelisolasjon". Her ble det undersøkt initieringstid og vekstrate i de to isolasjonsmaterialene syndiotaktisk PP og PEX for å kunne si noe om deres motstandsdyktighet mot elektrisk trevekst. Bakgrunnen for dette er et ønske om å finne metoder for å detektere elektrisk trevekst i kabelisolasjon før gjennomslaget skjer og for om mulig å kunne forhindre gjennomslag. Forskjellen mellom kostnadene ved kontrollerte utkoblinger og utskiftninger av kabler i motsetning til kostnadene ved uforutsette brudd er enorme. Dette gjør at forskning på feilmekanismer er lønnsomt.

Gjennom oppgaven blir elektrisk trevekst undersøkt for det relativt nye isolasjonsmaterialet syndiotaktisk polypropylen (sPP). Ved sammenligning med det mer kjente isotaktisk polypropylen (iPP), tradisjonelt sett kun betegnet som PP. Det er mulig at treveksten har en sammenheng med andre egenskaper som mekaniske, termiske og den molekylære oppbygningen. Dette er behandlet i den grad det er hensiktsmessig mulig innenfor hovedoppgavens arbeidsomfang.

Første del av oppgaven består i å studere tilgjengelig litteratur. Noe av dette vil nødvendigvis være gjentakelse fra prosjektoppgaven [1], men er i hovedsak hentet fra artikler hos IEEE og tekniske bibliotek ved NTNU. Hoveddelen av arbeidet er å gjennomføre laboratorieforsøk med de to materialene. Noen av metodene i laboratorieforskene er de samme som i prosjektoppgaven (spesialiseringsprosjekt høsten [1], med de forbedringer som der er foreslått. I tillegg er det utviklet et måleoppsett hvor resistansen i den elektriske treveksten kan måles. Alle laboratorieforsøk er utført ved Institutt for Elkraftteknikk ved NTNU, og SINTEF ENERGI.

1.1 Bakgrunn

Som høyspenning kabelisolasjon brukes både olje, papir mettet med olje, og polymerer. Blant polymerisolasjon er kryssbundet polyetylen (PEX) praktisk talt enerådende i dagens marked. De svært gode elektriske egenskapene som lav dielektrisk tapsfaktor, høy elektrisk holdfasthet og stor mekanisk styrke har plassert PEX i denne posisjonen. Den termiske toleransen har derimot et utviklingspotensial, og forbedring av stabilitetstemperatur fra $T_{s,LDPE} \approx 80$ °C til $T_{s,PEX} \approx 90$ °C var årsaken til introduksjonen av kryssbinding i forhold til forrige generasjons polyetylenisolasjon (LDPE). Denne temperaturgrensen begrenser blant annet overføringskapasiteten til kablene, og nytteverdien i høytemperaturapplikasjoner. En utvikling her er derfor ønskelig. En mulig utfordrer er sPP med betraktelig høyere smeltetemperatur og lignende elektriske egenskaper.

Fellesbetegnelsen PP har fra tidligere kun blitt brukt om iPP som lenge har blitt benyttet som blant annet tynn film i platekondensatorer. Materialet har vært kjent som sprøtt og stivt, og er derfor ikke blitt benyttet som kabelisolasjon. Håpet er at søstermaterialet sPP som er mer elastisk og som har høyere stabilitetstemperatur enn PEX kan benyttes også som kabelisolasjon ($T_{s,sPP} \approx 130$ °C).

Innledning

I polymerisolerte høyspenningskabler blir elektrisk trevekst sett på som den hyppigste feilmekanismen som fører til sammenbrudd. Elektrisk trevekst kan opptre i sammenheng med mekaniske svakheter, eller forurensinger i isolasjonsmaterialet som metallspon, gassbobler, støvkorn, eller lignende, men forekommer aldri uten et elektrisk felt. Forurensingene blir som oftest introdusert i ekstruderingen, tross høye presisjonskrav til temperatur, trykk og renhet.

Fenomenet elektrisk trevekst har lenge blitt studert i blant annet PEX, diverse epoksyblandinger, og tilsvarende materialer. Lite forskning har blitt utført på sPP til nå. Dette fordi materialet er forholdsvis nytt i isolasjonsøyemed. Hittil har man heller ikke klart å finne noen entydig forklaring på hvorfor og hvordan fenomenet utvikler seg. Derfor er denne forskningen nødvendig for å utvide forståelsen av elektrisk trevekst, både generelt og i sammenheng med sPP.

Fra undertegnedes arbeid med prosjekt høsten 2009 ble det oppdaget en annen type trevekst enn de karakteristiske grenvekst, og buskvekst som oppstår i PEX. I noen av prøvene vokste det mange tynne trekanaler fra elektroden til jord før et endelig gjennomslag skjedde langs en av kanalene typisk noen timer etter.

1.2 Hypoteser

Denne oppgaven søker å sammenligne sPP og iPP på lignende måte som sPP og PEX ble gjort i prosjektoppgaven [1]. Derfor presenteres like hypoteser for sPP og iPP, som det ble gjort for sPP og PEX i prosjektoppgaven.

Hypotese I og II:

- I. sPP har lengre initieringstid for elektrisk trevekst enn iPP under likt 50Hz spenningsnivå i samme nål plate- gap oppsett.
- II. Elektrisk trevekst vokser saktere i sPP enn i iPP under likt 50Hz spenningsnivå i samme nål plate- gap oppsett.

Forsøkene fra forprosjektet antydte blant annet en sammenheng mellom tilstedeværelsen av hulrom ved nålespissen i prøveobjektet før spenningssetting, og hvilken type trevekst som utviklet seg.

- III. Ved hulrom i sPP initieres en hurtigere trevekst med påfølgende gjennomslag enn i tilfelle uten hulrom for nål plate- gap oppsett.
- IV. Hulrom påvirker også typen elektrisk trevekst som oppstår før gjennomslag.

I tillegg er det ønskelig å studere de elektriske trekanalene for å få større klarhet i årsaken til utviklingsprosessene. Hypotese V søker å undersøke hvilken innvirkning ledningsevnen til trekanalene har på veksten.

- V. Enkelgrenet elektrisk trevekst har større konduktivitet enn tilsvarende multipl grenet elektrisk trevekst.

Kapittel 2.4 beskriver mer inngående hva elektrisk trevekst er, hva det kommer av og hva som påvirker veksten. Kapittel 2.1 beskriver de to typene polypropylen.

2. Teori

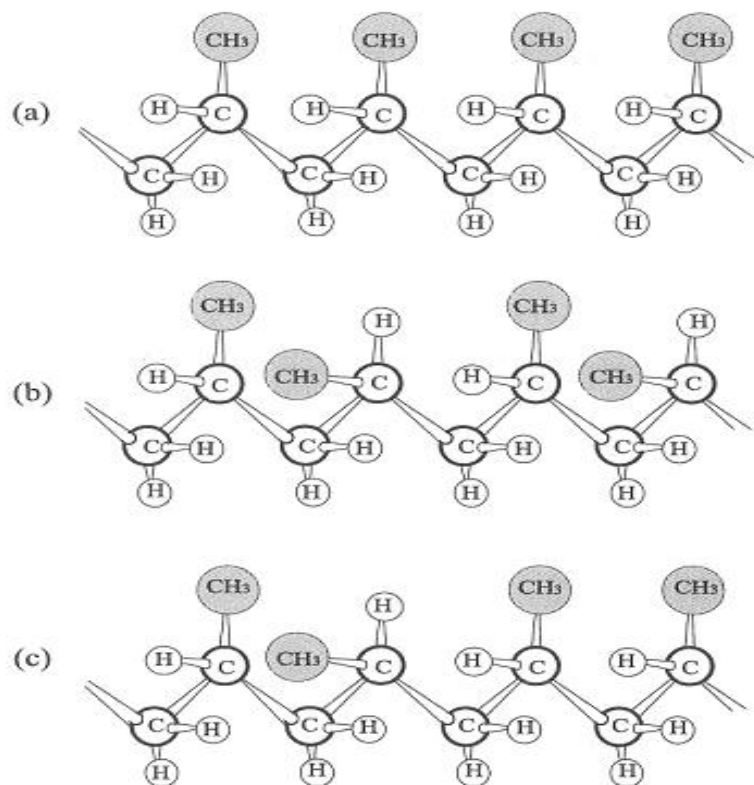
Polypropylen(PP) kan være en utfordrer til PEX som høyspent kabelisolasjon med sin temperaturgrense på nærmere 150 °C og lignende elektriske egenskaper, men har lenge kun blitt benyttet som tynn film i platekondensatorer i isolasjonsøyemed. Dette har vært på grunn av de skjøre mekaniske egenskapene. Materialet har vært kjent som sprøtt og stivt, og har derfor ikke funnet noen applikasjon som kabelisolasjon. Funnet av taktisitet av Ziegler og Natta [2] endret molekyloppbygningen noe, og sPP ble introdusert. Dette materialet hadde mer fleksible mekaniske egenskaper, med en stabilitetstemperatur nærmere 130 °C.

2.1 Polypropylen

Polypropylen er en polymer bestående av en kjede karbonatomer med metylmolekyler(-CH₃) bundet til sidearmene. Betegnelsen er (CH₃)_n. Bruken av polypropylen strekker seg fra tauverk til støtfangere, men i elektrisk sammenheng har de mekaniske egenskapene begrenset det til isolasjonsmateriale i platekondensatorer. Iboende stivhet og sprøhet har utelukket kabelisolasjon. Materialet har likevel den egenskapen at det er en termoplast, og dermed resirkulerbar, i motsetning til termosettinger som PEX. [3]

Polypropylen har lenge vært en kjent polymer med egenskaper som et stivt, sprøtt materiale med lav dielektrisk tapsfaktor(tan d), høy dielektrisk styrke, men tross sterk kjemisk stabilitet har PP en tendens til å svekkes i kontakt med kobber(Cu), og når det blir utsatt for UV-stråling. Andre egenskaper er høyt smeltepunkt og lav massetetthet(~0,905) i forhold til andre polymerer. Degradering under UV-stråling kan motvirkes ved å tilsette antioksidanter.

Gjennom oppdagelsen av Ziegler-Natta syntesen [2] på 1960-tallet økte også forståelsen av polymeren, og man kunne se tre distinkte materialer på grunnlag av ulike mikrostrukturer. Metylmolekylenes(-CH₃) retning var her bestemmende faktor. For iPP peker de alle i samme retning, ut av papirplanet i Figur 1 a), for sPP skifter metylretningen annenhver inn og ut av papirplanet, vist i Figur 1 b), mens retningen er usystematisk for den ataktiske typen(aPP) Figur 1 c).



Figur 1 - a) Isotaktisk PP, b) syndiotaktisk PP, c) ataktisk PP molekyler

iPP var den typen som innehadde egenskapene som tidligere ble tilskrevet generell PP. På det stadiet ble sPP sett på som en forurensing i iPP-materialet, som eventuelt kunne utvinnes. Maksimalt taktisitetsnivå (forholdstall som beskriver hvor mye av materialet som er syndiotaktisk bundet) var da opp mot 75 %. [4]

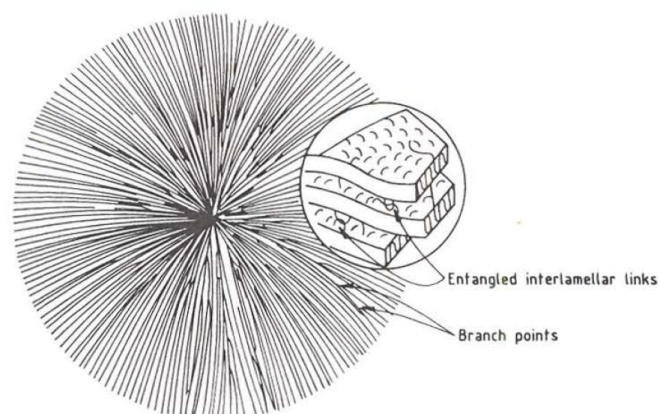
Senere ble nye metoder funnet for å polymerisere propylen. Den siste og mest vellykkede metoden som ble funnet på 1990-tallet tok i bruk metallorganiske katalysatorer. Med denne metoden kunne man bestemme graden av taktisitet så høy som 75-95 %. (også kjent som syndiotaktisk pentad fraksjon).

Egenskapene til dette nye sPP var en noe lavere smeltetemperatur (130 °C) enn iPP (~210 °C), men fortsatt høy sammenlignet med andre polymerer tiltenkt samme bruksområde (kabelisolasjon), som kryssbundet polyetylen (PEX) (90 °C). I Tabell 1 er flere materialegenskaper gjengitt.

Makrostrukturen til PP kan både beskrives i forhold til krystallinitet, men også i forhold til sfærolitter og størrelsen på disse. Av krystallinitet har Yoshino et al [5] vist til maksimumverdier på 69 % ved 373K for iPP, og påpekt mye lavere verdier for sPP. Forskning fra inneværende år [6] viser til sPP-prøver vannavkjølt med 15 °C/min med krystallinitet på 23,5 %. Disse verdiene er direkte relaterte til prøveobjektene benyttet i denne oppgaven.

Det er i hovedsak to typer bindinger som holder polymerene sammen. De kovalente bindingene mellom atomene i hver polymerkjede er de sterkeste, og de svakere van der Waalske bindingene holder molekykjedene sammen. I krystallinske områder ligger molekykjedene parallelt og holdes sammen av kovalente bindinger. Amorfe områder har

svakere intermolekylære bindinger, og blir derfor tidligere brutt enn de i krystallinske områder under belastning. De amorfne områdene er derfor utsatt i forhold til elektrisk trevekst når det gjelder hvor den videre veksten utvikler seg.



Figur 2 - Sfærulitt dannet av parallellbundne polymerkjeder. Oppstår i forskjellige størrelser og mengde avhengig av avkjølingshastighet [7]

Sfærulitter er sammengrodde krystallinske kuleformede områder som vist i Figur 2. Disse dannes ved at molekylljedene bukker seg i parallelle grener som danner et slags sentrum og dermed former krystallinske sfærer. Størrelsen på disse har vist seg å være avhengig av kjølingshastigheten ved støping av iPP [6] [8] (i referansene referert til som PP). For sPP derimot viste sfærulittene seg å bli betraktelig mindre enn i iPP, uansett avkjølingshastighet [5] [6]. Flere kilder antyder til at små sfærulitter kan motvirke elektrisk trevekst, men undertegnede har hittil ikke klart å finne noen klare underbyggende forskningsresultater på dette.

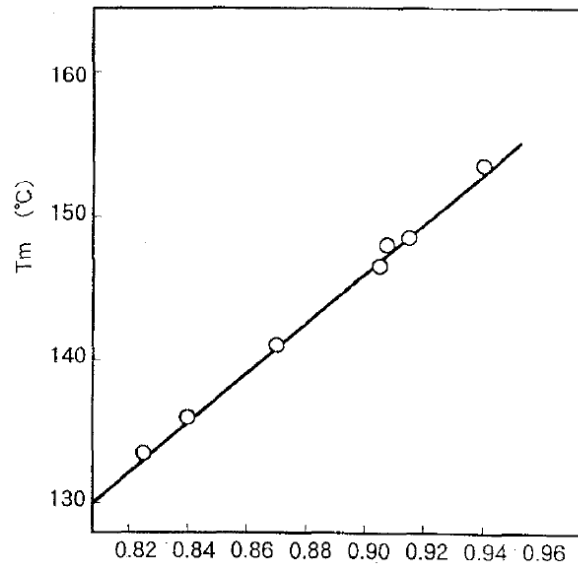
Tabell 1 – Materialeegenskaper ved sPP og iPP hentet fra databladene [Vedlegg A]

Egenskaper	Typiske verdier	
	sPP (Finaplas 1471)	iPP (RF365MO)
Massetetthet	880kg/m ³	905kg/m ³
Strekk modul(1mm/min)	483MPa	1150MPa
Strekk belastning ved svikt(50mm/min)	10 %	11 %
Strekk spenning ved svikt (50mm/min)	345MPa	29MPa
Smeltetemperatur	130 °C	210 – 260 °C

Graden av transparens i polypropylen er funnet å avhenge av graden av krystallinitet, og størrelsen til sfærulittene. Disse egenskapene blir bestemt av avkjølingshastigheten ved støping. En rask avkjøling gir små sfærulitter og små krystallinske områder. Hølto og Ildstad [6] viser til hurtig vannavkjøling på 15 °C/min som gir sfærulitter på maksimum 10µm i diameter, og sakte luftavkjøling på 0,2 °C/min på 15-50µm i diameter. Grunnen er at molekylljedene ikke rekker å innordne seg i parallelle rekker, og bindes i uordnede amorfne områder. Materialer med små sfærulitter og amorfne områder bryter ikke lyset så mye som sterkt krystallinske materialer, og er derfor mer transparente. God transparens muliggjør studering av elektrisk trevekst under mikroskop. Hølto og Ildstads sPP prøver har tidligere vist god gjennomsiktighet, og er godt egnet til dette formålet. Forundersøkelser har derimot vist en annen krystallinitet i iPP med samme avkjølingshastighet, og dermed en annen

Teori

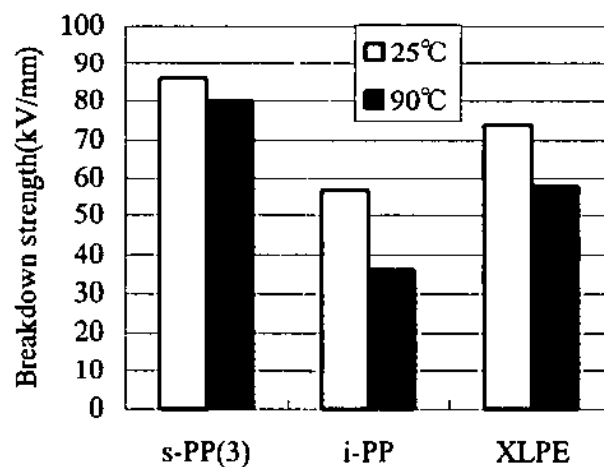
transparens. Det faktum at iPP er mindre gjennomsiktig, og ikke har blitt benyttet i applikasjoner hvor elektrisk trevekst har mindre innvirkning, gjør at lite eller ingen forskning har blitt gjort på elektrisk trevekst i iPP tidligere, kanskje også siden det ikke har blitt oppdaget av denne grunn.



Figur 3 - Smeltetemperatur avhengig av syndiotaktisk pentad fraksjon, eller grad av syndiotaktisitet for sPP [8]. X-aksen er benevningsløs.

I laboratoriedelen av denne forskningsoppgaven blir det benyttet sPP av typen Finaplas 1471 [Vedlegg A] produsert av Atofina, og iPP av typen RF365MO [Vedlegg A] produsert av Borealis.

Til sammenligning mellom materialene viser figur 3 målte verdier av [5] elektrisk holdfasthet i sPP, iPP og PEX.



Figur 4 - Elektrisk holdfasthet for sPP, iPP og XLPE (PEX) ved 25 °C og 90 °C. [5]

2.2 Partielle utladninger (PD)

Partielle utladninger kan sees på som veldig små overslag over lokale deler av et isolasjonsmateriale. Dette skjer når det lokale elektriske feltet overgår holdfastheten til isolasjonen. Utstikkende biter fra leder, støv, forkullet isolasjonsmateriale, gasslommer og hulrom er eksempler på feltforsterkende objekter. Spisse kanter på helt eller delvis ledende objekter er gjenstand for forsterkninger av det elektriske feltet siden de fungerer som ladingssfeller. [4] [9]

$$E_h = \frac{3\varepsilon_r}{1 + 2\varepsilon_r} E \quad (1.1)$$

En opphopning av ladde partikler vil øke potensialet over innledningsspenningen for utladninger i det aktuelle materialet. Dette vil bryte ned materialet som etter hvert kan føre til elektrisk trevekst og til slutt gjennomslag. Hulrom er også utsatte siden den dielektriske holdfastheten til de fleste gasser er betydelig lavere enn den for fast isolasjonsmateriale. Et hulrom vil samle ladninger som ved et vekslende felt vil føre til feltforsterkninger som fort overstiger holdfastheten til hulrommet og PD oppstår. Feltstyrken E_h i et sfærisk hulrom i isolasjonsmateriale med relativ permittivitet ε_r , og påtrykt felt E vises av ligning (1.1). [3]

For å kunne bestemme størrelsen på utladninger eksperimentelt er det vanlig og benytte seg av abc-ekvivalenten som muliggjør å bestemme tilsynelatende ladning overført etter en utladning for å få systemet i balanse igjen. For inngående beskrivelse av denne metoden henvises det til litteratur i emnet TET4160 [3].

2.3 Kommentarer til hypotesene

En arbeidsteori om elektrisk trevekst er at trekanalene oppstår når hydrokarbonkjedene brytes ned og danner gasser, i hovedsak hydrogen (H_2) og karbon (C). Hydrogengassen bidrar til redusert holdfasthet, men rett etter en utladning vil trykket være så høyt at Paschens teorem tilsier likevel en høy holdfasthet. Gassen diffunderer etter hvert ut av lommen i isolasjonsmateriale, noe som senker trykket og dermed også holdfastheten. Karbonet vil legge seg langs sidene i trekanalene og danne et tynt ledende karbonbelegg. Belegget vil være så tynt og skjørt at det deles inn i flere små flak som flytter noe på seg og danner sprekker seg i mellom. Disse sprekkeene vil representere gnistgap ved høye nok påspente spenninger, og følgelig vil det oppstå utladninger ved disse som igjen bryter ned isolasjonsmateriale i de omkringliggende områdene. Hvor dette skjer, vil være stokastisk fordelt ut fra hvor store utladninger og dermed hvor mye karbon som dannes. Hvor tykke eller tynne lag som dannes, og hvordan flakene vil bevege seg i henhold til trykk, elektrisk felt og så videre vil også ha en innvirkning. Dette igjen kan sees på som opphavet til den stokastiske veksten til de elektriske trærne. Den videre veksten til trekanalene i feltretningen kan forklares med at disse interne overslagene gir en ladningsoverføring til neste flak, som igjen fører ladningene videre. Med høy nok spenning og ladningstilførsel kan hele trekanalen sees på som ledende i det øyeblikket hvor det er overslag mellom hvert karbonflak fra elektroden til punktet ytterst på det elektriske treet. Dermed blir det tilført ladninger til dette punktet, og det elektriske treet blir formelig en forlengelse av elektroden.

Feltstyrken blir voldsomt stor ved slike spisse kanter i isolasjonen som tuppen av trekanalen er. Sannsynligheten for at isolasjonsmaterialet fortsetter å erodere her er meget stor.

Dette gir grunnlaget for interessen for å studere ledningsevnen til trekanalene. En kan tenke seg at tykke trekanaler har omdannet større mengde hydrokarboner enn tynne trekanaler. Tykke trekanaler, som dannes av store utladninger, danner også mer karbon og blir derfor mer ledende enn tynne trekanaler.

Forklaring til hypotese II: Et annet spørsmål i denne sammenhengen er hvorfor det i noen tilfeller dannes tykke trekanaler, og i andre tilfeller tynne. Tidligere undersøkelser har antydnet en sammenheng mellom tilstedeværelse av hulrom ved nålespissen før spenningssetting, og tykkelsen på trekanalene. Antall trekanaler har også blitt påvirket, hvor multiple tynne trekanaler har opptrådt dersom ingen hulrom, mens få og tykke trekanaler har opptrådt i prøver med hulrom.

2.4 Elektrisk trevekst

Elektrisk trevekst er et fenomen som kommer som følge av aldring av isolasjonsmaterialer. Aldring kan komme av ulike mekanismer som elektronisk-, termisk-, kjemisk-, mekanisk- eller elektromekanisk aldring. Alt dette kommer av krefter som svekker isolasjonsmateriales dielektriske egenskaper og bryter materialet i form av tynne, hule kanaler, men fellesnevneren er at det må være et elektrisk felt tilstede som overgår isolasjonsmaterialets tåleevne. Kanalene er gassfylte og delvis ledende som følge av karbonisering, og vokser grovt sett i feltretningen før de danner en ledende bro fra høyspenningselektrode til jord og forårsaker gjennomslag. De første tegnene på at feltstyrken overgår tåleevnen til materialet har blitt vist å være veldig svak lysemisjon og påfølgende målt PD aktivitet. [4]

De første bindingene som brytes ned er de svakeste. Disse ligger typisk i grensesjiktet mellom amorfe og krystallinske områder. Dette har blant annet blitt vist av Hølto og Ildstad [6] som har observert trevekst som følger grensesjiktet mellom sfærulittene i PE og sPP. Denne forskningen er et skritt nærmere å forstå den tilsynelatende stokastiske variasjonen til retningen på de elektriske trærne.

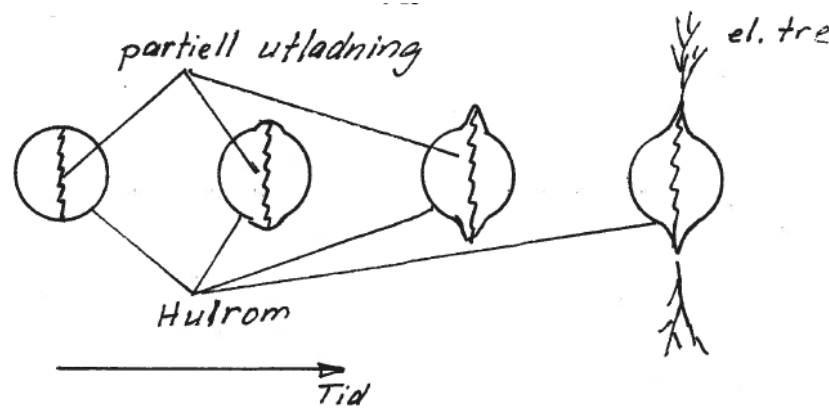
I beskrivelse av gangen i elektrisk trevekst er det vanlig å dele inn i tre faser

- Initieringsfasen
- Propagerings-, eller vekstfasen
- Gjennomslaget

2.4.1 Initieringsfasen

Initieringsfasen beskriver tiden fra det elektriske feltet overgår en grenseverdi til det begynner å utvikles et elektrisk tre. Noen velger også å dele inn initieringsfasen i to, tiden før dannelsen av ei gasslomme eller et hulrom, og tiden fra hulrommet finner sted til treveksten initieres. Spisse hulrom har som oftest kortere initieringstid enn sfæriske hulrom.

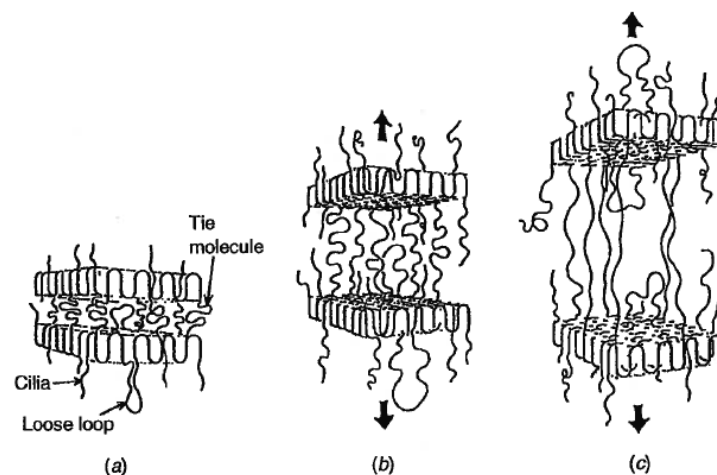
Overgangen fra hulrom til trevekst er beskrevet i Figur 5 som viser et sfærisk hulrom før, under og etter utladninger har dannet en begynnende trekanal.



Figur 5 - PD utvikling i sfærisk hulrom til elektrisk trevekst. [10]

Treveksten har utspring fra steder i isolasjonsmaterialet med feltforsterkninger, som spisse kanter på ledere, hulrom eller forurensinger i isolasjonen. Ladde partikler som beveger seg fritt i polymeren "fanges" ved slike steder. Ved vekslende felt, ac spenning eller reverserende dc spenning, vil ladningssamlingene danne lokale feltforsterkninger som medfører økt stress på isolasjonsmaterialet. Eksiterte elektroner akselerert til tilstrekkelig hastighet vil kollidere med molekylkjedene hver halvperiode. Kollisjonene kan bryte kjemiske bindinger og etter hvert danne hulrom. Ved noen tilfeller vil det være mulig å observere en svak pulserende lysemisjon [11] i denne fasen. Dette indikerer at lysinitieringsspenningen definerer også grensespenningen for degradering av materialet.

Mer langsom degradering skjer med Maxwellkrefter som river intermolekylære bindinger fra hverandre, spesielt i utsatte områder, som grensesjikt mellom krystallinske, og amorfne områder. Figur 6 viser progresjonen av svekkingen av bindingene i slike tilfeller.



Figur 6 - Oppbrytning av mellomkrystallinske bindinger i PE. [4]

Noe forskning har søkt å finne sammenhenger mellom mekaniske krefter og trevekst ved å støpe inn prestressede fiber i polymerer [12]. Disse forsøkene har vist at strekkrefter virker akselererende mens komprimerende krefter motvirker elektrisk trevekst.

2.4.2 Propageringsfasen

Vekstfasen av treveksten beskrives best med betraktninger rundt utladning i gass siden det i hovedsak er PD aktivitet i hulrom som driver veksten. (Den fortsatte) tilførselen av ladninger til hulrommet vil omsider overgå den lokale holdfastheten til gassen, siden den relative permittiviteten til isolasjonsmaterialet er mye større enn for gassen. Holdfastheten følger Paschens lov og avhenger av gasstrykk, eller gasstetthet og hulrommets volum [4]. Når holdfastheten overgås vil ladningene bombarderes mot isolasjonsmaterialet på veggen av hulrommet. Kjemiske bindinger blir brutt og hydrokarboner karbonisert til karbon (C) og hydrogen (H₂), samt små mengder andre gasser. Dette skaper et visst gasstrykk i trekanalene, som er med på å bestemme holdfastheten. I tillegg kan karbonet som legger seg langs kanalveggene være med på å bestemme ledningsevnen. Dette underbygger teorier som sier at trekanaler er delvis ledende.

For at treveksten i hovedsak skal vokse ut fra spissen på treet vil en sannsynlig forklaring ligge i følgende momenter: Når trykket etter PD faller på grunn av diffusjon vil holdfastheten også reduseres, samtidig som økning i tilført ladning ved påtrykt ac-felt gir høyere lokale felt. Trekanalen som det antas har karbonflak langs veggene med ulike mellomrom vil være ledende, men mellomrommene vil ikke kunne overføre ladning før eventuelle overslag til naboflak(-ene). Sterke felt vil dermed overgå alle gapene mellom karbonflakene og overføre all ekstra ladning til trespissen nærmest jordelektroden.

En slik forklaring vil i tillegg til å forklare at treveksten i hovedsak vokser ut fra spissen, åpne for at de lokale overslagene vil skade tilstøtende isolasjonsmateriale, og erodere nye delvis ledende avgreininger. Slik vil nye ladninger samles når spenningen snus ved neste halvperiode, og prosessen gjentas når potensialet igjen overstiger den lokale holdfastheten. Dette vil vises som en pulserende vekst av den elektriske treveksten. Prosessen med overslag mellom karbonflak kan sees i sammenheng med overflateutladninger (tracking). Mer om dette er forklart i kapittel 2.5.

2.4.3 Gjennomslaget

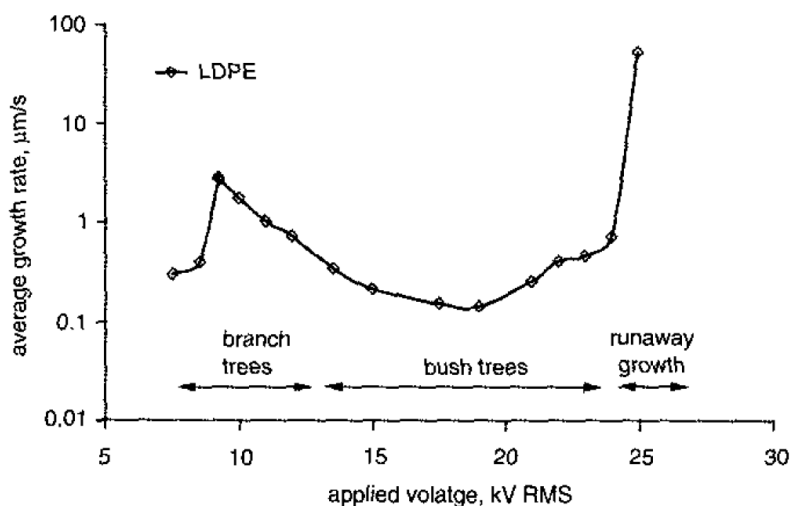
Gjennomslaget er kortslutningen og utladningen som ofte forbindes med at treveksten danner en ledende kanal til jord, men som mer presist skjer når feltstyrken overgår holdfastheten til det resterende isolasjonsmaterialet. Gjennomslaget kjennetegnes med en sterk økning i strøm og forkulling som utvider kortslutningskanalen til det mangedobbelte av trekanalen. Erfaringer fra forskningen på trevekst i PEX har vist at gjennomslag forekommer straks trekanalen danner en direkte kobling til jordelektroden. Med antakelsen at trekanalene er ledende er dette en naturlig følge. Prosjektoppgaven [1] viste en annen oppførsel for sPP. Flere tregrener nådde jordelektroden, påfølgende noe som tydet på delvise, sterke partielle gjennomslag i disse kanalene, før det endelige gjennomslaget langs en av kanalene. Dette setter noen spørsmålstegn rundt graden av konduktivitet i trekanalene for PP, i motsetning til PEX. Forklaringen kan finnes i geometrien til kanalene som tykkelse, mengde kanaler, og mengde karbonisert isolasjonsmateriale [6].

2.4.4 Innvirkning av spenning

Siden mesteparten av forskningen på elektrisk trevekst har blitt utført på PE, PEX eller ulike epoksyblandinger, er de fleste beskrivelsene relatert til veksten sett i forhold til disse stoffene. Noe forskning for øvrig [1] [6] har vist en viss forskjell mellom treveksten i PEX og PP. De følgende beskrivelsene vil beskrive treveksten i PP, men vil relateres til PEX og epoksy.

De to særpregede typene trevekst som har blitt beskrevet i PEX er grenvekst og buskvekst. I PP derimot har [6] [13] vist til en annen inndeling av treveksten. Disse er enkeltgrenet vekst til jord, og multiple grener til jord før gjennomslag.

For å beskrive sammenhengen mellom spenning, og elektrisk gren- og buskvekst, presenterte Dodd et al. [14] Figur 7 for LDPE (PE med lav krystallinitet). I forprosjektet ble det ikke funnet noen direkte buskform, men til dels lignende opptreden, som muligens kan settes i sammenheng med teorien til Dodd et al.



Figur 7 - Gjennomsnittlig vekstrate for elektriske trær i LDPE ved 30°C [14]

2.4.5 Ulike typer trevekst

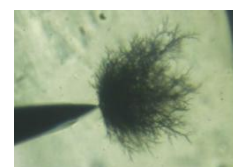
Grenvekst

Denne typen trevekst kjennetegnes med tydelige trekanaler med relativt få utgreininger, og én gren til jord før gjennomslag. Grenvekst er observert i PEX ved lavere spenninger, og i PP på alle spenningsnivå, ofte i sammenheng med hulrom ved nålespiss for nål-plategap forsøk.



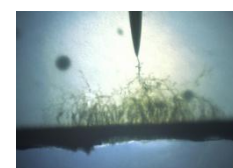
Buskvekst

Buskvekst utvikles typisk i PEX på høyere spenningsnivå. Veksten utpeker seg som hurtig, pulserende vekst av flere grener samtidig, og innenfor noenlunde samme radius ut fra forurensingen. Gjennomslaget skjer ofte ved at buskveksten stagnerer i lengderetningen men vokser seg tettere og tettere før en tykkere gren finner veien mot jord og danner gjennomslagskanalen.



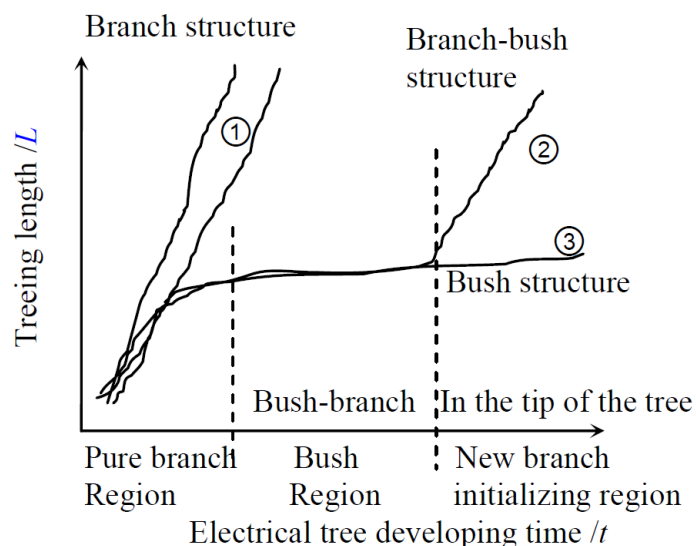
Multipel trevekst til jord

Denne kategoriseringen har først dukket opp i studeringen av trevekst i PP, hvor det er observert tynne trekanaler, i form som grenvekst, vokse til jord uten øyeblikkelig påfølgende gjennomslag. Derimot utbrer multiple grener seg ut fra den første grenen ved ca 1/3 av avstanden til jord. Denne veksten dekker et område ved jord med diameter på 2-4 ganger avstanden fra elektroden til jord. Et annet navn på denne typen tre brukt i denne oppgaven er "jordvekst" grunnet den massive veksten langs jordelektroden.



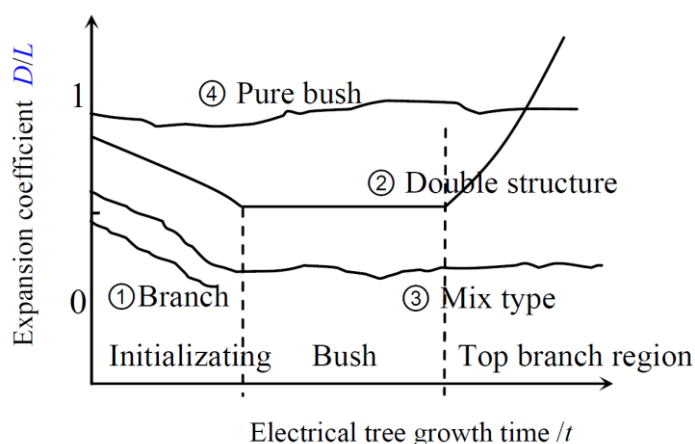
Klassifiseringsmetoder

Zheng og Chen [15] har presentert to verktøy for å klassifisere trevekst i PEX. Disse kan til en viss grad også benyttes i klassifisering av PP. Figur 8 viser hvordan trelengde som prosent av total lengde til jord gitt per tid kan grovt skisseres.



Figur 8 – Trevekstklassifisering på grunnlag av lengdeutvikling per tid. Lengde kan presenteres både med enhet μm , og som prosent av total lengde til jord. [15]

Figur 9 beskriver treveksten som funksjon av en vekstkoeffisient D ($=$ lengde / bredde). Denne beskriver forholdstallet mellom trevekstens bredde og lengde til enhver tid. Om denne verdien ligger under 1 betyr dette følgelig at treveksten er lengre enn den er bred. I motsatt fall, for $D > 1$ vil det innebære en bred vekst. En slik verdi tidlig i veksten kan være et kjennetegn for buskvekst om materialet er PEX, mens en høy D -verdi sent i vekstfasen kan sees på som et tegn på jordvekst om materialet er PP.



Figur 9 – Trevekstklassifisering på grunnlag av vekstkoeffisienten $D =$ bredde/ lengde, og utvikling per tid. [15]

2.4.6 Innvirkning av mekaniske krefter

Tidligere forskning på trevekst har vist til en sammenheng mellom mekaniske krefter og utvikling av elektrisk trevekst. Et forsøk med forspente fibre innstøpt i isolasjonsmateriale utført av [12] [16] konkluderte med at trykkrefter motvirker trevekst, og strekkrefter svekker motstandstyrken til isolasjonsmaterialet. [6] har forsøkt å relatere motstandsdyktigheten opp mot Youngs elastisitetsmodul delvis av denne grunn. Målinger av hurtig avkjølte sPP-prøver vises i Tabell 2.

Tabell 2- Målte strekkegenskaper av sPP og PEX [13]

Material	s-PP	XLPE
Yield stress, σ [MPa]	18,2	12,9
Elongation at yield [%]	45	79
Ultimate stress σ [MPa]	25,5	22
Elongation at break [%]	1300	950
Elasticity modulus	1.8	0.8

Kjøling

I støpe-/ekstruderingsprosessen av kabelisolasjon på leder vil det uunngåelig oppstå mekaniske spenninger i isolasjonsmaterialet ganske enkelt på grunn av ulik utvidelse og varmeledningsevne til polymeren og lederen. Materialet nærmest lederen vil avkjøles raskere enn det ytterste, som vil generere lag med mekaniske spenninger seg imellom. Dette prinsippet gjelder også for forurensing i isolasjonsmaterialet, som er med og påvirker holdfastheten rundt disse spenningene. En kabel kjøles som oftest utenfra og inn ved at omgivelsene er kaldere enn kabelen. Dermed vil det ytterste laget avkjøles og krympes først, og deretter laget innom. Slik vil det dannes "årringer" med mekaniske spenninger i kabelisolasjonen.

Kjøling fra høyere temperatur øker ulikhetene, og det samme gjør hastigheten på kjølingen. På grunn av krystallisering ønskes en hurtig avkjøling, men i forhold til mekaniske spenninger er det hensiktsmessig å avkjøle langsommere. Derfor velges avspenning på 130°C for PEX som har blitt presset ved ~175°C, etter selve støpeprosessen, for å la de mekaniske spenningene jevnes ut, og samtidig ikke påvirke krystalliniteten. PEX har i tillegg den egenskapen at det ikke deformeres av slike temperaturer på grunn av kryssbindingene.

Elektromekaniske krefter

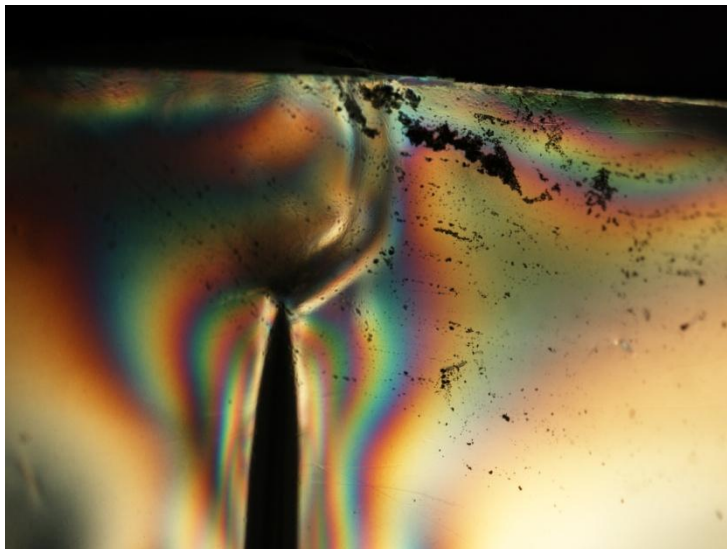
I tillegg til de mekaniske kreftene, kommer elektromekaniske krefter som følge av påtrykt felt og bevegelse av frie elektroner. Blythe [4] beskriver de gjensidig Coulombisk tiltrekkende kreftene mellom to elektroder med en polymer i mellom, og utleder ligning (1.2) for et enkelt, plant tilfelle med en polymer mellom to elektroder. E_a er den høyest observerbare tilsynelatende feltstyrken gitt av Youngs elastisitetsmodul Y og geometrien til elektrodegapet.

$$E_a \approx 0,6 \cdot \left(\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon'} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

Temperaturavhengigheten til Y medfører at de fleste plastmaterialer feiler ved høye temperaturer, men ligningen gir likevel et bilde av sammenhengene.

Teori

I nål-plategap prøveobjekter vil nåla ha en innvirkning, i tillegg til ulik kjøling fra sidene i materialet. Nåla som er laget av stål, leder varme bedre enn polymeren, og vil dermed kjøles hurtigere. Det tilstøtende polymermaterialet kjøles dermed også hurtig i forhold til materialet utenfor. Dermed får vi en tilsvarende effekt som for kabelen, men for materialet rundt nåla. Et eksempel på dette kan sees i Figur 10.



Figur 10 - Mekaniske spenninger i PEX, etter gjennomslag, vist ved doble polarisatorer

2.5 Overflateutladning

Saktevirkende svekking av materialer langs overflaten som oppstår på grunn av en kombinasjon mellom langsgående felt og forurensing. Forurensingene forårsaker lokale feltforsterkninger som gir opphav til PD og følgende langsgående karbonisering av isolasjonsmaterialet på overflaten. Selv om overflateutladning (tracking) kan minne om elektrisk trevekst, er dette et mye tregere fenomen. Avhengig av hendelsessted, vil tracking skape en ledende kanal til fase/jordpotensial langs overflaten, eller erodere isolasjonen nok til å initiere elektrisk trevekst i dybden. Eksempler på begge tilfellene er illustrert i Figur 11.



Figur 11 – a) Øvre del av kompositthus der overflaten er kraftig korrodert som følge av overflateutladninger (tracking) initiert av vann. b) overflateutladninger i fremkant av endeavslutning som har kraftig erodert PEX-isolasjon. [17]

Isolatorer i forskjellige omgivelser kan bli tilsmusset av skitt og fukt, stoffer som til en viss grad kan være ledende. Lekkstrømmer oppstår dermed langs overflaten, og vil medføre noe ohmsk oppvarming av den delvis ledende forurensingen. Oppvarmingen vil etter hvert tørke ut deler av overflaten, som mister sin ledningsevne og går over til å bli isolerende, all spenning legger seg over disse tørre båndene. Små overslag over disse tørre båndene er dermed å forvente. Disse overslagene vil forbrenne forurensingene, men også skade noen typer isolasjonsmaterialer, spesielt polymerer. I ulik grad, avhengig av type polymer, vil disse overslagene skade og forkulle små spor langs overflaten, som i seg selv også vil være ledende. Polymerer med aromatiske forbindelser har vist seg å lett avleire karbon [4] [3].

Tracking har blitt studert ved flere materialer, både PEX, PP og diverse epoksyblandinger. Mye brukte forsøk for å beskrive motstandsdyktigheten mot tracking til et materiale er støv-tåke tester. Blythe [4] beskriver oppsettet som en polymerduk dekket av en fast forurensing inneholdende 3% natriumklorid, med to kobber Elektrode på hver side adskilt med en tomme. Elektrodene påtrykkes 1,5kV og testen måler tiden det tar før trackingen skaper en sammenhengende ledende bro mellom de to elektrodene. Om materialet skulle være motstandsdyktig mot tracking vil det erodere gjennom tykkelsen av platen til en jordet metallplate på undersiden. Resultater fra slike forsøk er gjenskapt i Tabell 3. Resultatene viser en betydelig lengre tid før tracking oppstår i polypropylen (inneforstått iPP) enn i polyetylen, 5,78ganger lengre. Også [18] viser til lignende resultater, PP: 182timer, PE: 15-40timer.

Tabell 3 - Resultater fra støv-tåke test angående motstandsdyktighet mot overflateutladninger [4].

Material	Time to track (hr)
Polyethylene	33
Poly(methylmethacrylate)	162
Polypropylene	191
Polytetrafluoroethylene	600
Poly(vinylchloride)	0.3
Polystyrene	0.9

2.6 Levetidsfunksjoner

En ettertraktet beskrivelse av høyspenningsutstyr er levetidsfunksjonen. Denne er hva de fleste forskere på området søker å finne og forbedre til enhver tid. Om man med sikkerhet hadde kunnet beregne levetiden til eksempelvis vern eller høyspenningskabler hadde enorme summer blitt spart i vedlikehold, utskiftelse og unngåelse av aldringsskader. Flere er blitt forsøkt, noen brukes enda, men ingen er til i dag helt eksakte, mye som følge av naturens iboende stokastiske faktor. I forsøk på å finne hvor lenge høyspentutstyr kan belastes med et visst elektrisk felt før det opplever gjennomslag har empirisk forskning kommet fram til ligning [1.3].

$$t_l = A \cdot E^{-nt} \quad [1.3]$$

Her er E det elektriske feltet, t_l er levetiden og A er en koeffisient som avhenger av forurensingens geometri og type. Testresultater for tiden til gjennomslag ved ulike påtrykte elektriske felt kan plottes logaritmisk langs begge aksene, slik at n vil finnes som det negative stigningstallet til den lineært synkende kurven mellom plottene. Ildstad [3] oppgir at for ulike syntetiske polymerer har n-verdien blitt funnet i intervallet 8-14, mens [19] gir n verdier for trevekst med hulrom mellom 10-12 for blokkobjekt, og $n > 17$ for 5mm isolasjon uten hulrom. Om $n = 10$ og vi får en dobling av det elektriske feltet, vil levetiden minske med $2^{-10} = 1/1024$ med andre ord ca 1000 ganger kortere.

For simuleringens skyld kan ligning [1.3] kombineres med den mye brukte Masons [20] ligning, ligning [1.4] for beregning av feltstyrken langs nåleaksen i nål-plategap objekter.

$$E = \frac{2 \cdot V}{(r + 2X - X^2 / d) \cdot \ln(1 + 4d / r)} \quad [1.4]$$

Masons ligning [1.4] beskriver feltstyrken mellom nålespissen og jordelektroden ved avstanden X fra nålespissen. Feltet ved nålespissen gis da av $X=0$, og vi får ligning [1.5]. I ligningen er V den påsatte spenningen, r er kurveradien til nåla, og d er avstanden mellom nålespissen og jordelektroden.

$$E = \frac{2 \cdot V}{r \cdot \ln(1 + 4d / r)} \quad [1.5]$$

Blythe [4] viser til en annen lignende sammenheng [1.6]

$$t_c = V - V_{th}^{-n} \quad [1.6]$$

som tar en grensespenning V_{th} for toleransen til isolasjonsmaterialet i betraktning. Om potensialet $V < V_{th}$ vil det aldri forekomme noe gjennomslag, men om $V > V_{th}$ vil formel [1.6] være den gjeldende gjenstående levetiden.

3. Metode

Som videreutvikling av er det naturlig å bruke målemetoden som ble utarbeidet i Prosjektoppgaven [1]. Likevel har det blitt introdusert endringer og forbedringer, samt utarbeidelse av et helt nytt forsøk for å kunne besvare hypotesene. Følgende kapittel beskriver fremgangsmåten for produksjon av prøveobjekter, og forsøksoppsett for visuell studering av elektriske trær i vekst, samt for test av resistiviteten til trekanaler.

Det er utarbeidet flere prøver som grunnlag for resultatene presentert i denne oppgaven. I tillegg ble prøvene produsert til prosjektoppgaven tatt med. sPP-prøvene fra prosjektoppgaven ble navngitt PP1-001. PP1 for første støpte parti med syndiotaktisk polypropylen, og nummerert "001" og oppover innen hvert parti. Prøvene produsert for diplomoppgaven har fått forstavelsen "s-" eller "i-" foran PP, henholdsvis for å skille mellom syndiotaktisk og isotaktisk polypropylen. Derfor vil leseren finne prøver med navn som "PP4-003", "sPP7-018" og "iPP2-007" blant vedleggene. Undertegnede har hatt som mål å produsere så stort antall prøver mulig for å få så representativt grunnlag for forskningen som mulig. Arbeidsomfanget har derimot begrenset produksjonen til 39 sPP-prøver og 26 iPP-prøver, noe som har gitt en representasjon på 4-5 prøver uten hulrom for hvert spenningsnivå, pluss et varierende antall prøver med hulrom. Gjennomsnittlig avstand til jord og kurveradius på nålen oppnådd i produksjonen er gjengitt i Tabell 4.

Tabell 4 - Geometriske størrelser i nål-plategap prøveobjekter

	Avstand til jord [μm]	Radius spiss [μm]
Ønsket gjennomsnitt	1100	5
Ønsket standardavvik	150	2
Faktisk gjennomsnitt	1131	6
Faktisk standardavvik	161	10

3.1 Bakgrunn for valg av prøveobjekt

Den mest vanlige undersøkelsesmetoden for å studere elektrisk trevekst er nå-/plategap i form av en innstøpt nål i isolasjonsmateriale med en motstående flat jordelektrode. Dette oppsettet simulerer utstikkende deler av lederen i en kabel som forårsaker feltforsterkninger. Med små avstander mellom elektrodene gjør denne metoden det mulig å observere vekst av elektriske trær i mikroskop. En feltsimulering av nål-plategap vises i Figur 12. Her er feltlinjene fra nål til jordplate gjengitt i rødt, og ekvipotensiallinjene i farger. Disse viser at feltstyrken er klart sterkest nærmest nålespissen.

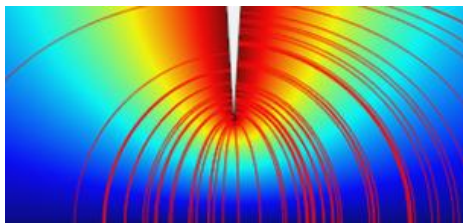
Alternativer til å støpe inn nåla i isolasjonsmaterialet er å presse den inn i ferdig isolasjon. Denne metoden er blitt brukt for å få faktisk kabelisolasjon, samt fordelen av den ytre halvlederen som jordelektrode.

Årsaken til valg av prøveobjekt i studering av elektrisk trevekst i kabelisolasjon er at det er ønskelig å ha prøveobjekter som er så lik faktisk kabelisolasjon som mulig, og at så mange variabler som mulig er kontrollerbare. Observerbarhet er også viktig. Forsøk med nål – plategap er et meget brukt forsøksoppsett i dette henseende. Dette gir to åpenbare

Metode

muligheter; enten snitt opp en ferdig kabel i passende størrelser og introduser en ledende forurensing i form av ei nål, eller design og produser prøveobjekter fra bunnen av for å få så like egenskaper som kabelisolasjonen som mulig.

Det første alternativet har fordelen ved at man unngår ekstrudering og støpeprosessen, og at man kan ta i bruk den ytre halvlederen i kabelen som jordelektrode. Bakdelene ligger i problemer med å presse ei nål inn i prøven og fortsatt kontrollere avstand til jord, kurveradien til nålespissen og faren for å dra med andre forurensinger inn i materialet. I tillegg kommer mekaniske spenninger som dannes ved introdusering av et fremmedlegeme i en massiv polymer. Kapittel 2.4.6 beskriver hvordan mekaniske spenninger påvirker elektrisk trevekst. Mer direkte og åpenbare problemer er at det finnes et fåtall sPP-isolerte kabler, og ingen med iPP som undertegnede har klart å finne.



Figur 12 - Simulert elektrisk felt for et nål-plategap. Feltlinjer i rødt, og ekvipotensiallinjer i farger.

Den andre muligheten er da å produsere prøveobjektene fra bunnen av. Dette innebærer mer forarbeid, som ekstrudering av sPP og iPP filmer fra pellets, støping av filmene til passende former og påføring av jordelektrode. Ekstruderingen bidrar til å fjerne hinnen som dannes på pelletsene, minimere støvkornstørrelsen i polymeren til tykkelsen på filmen, og i tillegg etterligne prosessen som skjer i produksjonen av reelle kabler. At polymerfilmene støpes under riktig trykk og temperatur i forhold til materialets egenskaper som smeltetemperatur er viktig for å unngå dannelsen av luftbobler i prøven og for å få mest optimal molekylstruktur. For molekylstrukturen er også avkjølingshastighet avgjørende, som beskrevet i kapittel 2.4.6. Ved avkjøling av alle prøveobjektene ble det derfor brukt hurtig vannkjøling for å unngå krystallisering.

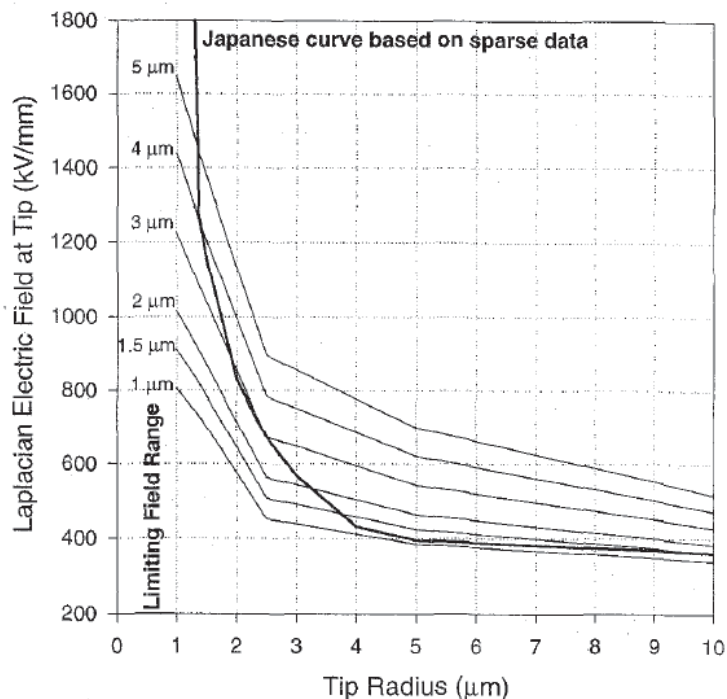
For å studere materialets egenskaper kan man først og fremst konferere med dokumentasjon fra pelletsleverandør, eller man kan benytte DSC- (Differential Scanning Calorimeter) målinger for å studere materialeegenskapene man ønsker.

Om man introduserer elektroden, i form av ei akupunktur nål, mens polymeren er flytende og en stund før avkjøling, vil mye av de mekaniske spenningene unngås. I tillegg er det lettere å innføre nåla med større presisjon. En viktig detalj er å pusse sidene på nåla for å unngå at den glir ut av prøven etter avkjøling. Med to-komponent sølvepoksy og en bit aluminiumsfolie blir prøven fullført med jordelektrode. Sølvepoksyen trenger herding i henhold til dokumentasjonen [Vedlegg A] i 3 timer i varmeskap med 80 °C.

Når det gjelder feltstyrken i nål-plategap er det allerede nevnt Masons ligning i teorikapittelet [1.4]. Av andre teorier brukes også ofte Laplace-felt og videre Poisson-felt for å forklare blant annet initieringen av PD og trevekst i polymerer [11]. Generelt sett for dielektrikum så øker konduktiviteten under økende høye elektriske ac-felt. Dette skjer inntil et punkt hvor konduktiviteten σ blir lik permittivitetskonstanten ϵ til dielektrikumet multiplisert med vinkelhastigheten ω , vist i ligning (2.1).

$$\sigma(E) = \varepsilon \cdot \omega \quad (2.1)$$

Når dette nivået er nådd er den resistive og den kapasitive strømmen lik, og det blir formet romladninger i isolasjonsmaterialet som motvirker videre økning av feltstyrken. Økt spenning ut over dette vil derfor kun bidra til økt romladningsmengde og utstrekning av romladningsregionen. Beregninger basert på Laplacefelt tar ikke slike romladningsregioner i betraktning, i motsetning til Poissonfelt. Jiang [11] viser via Figur 13 hvordan feltstyrken ikke endres stort for nåleradier over 5 μm . Det presiseres dog at den påførte kurven er basert på relativt få prøver og er derfor noe usikker.



Figur 13 - Laplace felt ved nålespisser med spissradius angitt langs x-aksen [11]

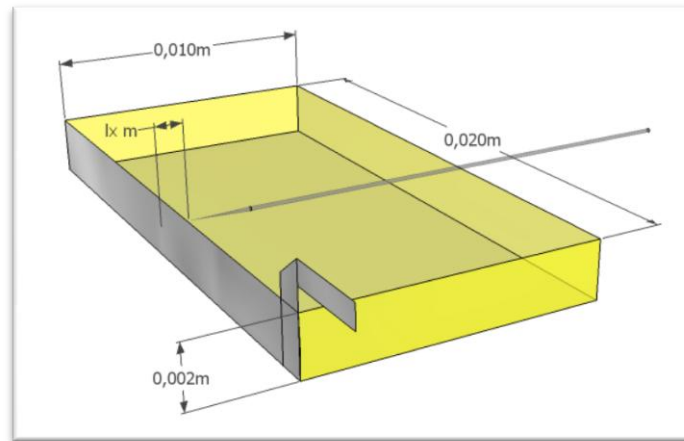
3.2 Produksjon av prøveobjekt

For å oppnå en så lik produksjonsprosess som dagens kabelprodusenter bruker som mulig ble prosessen med å lage prøveobjekter startet med å ekstrudere pellets til tynne bånd. De fordeler som følger er at man fjerner et ikke ønskelig belegg som legger seg på pelletsene etter produksjon, og støv og annen forurensing minimeres til tykkelsen av båndet. Innstillinger på ekstruderen (Collin E20P Extruder) kan finnes i [Vedlegg B], og nærmere beskrivelse av ekstruderingsprosessen finnes i prosjektrapporten [1].

De ekstruderte båndene ble så kuttet opp og plassert i ei spesialdesignet støpeform [figur XZ] og plassert i ei hydraulisk presse (Genesis Wabash)) med varmeelementer og intern vannkjøling. Innstillinger for pressen kan finnes i [Vedlegg B]. iPP ble varmet opp til 190 $^{\circ}\text{C}$ og avkjølt gjennomsnittlig med 0,61 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ (≈ 35 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$). For data fra temperaturmålingene, se [Vedlegg E]. sPP ble varmet opp til 185grader, og avkjølt gjennomsnittlig med 0,60 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$. PEX ble varmet opp i to trinn. Først til 120 $^{\circ}\text{C}$, så til 180 $^{\circ}\text{C}$ med gjennomsnittlig avkjølingsrate på 0,48 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ (≈ 29 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$).

Metode

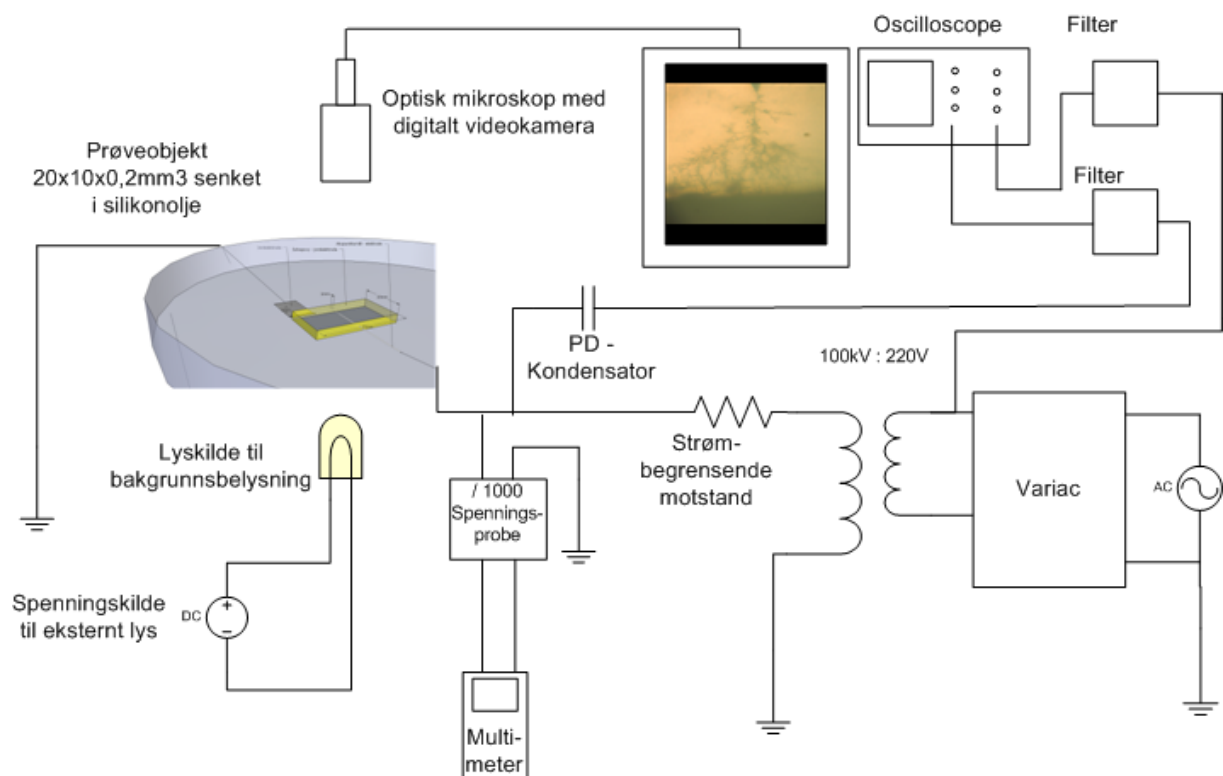
Figur 14 viser en 3D modellering av et prøveobjekt med mål.



Figur 14 - Prøveobjekt med mål

3.3 Spenningsprøving

Laboratorieoppsettet er designet for best mulig å observere treveksten under spenning til og med gjennomslag, og samtidig redusere skadeomfanget i prøveobjektet ved gjennomslag. I tillegg er det ønskelig å observere PD-aktiviteten underveis, og relatere den til treveksten. Forsøkkretsen kan sees i Figur 15.

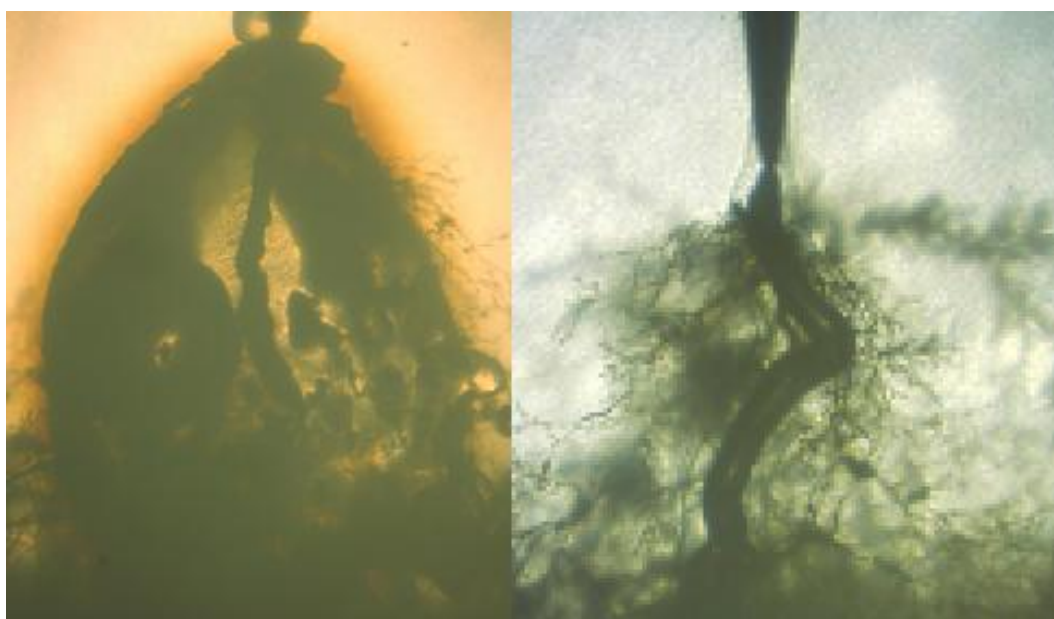


Figur 15 – Testoppsett

Spenningskilden er en variac med flytende justering av AC spenning fra 0 til 220V koblet til en 220V:100kV transformator. En strømbegrensende motstand på 400kΩ kobles på

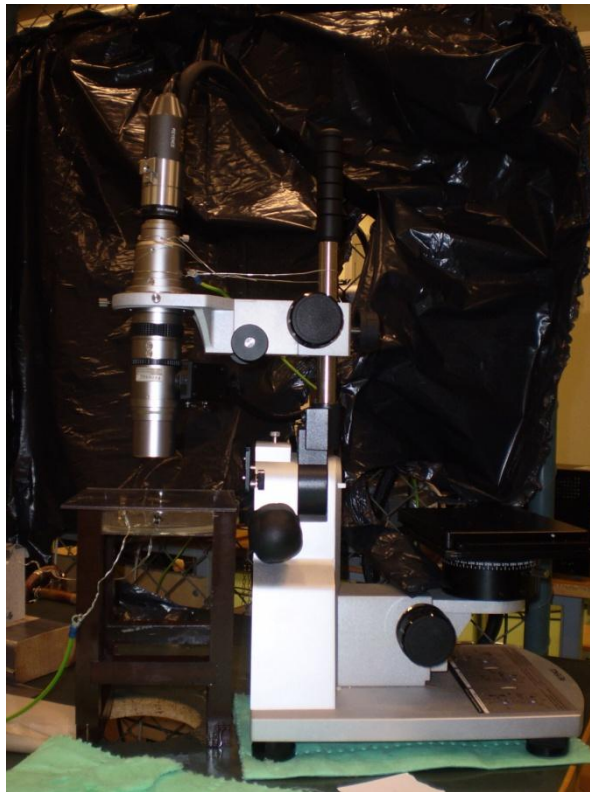
utgangen av transformatoren for å beskytte utstyret ved gjennomslag, samt minske mengden forbrent isolasjonsmateriale i prøven ved gjennomslag. Forut for hovedtestene ble det utført forundersøkelser med en mindre og en større motstand som strømbegrenser. Figur 16 viser forskjellen i skadeomfang i isolasjonsmaterialet.

For å forsikre seg om den faktiske spenningen over prøveobjektet ble det plassert en Fluke spenningsprobe med forhold 1:1000 på høyspenningssiden som vist i Figur 15. Et multimeter ble brukt for å måle spenningen ut fra variacen, på primærsiden av transformatoren. For å muliggjøre PD-målinger monteres det inn en 100pF kondensator. Funksjonen til denne er beskrevet i kapittel 2.2 om PD.. Lavspentsiden til kondensatoren ledes via et målefilter til et oscilloskop (Yokogawa DL1600 SERIES DSOS) som overvåker PD-aktiviteten i kretsen. På grunn av dette er det meget viktig å eliminere alle andre kilder til utladning, som utstikkende deler på lederen, løse koblinger osv. Dette gjøres blant annet med koronaringer. For å få oscilloskopet til å trigge på signalene sendes et målesignal av spenningen fra primærsiden av transformatoren også til oscilloskopet via en spenningsprobe og et filter. Med "envelope"-funksjon og akkumulering av signalene over gitte tidsperioder muliggjøres registrering av PD-aktiviteten med oscilloskopet. Envelope funksjonen sørger for at ytterpunktene av pulsene blir lagret.



Figur 16 - Skadeomfang i sPP ved 7kV, med hhv 200kohm (til venstre) og 400kohm (til høyre) i serie ut fra transformatoren.

Selve prøveobjektet ble plassert i ei petriskål fylt med silikonolje for å unngå overslag langs utsiden av polymeren. Tyktflytende silikonolje(Dow Corning® 200 Fluid 1000cSt) viste seg å være mer hensiktsmessig å bruke enn mer tyntflytende silikonolje siden bevegelse induisert av det elektriske feltet vises i mikroskopet og skaper forstyrrelser i målingene.



Figur 17 - Mikroskop med prøvestativ og underbelysning

Petriskålen var gjennomsiktig og var plassert på et stativ med en glassplate, og tildekket med ei pleksiglassplate for å unngå oljesøl på mikroskopet under spenningssetting. Et digitalt mikroskop med videofunksjon og mulighet for 1000x forstørrelse ble stilt over prøven, men med sikker avstand fra strømførende deler, for å fange opp treveksten under spenning. Gjennomsiktigheten i prøvestativet muliggjør underbelysning som er kritisk for gode skyggebilder av treveksten. Det er en fordel at underbelysningen er av laveffekttypen som ikke avgir nevneverdig varme slik at silikonoljen unngår å bli oppvarmet, og over tid tyntflytende. Derfor ble det benyttet ei LED lampe med samlelinse, drevet av en separat justerbar 20V DC-kilde. For å få optimal fokus på bildene var det viktig å unngå unødvendig lysbrytning i form av silikonolje under prøveobjektet.

3.4 Behandling av måledata

Når resultatene av spenningssettingen er en video, så gjenstår prosessen å ekstrahere nyttige parametre. Som beskrevet i kapittelet 3.4 Behandling av måledata er mål av lengde og bredde av treveksten veldig beskrivende. Til denne prosessen brukes et mikroskop (VHX-500) med digitale måleprogram. Tiden for lengde- og breddemålingene registreres også manuelt slik, og dermed kan både momentan- og gjennomsnittsverdier av vekstkoefisienten D beregnes, og prosentvis lengdevekst, og vekstraten ($\mu\text{m/s}$). Registrerte og behandlede måleverdier av testene utført i forbindelse med denne oppgaven finnes i [Vedlegg E].

3.5 Konduktivitet i trekanaler

En potensiell måte å karakterisere de forskjellige trestrukturene på er å se på resistiviteten til trekanalene. En antar at antall kanaler, tykkelsen på kanalene, og mengden karbon som ledende materiale i og langs kanalenes vegger påvirker resistiviteten.

Tidligere erfaring samt innledende forsøk med spenningsprøvingen har vist en tendens til at det ved 9kV testspenning vil utvikles tydelige multiple grener mot jord før gjennomslag, dersom prøvene er fri for hulrom ved nålespissen ved spenningssetting. Derimot for prøver med hulrom vil det utvikles en annerledes trevekst med tykkere kanaler, og kun en til to grener mot jord før gjennomslag. Derfor ble 9kV valgt som spenningsstyrke for konduktivitetmålingen.

Til sammenligning i testingen viser [21] til en resistivitet for PP-film på, $\rho_{iPP} = 20 \cdot 10^{14} \Omega m$ som kan antas å være iPP. [8] viser til resistivitet for både sPP og iPP på $> 10^{15} \Omega m$. Dette åpner for en beregning av forventet motstandsverdi i referanseprøvene ved å bruke definisjonen på resistivitet, ligning (2.2). En antatt lengde på $L=1mm$, og et tverrsnitt $A = 4mm^2$. Tverrsnittet er basert på ei kvadratisk rute mellom nålespissen i et prøveobjekt, like bred som prøven er tykk.

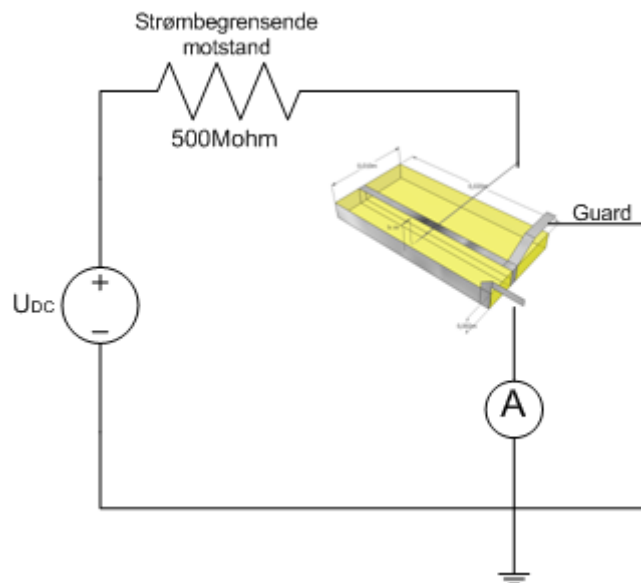
$$R_1 = \rho \cdot \frac{L}{A} = 20 \cdot 10^{14} \Omega m \cdot \frac{1mm}{2mm \cdot 0,002m} = 5 \cdot 10^{17} \Omega = 5 \cdot 10^5 T\Omega$$

$$R_2 = \rho \cdot \frac{L}{A} = 10^{15} \Omega m \cdot \frac{1mm}{2mm \cdot 0,002m} = 2,5 \cdot 10^{17} \Omega = 2,5 \cdot 10^5 T\Omega$$
(2.2)

Dette gir en resistans i området $2,5-5 \cdot 10^5 T\Omega$.

Forprosessen før selve strømmålingen og konduktivitetstesting innebar spenningssetting som beskrevet i kapittel 3.3, men med kontinuerlig overvåking for å stanse forsøket før faktisk gjennomslag, men med så langt utviklet trevekst som mulig. Dette krevde blant annet erfaring fra tidligere spenningstesting for å kunne "vite" når det var mest hensiktsmessig å slå av spenningen, men en tidkrevende overvåking.

For å kunne måle resistiviteten i trekanalene ble det utviklet et prøveoppsett som innebar spenningssetting og strømmåling gjennom prøvene etter trevekst. Nødvendig utstyr var høyspent DC-kilde, strømbegrensende motstand og elektrometer (6517 Keithley). For å unngå DC-overslag under målingen settes maksimalt spenningsnivå til 6kV. Dette gir veldig små forventede strømmer gjennom prøveobjektene, i størrelsesorden pA, som dermed setter krav til følsomheten til elektrometeret. For å oppnå slik nøyaktighet er det også kritisk at spenningskilden er veldig stabil siden målingen i elektrometeret reagerer på små endringer i spenning. Målekretsen er vist i Figur 18.



Figur 18 - Prøveoppsett for konduktivitets test

Størrelsen på motstanden er beregnet under, etter beskrivelse fra brukermanualen til elektrometeret [22]. Strømbegrensning er viktig siden elektrometeret er så skjørt for både store strømmen og store endringer i spenninger. Derfor er det også utstyrt med en intern kortslutningsfunksjon ("Zero check") for å rute strømmene utenom den fintfølede elektroniske målekretsen ved endring i påtrykt spenning. Formel for å beregne minste strømbegrensende motstand i målekrets for resistivitet i trekanaler er gjengitt i (2.3)

$$MinR_{series} = \left(\frac{SourceVoltage - 220V}{220V} \right) R_{in} \quad (2.3)$$

Tabell 5 - Bestemmende strømverdier for strømbegrensende motstand

Lowest range to be used	R_{in}
2nA or 20nA	11M Ω
200nA or 2 μ A	3.5M Ω
20 μ A or 200 μ A	50k Ω
2mA or 20mA	500 Ω

Tabell for innsetningsverdier i Tabell 5. I dette tilfellet er det forventet å se strømmen i området 2-20nA, mest sannsynlig også enda mindre. Derfor velges 11M Ω til videre bruk i (2.3)

$$MinR_{series} = \left(\frac{U_{kilde} - 220V}{220V} \right) R_{in} = \left(\frac{10kV - 220V}{220V} \right) 11M\Omega = 489M\Omega \quad (2.4)$$

Denne verdien gir en praktisk motstand på 500 M Ω som må kunne tåle en effekt på

$$\text{MinPowerRating} = \frac{U_{\text{kilde}}^2}{R_{\text{series}}} = \frac{10kV^2}{500M\Omega} = 0,2W \quad (2.5)$$

Tilgjengelig i labben var en 400Mohm motstand med merkeeffekt 10W, og 5 stk 20Mohm motstander med merkeverdi 5W hver.

Som det framgår av Figur 18 er det brukt guard, for å unngå at krypstrømmer langs overflata på prøveobjektet ikke skal tas med i målingene av strømmen gjennom den elektriske treveksten. Guarden ble påført så nære jordelektroden som mulig, med samme metode som med sølvepoksy og aluminiumsfolie. På grunn av silikonolje på prøvene etter testingen ble de tørket rene og pusset med sandpapir (type 100) for å gi epoksyen bedre feste.

Etter selve spenningssettingen for å forme forskjellige eksemplarer av trær i prøvene, ble det brukt mikrotom for å kutte ned på avstanden fra jord til nåla. Dette ble gjort slik at man kommer godt i kontakt med trekanalene ved ny påføring av jordelektrode.

For å kalibrere målekretsen ble den før bruk, kortsluttet og spenningsatt med 500V. Seriemotstanden var på forhånd dobbeltsjekkert til å være 500MΩ. Den målte strømmen ved dette tilfellet ble, som den skulle bli i henhold til ohms lov, 1μA (=500V/500Mohm).

4. Resultater

Følgende kapittel presenterer fremskaffede resultater i form av bilder, grafer og tabeller, ordnet etter hvilken hypotese de søker å belyse. Diskusjon av resultatene og vurdering av feilkilder presenteres i kapittel 5. Bakgrunnsdata for resultatene finnes på tre DVDer med bilder og video. Behandlede data finnes som Excel ark i [Vedlegg E].

Blant resultatene brukes det gjennomgående tre grupperinger av prøvene. m/hulrom, u/hulrom og totalt. Disse viser til gjennomsnittsverdier av henholdsvis prøver med hulrom for det angitte spenningsnivået, prøver uten hulrom, og alle prøvene samlet i et totalt gjennomsnitt.

4.1 Prøveobjektene

Ved avkjøling av alle prøveobjektene ble det brukt hurtig vannkjøling for å unngå krystallisering. Dette resulterte i gjennomsnittlige avkjølingshastigheter for sPP på 0,60 °C/s (≈ 36 °C/min), iPP på 0,61 °C/s (≈ 36 °C/min), og for PEX 0,48 °C/s (≈ 29 °C/min).

Av de produserte prøveobjektene ble gjennomsnittet av de viktigste geometriske egenskapene beregnet. Disse er gjengitt i Tabell 6. Verdt å merke seg her er nåleradien for sPP prøver testet ved 7kV, og avstanden til jord for iPP 11kV. Spesielt disse verdiene har vist seg å virke inn på resultatene, noe som vil bli diskutert i kapittel 5.

Tabell 6 - Gjennomsnittlige geometrisk mål for prøveobjektene fordelt på spenningsnivå og materiale

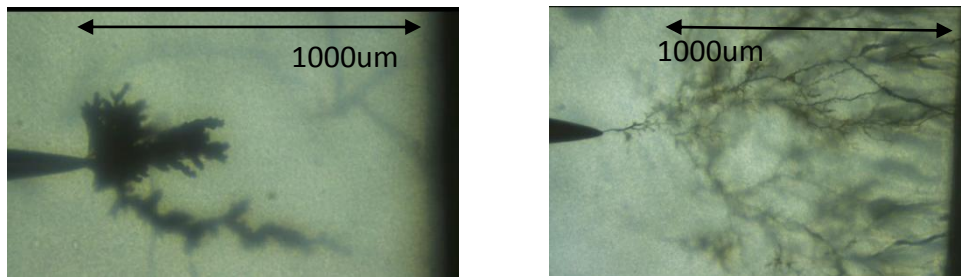
Materiale	Spenningsnivå	Avstand til jord gj.snitt[μm]	Nåleradius gj.snitt [μm]
sPP	7kV totalt	1181	13
	9kV totalt	1182	6
	11kV totalt	1111	7
	13kV totalt	1054	7
iPP	7kV totalt	1096	5
	9kV totalt	1189	3
	11kV totalt	940	2
	13kV totalt	1184	3

4.2 Betydning av hulrom ved nålespiss

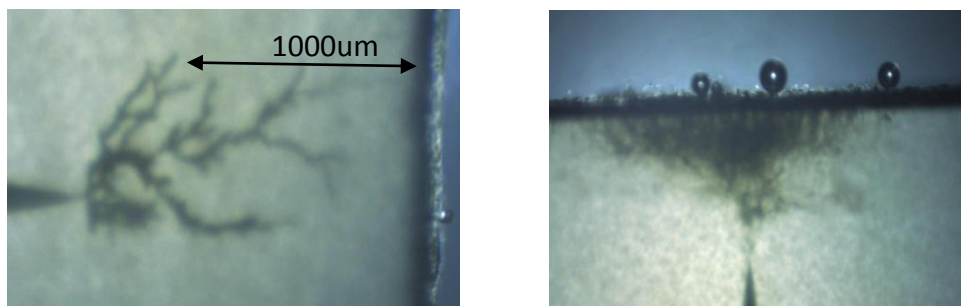
I dette delkapittelet behandles betydningen av hulrom ved nålespissen i henhold til hypotese IV: Hulrom påvirker typen elektrisk trevekst som oppstår før gjennomslag.

For å finne svar på dette ble nålen trukket ut til om lag 600 μm i 5 prøver med overlegg. Resultatene antydte en sammenheng mellom tilstedeværelsen av hulrom ved nålespissen, og hvordan den påfølgende treveksten utartet seg. Eksempler på slike forskjeller vises for sPP i Figur 19 og for iPP i Figur 20.

Resultater

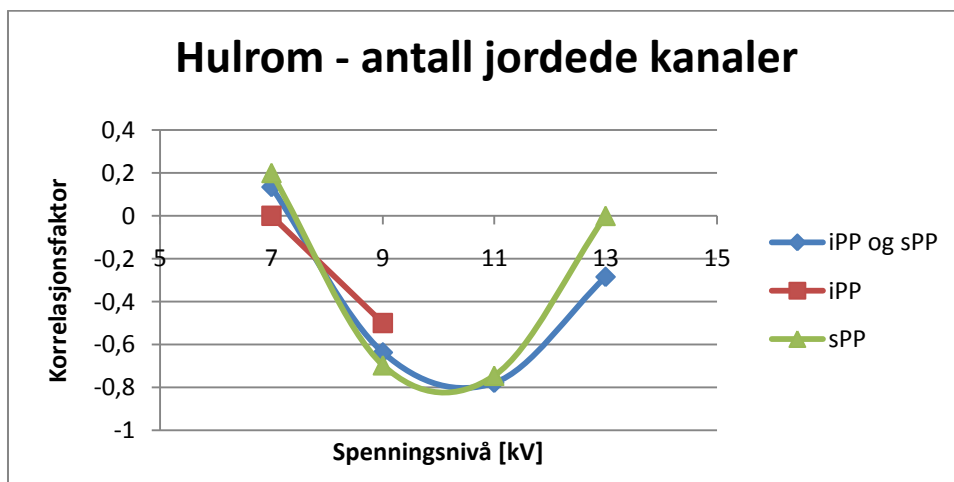


Figur 19 – Trevekst ved 9kV i prøve a) sPP5-004 med hulrom, og b) sPP5-007 uten hulrom



Figur 20 - Trevekst ved 9kV i prøve a) iPP1-006 med hulrom, og b) iPP2-012 uten hulrom

Undersøkelser utført her har forsterket antagelser om avhengighet av hulrom, men også belyst en sterk kobling til spenningsnivå. Det er blitt gjort en beregning av korrelasjonsfaktor ved ulike spenningsnivå mellom hulrom i prøvene, og antall trekanaler med kontakt mot jord før gjennomslag. Hulrom ble definert ved "1" for prøver med hulrom og "0" for prøver uten hulrom. Typen trevekst ble definert ut i fra om antall trekanaler mot jord før gjennomslag var 2 eller flere (satt til "1"), eller kun 1 (satt til "0"). Resultatet av beregningene vises i Figur 21.

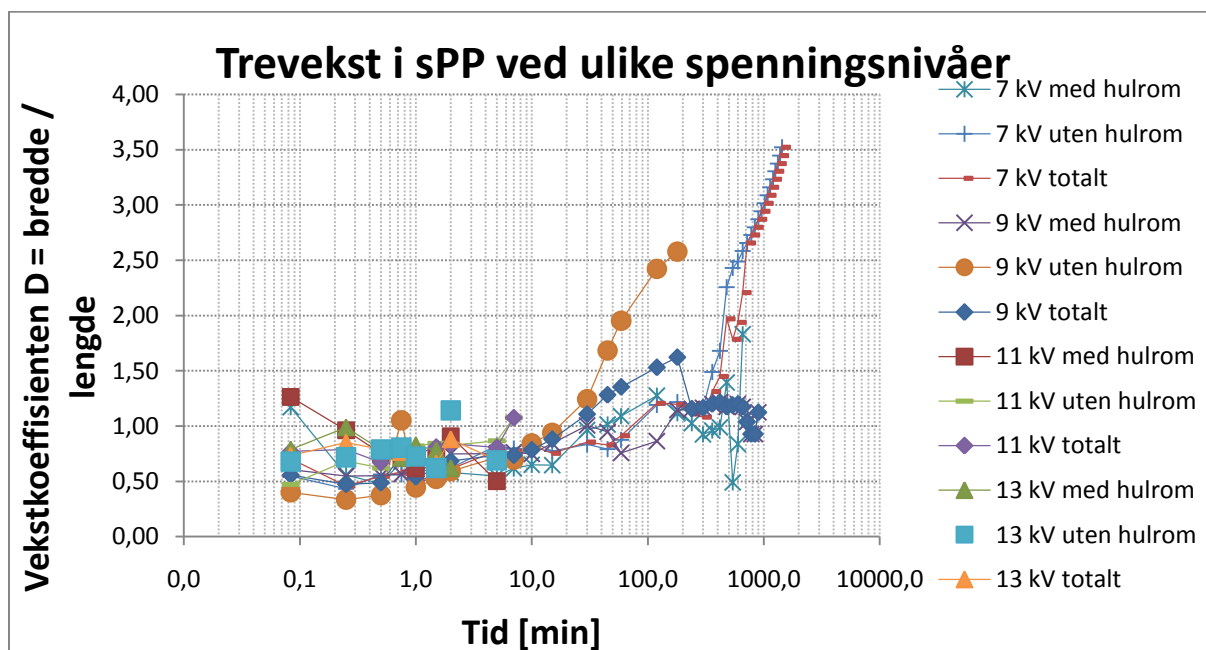


Figur 21 - Korrelasjonsfaktor mellom hulrom og type trevekst ved ulike spenningsnivå for iPP, sPP og begge samlet

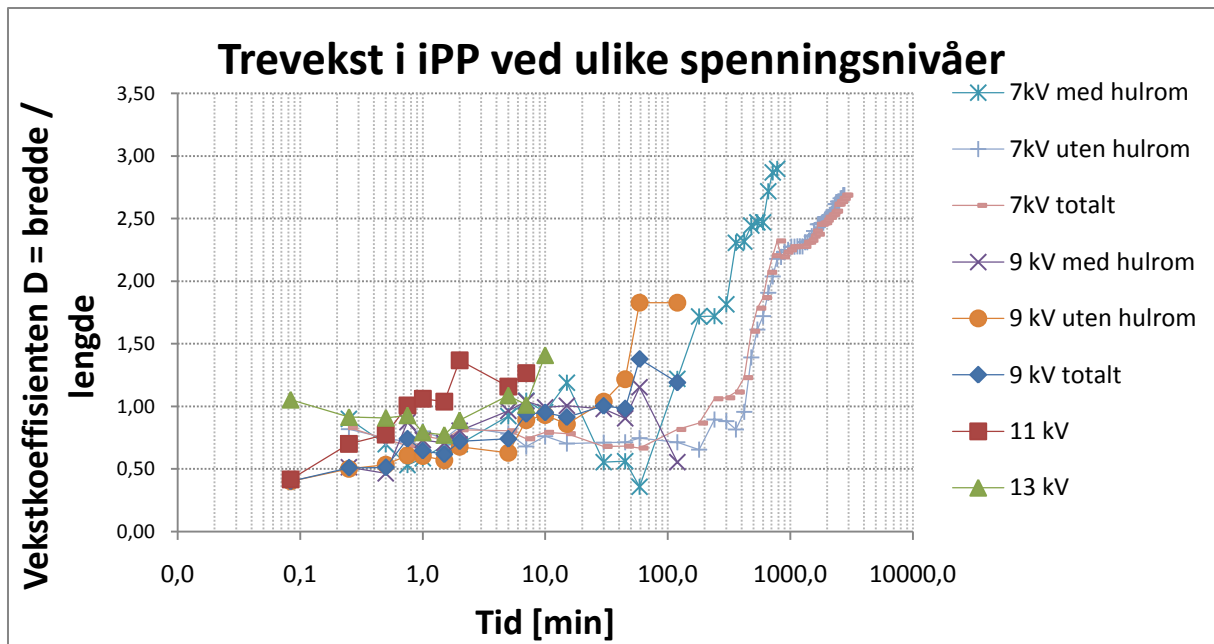
4.3 Beskrivelse av treform

Dette delkapittelet viser resultater som søker å beskrive elektrisk trevekst med tanke på klassifisering av type tre.

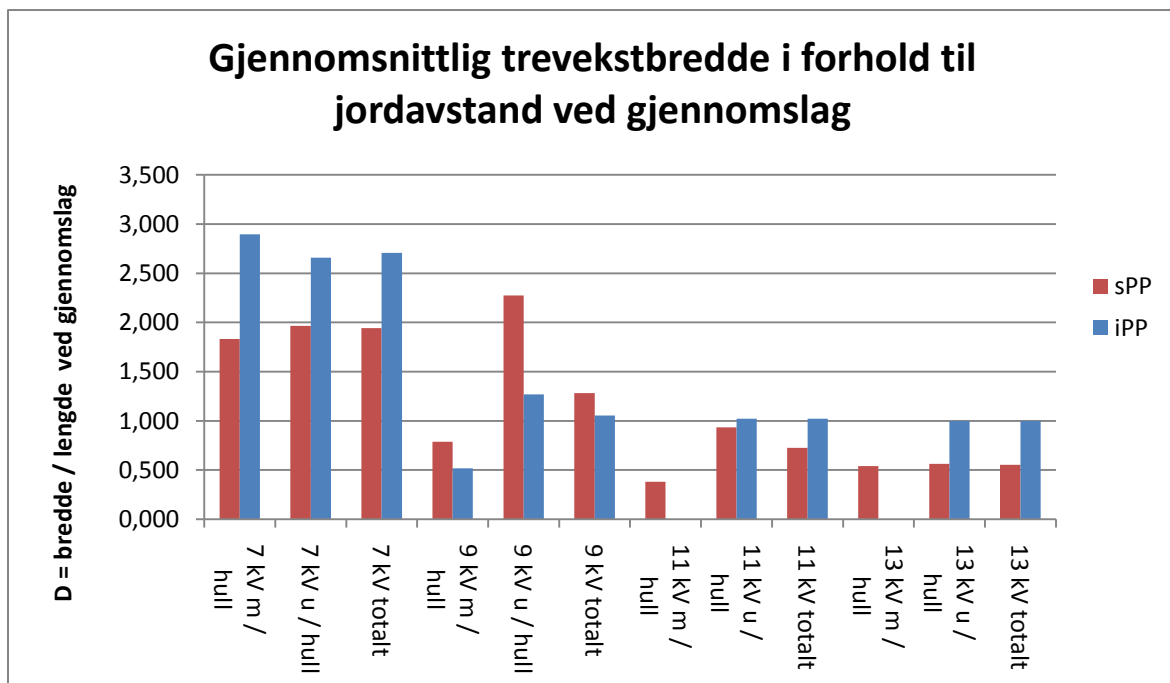
Som beskrevet i metodekapittelet (3.4) er verktøy for klassifisering blant annet vekstkoeffisienten D , presentert i Figur 22 og Figur 23 henholdsvis for materialene sPP og iPP. Den siste verdien av D , målt etter gjennomslag presenteres i Figur 24 som et mål på hvor bred veksten til slutt ble.



Figur 22 - Vekstkoeffisienten (D =bredde/lengde) til trevekst som funksjon av tid, ved ulike spenningsnivå sPP.

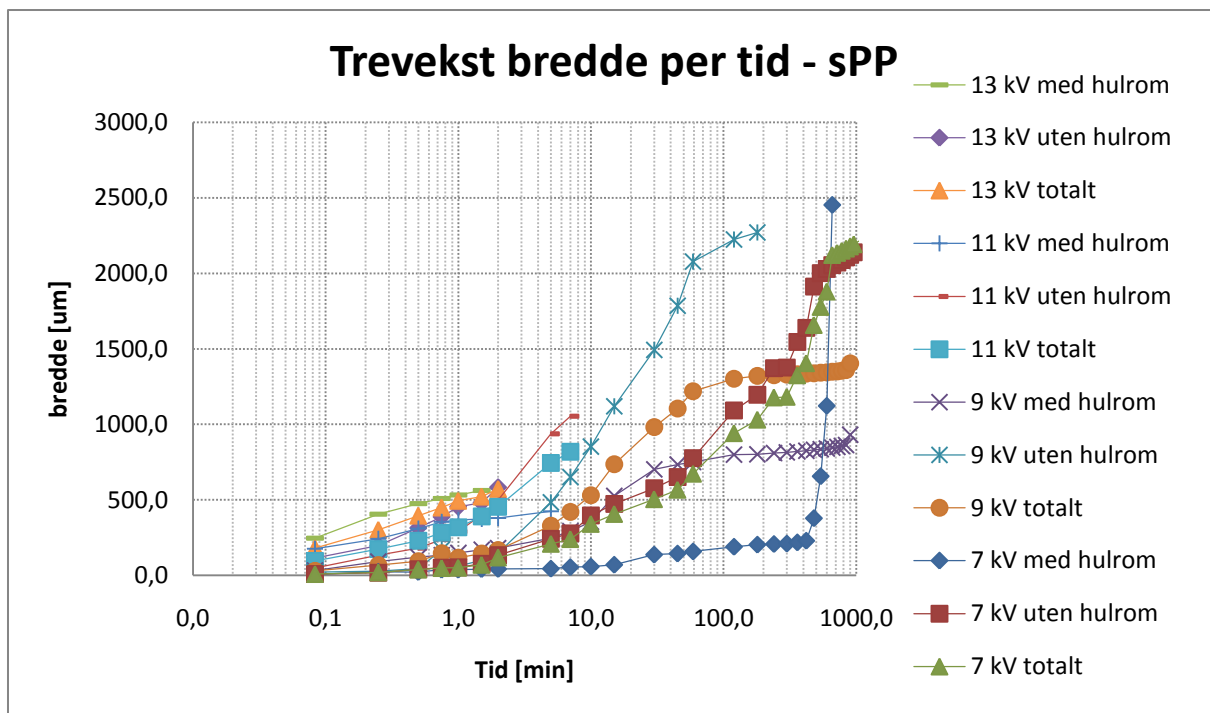


Figur 23 - Vekstkoeffisienten ($D = \text{bredde} / \text{lengde}$) til trevekst som funksjon av tid, ved ulike spenningsnivå iPP.

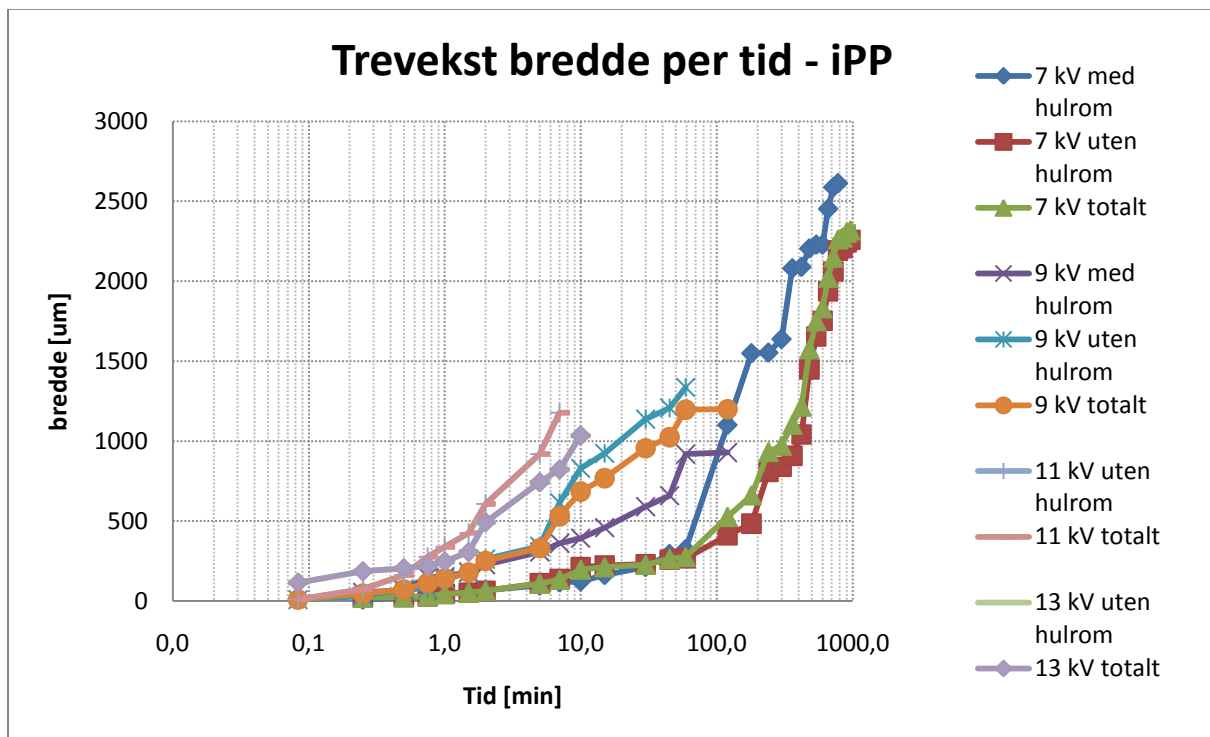


Figur 24 - Fraktaldimensjon ved gjennomslag for ulike spenningsnivå, sPP og iPP.

En annen måte for å beskrive treveksten på er breddeutviklingen per tid og lengden til treveksten per tid. Figur 25 viser den gjennomsnittlige breddeveksten i sPP for de ulike spenningsnivåene, men også delt inn i prøver med og uten hulrom. Tilsvarende presenteres breddeveksten i iPP i Figur 26 for.



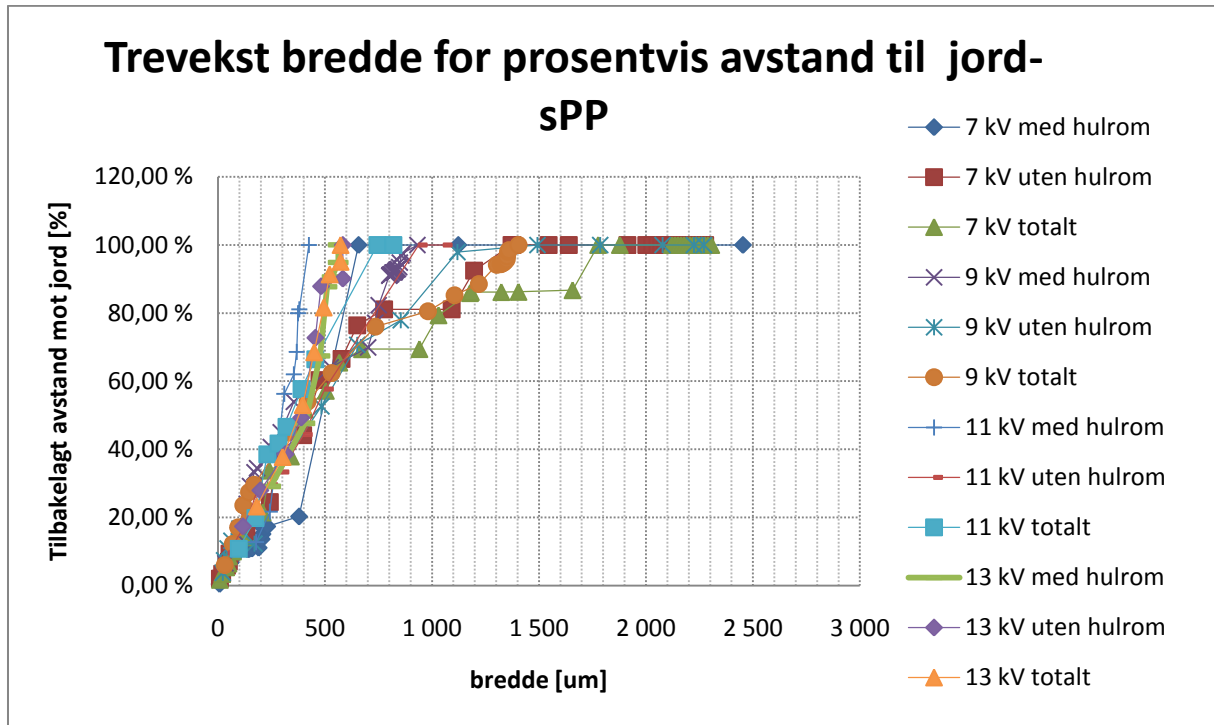
Figur 25 - Gjennomsnittlig bredde til treveksten i sPP for ulike spenningsnivå gitt per tid.



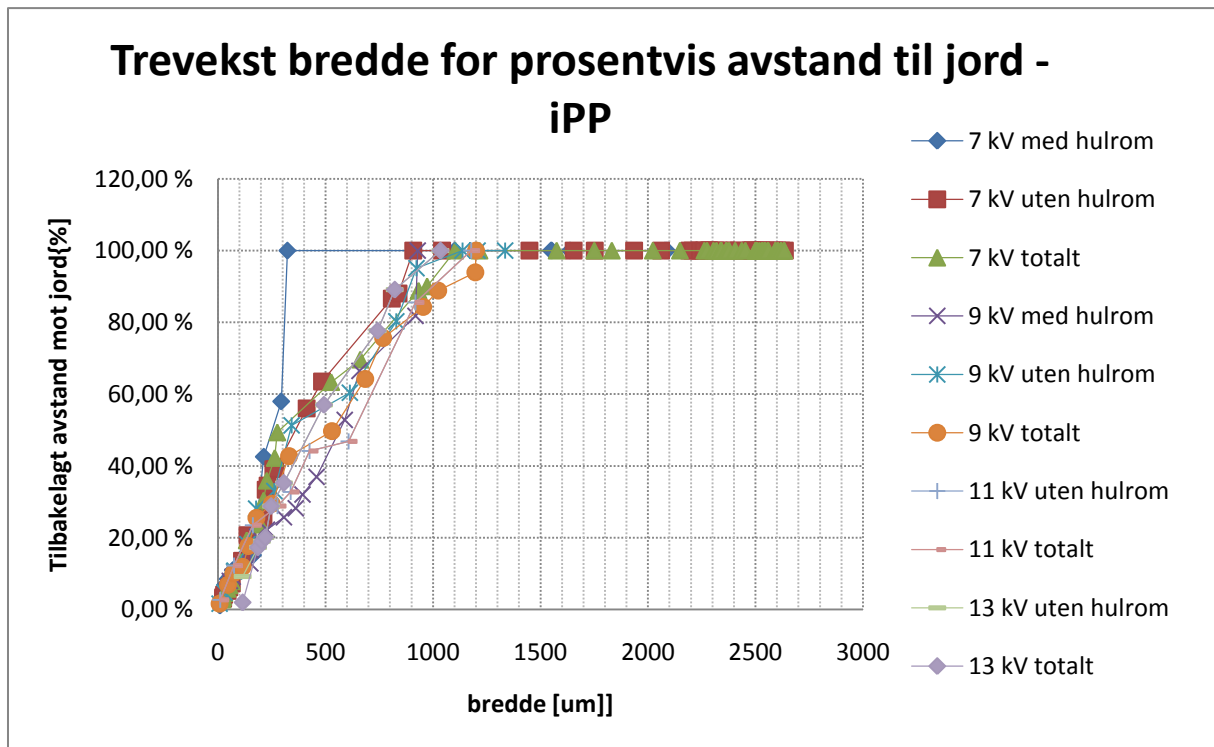
Figur 26 - Gjennomsnittlig bredde til treveksten i iPP for ulike spenningsnivå gitt per tid

Resultater

For et mer nyansert bilde av bredden presenteres også breddeveksten gitt av avstand tilbakelagt mot jord i prosent. For sPP vises dette i Figur 27, mens Figur 28 viser det for iPP.

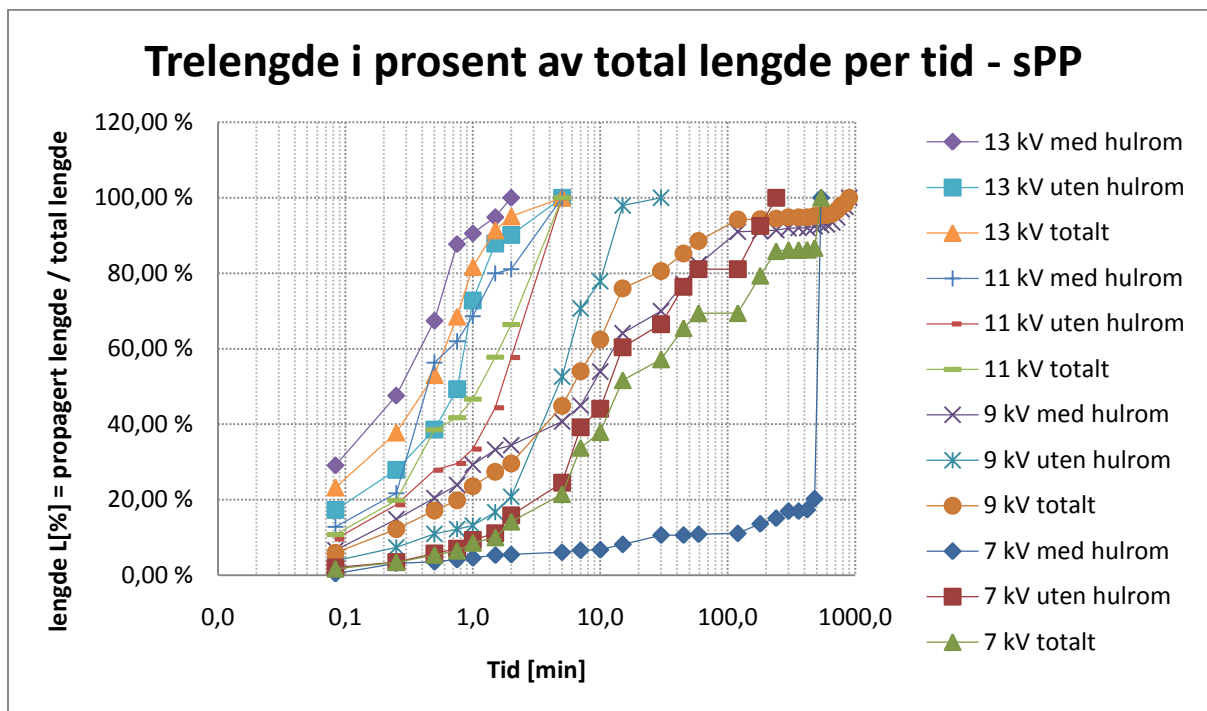


Figur 27 – Gjennomsnittlig breddevekst gitt av prosentvis avstand til jord – sPP

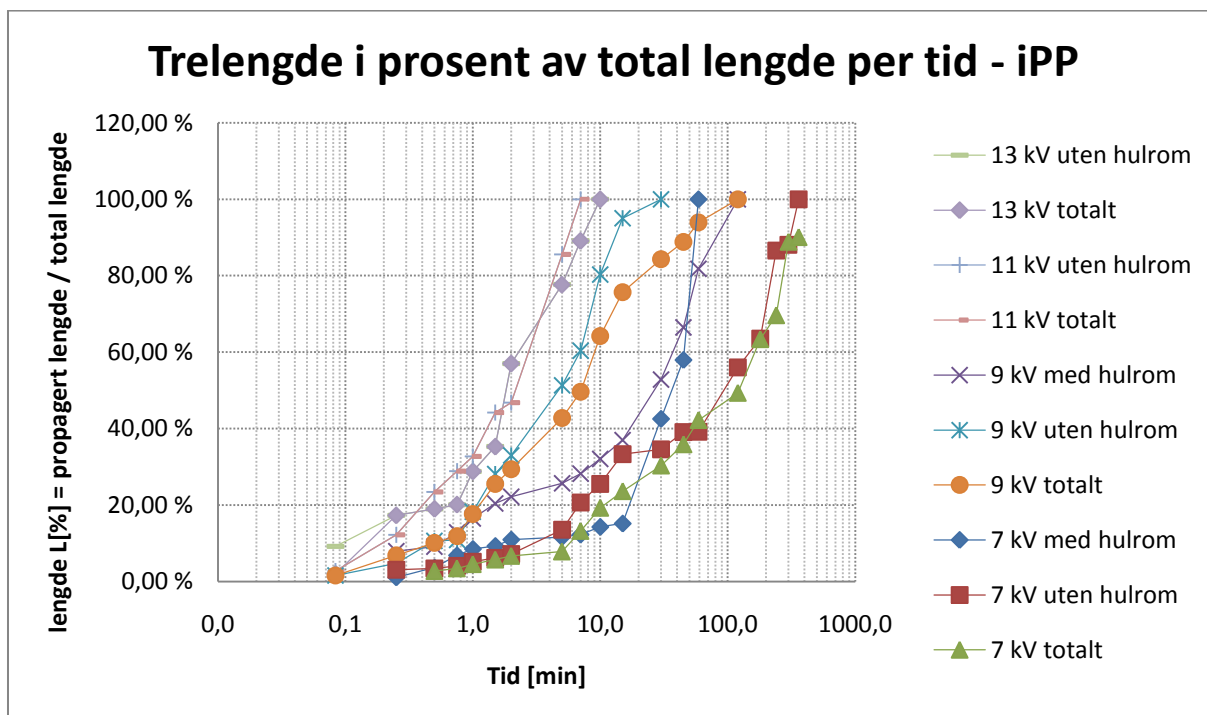


Figur 28 – Gjennomsnittlig breddevekst gitt av prosentvis avstand til jord – iPP

Lengdevekstens utvikling som prosent av total avstand mellom nål og jord vises for sPP i Figur 29, og for iPP i Figur 30.



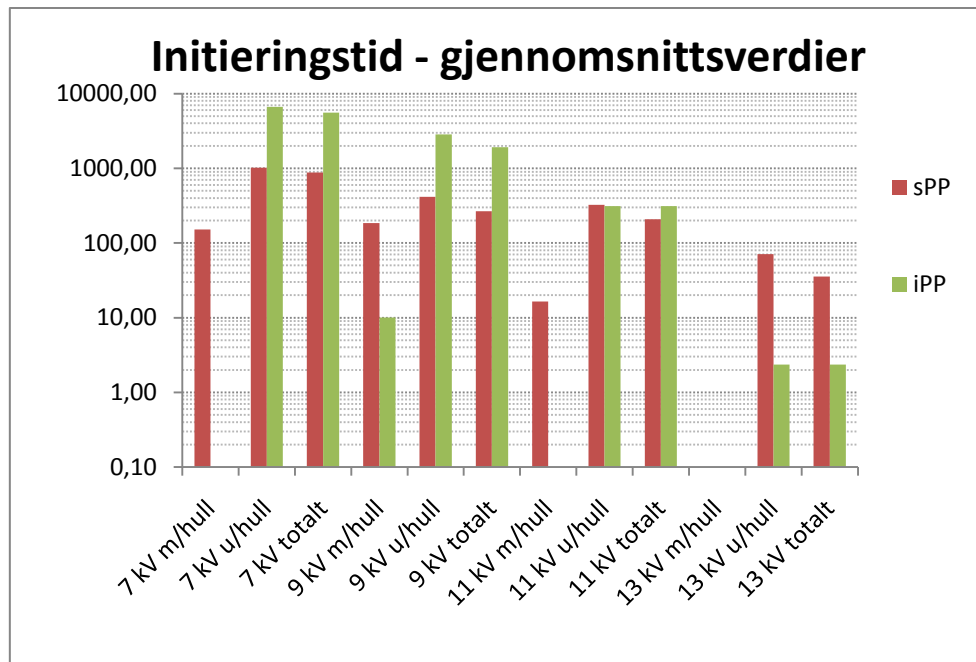
Figur 29 - Gjennomsnittlig trelengde i sPP i prosent av total lengde til jord per tid, gitt for ulike spenninger



Figur 30 - Gjennomsnittlig trelengde i iPP i prosent av total lengde til jord per tid, gitt for ulike spenninger.

4.4 Initieringstid

Dette delkapittelet betrakter hypotese I: sPP har lengre initieringstid enn iPP. Tiden fra spenning påsettes over prøveobjektet til elektriske trær begynner å vokse er her definert som initieringstiden. Denne variabelen beskriver hvor lenge isolasjonsmaterialet holder ut det påtrykte elektriske feltet før den første sprekken dannes, og treveksten starter. Tilstedeværelsen av elektriske trær innebærer en svekkelse av materialet, og vil før eller siden føre til gjennomslag. Det gjør denne variabelen like viktig som tiden til gjennomslag.



Figur 31 - Gjennomsnittsverdier for initieringstid for elektrisk trevekst i sPP og iPP. Y-aksen er gitt i sekunder fra spenningsetting.

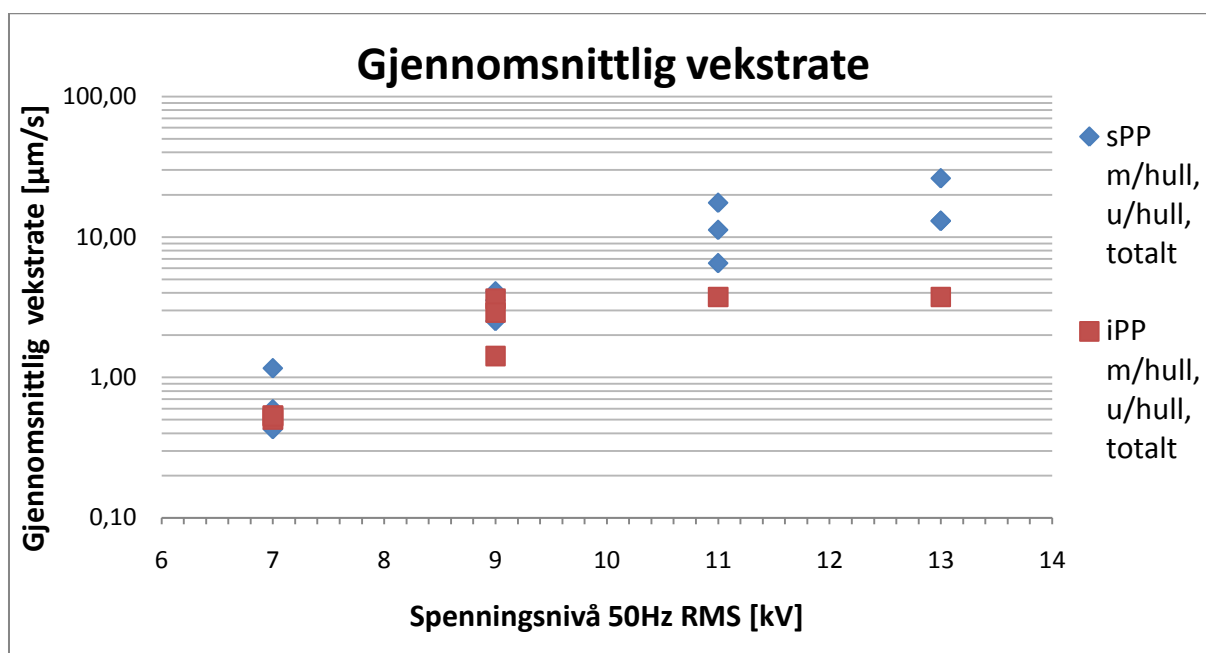
Tabell 7 - Initieringstid med differanser

Initieringstid	sPP	iPP	Differanse	Differanse
Gjennomsnitt	[sek]	[sek]	[sek]	[%]
7 kV m/hull	152,0	0,1	151,9	
7 kV u/hull	21563,4	6651,0	14912,4	2,24
7 kV totalt	17994,9	5542,5	12452,3	2,25
9 kV m/hull	184,0	10,1	174,0	17,28
9 kV u/hull	416,1	2855,0	2439,0	5,86
9 kV totalt	265,9	1906,7	1640,8	6,17
11 kV m/hull	16,4			
11 kV u/hull	324,2	313,0	11,2	0,04
11 kV totalt	208,8	313,0	104,2	0,50
13 kV m/hull	0,1			
13 kV u/hull	70,8	2,4	68,5	28,93
13 kV totalt	35,5	2,4	33,1	13,98

4.5 Vekstrate

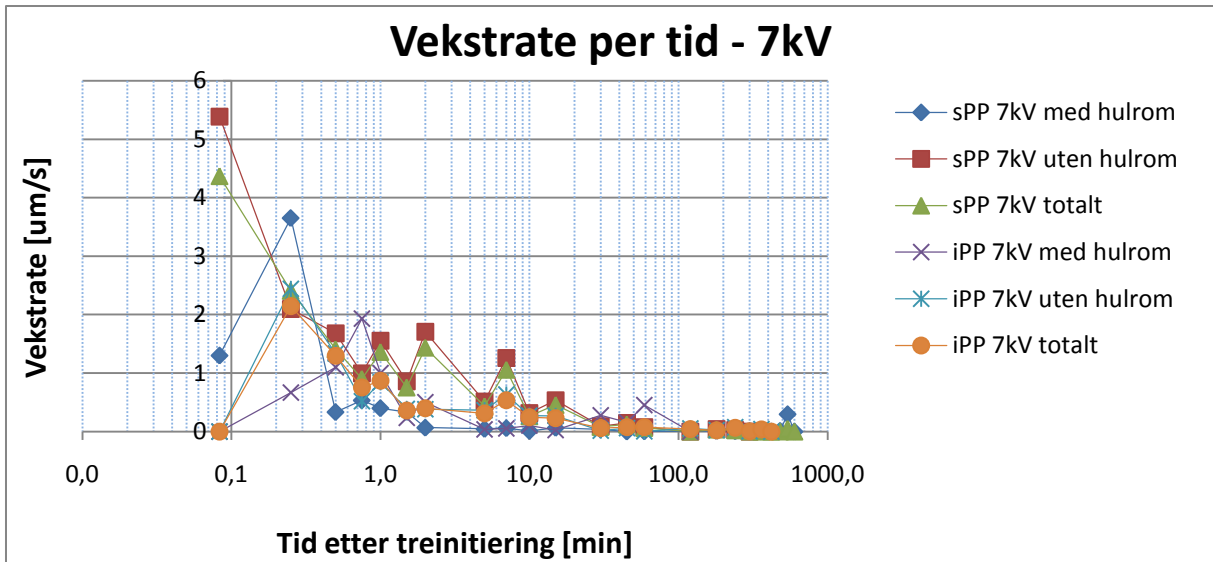
Her behandles vekstraten i forhold til hypotese II: Elektrisk trevekst vokser saktere i sPP enn i iPP, og hypotese IV: Hulrom påvirker typen elektrisk trevekst som oppstår før gjennomslag.

Hvor hurtig veksten er i lengderetningen er avhengig av kildepenningen. Fordelingen for sPP og iPP vises i Figur 32.

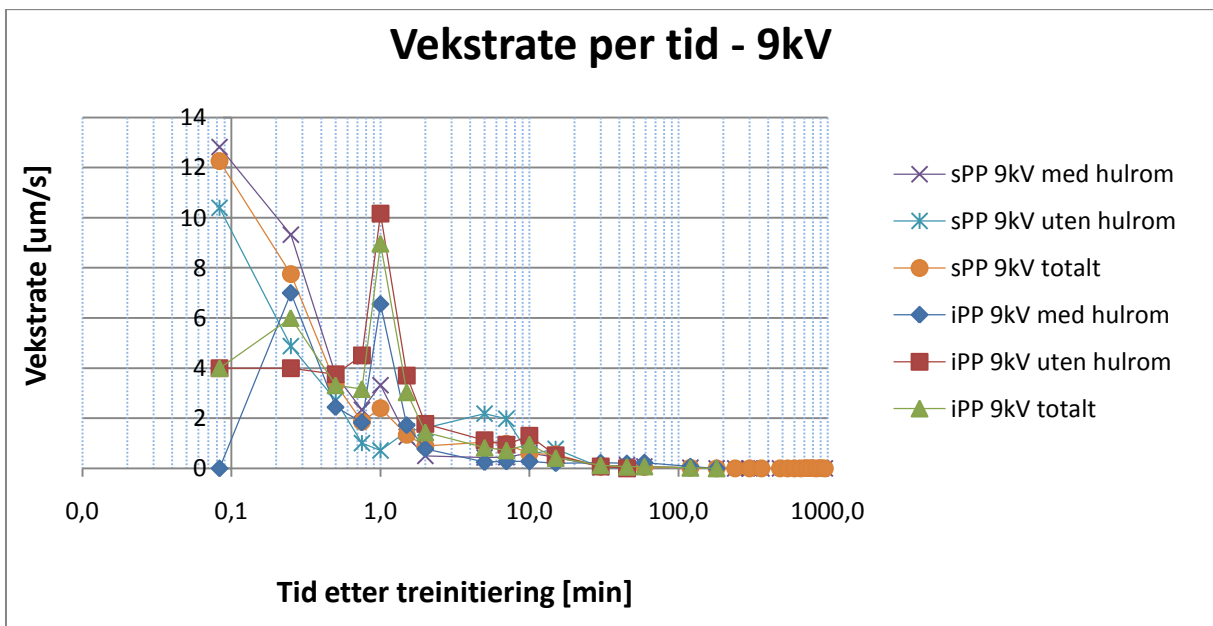


Figur 32 - Gjennomsnittlig vekstrate gitt per spenningsnivå

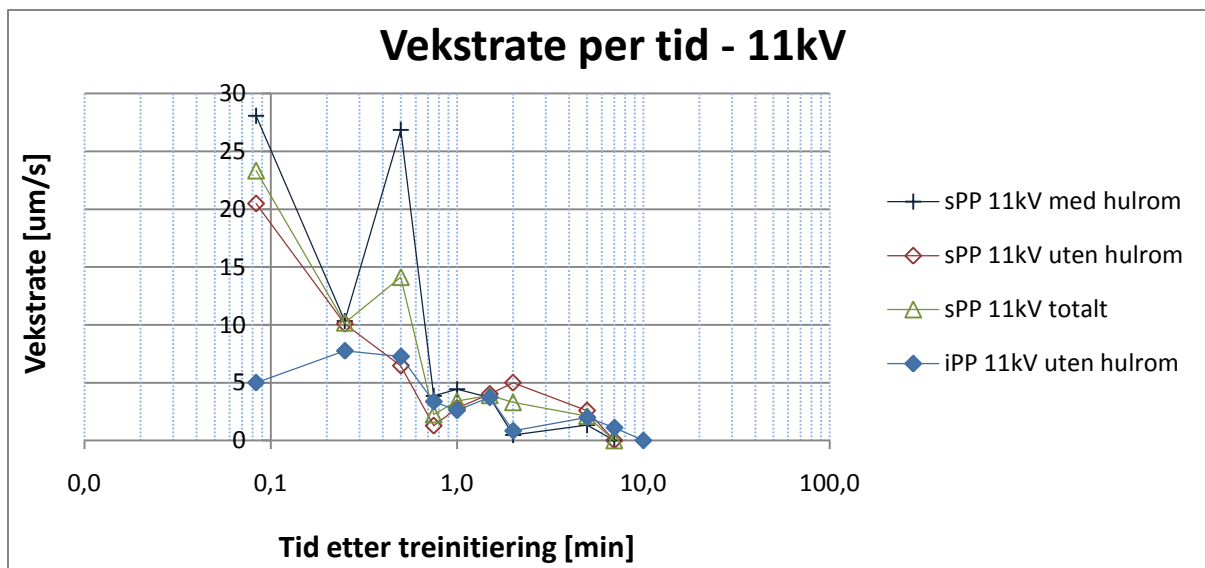
Vekstratens utvikling per tid kommer fram av Figur 33 til Figur 36 henholdsvis for hvert av spenningsnivåene det er utført målinger ved.



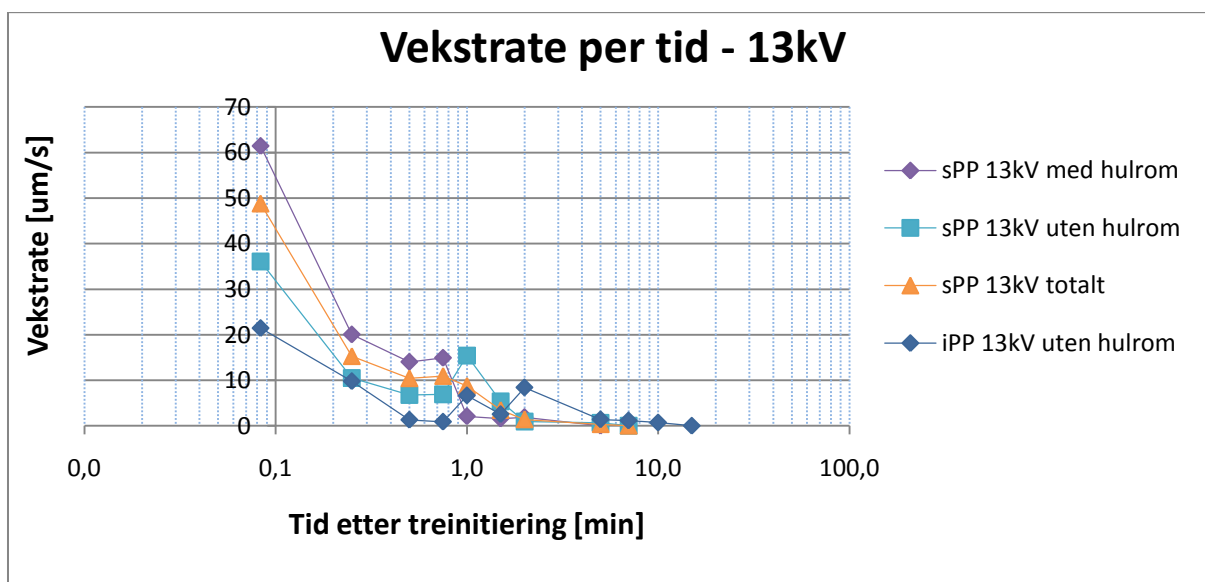
Figur 33 - Vekstrate per tid for 7kV



Figur 34 - Vekstrate per tid for 9kV



Figur 35 - Vekstrate per tid for 11kV

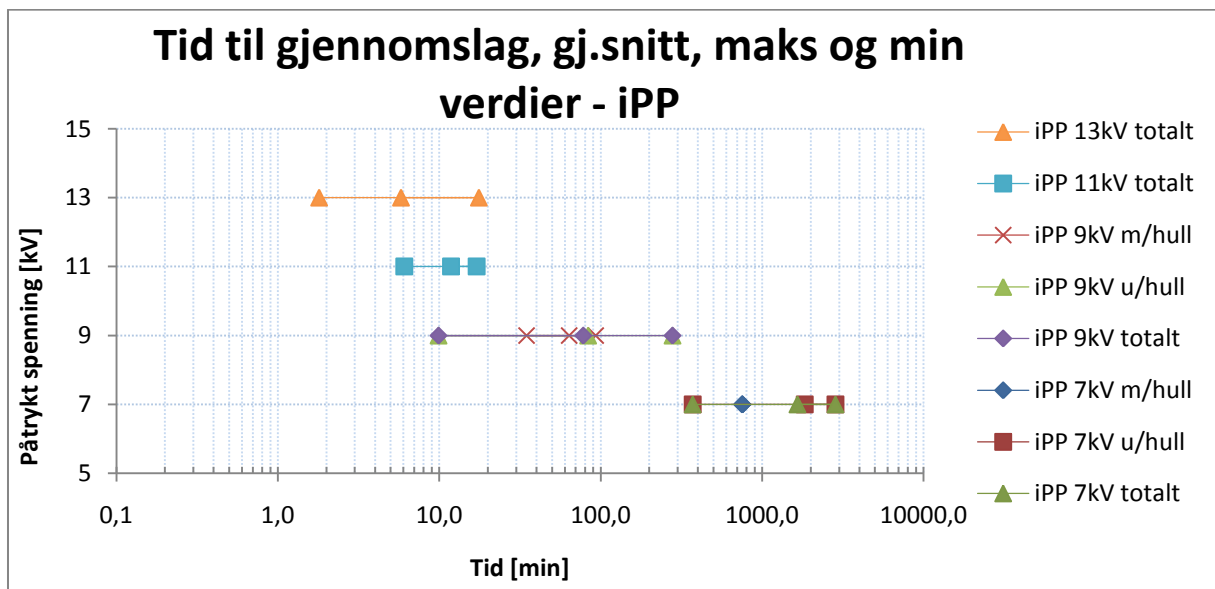
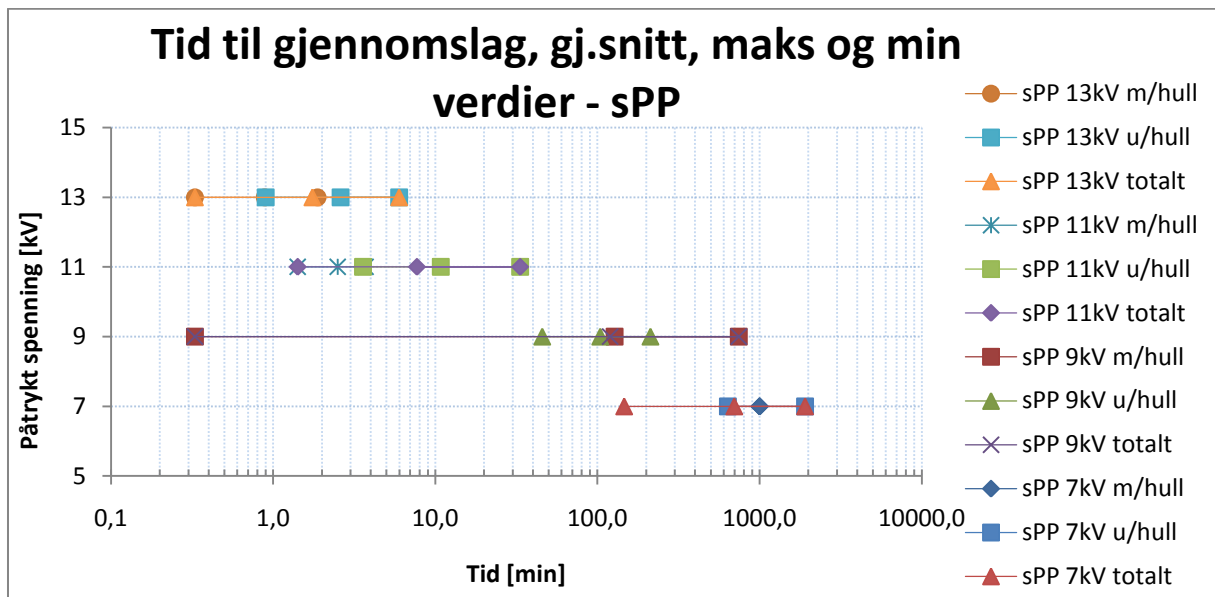


Figur 36 - Vekstrate per tid for 13kV

4.6 Tid til gjennomslag

Dette delkapittelet behandler også hypotese II: Elektrisk trevekst vokser saktere i sPP enn i iPP. Muligens er den viktigste variabelen i denne undersøkelsen tiden til gjennomslag. Dette representerer levetiden til materialet, og sier noe om hvor lenge det tåler det aktuelle stressnivået. Resultatenes betydning kan videreføres til hvor lenge man kan forvente at en kabel kan være i bruk før den bør bli kontrollert/ byttet for å unngå gjennomslag, materielle ødeleggelser og unødvendig nedetid. Tid til gjennomslag presenteres i Figur 37 for sPP, og Figur 37 – (Øverst) Tid til gjennomslag vist som tre punkter for hver graf; minste tidsmåling, gjennomsnittlig verdi, og lengste tid til gjennomslag i sPP-prøver.

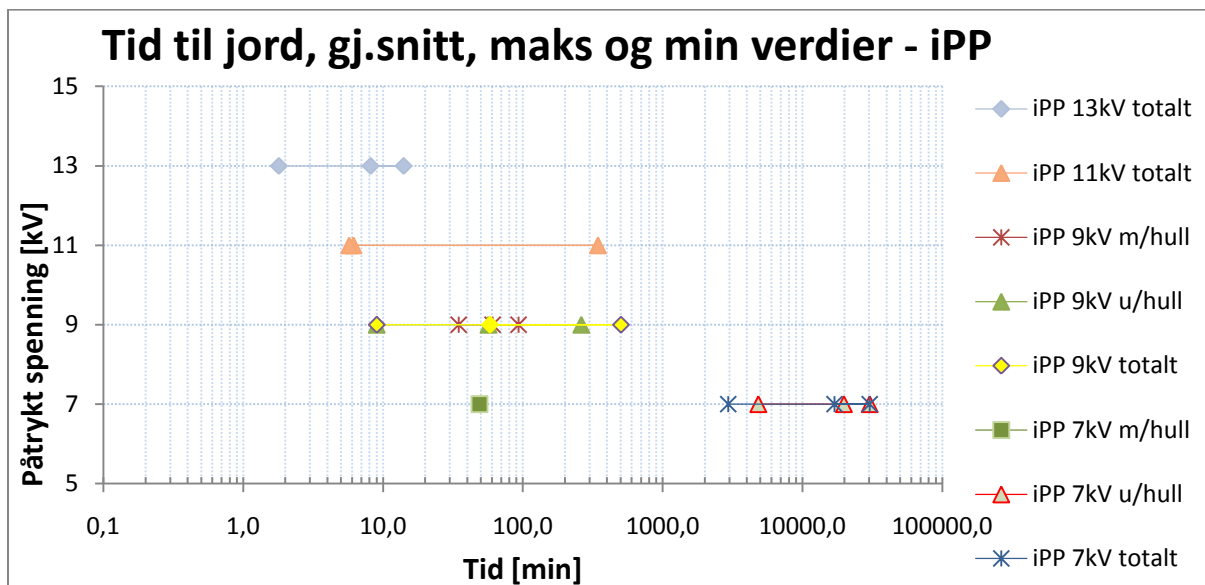
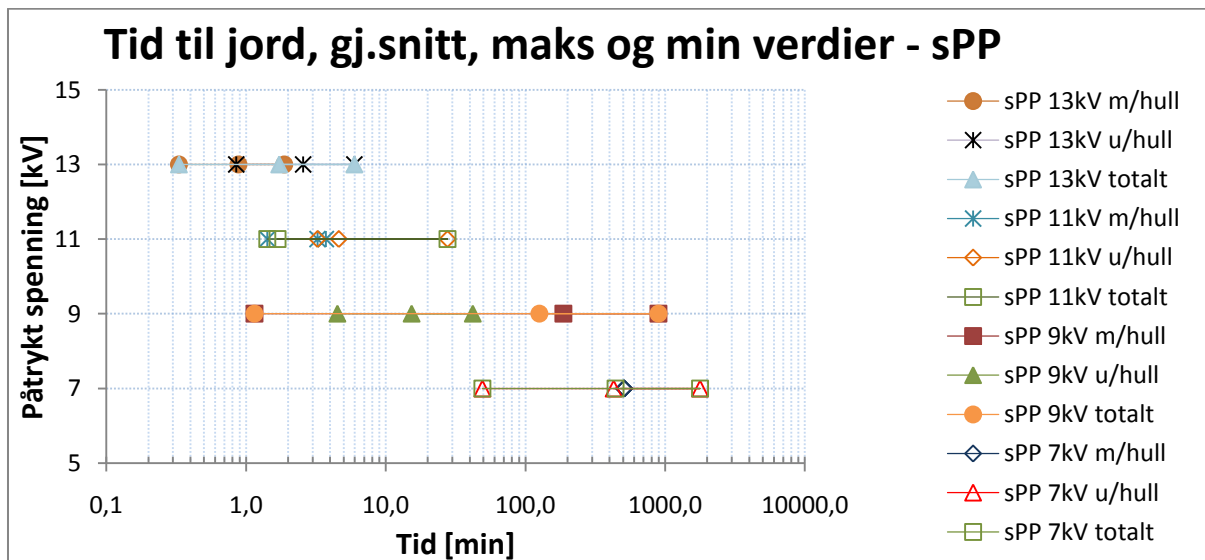
Figur 38 for iPP.



Figur 37 – (Øverst) Tid til gjennomslag vist som tre punkter for hver graf; minste tidsmåling, gjennomsnittlig verdi, og lengste tid til gjennomslag i sPP-prøver.

Figur 38 – (Nederst) Tid til gjennomslag vist som tre punkter for hver graf; minste tidsmåling, gjennomsnittlig verdi, og lengste målte tid til gjennomslag i iPP-prøver.

En tilsvarende viktig indikator er tiden det tar før treveksten når jord. Denne parameteren har i tidligere betraktninger av PEX og andre polymerer vært lik tid til jord, men for PP vil det være interessant å studere dette, og avviket mellom tid til jord og tid til gjennomslag.

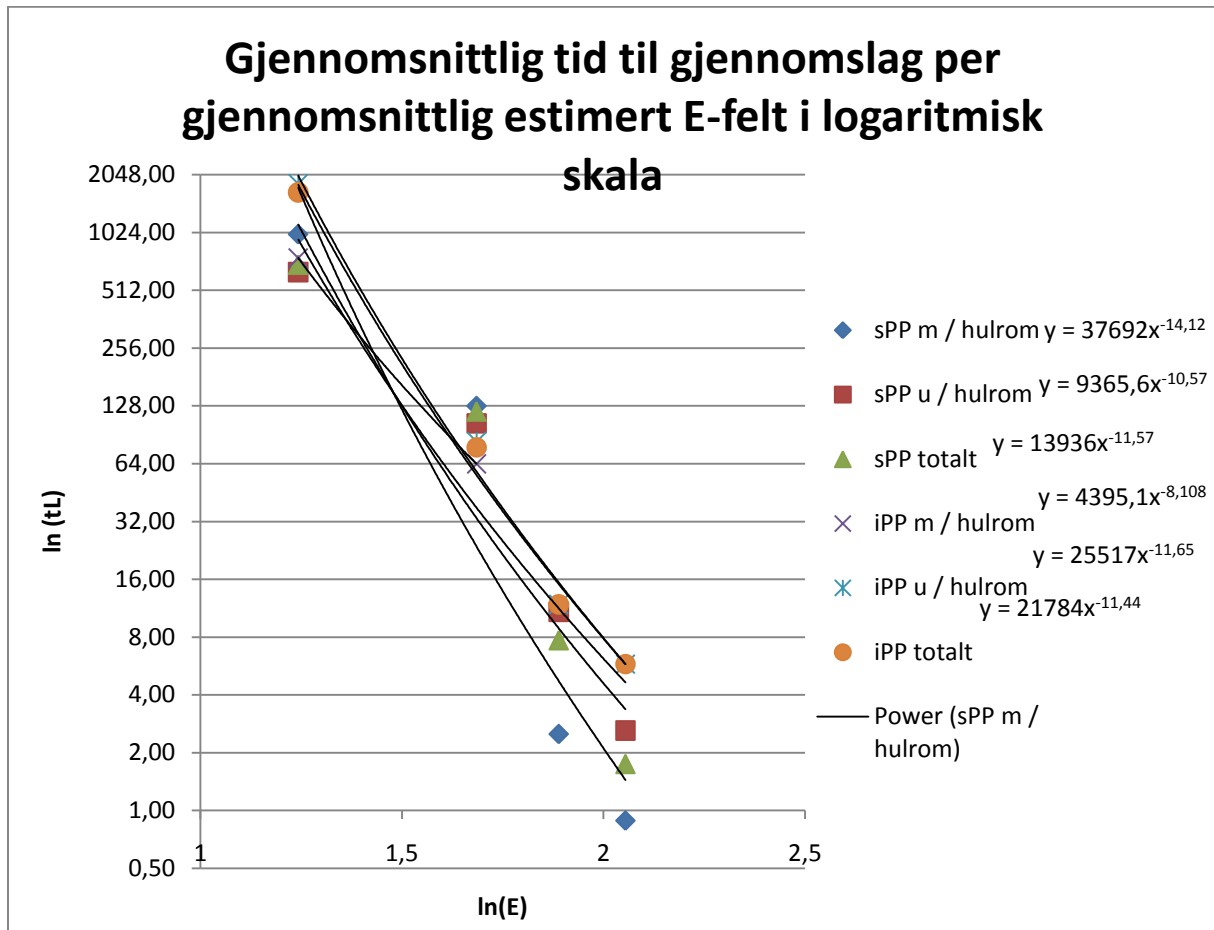


Figur 39 – (Øverst) Tiden fra spenningssetting til treet når jord i sPP-prøver, presentert som minimum-, gjennomsnitt- og maksimumverdier.

Figur 40 – (Nederst) Tiden fra spenningssetting til treet når jord i iPP-prøver, presentert som minimum-, gjennomsnitt- og maksimumverdier

4.7 Levetidsfunksjon

Dette delkapittelet behandler resultatene for tid til gjennomslag, og beregnet feltstyrke med tanke på hypotese I og II. Feltstyrken ble beregnet etter ligning [1.4], med gjennomsnittlig avstand mellom nål og jord, og gjennomsnittlig kurveradius på nålespissen som variable. Spenningen var også den gjennomsnittlig påtrykte etter målte verdier for alle prøvene ved hvert spenningsnivå. Logaritmen til den slik estimerte feltstyrken langs x-aksen, og logaritmen til tiden til gjennomslag langs y-aksen for sPP og iPP er gitt i Figur 41.

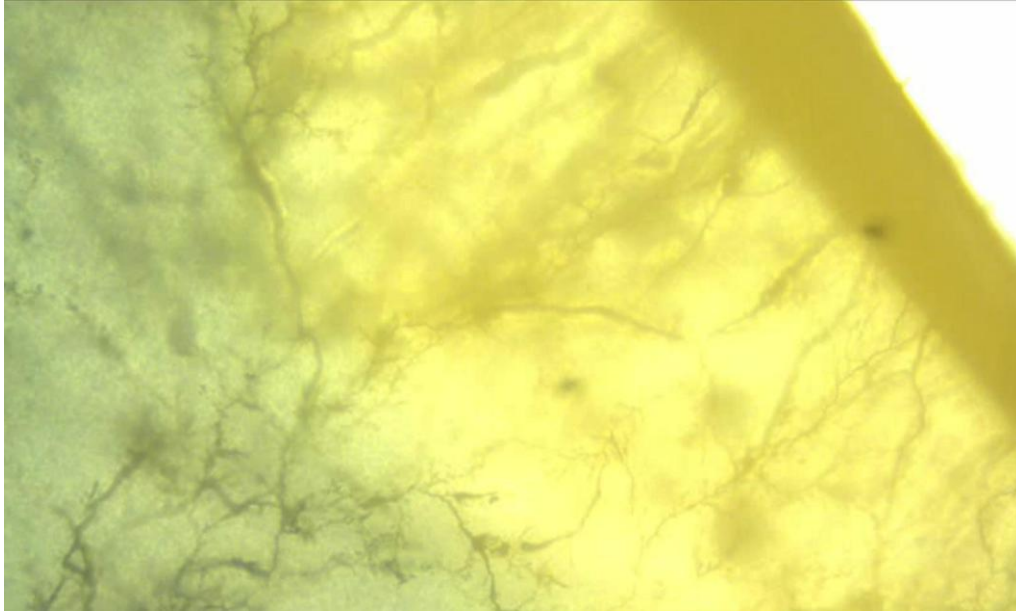


Figur 41 - Gjennomsnittlig tid til gjennomslag per gjennomsnittlig estimert E-felt i logaritmisk skala.

4.8 Konduktivitet test

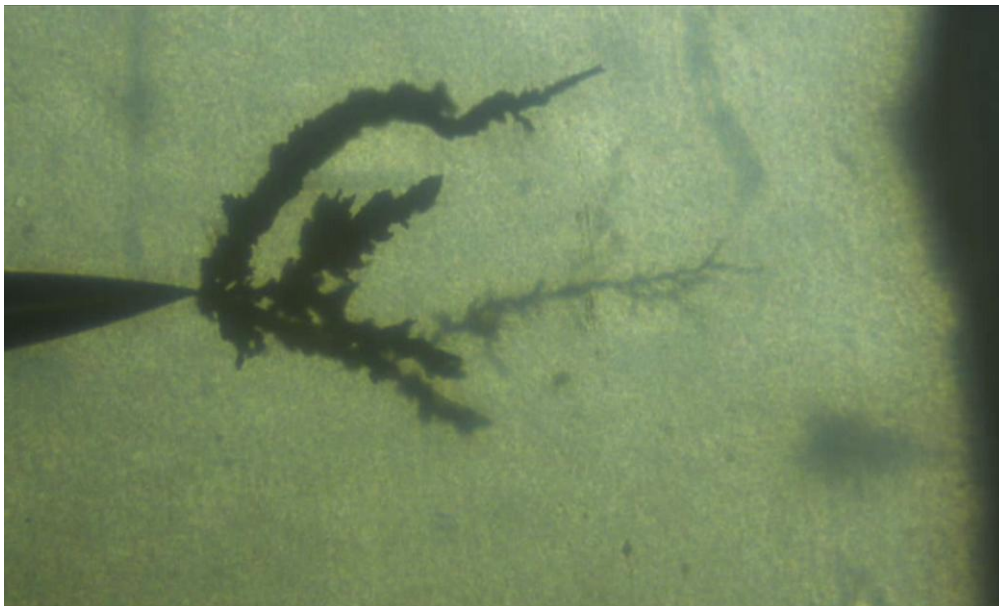
4.8.1 Prøveobjektene

sPP6-004, med multiple grener mot jord. Prøvene ble kuttet opp med mikrotom og deretter ble det målt lekkstrøm gjennom trekanalene. Dette ble gjort for to avstander fra nålespissen til den nye jordelektroden, ved 1489 μ m og 681 μ m.



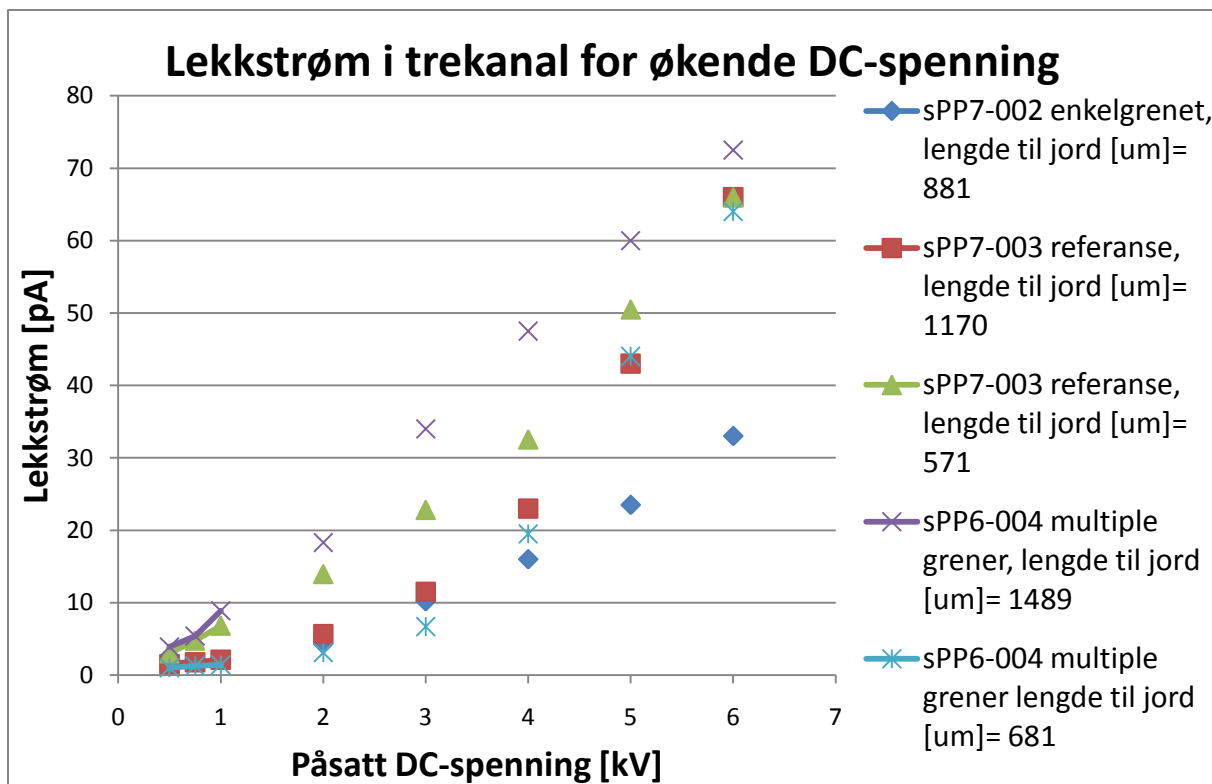
Figur 42 - sPP6-004 uten hulrom, spenningsatt på 9kV og stoppet etter 59min.

sPP7-002, med enkel gren mot jord testet ved 881 μ m.

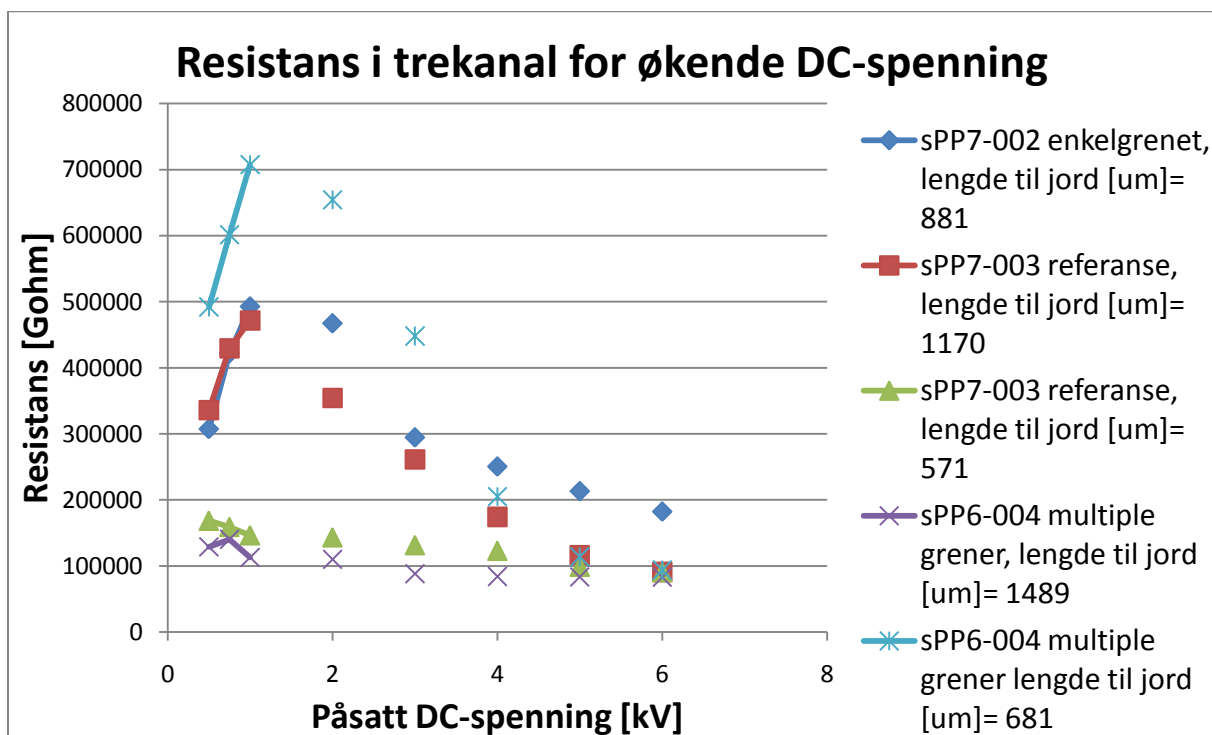


Figur 43 - sPP7-002 med hulrom, spenningsatt på 9kV og stoppet etter 68min

sPP7-003, uten trevekst, fungerer som referanseprøve.



Figur 44 - Lekkstrøm i trekanal under trinnvis stigende DC-spenning



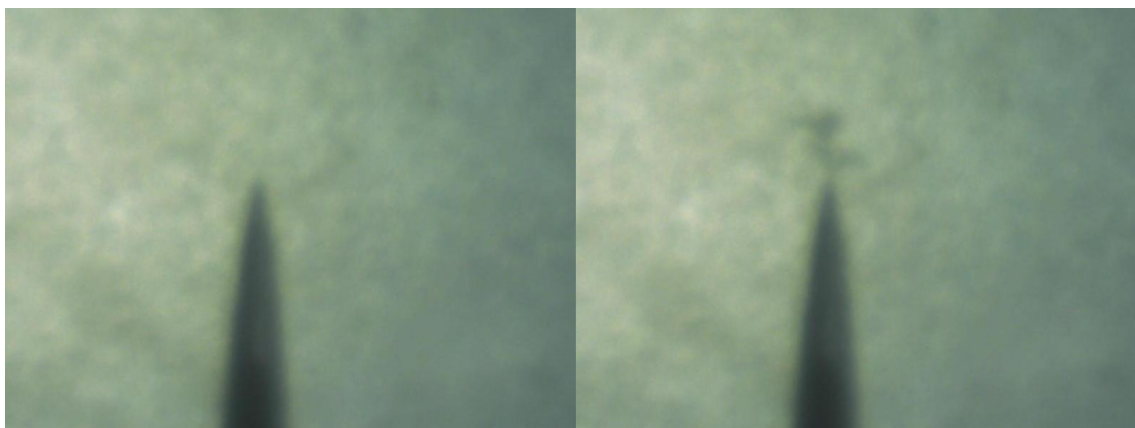
Figur 45 - Resistans i trekanal for trinnvis økende spenning

4.9 Andre resultater

I dette delkapittelet presenteres resultater som kan være av betydning, men som ikke direkte er koblet til noen av hypotesene.

4.9.1 Betydning av sfærulitter

Figur 46 a) viser krystallinske områder i form av relativt store sfærulitter i iPP-materialet i et prøveobjekt før spenningssetting. Spesielt er overflatesjiktene mellom sfærulittene synlige i form av skygger på bildet. Figur 46 b) viser prøven etter en kort tid spenningssetting hvor treveksten har utviklet seg. Veien treveksten har valgt er tydelig den samme som skyggene indikerte allerede før spenningssetting.

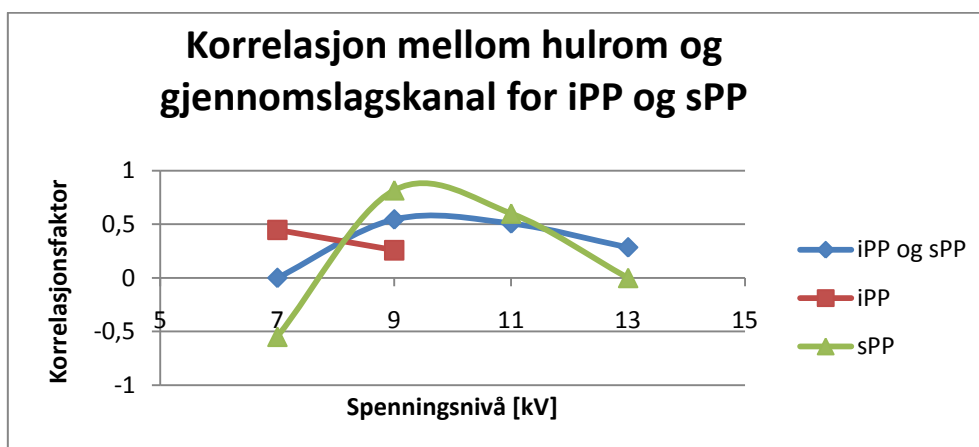


Figur 46 - iPP prøve før (bilde a til venstre) og etter (bilde b til høyre) treinitiering. Trevekstens gang i grensesjiktet mellom sfærulittene er tydelig.

4.9.2 Gjennomslagskanal

For sPP-prøvene ble det i 74% av prøvene gjennomslag i første trekanal til jord. iPP-prøvene opplevde en andel på 61% for denne oppførselen. Dette ga en total prosentandel for alle prøvene på 68%.

Til undersøkelse av potensielle sammenhenger presenteres korrelasjonskoeffisienten mellom hulrom og gjennomslagskanal i Figur 47.

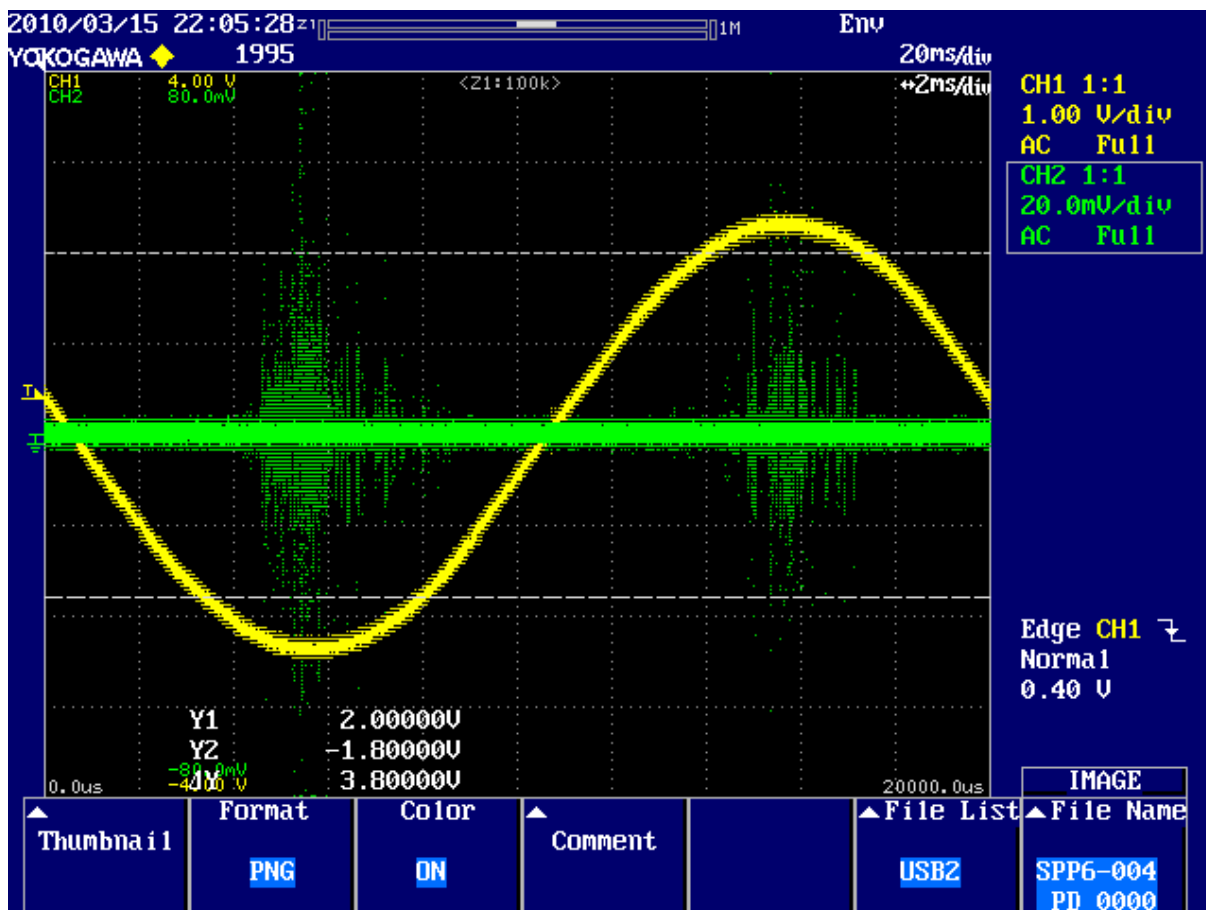


Figur 47 - Korrelasjon mellom tilstedeværelse av hulrom, og om første jordgren blir gjennomslagskanal eller ikke.

4.9.3 PD-måling under trevekst

Dette kapittelet presenterer resultatene fra PD-målingene, og søker å belyse eventuelle sammenhenger mellom PD aktiviteten og trevekstaktivitet som initiering, spesielt hurtig propagering, jordvekst, eller lignende. Målingene ble gjort av utladningsaktiviteten akkumulert i gitte tidsintervall, to minutter fram til 10min, deretter hvert tiende minutt fram til en time, så påfølgende hver time til gjennomslag.

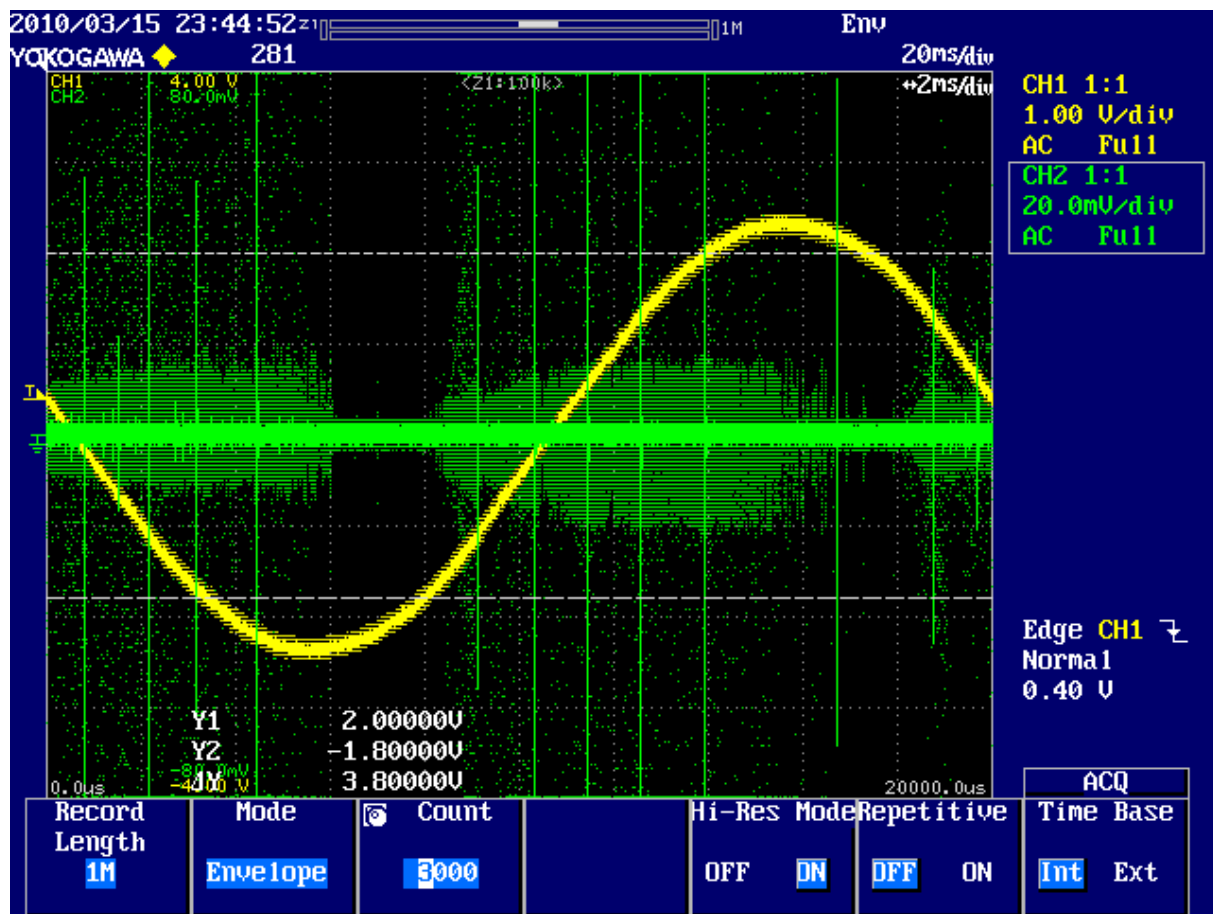
Et eksempel på en måling er vist i Figur 48. Denne viser akkumulert PD fra 0-2min. Dette tidspunktet har sPP prøven enda ikke har initiert trevekst.



Figur 48 - Akkumulert PD fra 0-2min for sPP6-004 uten hulrom, testet på 9kV. Bildet er tatt før treinitiering. Den gule grafen er referansespenningen, og den grønne representerer de partielle utladningene. Oppløsningen er 20mV/divisjon for grønn graf.

Kalibrering av PD-måleutstyret ble gjort ved å beholde spenningen av, ha et prøveobjekt koblet til, men med spenningen av. Deretter ble det påtrykt en kjent ladning til kretsen med en kalibrator. Oscilloskopet plukker så opp en skalert spenningspuls, som peker tilbake på utladningsstørrelsen når denne er kjent. Her ble også støynivået funnet til 5-10pC. Omregningsfaktoren fra mV til pC ble funnet som et gjennomsnitt av to målinger til å være 1,45 pC/mV. Fra Figur 48 kan vi dermed se at hovedtyngden av utladningene ligger på ca $15\text{mV} * 1,45 = 21,75\text{pC}$. Dette er veldig svake PD-signaler, og ikke langt over støygrensen. Pulsene kommer rundt 90 grader i negativ halvperiode, og ved 270 grader i positiv halvperiode.

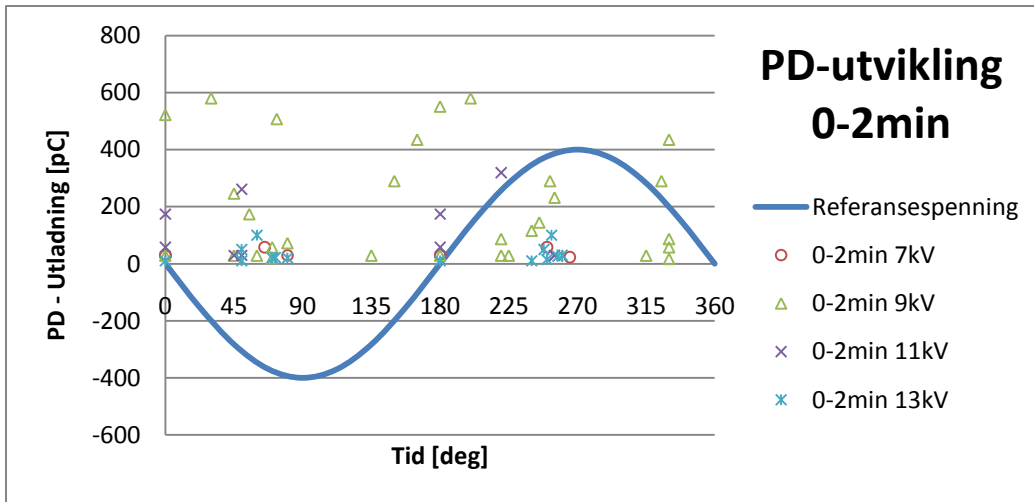
Figur 49 viser utladningsaktivitet rett etter treinitiering. Aktiviteten er betraktelig høyere, men utladningene er fortsatt relativt svake. Ikke 90 grader er belastet, men helt fra (-20) til 90 grader, og 160 til 270 grader.



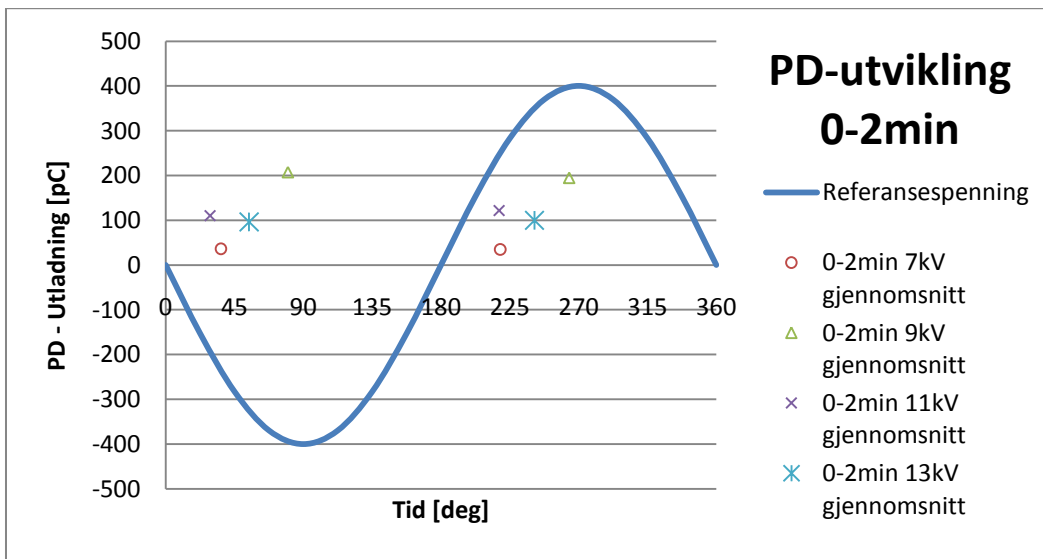
Figur 49 - Akkumulert PD fra 7-9min for sPP6-004 uten hulrom, testet på 9kV. Bildet er tatt ikke lenge etter treinitiering.

Flere av disse målingene er lest av og tegnet i faseplott for hvert av de nevnte tidsintervallene. Alle de målte verdiene for hvert testspenningsnivå vises for 0-2 min i Figur 51, og gjennomsnittsverdiene for hvert spenningsnivå vises i Figur 51. Grafer for tidsintervaller opp til 3-4timer kan finnes i [Vedlegg C], og målebildene av PD-aktiviteten finnes i [Vedlegg E].

Resultater



Figur 50 - Faseplott av PD-aktivitet fra 0-2min etter spenningssetting. Alle de målte verdiene for hvert spenningsnivå er plottet.



Figur 51 - Faseplott for PD aktivitet fra 0-2min etter spenningssetting. Gjennomsnittsverdier for hvert spenningsnivå er plottet.

5. Diskusjon

Målsetningen ved denne oppgaven har vært å finne sammenhenger mellom sPP og iPP med tanke på elektrisk trevekst. Resultatene fra forsøkene med nål-plategap, og målingen av resistivitet i treveksten vil her drøftes i forhold til hypotesene presentert i kapittel 1.2, samt andre betydningsfulle funn. Til sist i kapitlet vil feilkildene ved målingen drøftes etter betydning.

5.1 Produksjon av prøveobjektene

I dette delkapitlet beskrives de oppnådde karakteristika for prøveobjektene.

Vist først blant resultatene er de geometriske målene for prøveobjektene (Tabell 6), og nevnt der skiller gjennomsnittene til 7kV sPP og 11kV iPP ut som betydningsfulle avvik. I tillegg ligger de gjennomsnittlige nåleradiene til hele sPP-opplaget noe over gjennomsnittet til iPP. Dette kan ha hatt betydning for resultatene ved sammenligning mellom de to materialene. Kun disse målene tatt i betraktning så burde målingene for sPP gi både kortere initieringstid, høyere vekstrate og lengre tid til gjennomslag enn de ville vist for mindre nåleradius, kanskje også sammenlignet med iPP. Ved 11kV derimot burde målingene gi iPP den samme effekten, kortere initieringstid, høyere vekstrate og kortere tid til gjennomslag, i det minste tid til jord. Kortere avstand til jord vil i praksis være tilsvarende med økt spenning.

Separat sett viser målene på prøveobjektene at det krever stor presisjon i produksjonen av prøveobjektene når det gjelder oppmåling av nåler, produksjon av støpeform, gjennomføring av støpeprosessen inkludert innføring av nål, og håndtering av prøvene før spenningssetting. I alle ledd av prosessen er det fare for at det oppstår hulrom ved nålespissen eller avstanden til jord blir for stor eller for liten. Derfor har flere prøver blitt forkastet under veis. Men det er en lang og tidkrevende prosess, slik at feil i produksjonen gir følger for den totale mengden nyttige prøver.

5.2 Betydningen av hulrom

Dette delkapitlet inneholder diskusjon av betydningen av hulrom opp i mot hypotese III og IV, initieringstid og tretype.

Som vist i kapittel 4.2 antydte resultatene en sammenheng mellom tilstedeværelse av hulrom ved nålespissen og typen trevekst. Figur 19 og Figur 20 viser to prøver av hvert materiale hvor de to presenterte treveksttypene, enkelgrenet og multippel trevekst til jord, kom ved 9kV. Men en annen tolkning av resultatene trenger ikke nødvendigvis å bety at om man har hulrom så får man gjennomslag ved første kontakt med jord hver gang. Det kan derimot innebære en annen initiering og begynnelse på treveksten som muligens er med på å definere den videre veksten. Det er derimot flere variabler å ta hensyn til, som for eksempel den lokale molekylstrukturen i materialet mellom nåla og jordelektroden. Også geometrien til hulrommet kan ha en innvirkning. Sannsynligvis spiller radiusen på hulrommet like viktig rolle som radiusen på nåla i de to tilfellene. De tydeligste forskjellene i treveksten har vist seg å være tilsynelatende tykkelse på trekanalene for prøver med eller uten hulrom.

Hvordan den videre utartingen ble, er mer avhengig av spenningsnivå og geometriske variabler som avstand til jord og nåleradius.

5.3 Treform

Korrelasjonsberegningen mellom hulrom og type trevekst viste en sterkere sammenheng ved 9 og 11kV enn ved 7 og 13kV testspenning. Av visuell observasjon kan det sies at årsaken til avvikene ved 7kV er en annen enn ved 13kV testspenning. Ved 7kV er spenningen så lav at det later til at kanalene uansett ikke blir tykke nok til å skape gjennomslag momentant når treet først når jordelektroden. Dette gir rom for multiple trekanaler til jord før gjennomslag opptrer for begge prøveobjekttypene. Ved 13kV derimot har spenningen motsatt effekt, og hindrer prøvene som "normalt sett" ville gitt jordvekst, får gjennomslag omtrent med en gang på grunn av det sterke elektriske feltet.

Dette sees også ut i fra figur 12 for gjennomsnittlig trebredde ved gjennomslag i forhold til trelengde, hvor trebredden er betydelig større ved 7kV enn ved de andre testspenningene, både for sPP og iPP. Her viser det seg forøvrig også at iPP har generelt sett bredere vekst, omtrent 60 %, for prøvene med hulrom. Et utypisk resultat for fraktaldimensjonen derimot er den tydelige brede veksten i sPP-prøvene uten hulrom ved 9kV i forhold til de med hulrom. Om dette er et resultat av stokastisk variasjon, eller om det er noe spesielt ved denne feltstyrken som gir slike forskjeller er ikke helt klart. En tanke som følger naturlig av dette er at hypotesen om at hulrom og tretype har en tydelig sammenheng styrkes ved den utypiske oppførselen ved 9kV, og at sammenhengen i virkeligheten ikke er så klar.

Figur 13, som beskriver tidsutvikling av gjennomsnittlig trebredde i sPP, viser en tydelig tendens. Både ved 7, 9 og 11kV får grafene en positiv knekk mye tidligere for prøveobjekter med hulrom enn for prøvene uten hulrom. Forskjellen er tydeligst ved 7kV hvor grafen med hulrom ikke viser til noen breddevekst før den får en tilnærmet 90 grader knekk det siste stykket. Ved 9kV er ulikheten ikke så markant, men grafen uten hulrom ligger godt over grafen med hulrom langs hele levetiden til prøvene. For 11kV er det også en forskjell, men i mye mindre grad siden tiden til gjennomslag er betydelig kortere enn for de lavere spenningsnivåene.

For iPP kan forskjellene bare sammenlignes for 7 og 9kV grunnet mangel på prøvemateriell med hulrom for testene ved de høyeste spenningene. Forskjellene er ikke så tydelige i dette materialet, og de forteller om motsatte forhold enn for sPP ved 7kV. I iPP prøvene ved 7kV er det prøvene med hulrom som får den bredeste veksten, og som begynner å vokse i bredden tidligst. Ved 9kV er det derimot prøvene uten hulrom som får bredest trevekst, noe som ligner mer på resultatene fra sPP.

Når det gjelder figur 15 og 16 som beskriver tidsutvikling av gjennomsnittlig trelengde i prosent av total avstand fra nål til jord, viser disse noe av det samme som breddegrafene gjorde. For sPP skiller 7kV med hulrom seg ut ved at prøvene heller ikke vokser nevneverdig i lengderetning før helt mot slutten av levetiden. Dette får en til å trekke paralleller med buskveksten i PEX, som kjennetegnes med stagnering i lengde og bredderetning, men som får store mengder trekanaler med omtrent lik lengde, bredde og tykkelse i et busklignende

virvar før det til slutt vokser en enkel og noe tykkere gren mot jord som forårsaker gjennomslag. Men studering av bildene [Vedlegg E viser at likheten ikke er fullstendig. I sPP er det ikke et utall av små kanaler som vokser oppå hverandre, men et par korte kanaler som vokser seg tykkere og tykkere før et utskudd strekker seg mot jord. I tillegg kommer jordveksten som oppstår når det ikke blir noe øyeblikkelig gjennomslag etter kontakt med jord.

7kV iPP med hulrom skiller seg også ut ved at veksten i lengderetning går sakte i de første 11 minuttene før vekstraten skyter i taket og ser ut til å gå mot jord raskere enn for noen av de andre prøvene.

En fellesnevner for alle sPP-prøvene, unntatt 11kV uten hulrom, er en relativt hurtig vekst fra mellom 20 og 40% (avhengig av spenningsnivå) og opp til 80% av total avstand til jord, før treveksten opplever en stagnering og utflating de siste 10-20 %. For iPP er starten på veksten omtrent den samme, men det er bare prøvene ved 9kV som opplever den samme stagneringen de siste 10-20 %.

Som en mer generell beskrivelse kan man si at sPP-prøvene ved 11 og 13kV ser ut til å bruke like lang tid til jord, og prøvene ved 7 og 9kV har tilsvarende oppførsel, bortsett fra 9kV uten hulrom. Dette kan være en indikasjon på at det ligger et skille i treoppførsel mellom 9 og 11kV.

5.4 Initieringstid

Dette delkapittelet behandler diskusjonen av resultatene som berører hypotese I og III om initieringstid med eller uten hulrom.

Figur 19 sammenligner den gjennomsnittlige initieringstiden for sPP og iPP for hvert spenningsnivå, og i forhold til hulrom. Ut i fra denne kreves et par oppklarende kommentarer. For 7kV m/hulrom iPP, og 13kV m/hulrom sPP mangler gjennomsnittet på grunn av at det er lik null og faller utenom skalaen i skjemaet. For 11kV og 13kV m/hulrom finnes ingen iPP-prøver med hulrom, og derfor mangler også søyler der.

På grunnlag av dette kan man se fra søylediagrammet at sPP har mye lengre initieringstid for prøver ved 7kV. Det er tydeligst at det er slik for 7kV med hulrom, men siden diagrammet har logaritmisk y-akse får ulikhetene for 7kV u/hull og 7kV totalt større utslag.

For 9kV vises den samme trenden, men med mindre forskjeller. Prøvene uten hulrom har lengre initieringstid, og for prøvene med hulrom er det sPP som har lengst initieringstid. Derimot presterer iPP bedre for prøvene uten hulrom. Som vist i Tabell 7 ser vi eksempler på store prosentvise forskjeller i begge retningene.

På 11kV nivået presterer de to materialene forholdsvis likt med en tanke lengre initieringstid for sPP prøvene uten hulrom. Derimot siden det ikke er noen iPP-prøver med hulrom på dette spenningsnivået, blir bare den totale gjennomsnittstiden til sPP trukket ned av prøvene med hulrom, og 11kV iPP totalt ender opp noe høyere enn 11kV sPP totalt.

Ved 13kV har sPP betydelig lengre initieringstid enn iPP.

Disse resultatene antyder sterkt at sPP har generelt sett lengre initieringstid enn iPP, spesielt for prøver med hulrom, men også til en viss grad uten hulrom. Det er dermed ingen klar sammenheng mellom hulrom og initieringstid for sPP-prøver.

Derimot om vi sammenligner disse prestasjonene med gjennomsnittsverdiene for nåleradius i de benyttede prøvene, kommer det fram at sPP-prøvene generelt sett har blitt utsatt for noe lavere feltstyrke ved spissene på grunn av de noe større nåleradiene. Dette har likevel ikke hatt noen betydningsfull innvirkning om Jiangs [11] argumenter om nåleradius kan legges til grunn.

5.5 Vekstrate

Illustrering av vekstraten i Figur 32 og Figur 36 viser litt ulike resultater. Figur 32 viser gjennomsnittlig vekstrate for alle prøvene ved ulike spenningsnivå. Denne viser trenden at sPP har omtrent lik vekstrate som iPP for 7kV og 9kV, men har betydelig høyere hastighet mot jord for 11 og 13kV enn for de lavere testspenningene. Det spesielle med denne situasjonen er at forskjellen kommer av at vekstraten i iPP stagnerer fra 9kV og er tilnærmet stabil for 11 og 13kV.

Tidligere erfaring [1] har vist tendenser til at både PEX og sPP har tilnærmet proporsjonale forhold mellom spenningsnivå og vekstrate. I forhold til Figur 7 og Dodds [14] teorier for trevekst i LDPE (Low Density Poly Ethylene) burde det dog være omvendt proporsjonale utviklinger i spenningsområdet 9-13kV. Nivået på vekstraten ligger også noe over tilfellet for LDPE.

5.6 Tid til gjennomslag

Dette delkapittelet behandler tid til gjennomslag og tid til jord som parametre til å vurdere hypotese II. Tid til gjennomslag er et tydelig mål på levetid, og i så måte kan også tid til jord også være det. Tidligere studier av elektrisk trevekst i blant annet PE, PEX, og epoksymaterialer har, så fremt forfatteren har klart å finne dokumentasjon på, ikke behovd å forholde seg til denne parameteren siden gjennomslag har forekommet ved første registrerte kontakt med jord. Derfor er det lite annen materiale å sammenligne disse med enn tid til gjennomslag. Likevel presenterer denne parameteren noen interessante resultater.

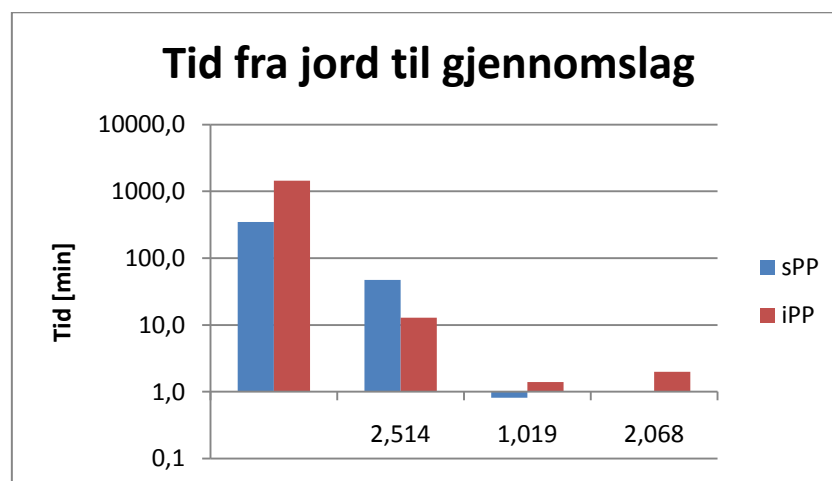
Det kommer tydelig fram av Figur 39 og Figur 40 at treveksten bruker mye kortere tid på å nå jordelektroden i sPP enn i iPP for 7kV. For 9kV har sPP et noe bedre gjennomsnitt, men i de resterende klassene har iPP en noe lengre tid før treet når jordelektroden.

Det mest bemerkelsesverdige ved disse resultatene er noe som også har kommet fram av andre resultater. Tiden før treveksten når jord er omtrent lik for 11 og 13kV. Dette gjelder for begge materialene. Ytterpunktene er for så vidt forskjøvet i forhold hverandre, men gjennomsnittet for 13kV er faktisk noe lengre enn for 11kV for både sPP og iPP. For iPP kan dette forklare med den kortere gjennomsnittlige avstanden til jord for 11kV, og dermed en hurtigere vekstrate, men ikke for sPP, hvor forholdet er motsatt, noe som burde motvirket denne trenden.

På den annen side kan man si at den betydelige forskjellen mellom tid til jord ved 7kV er spesiell på grunn av forskjellen mellom nåleradiene. Om sammenhengen skulle innvirke på tid til jord, så burde muligens ikke iPP vist så mye lengre tid enn sPP. Noe forskning mener nåleradien kun har innvirkning på initieringstiden, men som denne oppgaven forsøker å vise er at nåleradien kan ha en sammenheng med hva som skjer i selve initieringen og dermed hvordan treveksten utarter seg.

Om man ser bort fra prøvenes geometriske ulikheter kan en annen mulig forklaring på den lengre tiden til jord hos iPP ligge i de krystallinske områdene. Hver utladning som skjer ved spissen av treet vil ha en gitt energimengde å fordele på det omkringliggende materialet. For iPP som har relativt store sfæruitter i forhold til sPP (som har omtrent ingen), vil det være nok av sterke bindinger å belaste utladningsenergien på. Energimengden som "treffer" de svake mellomliggende bindingene, som vil være førstevalget for treveksten å gro, vil være minimal i forhold til i sPP, hvor slike forhold vil befinne seg i alle retninger. Teorien bygger på flaskehalsprinsippet. For høye spenninger derimot vil utladningene bli så kraftige at til og med de sterkere intermolekylære bindingene blir brutt, og forskjellen i vekstrate blir mindre.

Tid til gjennomslag er presentert i Figur 37 og Figur 38 og viser generelt sett et lengre gjennomsnitt for iPP enn for sPP ved 7, 11 og 13kV. For 9kV derimot har sPP lengre tid til gjennomslag enn for iPP. Dette er tilsvarende som for tid til jord. Det mest iøynefallende er det store ytterpunktet på 9kV sPP hvor tiden er under ett minutt. En nærmere titt på bakgrunnstallene viser at denne verdien kommer av en prøve med hulrom som har avstand til jord på 916 μ m, og initieringstid lik null. Fra Figur 52 vises tiden mellom jordkontakt og gjennomslag. iPP har tydelig lengre tid på å utvikle jordvekst enn sPP for alle spenningsnivåene. Dette sammenfaller med gjennomsnittlig trevekstbredde ved gjennomslag for 7, 11 og 13kV vist i Figur 24, men ikke for 9kV. Dette styrker inntrykket av en forskjell i oppførsel rundt denne spenningen, eventuelt at det finnes en ulikhet i prøvene benyttet ved dette spenningsnivået for begge materialene, som ikke er blitt registrert.



Figur 52 - Tid fra trekanalene når jord, til gjennomslaget inntreffer. Viser hvor lenge eventuell jordvekst pågår.

Differansen mellom tid til jord og tid til gjennomslag er presentert i Figur 52. Her vises tendensen til at de elektriske trærne har mindre tid til å vokse lateralt før gjennomslag, ved 7 og 9kV. Ved 7kV bruker iPP lengre tid til gjennomslag, men ved 9kV bruker sPP lengst tid.

Dette samsvarer også med resultatene for tid til jord, og tid til gjennomslag, så ulikhetene gjelder for alle ledd i treveksten.

5.7 Gjennomslagskanal

Som nevnt i kapittel 4.9.2 var 68% av det totale antall prøver som fikk gjennomslag gjennom den første trekanalen som nådde jord. Dette antyder at det er en viss sammenheng, uten at datagrunnlaget er godt nok til å kunne konkludere. Ut i fra bakgrunnstallene er det en større avhengighet ved 13kV (nesten 100 %) enn ved de lavere spenningene.

Korrelasjonsberegningene i forhold til prøver med eller uten hulrom endte også med en spenningsavhengighet hvor denne sammenhengen er sterkest for sPP ved 9kV, og ble målt til 0,81. Sammenhengen ved 7kV sPP har derimot motsatt fortegn. Med andre ord var det flere prøver uten hulrom ved 7kV sPP som fikk gjennomslag gjennom første trekanal mot jord. Her er det dermed ingen entydige resultater, men en antydning om spenningsavhengighet.

5.8 Levetidskurve

Som vi ser fra Figur 41 er alle levetidskurvene i normal skala og tilpasset de plottede verdiene godt. Generelt sett er alle de tilpassede kurvene noenlunde parallelle, som kan bety at nedbrytningen av materialet kommer av like prosesser. Dette stemmer godt over ens med prøvene og testingen, at det stort sett er hulromsutladninger som bryter ned isolasjonen.

Alle "n"-verdiene til de tilpassede kurvene befinner seg innenfor de empirisk tilegnede verdiene for syntetiske polymerer som Ildstad [3] presenterer på 8-14. I forhold til Kreugers [9] teorier om forskjell mellom objekter med og uten hulrom synes sPP-verdiene å nærme seg en motsatt sammenheng. For sPP med hulrom ble $n=14,12$, og sPP uten hulrom ble $n=10,57$. iPP-verdien med hulrom, $n= 8,11$ og for prøver uten hulrom, $n= 11,65$ faller utenfor de gitte intervallene til Kreuger på 10-12 for blokkobjekter med hulrom, og $n>17$ for isolasjon uten hulrom. Resultatene av dette kan tyde på at sPP-prøvene med hulrom har lengre levetid enn prøvene uten, mens iPP-prøvene med hulrom har, som forventet, kortere levetid enn prøvene uten hulrom. Videre kan det kommenteres at n-verdien til iPP-prøver med hulrom ligger i nedre sjikt, og kan betegnes slav. Levetiden for slike prøver er med andre ord lav.

5.9 Konduktivitetstest

Dette delkapittelet behandler resultatene fra konduktivitetstesting med tanke på hypotese V: Enkelgrenet elektrisk trevekst har større konduktivitet enn multiplere grenet trevekst. Disse resultatene ble presentert i Figur 44 med lekkstrøm i trekanalen, og i Figur 45 med den dertil beregnede resistansen. Testingen er kvalitativ og består av 5 sPP-prøver for sammenligning av multiplere trevekst, enkelgrenet trevekst og referanseprøver uten trevekst. På forhånd ble det beregnet en forventet verdi på denne resistansen ut i fra en teoretisk motstandsverdi på $2,5 \cdot 10^5 T\Omega$. Ved første blick på plottene av lekkstrøm kommer den

proporsjonale sammenhengen mellom strøm og spenning fram i form av lineær økning i strøm for økt spenning. Videre kommer det fram at sPP6-004 med multiple grener ved 1489 μm registrerte høyeste målte lekkstrøm for alle spenningsnivåene. Isolert sett ville dette kunne tolkes til at det store antallet trekanaler gir større ledningsevne enn både referanseprøven og prøven med en enkel gren mot jord. Derimot viste samme prøve noe lavere strøm ved kortere avstand(681 μm), men med en ulineær innsvingning mot de første verdiene for det høyeste spenningsnivået. Mest sannsynlig er dette et tegn på gjenværende romladninger i isolasjonen, som setter opp motfelt og begrenser strømmen når spenningen er for lav til å overgå dette nivået. Denne mekanismen er så treg at måleresultater vil la seg påvirke av den selv dager etter. For å unngå denne effekten ble prøveobjektene kortsluttet etter hver måling, i 3-5 timer. Om antakelsen om mekanismen stemmer viser grafene at dette tidsintervallet ikke var lenge nok, og det fortsatt befinner seg romladninger i isolasjonen som begrenser strømmen. Noe som taler mot denne antakelsen er plottene til sPP7-003 referanseprøven som har stikk motsatt opptreden. Den første målingen ved 1170 μm avstand viser lavere strøm enn den andre målingen ved 571 μm . Om teorien om romladninger skulle passe inn burde resultatene være byttet om for referanseprøven. Holdfastheten til resultatene svekkes også av den siste prøven, sPP7-002 enkelgrenet trevekst ved 881 μm . Denne har laveste målte lekkstrøm av alle prøvene, til og med lavere enn referanseprøven. Grunnen til dette kan være at de faktiske strømmene er så små at de er påvirket av støy.

5.10 PD-målinger

Dette delkapittelet søker å behandle PD-målingene for å bruke disse til å sette lys på elektrisk trevekst generelt. Figur 50 og Figur 51 viser faseplott for 0-2min PD akkumulering, og resten av faseplottene kan sees i [Vedlegg C]. Av disse kommer det fram at gjennomsnittsverdiene ligger rundt 45grader for negativ halvperiode, og 225 for positiv halvperiode. Det er også entydig at gjennomsnittsverdiene for 9kV ligger lengst mot høyre for alle målingene opp til 10min. I styrke ligger 9kV også høyest i sammenligningen ved hvert tidsintervall.

De sterkeste utladningene for prøvene ved 9kV ligger i området 400-500pC, mens den høyeste gjennomsnittsverdien er det 7kV som står for på rundt 1000pC. Den største akkumulerte PD-målingen ble gjort i intervallet 10-20min for 9kV. Utladningsstyrken var på rundt 1740pC. Ved å studere bakgrunnsdataene kan dette settes i sammenheng med hulrom ved nålespissen, stagnering av veksten i det aktuelle tidsrommet, og en vekst som har kommet ca 40 % av total lengde mot jord.

Det at prøvene ved 7kV får en topp etter nærmere 50min, og etter 2-3 timer er et tegn på at PD-aktivitet skjer senere ved lavere spenningsnivå, men styrken på utladningen er minst på høyde med det målt ved de høyere spenningsnivåene.

5.11 Feilkilder

Prøveproduksjonen

Den største feilkilden i dette forsøket introduseres i produksjonsprosessen i form av for store eller små avstander mellom nålespissen og jordelektroden i prøvene. Nåleradiene er også kritisk viktig å få så små og med så lite variasjon mellom prøvene som mulig. Et problem i produksjonsprosessen som gjør at slike variasjoner oppstår er først og fremst variasjonen fra nåleprodusenten i både nålelengde og radien på nålespissen. Dette har det blitt tatt høyde for å minimere følgene av, nøyte forklart i prosjektoppgaven [1], men som stort sett

Diskusjon

innebærer oppmåling av hver enkelt nål, og tilpassing av støpeformen med mellomleggsringer.

En annen feilkilde er ukontrollert forurensing i isolasjonsmaterialet. For å få kontroll på så mye som mulig ble det gjort flere tiltak, deriblant ekstrudering. I tillegg ble all operasjon utført under flowbenk (en lukket arbeidsbenk med vifte og luftrenser), alt materiell ble rensset med isopropanol, bruk av engangshansker og generell vaksomhet mot urenheter.

Å sørge for å få isolasjonsmaterialet så homogent som mulig, og likt fra prøve til prøve ble det tilstrebet likhet i produksjonsprosessen, samt målinger av temperatur og trykk i ekstruderings- og støpeprosessene. Selve ekstruderingen var også et verktøy for å oppnå homogen masse i prøveobjektene.

Spenningstesting

Potensielle feilkilder ved målinger av partielle utladninger er mange. Slike målinger er følsomme for all mulig aktivitet i nærheten. Det er blitt registrert at lys i samme rom skrues av og på, bruk av bormaskin og andre motoriserte verktøy har også virket inn. For å unngå så mange som mulig av slike feilkilder ble det forsøkt å avpasse tidspunkt for målingene for å unngå slike hendelser. Andre potensielle utladningskilder i kretsen er likevel hovedkilden, og det man må tilstrebe å fjerne. Spesielt skarpe kanter på ledere og kontaktpunkter er utsatte, samt steder med fare for overslag gjennom luft fra leder til jord. Alle skarpe kanter ble derfor utstyrt med koronaringer for utjevning av det lokale elektriske feltet. Kritiske steder i kretsen, som nær prøveobjektet og mikroskopet ble det tatt ekstra hensyn for å sørge for stor nok avstand mellom ledende deler og jordede deler, i tillegg til jording av alle metalliske komponenter i testcellen.

Også ved PD-måling ble måleverdiene lest av manuelt fra skjermbilder på oscilloskop. Dette åpner for store feilkilder siden avlesningen blir 3-ledd i selve informasjonsgangen.

Preliminære forsøk med iPP avdekket lavere transparens, noe som påvirker presisjonen ved bestemmelse av initieringstid og tid til jord for elektriske trær enn for sPP og PEX.

Konduktivitetstesting

Problemer ved denne prøvemethoden er oppsamling av romladninger i isolasjonen som forårsaker utladende strømmer i relaksasjonssammenheng. De praktiske følgene av dette er at all testing måtte starte ved de laveste spenningene og gradvis økes siden relakseringen er treg, og urelevant i forhold til ledningsevnen. Et forsøk på å motvirke denne effekten ble utført i forsøkene ved å kortslutte prøvene i noen timer. Dette viste seg å ikke være lenge nok til å få upåvirkede nye målinger. Dette bør også gjøres før første strømmåling etter treveksten.

Andre forhold å forholde seg til er kontaktspenninger i målekretsen, og strømmer som følge av disse. Dette løses ved å bruke "zero correct" funksjonen på elektrometeret ved kortsluttet krets slik at de konstante strømmene på grunn av ulikt potensial ved metallene i kretsen ikke tas med i målingene.

I tillegg må man minimere feilmålinger på grunn av lange kabelstrek og uskjermede kabler som plukker opp induktiv støy.

Følsomheten til elektrometeret er så stor, og de aktuelle strømmene så små at innvirkning av støy blir betydelig. Potensielle måter å omgå denne problemstillingen på kan være å sette spenning på flere prøver i parallell og måle den totale strømmen gjennom disse. I forhold til denne strømmen blir støyen liten. Typen trevekst må da naturligvis være lik i alle prøvene for å få sammenlignbarhet.

Bruk av mikrotom for å kutte opp prøvene er en potensiell feilkilde for ny oppmåling av avstand til jord om knivbladet er ruglete og uskarpt. Skyggene av den ujevne kanten vil gjøre jordkanten uklar og vanskeligere å definere. Dette gjelder også ved oppmåling av andre deler av trekanalene.

Potensiell feilkilde ved prepareringen av prøveobjektene for resistanstesting var ved ny påføring av jordelektrode. Det ble pusset ned litt på jordsiden slik at sølvepoksen skulle feste seg bedre. Dette kan ha forårsaket dårligere kontakt med karbonet i trekanalene, noe som ville ha påvirket resultatet.

Diskusjon

6. Konklusjon

Arbeidet med denne masteravhandlingen har ledet frem til følgende hovedkonklusjoner:

- Resultatene antyder at hulrom ved nålespissen i nål-plategap påvirker tykkelsen av trekanalene, og dermed mengden karbonisert isolasjonsmateriale. Videre vises det til en middels sterk sammenheng mellom denne parameteren og spenningsnivå som definerende for type trevekst. Med type trevekst menes her én eller multiple trekanaler i kontakt med jord før gjennomslag.
- Hulrom ved nålespissen har vist en sterk tendens til å påvirke antall trekanaler mot jord for 9 og 11kV, men ikke 7 og 13kV, altså gjelder det i kombinasjon med spenningsvariasjoner. Det er ikke avdekket noen tydelig sammenheng mellom omfanget av jordveksten og hulrom.
- Hulrom ser ikke ut til og nevneverdig påvirke tid til jord og tid til gjennomslag i sPP, om noe så ved å forlenge levetiden noe.
- Resultatene viser ingen tydelig sammenheng mellom hulrom og initieringstid i sPP.
- Initieringstiden i sPP tenderer mot å være lengre enn i iPP.
- Den gjennomgående tendensen i resultatene er at elektrisk trevekst vokser raskere i sPP enn i iPP. Dette gjelder både tid til treveksten når jord, og tid til gjennomslag.
- I motsetning til nevnte tendens har sPP vist generelt bedre verdier ved 9kV enn iPP.
- Resultatene fra resistansmålingene av trekanaler i sPP var inkonsekvente. Forsøksmetoden krever videre utvikling og større prøvemengder.

6.1 Videre Arbeid

Gjennom prøving, feiling og studering av denne oppgaven har det åpenbart seg flere mulige fremgangsmåter for å studere elektrisk trevekst i sPP videre. Flere forslag er listet opp under

Vise til likheter mellom trevekst og mekaniske sprekkdannelser i diverse materialer. Etter private samtaler med sivilingeniør i maskin kunne sammenhenger mellom tretthetsbrudd og utmatting av materialer knyttes til dannelsen av elektrisk trevekst. Blant annet blir ultralyd brukt til å avdekke sprekkdannelser i bygningsbransjen for både metaller og betong. Om man eksempelvis stanser trevekst midtveis og måler med ultralydverktøy for å prøve å detektere sprekkdannelsene vil dette muligens være behjelpelig for å avdekke trevekst i kabelisolasjon. Den dypere forklaringen på fremveksten av elektrisk trevekst kan kanskje også nærmere knyttes til trykkrefter og lokal oppbrytning av molekylkjeder på grunn av varmgang.

En mer direkte utvidelse av forsøkene kan være å måle tykkelsen på trekanalene for de ulike trevekstene, også i forskjellige avstander fra nålespissen. Eksempelvis ville det vært

Konklusjon

interessant å dissekere prøvene som viste enkelgrenet trevekst, og ta prøver for å finne hvilke stoffer som befinner seg i trekanalene før og eventuelt etter gjennomslag. I tillegg til klassifisering av iboende trykk- og strekkrefter i sPP etter støping/ekstrudering.

Prøving ved andre spenningsnivå kan være interessant, kanskje spesielt ved 10kV på grunn av det indikerte skillet mellom 9 og 11kV i propagert trelengde som prosent av total lengde per tid. Også lavere spenninger enn 7kV kan være interessant å studere for å få mer realistiske feltstyrker. Problemet med dette vil selvfølgelig være den lange tiden slike forsøk vil ta. Mulige løsninger av slike utfordringer kan være å finne måter å spenningssette flere prøveobjekter samtidig. Dette kan også benyttes for å øke det statistiske grunnlaget.

Utvidelse av resistansmålingene med å endre på prøveoppsettet slik at man måler den totale lekkstrømmen gjennom flere like prøveobjekter (med tilsvarende trevekst) parallelt. En slik sammenligning av måleresultater vil være mindre følsom for støy

Et annet punkt som bør fokuseres på for å forbedre konduktivitetstesting er å benytte et tydeligere system ved dissekering av prøvene med mikrotom, og mer nøyaktig måling mellom kutt for å få like avstander til jord mellom hver strømmåling.

Et forbedringspotensial ved denne oppgaven er behandlingen av PD-målingene. Et bedre system for å registrere målingene er nødvendig slik at ikke bare utladningsnivå registreres, men også antall utladninger. Dermed kan tilsynelatende energinivå utladet i isolasjonsmaterialet beregnes. Til denne funksjonaliteten finnes spesialdesignet utstyr og programvare, eksempelvis Omicron MPD600.

7. Bibliografi

- [1] Ketil Stokland, "Elektrisk trevekst i polypropylen (PP) og tverrbundet polyetylen (PEX) kabelisolasjon," NTNU, Trondheim, Spesialiseringsprosjekt 2009.
- [2] Anders Isnes(redaktør). (2007, Desember) Norsk Kjemi Selskap(NKS) for Nasjonalt senter for naturfag i opplæringen. [Online].
http://www.naturfag.no/artikkel/vis.html?tid=810446&within_tid=689025_11.12.2007
- [3] Erling Ildstad, *Compendium Electric Power Engineering TET4160 High Voltage Insulating Materials.*: NTNU, 2007.
- [4] A.R.Blythe, "Electrical Properties of Polymer - Cambridge Solid State Science Series," in *Electrical Properties of Polymers - Cambridge Solid State Science Series.*: Cambridge University Press, 1979.
- [5] Yoshiji Matsuda, Asakiyo Ueda, Tsuyoshi Demura, Yoshitsugu Miyashita, Katsumi Yoshino Kiyoshi Kurahashi, "The Application of Novel Polypropylene to the Insulation of Electric Power Cable," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES , vol.2, 2002, pp. 1278-1283.*
- [6] Ildstad Hølto, "Electrical Tree Growth in Extruded s-Polypropylene," NTNU, SINTEF, Trondheim, Conference Paper 2010.
- [7] Dr. N.Parkman, Professor K.Overshott D.U.Morgan, *Electrical Degredation and Breakdown in Polymers*, 4th ed., Peter Peregrinus, Ed.: IET Materials and Devices.9, 1992.
- [8] K Yoshino et al., "Novel properties of new type conducting and insulating polymers and their composites," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 3, pp. 331-344, June 1996.
- [9] F.H.Kreuger, *Industrial High Voltage*. Delft, Nederland: Delft University Press, 1991.
- [10] Erling Ildstad, *Compendium for Condition Assessment of High Voltage Apparatus ELK-30*. Trondheim: NTNU, Institutt for Elkraftteknikk, 2009.
- [11] Jinbo Kuang, Steven Boggs, Grace Jiang, "Critical Parameters for Electrical Tree Formation in XLPE," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 292-296, April 1998.
- [12] D.W. Auckland M.N. Arbab, "The influence of vibration on the," *IEEE Proceedings*, vol. 133, no. Part A, No.9, December 1986.
- [13] Jorunn Hølto and Erling Ildstad, "Comparison of Electrical Treeing in Polypropylene and Cross linked Polyethylene," *Nord-Is09*, October 2009. [Online].
<http://www.sintef.com/upload/31795/H%C3%B8lto2009coe.pdf>

- [14] J.V. Champion, Y. Zhao, A.S. Vaughan, S.J.Sutton, S.G.Swinger S.J. Dodd, "Influence of Morphology on Electrical Treeing in Polyethylene Blends," *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 150, no. 2, pp. 58-64, March 2003.
- [15] George Chen Xiaoquan Zheng, "Propagation MEchanism of Electrical Tree in XLPE Cable Insulation by investigating a Double Electrical Trre Structure," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 3, pp. 800-807, June 2008.
- [16] H.Ding B. R. Varlow, "Mechanically Prestressed Composite Dielectrics and Improvement," in *International Conference on Solid Dielectrics*, Toulouse, 2004.
- [17] Sverre Hvidsten, "Deteksjon av begynnende havari av 145kV PEX-kabel endeavslutninger," Sintef Energiforskning AS, Trondheim, Teknisk Rapporttype 2,5,6,8, 2003.
- [18] G.M.L.Sommerman, "Electrical Tracking Resistance of Polymers," *Fellow AIEE*, pp. 969-974, 1960.
- [19] H.F.a.K.N. Y.Sakamoto, "Investiagation on Test Method of DC XLPE Cable," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. Pas-101, no. 6, pp. 1352-1362, 1982.
- [20] J.H. Mason, "The Deterioration and Breakdown of Dielevtric Resulting From Internal Discharges," in *IEE vol 98*, 1951, pp. 44-59.
- [21] Xishun Xic Huang Ziaoqin, "The Effect of X-ray Radiation on Conductivity of PP Film," in *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Baltimore, MD USA, 1992, pp. 189-191.
- [22] Keithley Instruments Inc., *Model 6485 Pocoammeter Instruction Manual*. USA: Keithley Instruments Inc., 2001.

8. Vedlegg

Vedlegg A: Datablad

- sPP
- iPP
- Silikonolje, tyktflytende
- Silikonolje, tyntflytende
- Sølvepoksy

Vedlegg B:

- Utstysrliste
- Ekstruderingsinstillinger
- Støpeinstillinger

Vedlegg C:

- PD-grafer

Vedlegg D:

- Trevektstgrafer

Vedlegg E: DVD 1

- Behandlet materiale
 - Karakteriseringsdata av prøveobjekter (.xls)
 - Karakteriseringsdata av trevekt (.xls)
 - PD-data(.xls)
 - Temperaturdata(.xls)
 - Konduktivitetttest måledata(.xls)
- Råmateriale
 - Bilder og video av elektrisk trevekt
 - Prøvesett: sPP6, sPP7, sPP8

Vedlegg F: DVD 2

- Råmateriale
 - Bilder og video av elektrisk trevekt
 - Prøvesett: iPP1, PEX3, PEX4, sPP5, sPP9

Vedlegg G: DVD 3

- Råmateriale
 - Bilder og video av elektrisk trevekt
 - Prøvesett: iPP2

Total Finaplas® 1471 Copolymer Syndiotactic Polypropylene

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polypropylene](#)

Material Notes: FINAPLAS® 1471 is a syndiotactic form of copolymer polypropylene via ATOFINA proprietary technology. Syndiotactic is a lower melting, lower crystallinity form of polypropylene. FINAPLAS® 1471 complies with FDA regulations Title 21 CFR Section 177.1520 (c) 3.1 and may be used under these provisions for food contact and packaging.

Application

FINAPLAS® 1471 is a high melt strength grade recommended for extruded sheet and film constructions.

Information provided provided by Total Petrochemicals.

Total Petrochemicals now includes former Fina and Atofina plastics product lines.

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.880 g/cc	0.0318 lb/in ³	ASTM D1505
Melt Flow	4.00 g/10 min	4.00 g/10 min	ASTM D1238
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	15.2 MPa	2200 psi	ASTM D638
Elongation at Break	300 %	300 %	ASTM D790
Elongation at Yield	10.0 %	10.0 %	ASTM D790
Tensile Modulus	0.483 GPa	70.0 ksi	ASTM D638
Flexural Modulus	0.345 GPa	50.0 ksi	ASTM D638
Izod Impact, Notched	6.41 J/cm	12.0 ft-lb/in	ASTM D256A
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Melting Point	130 °C	266 °F	DSC-2 Differential Scanning Calorimeter
Optical Properties	Metric	English	Comments
Haze	4.80 %	4.80 %	ASTM D1003
Yellow Index	-1.70 %	-1.70 %	ASTM D1925

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.



Polypropylene RF365MO

Description

RF365MO

Applications

Closures Excellent transparency
Thin wall containers

Special features

Improved gloss and excellent transparency Good impact strength
Shows excellent antistatic performance High stiffness

Physical Properties

Property	Typical Value	Test Method
<small>Data should not be used for specification work</small>		
Density	905 kg/m ³	ISO 1183
Melt Flow Rate (230 °C/2,16 kg)	20 g/10min	ISO 1133
Tensile Modulus (1 mm/min)	1.150 MPa	ISO 527-2
Tensile Strain at Yield (50 mm/min)	11 %	ISO 527-2
Tensile Stress at Yield (50 mm/min)	29 MPa	ISO 527-2
Heat Deflection Temperature (0,45 N/mm ²) ¹	80 °C	ISO 75-2
Charpy Impact Strength, notched (23 °C)	5,5 kJ/m ²	ISO 179/1eA
Hardness, Rockwell (R-scale)	82	ISO 2039-2

¹ Measured on injection moulded specimens acc. to ISO 1873-2

Processing Techniques

This product is easy to process with standard injection moulding machines.

Following moulding parameters should be used as guidelines:

Melt temperature	210 - 260 °C	
Holding pressure	200 - 500 bar	Minimum to avoid sink marks.
Mould temperature	30 - 40 °C	
Injection speed	High	

Shrinkage 1 - 2 %, depending on wall thickness and moulding parameters



Polypropylene RF365MO

Storage

RF365MO should be stored in dry conditions at temperatures below 50°C and protected from UV-light. Improper storage can initiate degradation, which results in odour generation and colour changes and can have negative effects on the physical properties of this product.

Safety

The product is not classified as a dangerous preparation.

Recycling

The product is suitable for recycling using modern methods of shredding and cleaning. In-house production waste should be kept clean to facilitate direct recycling.

Please see our Safety Data Sheet for details on various aspects of safety, recovery and disposal of the product, for more information contact your Borealis representative.

Related Documents

The following related documents are available on request, and represent various aspects on the usability, safety, recovery and disposal of the product.

Safety Data Sheet

Recovery and disposal of polyolefins

Information on emissions from processing and fires

Statement on compliance to food contact regulations



Polypropylene
RF365MO

Disclaimer

The product(s) mentioned herein are not intended to be used for medical, pharmaceutical or healthcare applications and we do not support their use for such applications.

To the best of our knowledge, the information contained herein is accurate and reliable as of the date of publication, however we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information.

Borealis makes no warranties which extend beyond the description contained herein. Nothing herein shall constitute any warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.

It is the customer's responsibility to inspect and test our products in order to satisfy itself as to the suitability of the products for the customer's particular purpose. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of our products.

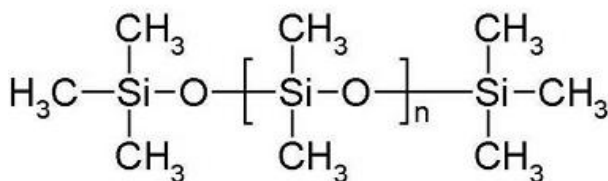
No liability can be accepted in respect of the use of Borealis' products in conjunction with other materials. The information contained herein relates exclusively to our products when not used in conjunction with any third party materials.

WACKER® AK 100

SILICONE FLUID

Product description

Structural formula:



WACKER® AK 100 is a linear, non-reactive polydimethylsiloxane with a viscosity of approx. 100 mm²/s. Due to its chemical structure, WACKER® AK 100 has an outstanding property profile, which sets it apart from organic materials such as mineral oils.

Properties

WACKER® AK 100 is a clear, odorless and colorless liquid.

Special features

- minimal change in physical properties over a broad temperature range
- excellent water-repellent properties
- good dielectric properties
- low surface tension and thus high surface activity
- chemically highly unreactive
- low solidifying point
- high flash point
- high heat resistance
- good solubility in a wide range of solvents

Application

- release agent
- lubricant
- hydraulic fluid

- antifoam agent
- water-repellent agent
- liquid dielectric for electrical and electronic equipment
- heat-transfer oil
- polish additive
- plastics additive
- additive for textile and fiber auxiliaries

For pharmaceutical applications, we recommend specialty silicone fluids from our SILFAR® line. Silicone fluids from our BELSIL® line are available for the cosmetic sector. Whenever particularly high heat and shear resistance is required, we recommend silicone fluids from our AK stab, AK visc and AKC product lines. Specialty grades of the product (available as WACKER® PLASTICIZER) will be needed for use as a silicone plasticizer in RTV-1 sealants.

Processing

Due to WACKER® SILICONE FLUID's many diverse applications, no general processing information can be provided. Parameters will vary from application to application.

Available in a range of viscosities, WACKER® SILICONE FLUIDS AK are miscible with each other in any ratio. The standard product's viscosity can thus be altered to suit your individual needs.

WACKER® AK 100 is a non-polar liquid and is immiscible with polar solvents such as water or short-chain alcohols. In aliphatic and aromatic hydrocarbons, chlorohydrocarbons, ethers, esters, ketones and higher alcohols, WACKER® AK 100 is soluble in any proportion.

Before the product is used with solvents for the first time, it is advisable to perform a lab-scale test. When solvents are used, please remember to read the appropriate hazard information.

Storage

The 'Best use before end' date of each batch is shown on the product label.

Storage beyond the date specified on the label does not necessarily mean that the product is no longer usable. In this case however, the properties required for the intended use must be checked for quality assurance reasons.

Comprehensive instructions are given in the corresponding Material Safety Data Sheets. They are available on request from WACKER subsidiaries or may be printed via WACKER web site <http://www.wacker.com>.

Safety notes

Product data

Typical general characteristics	Inspection Method	Value
Appearance		colorless, clear
Viscosity, dynamic at 25 °C		95 - 105 mPa.s
Density at 25 °C	DIN 51757	approx. 0,96 g/cm ³
Refractive index at 25°C		approx. 1,403
Surface tension at 25 °C		0,021 N/m
Flash point	ISO 2592	> 275 °C
Viscosity, kinematic at 25 °C	DIN 53018	approx. 100 mm ² /s

These figures are only intended as a guide and should not be used in preparing specifications.

The data presented in this leaflet are in accordance with the present state of our knowledge, but do not absolve the user from carefully checking all supplies immediately on receipt. We reserve the right to alter product constants within the scope of technical progress or new developments. The recommendations made in this leaflet should be checked by preliminary trials because of conditions during processing over which we have no control, especially where other companies' raw materials are also being used. The recommendations do not absolve the user from the obligation of investigating the possibility of infringement of third parties' rights and, if necessary, clarifying the position. Recommendations for use do not constitute a warranty, either express or implied, of the fitness or suitability of the products for a particular purpose.

The management system has been certified according to DIN EN ISO 9001 and DIN EN ISO 14001

WACKER is a trademark of Wacker Chemie AG.

For technical, quality, or product safety questions, please contact:

Wacker Chemie AG
Hanns-Seidel-Platz 4
81737 München, Germany
info.silicones@wacker.com

www.wacker.com

Dow Corning® 200 Fluid

FEATURES

- Water-clear silicone fluid available in viscosities up to 1,000,000cSt
- Little change in physical properties over a wide temperature range
- Good heat stability, good oxidation resistance, very low vapor pressures, and high flash point
- Very low pour point
- Low toxicity
- Essentially inert
- Low surface tension - readily wets petroleum surfaces
- Excellent water repellent, release, dielectric and antifoam properties
- Soluble in a wide range of solvents
- Depending on viscosity, insoluble in most crude oil

Additives, mainly foam control agents, for gas and oil processing

APPLICATIONS

- *Dow Corning*® 200 Fluid 1000cSt, 12,500cSt, 60,000cSt, 100,000cSt, 600,000cSt, 1,000,000cSt are widely used during petroleum production and refinery operations for foam control. Extremely small addition levels of fluid effectively control foam in many non-aqueous processing operations. Due to their unique combination of chemical and physical properties, these polydimethylsiloxanes are the most effective antifoams for petroleum applications.
- Main Petroleum applications are in:
 - Gas-oil separation
 - Delayed Coking
 - Vacuum distillation
 - Lubricating oil
 - Asphalt extraction and processing
- Other Petroleum applications:
 - Anti-corrosion through water repellency
 - Coke inhibition in furnace tubes
 - Lubrication
 - Low temperature mechanical fluid

TYPICAL PROPERTIES

Specification writers: These values are not intended for use in preparing specifications. Please contact your local Dow Corning sales representative prior to writing specifications on this product.

	Parameter	Unit	Value
<i>Dow Corning</i>® 200 Fluid 1000cSt			
0176	Appearance		Colorless, odorless fluid
0004/0577	Viscosity 25°C (77°F)	cSt	1,000
0001A	Specific gravity		0.971
0006	Flash point - open cup	°C	>315
		°F	>599
0133	Pour point	°C	-50
		°F	-58
0461	Surface tension	mN/m	21.2
<i>Dow Corning</i>® 200 Fluid 12,500cSt			
0176	Appearance		Colorless, odorless fluid
0004/0577	Viscosity 25°C (77°F)	cSt	12,500
0001A	Specific gravity		0.974
0006	Flash point - open cup	°C	>321
		°F	>609.8
0133	Pour point	°C	-46
		°F	-50.8
0461	Surface tension	mN/m	21.5

TYPICAL PROPERTIES (continued)

	Parameter	Unit	Value
Dow Corning® 200 Fluid 60,000cSt			
0176	Appearance		Colorless, odorless fluid
0004/0577	Viscosity 25°C (77°F)	cSt	60,000
0001A	Specific gravity		0.976
0006	Flash point - open cup	°C	>321
		°F	>609.8
0133	Pour point	°C	-41
		°F	-41.8
0461	Surface tension	mN/m	21.5
Dow Corning® 200 Fluid 100,000cSt			
0176	Appearance		Colorless, odorless fluid
0004/0577	Viscosity 25°C (77°F)	cSt	100,000
0001A	Specific gravity		0.977
0006	Flash point - open cup	°C	>321
		°F	>609.8
0133	Pour point	°C	-33
		°F	-27.4
0461	Surface tension	mN/m	21.5
Dow Corning® 200 Fluid 600,000cSt			
0176	Appearance		Colorless, odorless fluid
0004/0577	Viscosity 25°C (77°F)	cSt	600,000
0001A	Specific gravity		0.978
0006	Flash point - open cup	°C	>321
		°F	>609.8
0133	Pour point	°C	-25
		°F	-13
0461	Surface tension	mN/m	21.6
Dow Corning® 200 Fluid 1,000,000cSt			
0176	Appearance		Colorless, odorless fluid
0004/0577	Viscosity 25°C (77°F)	cSt	1,000,000
0001A	Specific gravity		0.978
0006	Flash point - open cup	°C	>321
		°F	>609.8
0133	Pour point	°C	-25
		°F	-13
0461	Surface tension	mN/m	21.6

DESCRIPTION

Dow Corning® 200 are 100% polydimethylsiloxane fluids, available in different viscosities.

BENEFITS

Effective antifoam in petroleum foaming materials due to its unique combination of low surface tension, inertness, and crude oil insolubility.

HOW TO USE

The main application is in non-aqueous foam control. The starting level of active material recommended in these applications is 10ppm. In many cases, the optimal usage level can end up to be around 1ppm. The fluid is usually pre-diluted in a hydrocarbon solvent, and added continuously by metering pump.

The solvents most often used for this dilution are white spirits, toluene, xylene, diesel, or naphtha, as well as other low molecular weight petroleum fractions.

The viscosity of the *Dow Corning® 200 Fluid* will be selected to suit the application. The primary selection criteria are the insolubility in the foaming system, the working temperature, and the ease of handling.

Higher viscosities are used when gas-oil ratio increases, or when increased thermal resistance is required.

Dow Corning® 200 Fluid 100,000 cSt, 600,000cSt and 1,000,000 cSt for instance, are recommended for use in gas-oil separation of crude oil with a high Gas Oil Ratio, or for use in delayed coking.

Some of the high viscosity materials are also available pre-diluted from *Dow Corning* (e.g. *Dow Corning® 2-1165*).

HANDLING

PRECAUTIONS

PRODUCT SAFETY INFORMATION REQUIRED FOR SAFE USE IS NOT INCLUDED. BEFORE HANDLING, READ PRODUCT AND SAFETY DATA SHEETS AND CONTAINER LABELS FOR SAFE USE, PHYSICAL AND HEALTH HAZARD INFORMATION. THE SAFETY DATA SHEET IS AVAILABLE FROM YOUR LOCAL DOW CORNING SALES REPRESENTATIVE.

USABLE LIFE AND STORAGE

When stored at or below 60°C (140°F) in the original unopened containers, this product has a usable life of 36 months from the date of production.

PACKAGING

Dow Corning[®] 200 Fluid 1000cSt is available in 1kg samples, 25kg pails, 200kg drums and 1000kg IBC's.

Dow Corning[®] 200 Fluid 12500cSt is available in 1kg samples, 20kg pails, 190kg drums and 980kg IBC's.

Dow Corning[®] 200 Fluid 60,000cSt is available in 1kg samples, 20kg pails, 190kg drums and 960kg IBC's.

Dow Corning[®] 200 Fluid 100,000cSt is available in 454g samples, 18.1kg pails, 192.7kg drums and 952.5kg IBC's.

Dow Corning[®] 200 Fluid 600,000cSt is available in 1kg samples and 170kg drums.

Dow Corning[®] 200 Fluid 1,000,000 cSt is available in 1kg samples and 170kg drums.

LIMITATIONS

This product is neither tested nor represented as suitable for medical or pharmaceutical uses.

HEALTH AND ENVIRONMENTAL INFORMATION

To support customers in their product safety needs, Dow Corning has an extensive Product Stewardship organization and a team of Health, Environment and Regulatory Affairs specialists available in each area.

For further information, please consult your local Dow Corning representative.

LIMITED WARRANTY INFORMATION – PLEASE READ CAREFULLY

The information contained herein is offered in good faith and is believed to be accurate. However, because conditions and methods of use of our products are beyond our control, this information should not be used in substitution for customer's tests to ensure that Dow Corning's products are safe, effective, and fully satisfactory for the intended end use. Dow Corning's sole warranty is that the product will meet the Dow Corning sales specifications in effect at the time of shipment. Your exclusive remedy for breach of such warranty is limited to refund of purchase price or replacement of any product shown to be other than as warranted. Dow Corning specifically disclaims any other express or implied warranty of fitness for a particular purpose or merchantability. Unless Dow Corning provides you with a specific, duly signed endorsement of fitness for use, Dow Corning disclaims liability for any incidental or consequential damages. Suggestions of use shall not be taken as inducements to infringe any patent.

Number of Components: Two
 Mix Ratio By Weight: 10:1
 Specific Gravity:
 Part A 3.10
 Part B 0.95
 Pot Life: 4 Hours

Minimum Bond Line Cure Schedule*:
 150°C 15 Minutes
 100°C 1 Hour
 80°C 3 Hours
 60°C 6 Hours
 23°C 3 Days

Shelf Life: One year at room temperature

A heat cure is recommended to achieve optimum properties.

*Note: Container(s) should be kept closed when not in use. For filled systems, mix the contents of Part A thoroughly before mixing the two parts together. *Please see Applications Note available on our website.*

Product Description:

EPO-TEK[®] E4110 is an electrically conductive, silver-filled epoxy paste. This two component system is designed for low temperature curing from ambient to 80°C, although other heat cures can be used.

EPO-TEK[®] E4110 Advantages & Application Notes:

- Ease of use: smooth flowing paste allows for automated dispensing, stamping, brushing, or hand applications. In some cases, the low viscosity nature of the paste allows it to be sprayed onto targets.
- Suggested applications include: EMI and Rf shielding, ITO interconnects in LCDs, low temperature cryogenic cooling.
- Exhibits superior adhesion to a wide variety of substrates including most metals, ceramics, glass and plastics.
- Hybrid / Micro-electronic adhesive including die-attach and substrate attach for Rf and Microwave devices.
- Bright and shiny silver epoxy; provides a metallic-like layer after cure.

Typical Properties: *(To be used as a guide only, not as a specification. Data below is not guaranteed. Different batches, conditions and applications yield differing results; Cure condition: 150 °C/1 Hour ; * denotes test on lot acceptance basis)*

Physical Properties:	
*Color: Part A: Silver Part B: Clear/Colorless	Weight Loss:
*Consistency: Smooth flowing paste	@ 200°C: 0.70%
*Viscosity (@ 100 RPM/23°C): 800 – 1,600 cPs	@ 250°C:
Thixotropic Index: 2.1	@ 300°C:
*Glass Transition Temp.(Tg): ≥ 40°C (Dynamic Cure 20—200°C /ISO 25 Min; Ramp -10—200°C @ 20°C/Min)	Operating Temp:
Coefficient of Thermal Expansion (CTE):	Continuous: - 55°C to 150°C
Below Tg: 48 x 10 ⁻⁶ in/in/°C	Intermittent: - 55°C to 250°C
Above Tg: 150 x 10 ⁻⁶ in/in/°C	Storage Modulus @ 23°C: 518,756 psi
Shore D Hardness: 60	Ions: Cl ⁻ 151 ppm
Lap Shear Strength @ 23°C: 1,266 psi	Na ⁺ 23 ppm
Die Shear Strength @ 23°C: ≥ 5 Kg / 1,700 psi	NH ₄ ⁺ 23 ppm
Degradation Temp. (TGA): 380°C	K ⁺ 31 ppm
	*Particle Size: ≤ 45 Microns
Electrical Properties:	
*Volume Resistivity @ 23°C: ≤ 0.0005 Ohm-cm	*Volume Resistivity @ 23°C (23°C/3 Day cure): ≤ 0.007 Ohm-cm
Thermal Properties:	
Thermal Conductivity: 1.37 W/mK	

EPOXY TECHNOLOGY, INC.

14 Fortune Drive, Billerica, MA 01821-3972 Phone: 978.667.3805 Fax: 978.663.9782

www.EPOTEK.com

Epoxy and Adhesives for Demanding Applications™

This information is based on data and tests believed to be accurate. Epoxy Technology, Inc. makes no warranties (expressed or implied) as to its accuracy and assumes no liability in connection with any use of this product.

Vedlegg B - Utstyr, ekstruderingsinstillinger og presseinstillinger

Utstyr	Typebetegnelse	Serienummer
Analogt stereomikroskop	Wild Heerbrug	P3-014-1
Analogt stereomikroskop	Wild Heerbrug	P3-014-2
Ekstern lyskilde til mikroskop	Wild Heerbrug	P3-014-4
Digitalt mikroskop m/komputer	VhX-500	P03-0211
Strømbegrensende høyeffektmotstand	4000k Ω	-
Strømbegrensende høyeffektmotstand, 2stk	200k Ω	-
Stativ til prøve	-	-
Petrisskål m/lokk i pleksiglass	-	-
Silikonolje	-	-
Variac m/flytende spenningsjustering	0-220V, maks 17A	BI556
Transformator	220V:100kV	BI-286
Kondensator	100pF, 100kV	K3-083
Oscilloskop	TDS2024	G04-0254
Tang amperemeter	SOAR-643	IO4-0352
Multimeter	Fluke 117	S03-0382
Partikkel teller	GT-521	N07-0110
Mikrotom	R.Jung Heidelberg	P3-08
Temperatur logger	HP 3497A	G05-0088
Høy intensitet diodelys	Luxeon, 145 lumen, bølgelengde 7000K	
AC strøm/spenningskilde til lys, 0-20V	Mascot 719	B02-0429
Filter for oscilloskoptilkopling høyspent	-	I06-0067
Step-down transformator for oscilloskoptilkopling	-	I06-0422
Elektrometer	Keithley 6517	S03-241
Stabil spenningskilde	HCN140-35000	EFI B02-0405
Fluke spenningsprobe	1000:1	I06-0316
Multimeter	Fluke	S3-72
Multimeter	Escort EDM 168A	S03-0185

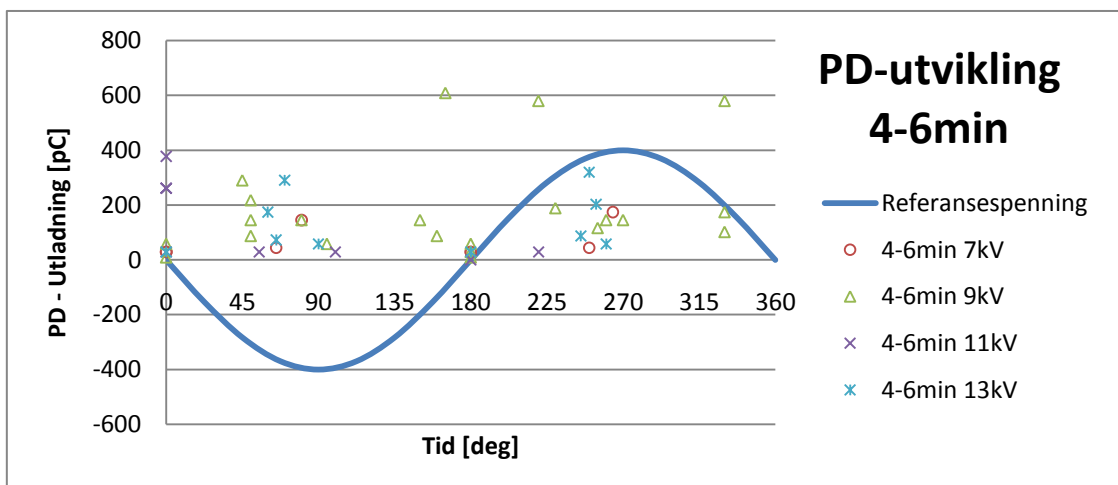
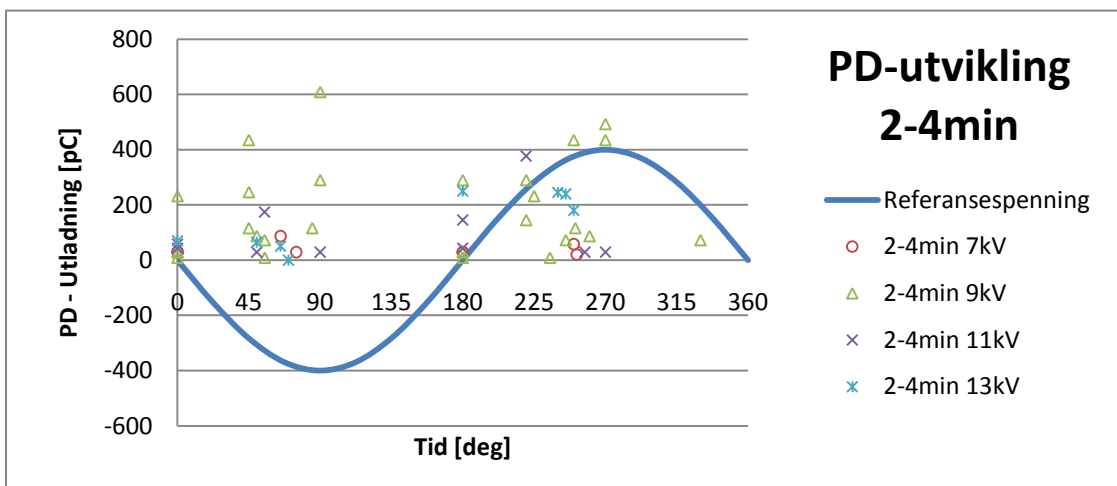
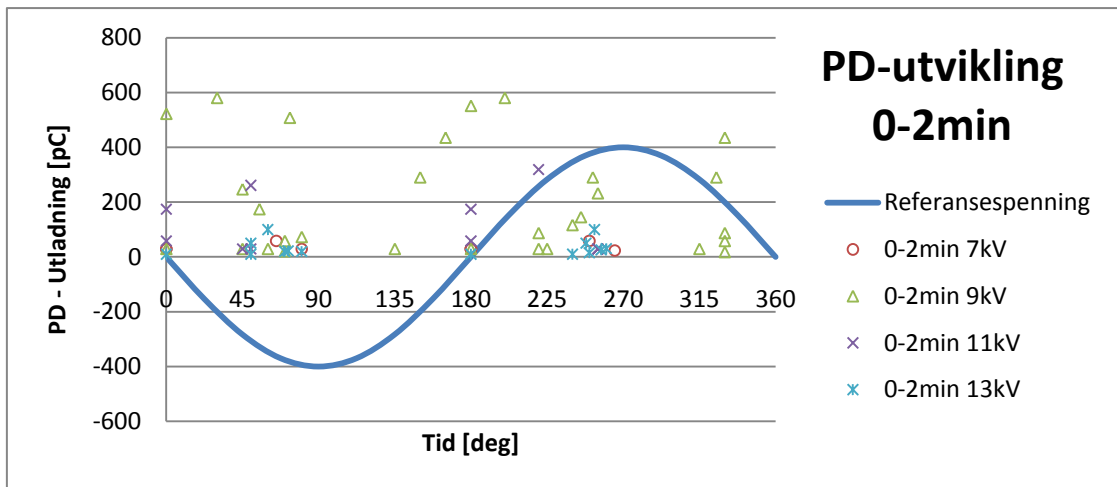
Ekstrudering	iPP	sPP	PEX
Materiale	RF365MO	PP1471	LS4201S
Ekstruderingsdato	12.02.2010	09.2009	09.2009
Sone 1 (Varmeelement)	150 °C	150 °C	117 °C
Sone 2 (Varmeelement)	190 °C	190 °C	117 °C
Sone 3 (Varmeelement)	210 °C	196 °C	117 °C
Sone 4 (Varmeelement)	210 °C	205 °C	117 °C
Sone 5 (Varmeelement)	205 °C	200 °C	117 °C
Sone 6 (Vannkjøling)	16 °C	16 °C	16 °C
Hastighet på ekstruderingskrue	70 rpm	70 rpm	10 rpm
Hastighet på enkelrullen	3 rpm	3,01 rpm	3 rpm
Hastighet på dobbelrullen	1,5 rpm	1,53 rpm	1,5 rpm
Temperaturmåling - TM	211 °C	197 °C	116 °C
Temperaturmåling - MD	-	115 bar	115 bar

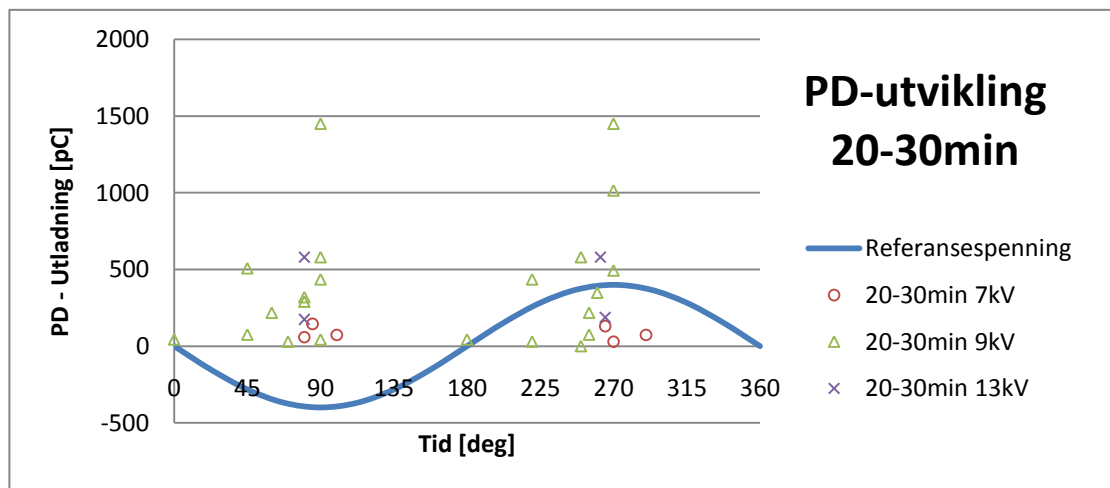
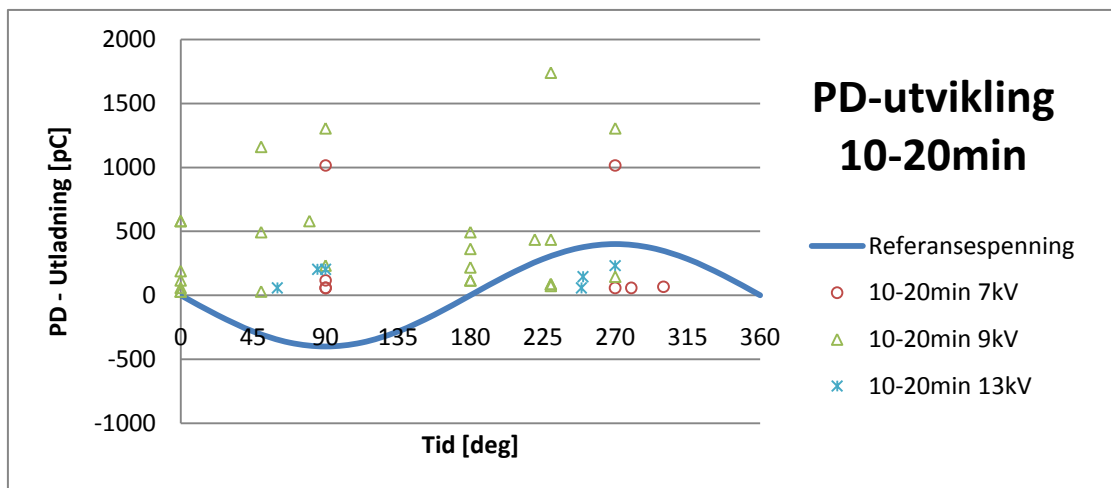
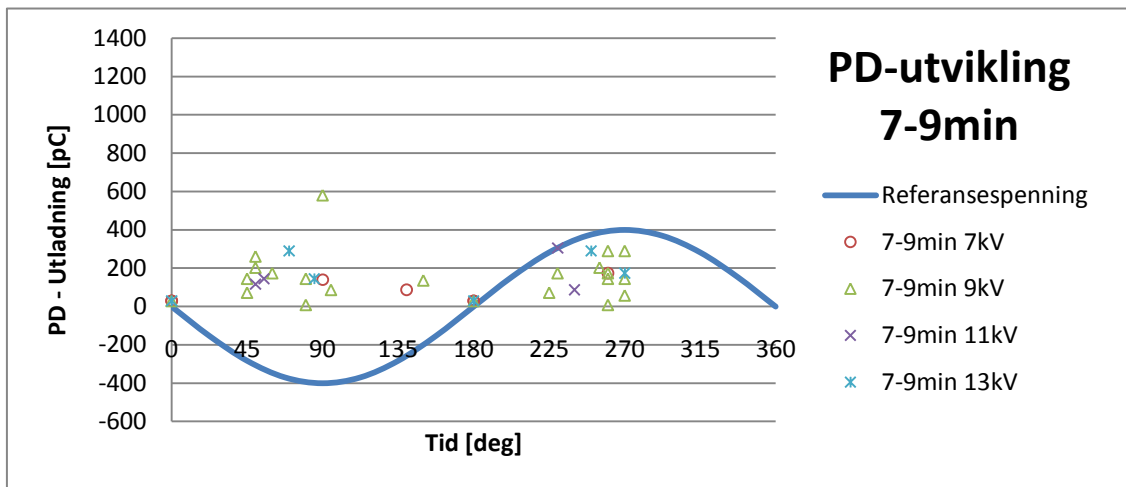
Pressing	PEX1	PEX2	PEX3	PP1	PP2	PP3
Materiale	LS4201S	LS4201S	LS4201S	PP1471	PP1471	PP1471
Pressedato	03.09.2009	02.12.2009	16.04.2010	#####	27-29.10.2009	#####
Mengde	0,5 g	0,4 g	0,4 g	0,5 g	0,4 g	0,4 g
Lavtrykk	2 tonn	2 tonn	2 tonn	2 tonn	2 tonn	2 tonn
Lavtrykk tid	8 min	8 min	8 min	8 min	8 min	8 min
Platetemperatur topp/bunn lavtrykk	120 °C	120 °C	120 °C	160 °C	185 °C	180 °C
Høytrykk	12 tonn	15 tonn	12 tonn	12 tonn	20 tonn	20 tonn
Høytrykk tid	45 min	45 min	45 min	2 min	2 min	2 min
Platetemperatur topp/bunn høytrykk	180 °C	180 °C	180 °C	160 °C	185 °C	180 °C
Luftkjøling tid	1 min	1 min	1 min	0 min	0 min	0 min
Vannkjøling tid	15 min	15 min	15 min	15 min	15 min	15 min
Avspenning temp	130 °C	130 °C	130 °C	0 °C	0 °C	0 °C
Avspenning tid	20 min	5 min	20 min	0 min	0 min	0 min
Avgassing temp	90 °C	90 °C	90 °C	0 °C	0 °C	0 °C
Avgassing tid	3 døgn	3 døgn	3 døgn	0 min	0 min	0 min

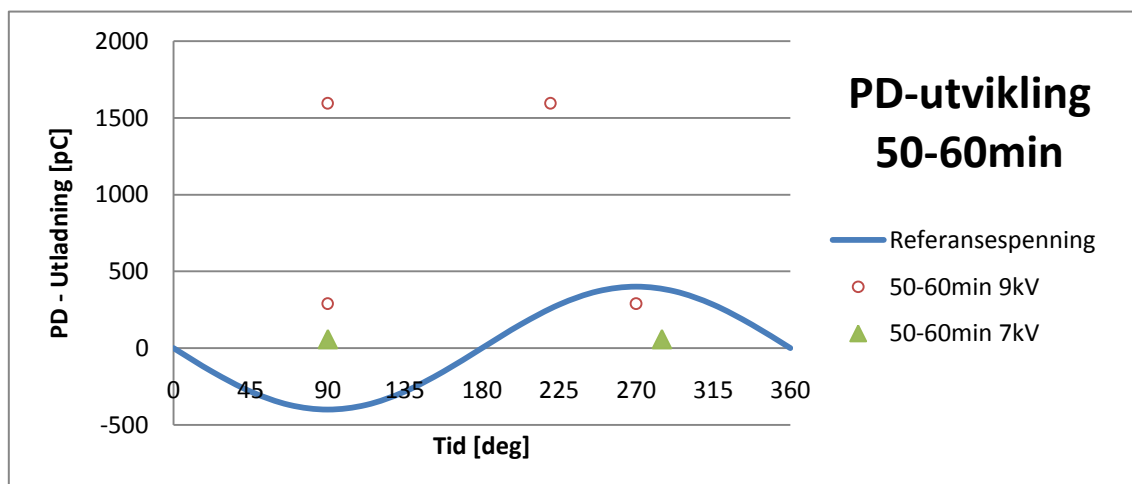
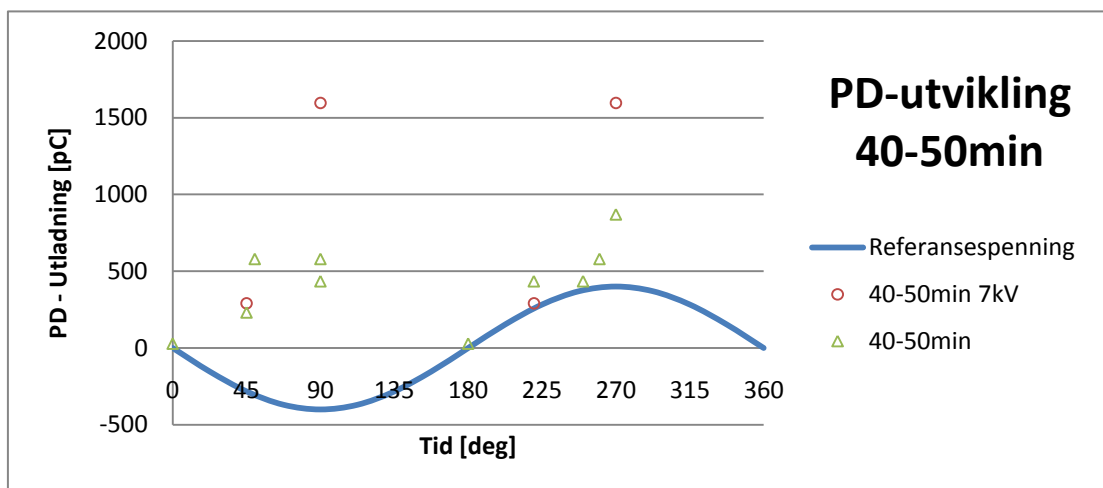
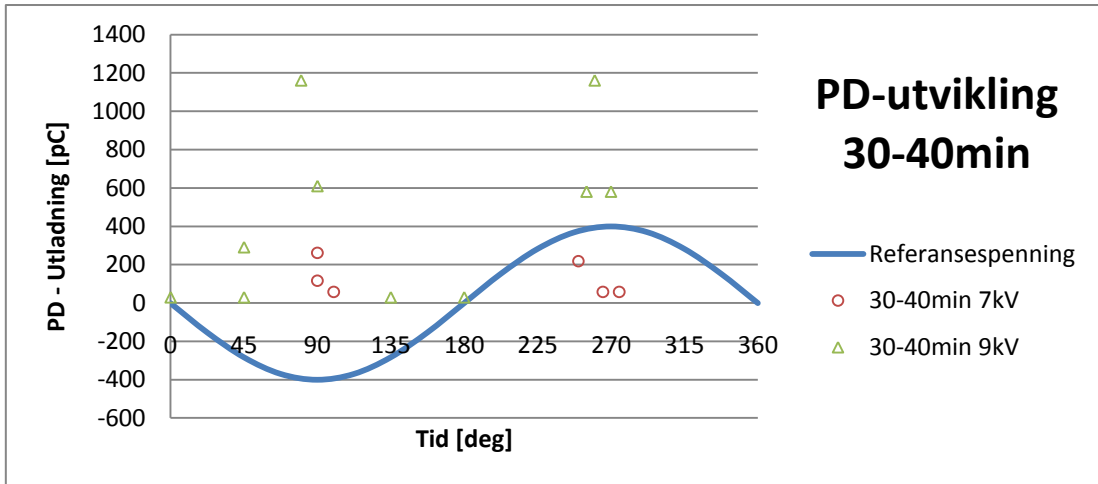
Pressing	PP4	PP11	sPP5	sPP6	sPP7	sPP8
Materiale	PP1471	PP1471	PP1471	PP1471	PP1471	PP1471
Pressedato	04.12.2009	03.11.2009	27.01.2010	#####	#####	#####
Mengde	0,4 g	14 g	0,4 g	0,4 g	0,4 g	0,4 g
Lavtrykk	3 tonn	3 tonn	2 tonn	2 tonn	2 tonn	2 tonn
Lavtrykk tid	8 min	8 min	8 min	8 min	8 min	8 min
Platetemperatur topp/bunn lavtrykk	181 °C	180 °C	180 °C	180 °C	181 °C	185 °C
Høytrykk	12 tonn	20 tonn	20 tonn	15 tonn	15 tonn	10 tonn
Høytrykk tid	2 min	2 min	2 min	2 min	2 min	2 min
Platetemperatur topp/bunn høytrykk	181 °C	180 °C	180 °C	180 °C	181 °C	185 °C
Luftkjøling tid	0 min	0 min	0 min	0 min	0 min	0 min
Vannkjøling tid	15 min	15 min	15 min	15 min	15 min	15 min
Avspenning temp	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C
Avspenning tid	0 min	0 min	0 min	0 min	0 min	0 min
Avgassing temp	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C	0 °C
Avgassing tid	0 min	0 min	0 min	0 min	0 min	0 min

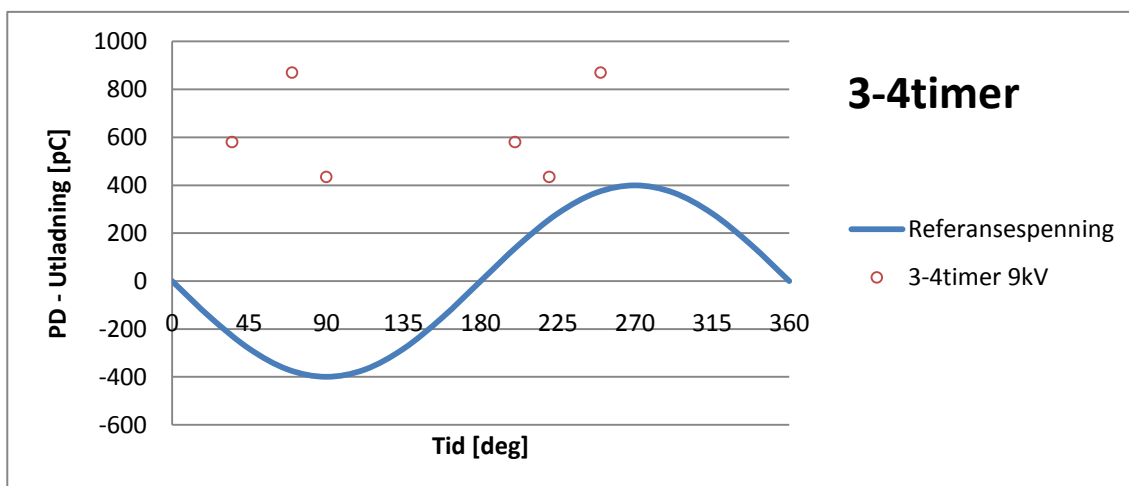
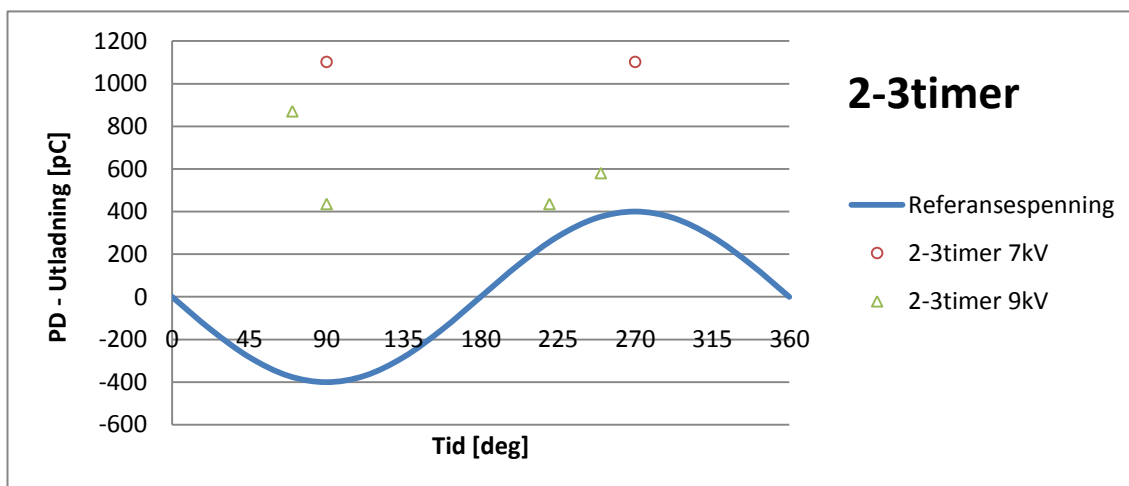
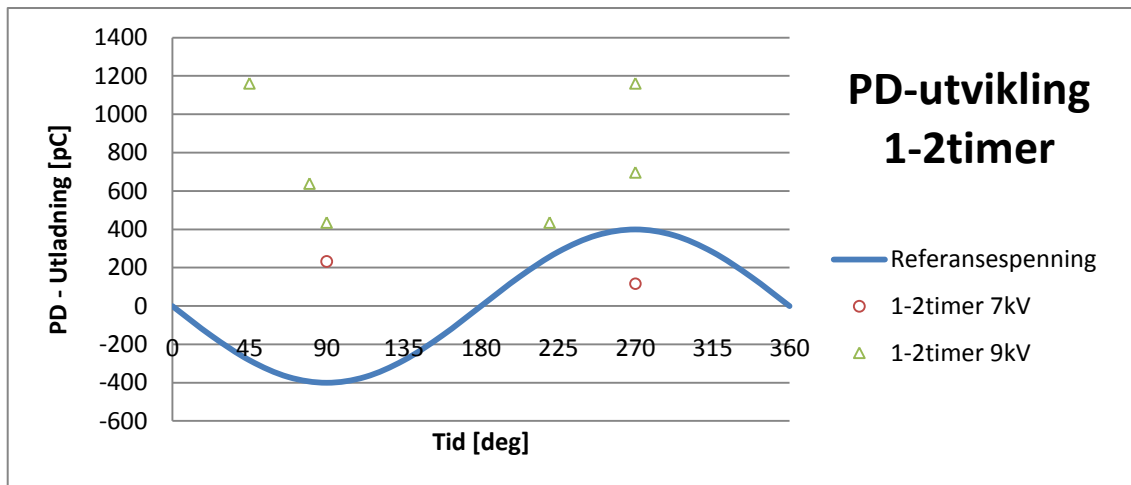
Pressing	sPP9	sPP1	sPP2
Materiale	PP1471	RF365MO	RF365MO
Pressedato	16.05.2010	24.03.2010	14.05.2010
Mengde	0,4 g	0,4 g	0,4 g
Lavtrykk	2 tonn	2 tonn	2 tonn
Lavtrykk tid	8 min	8 min	8 min
Platetemperatur topp/bunn lavtrykk	185 °C	190 °C	185 °C
Høytrykk	12 tonn	15 tonn	12 tonn
Høytrykk tid	2 min	2 min	2 min
Platetemperatur topp/bunn høytrykk	185 °C	190 °C	185 °C
Luftkjøling tid	0 min	0 min	0 min
Vannkjøling tid	15 min	15 min	15 min
Avspenning temp	0 °C	0 °C	0 °C
Avspenning tid	0 min	0 min	0 min
Avgassing temp	0 °C	0 °C	0 °C
Avgassing tid	0 min	0 min	0 min

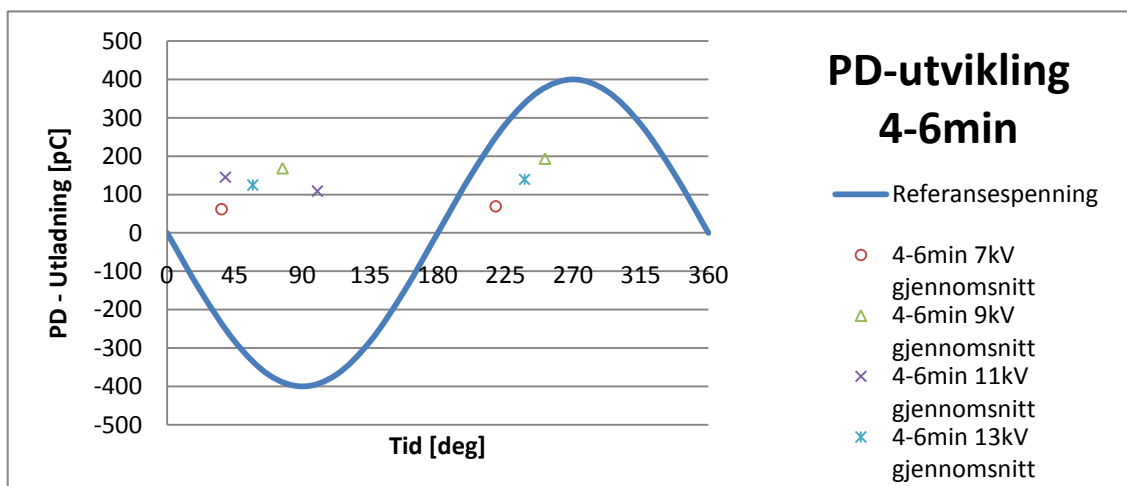
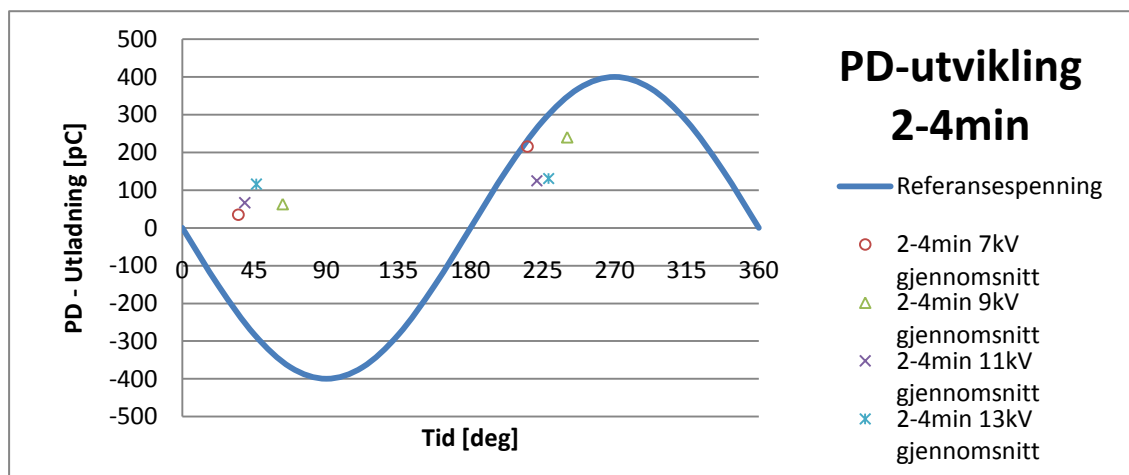
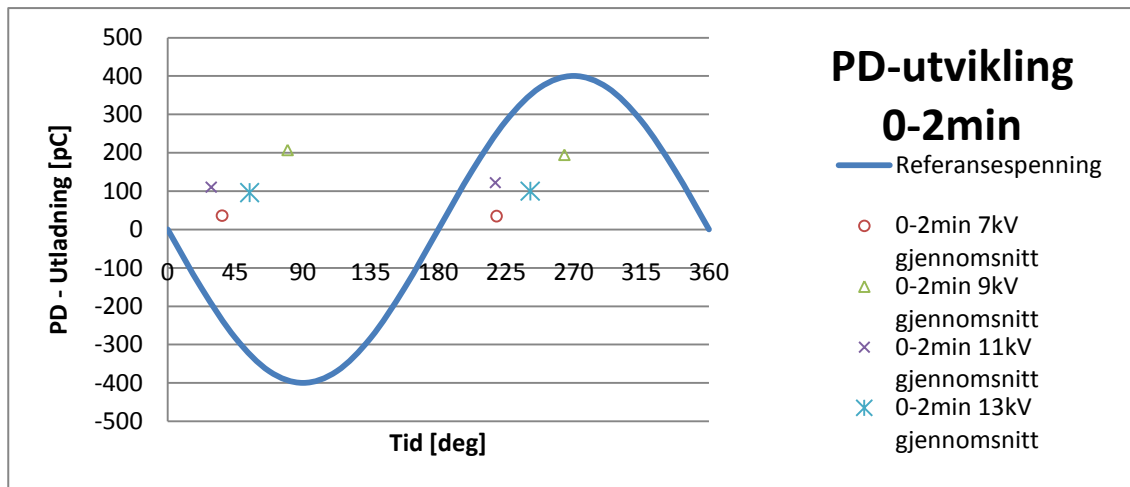
Vedlegg C PD-grafer

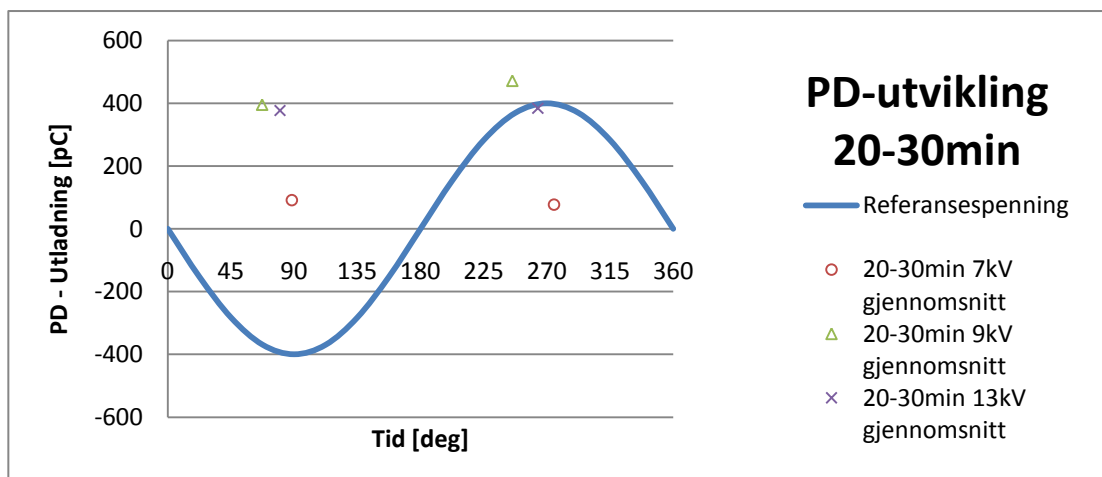
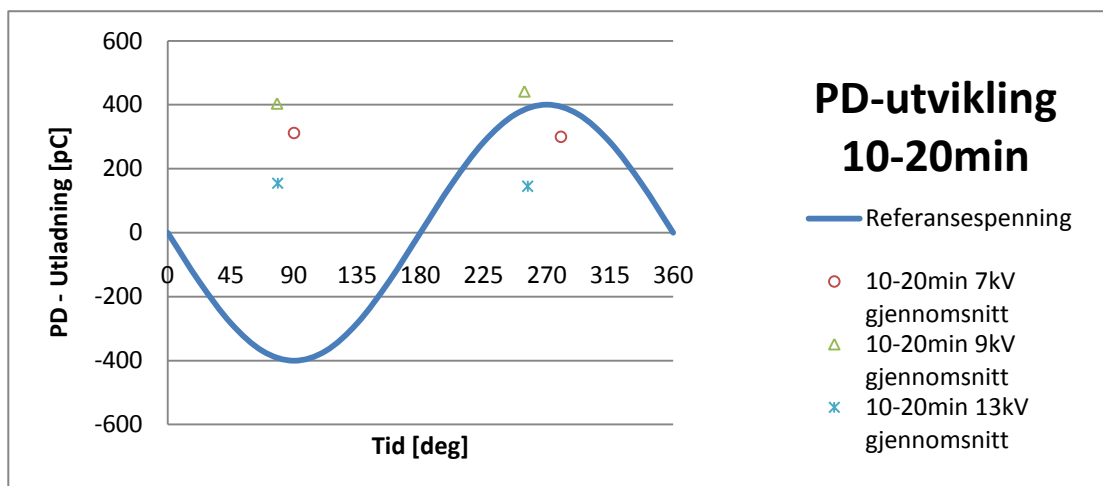
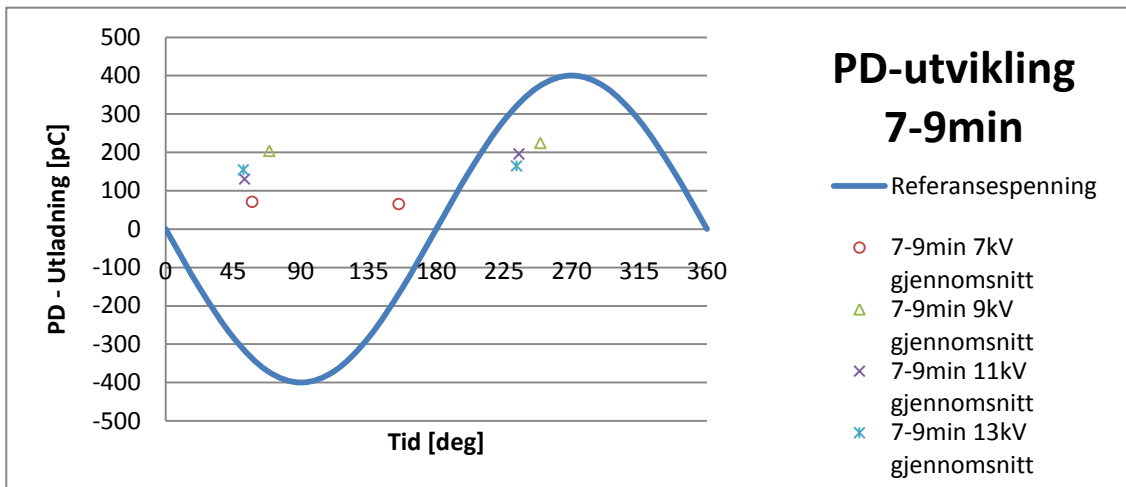


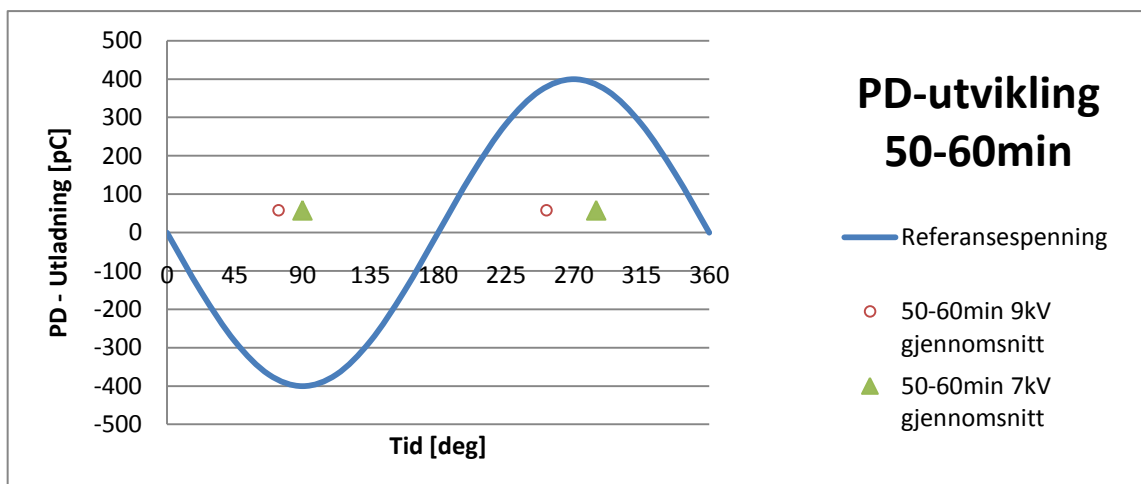
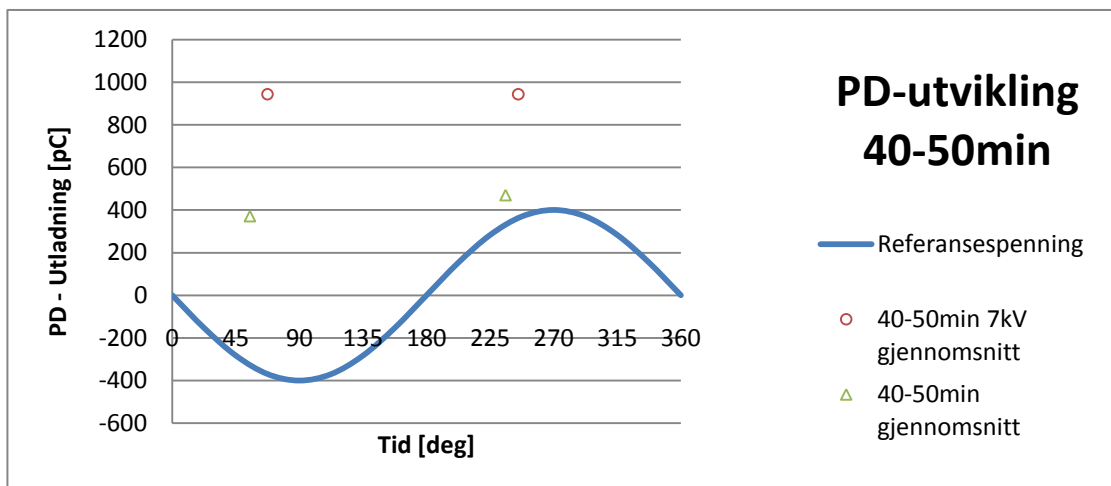
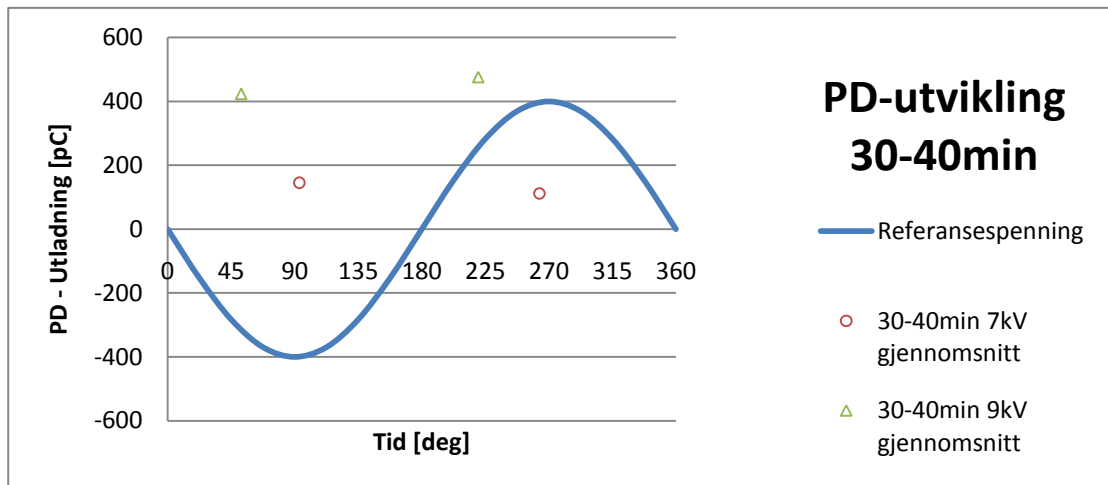


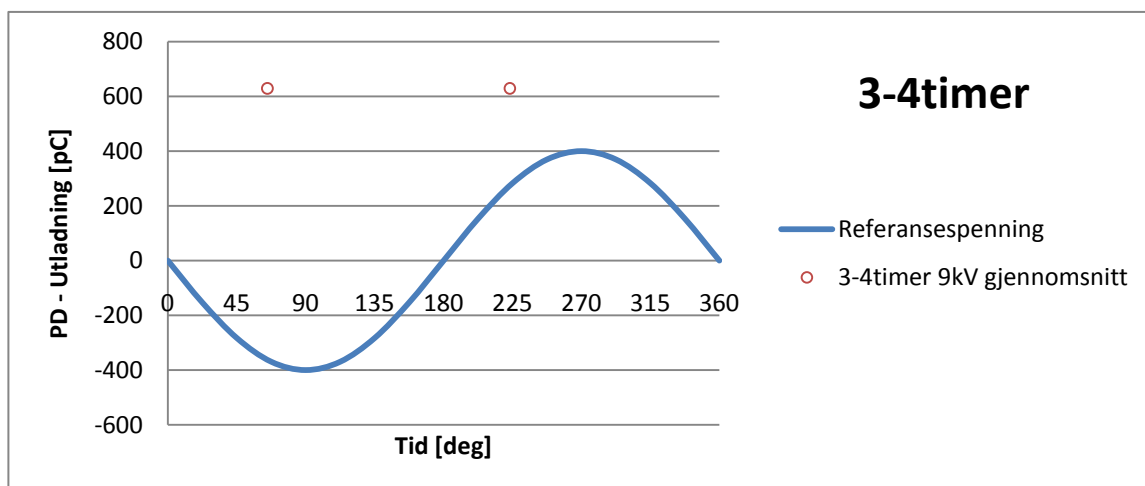
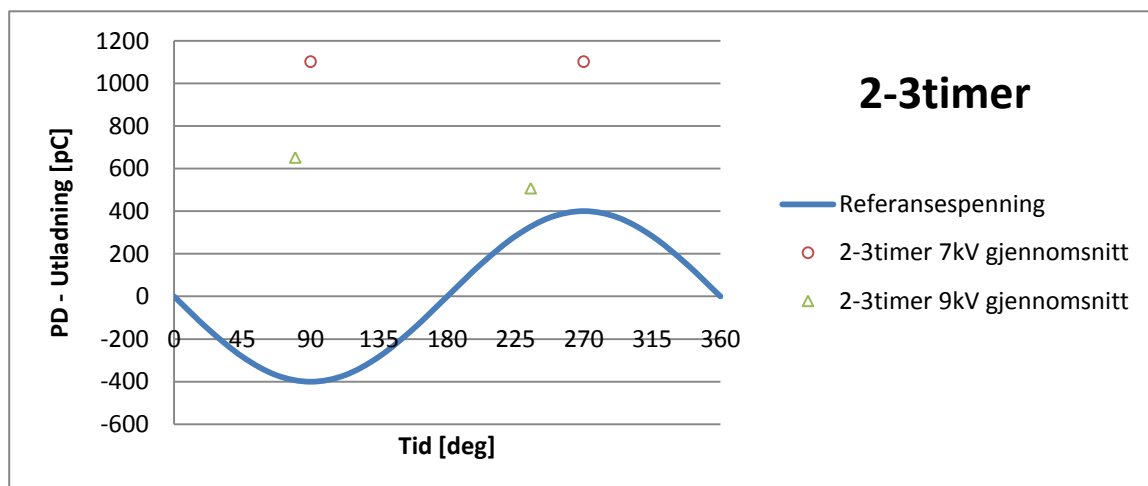
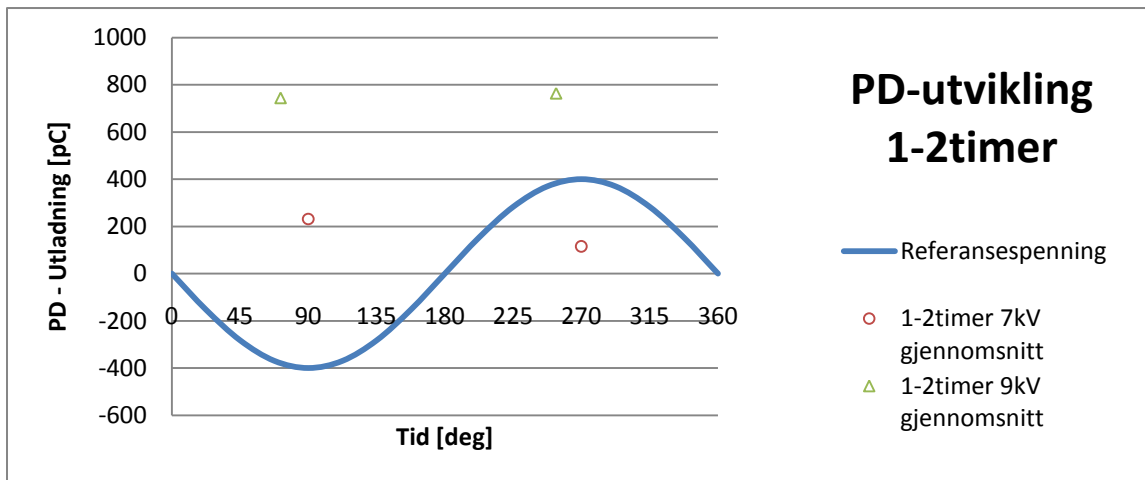






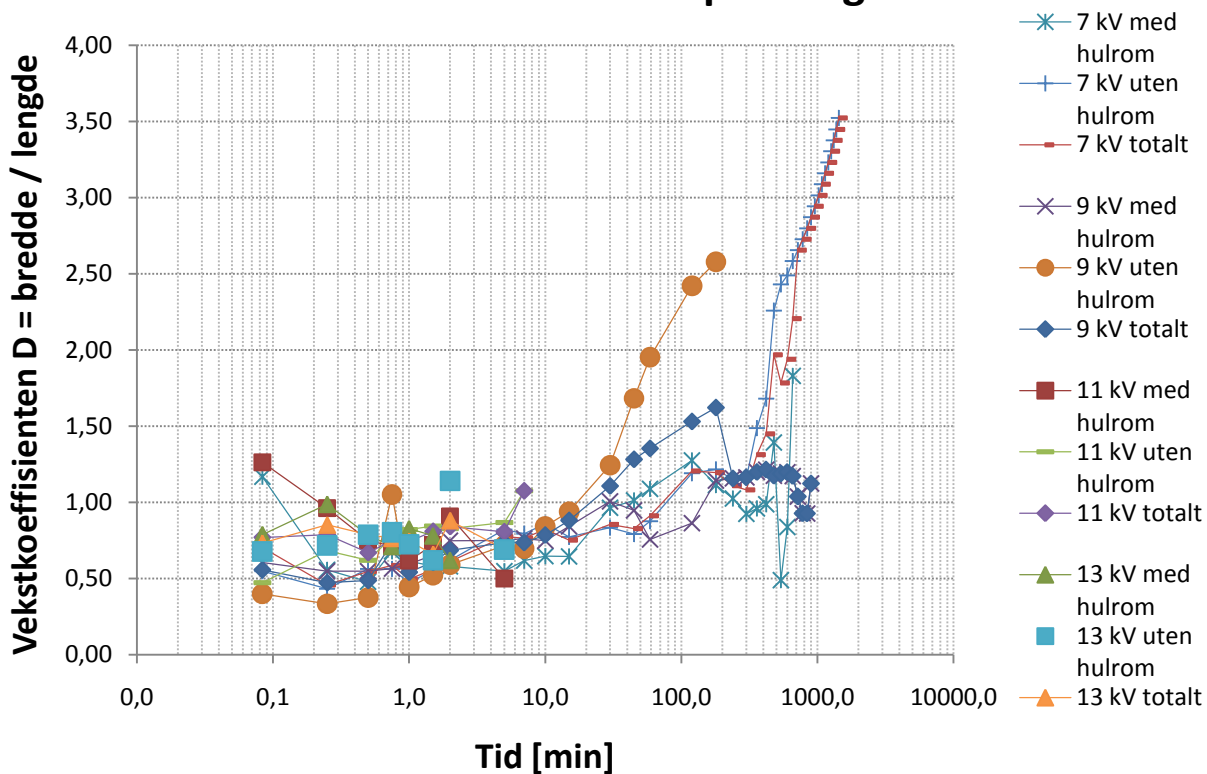




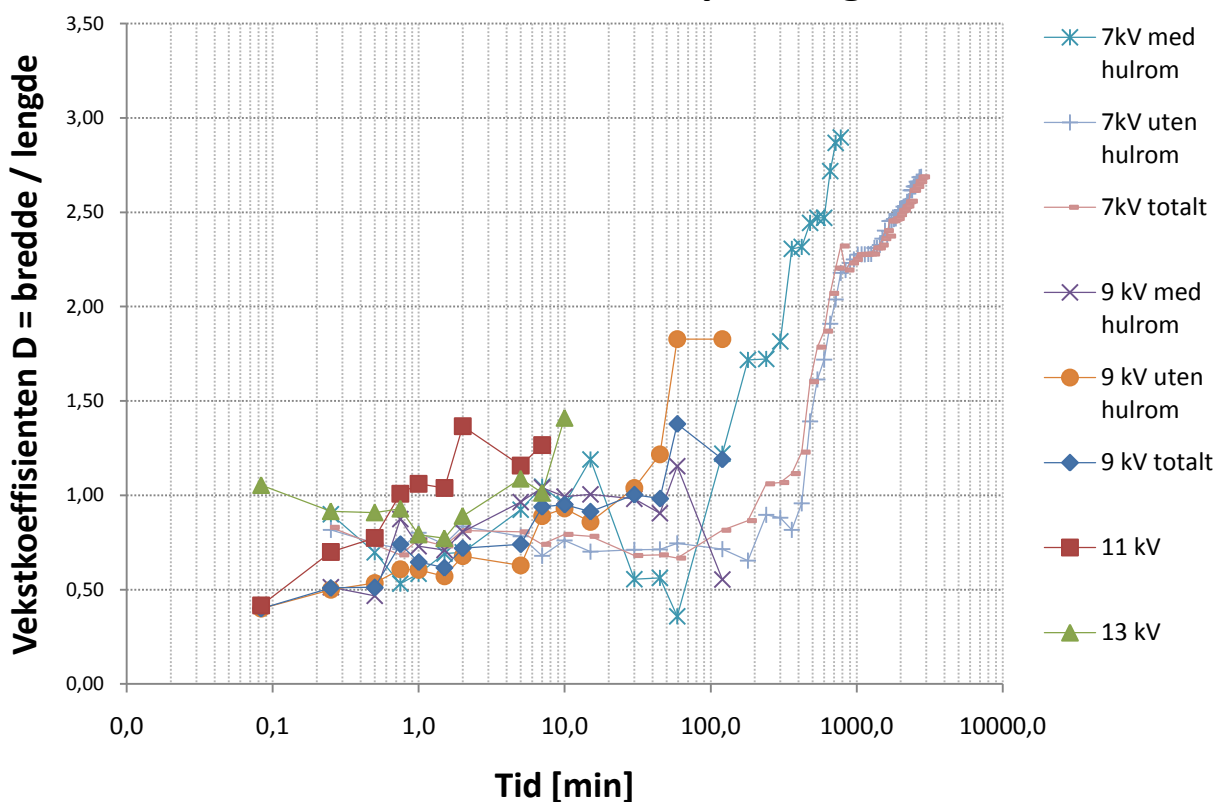


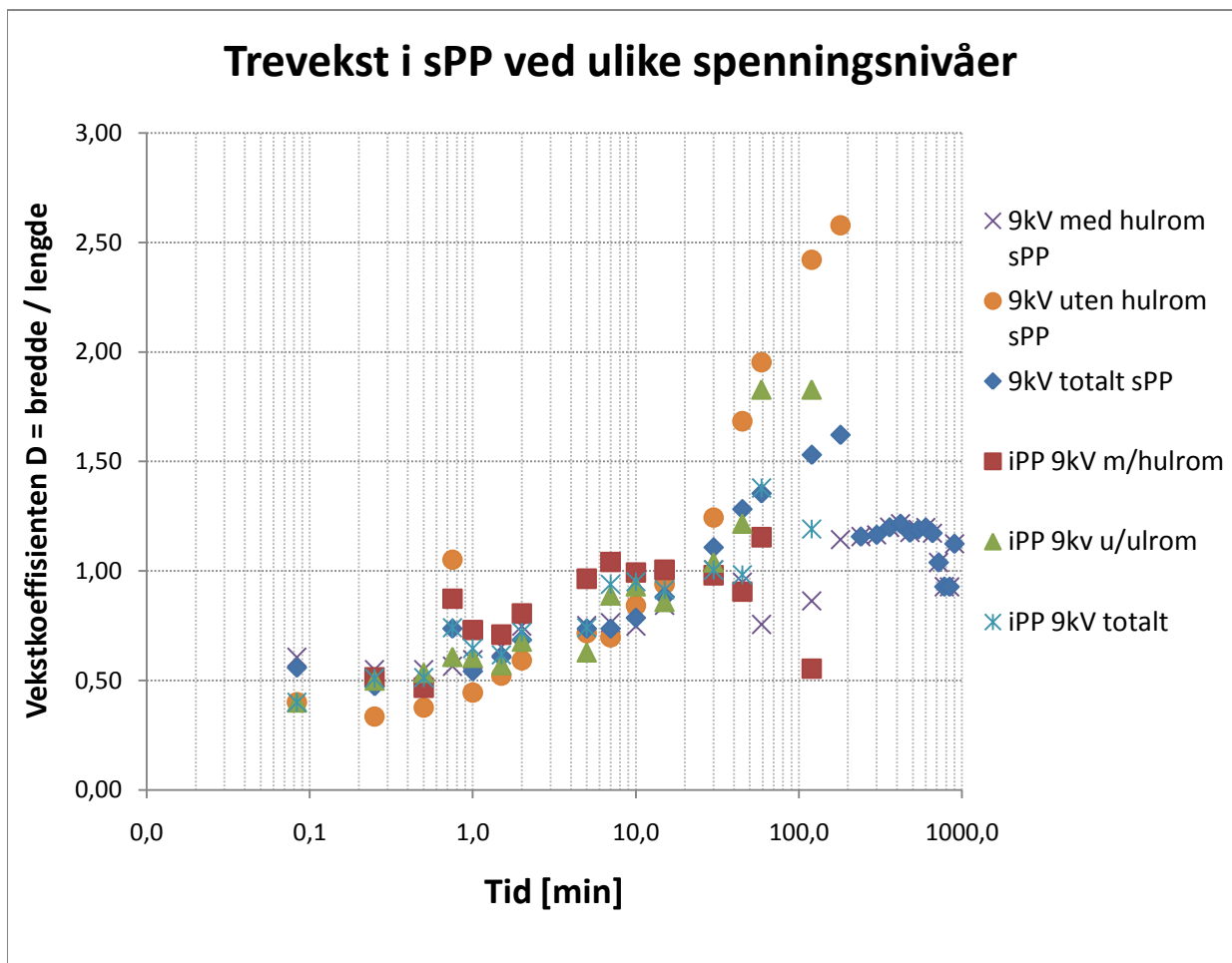
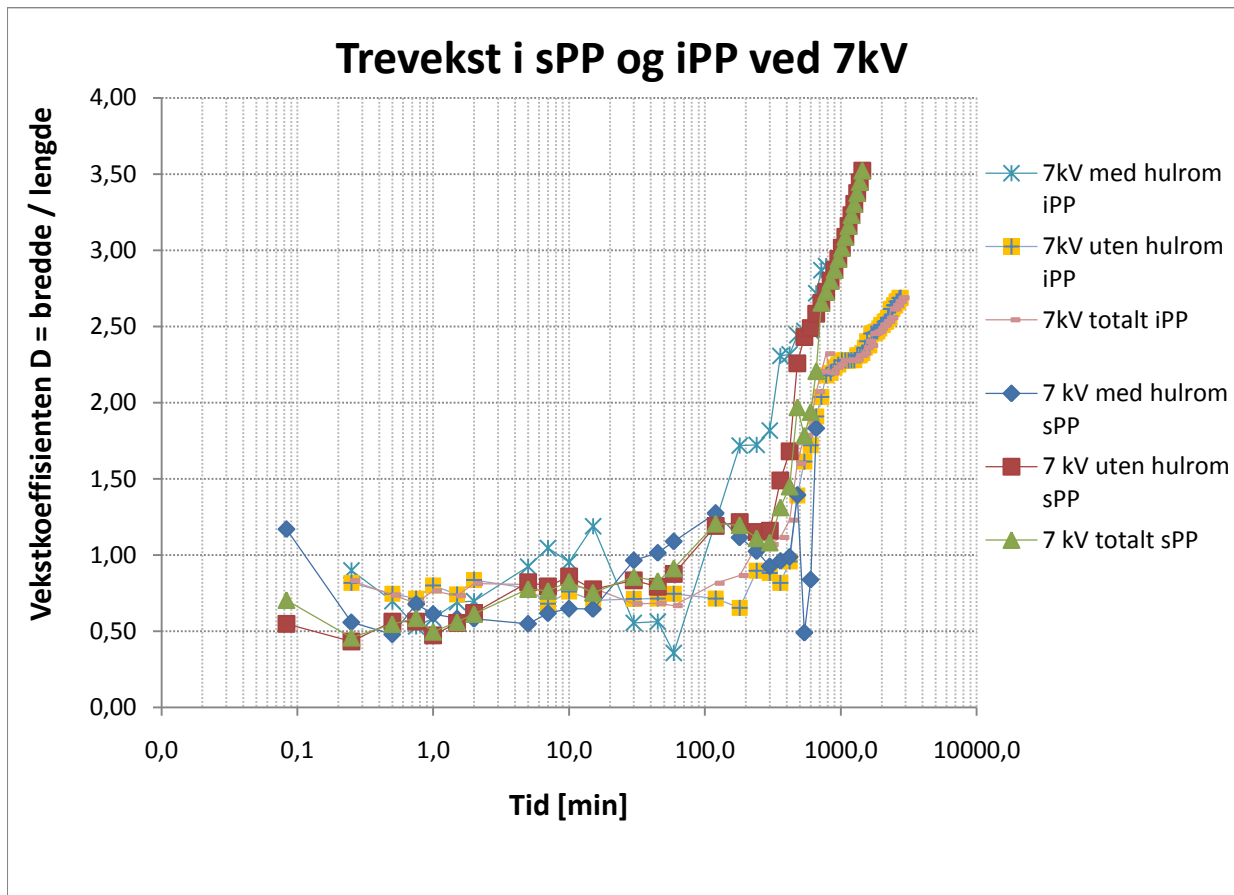
Vedlegg D Trevekstgrafer

Trevekst i sPP ved ulike spenningsnivåer

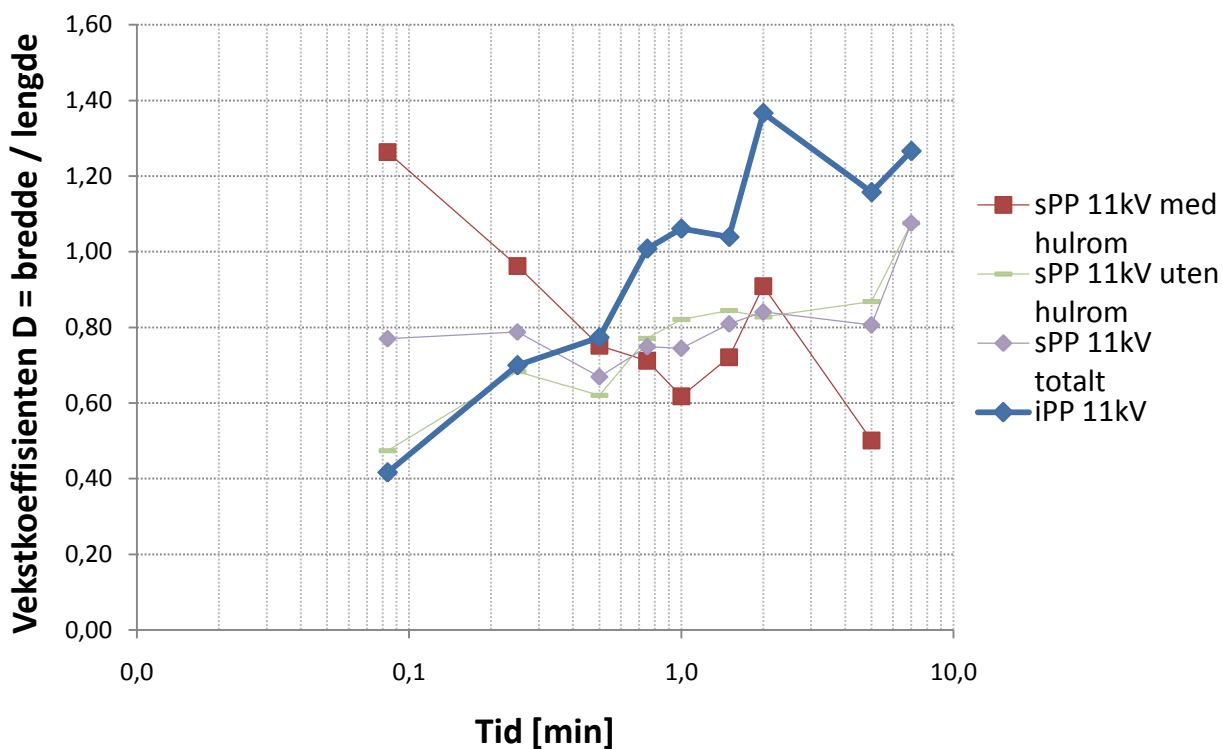


Trevekst i iPP ved ulike spenningsnivåer

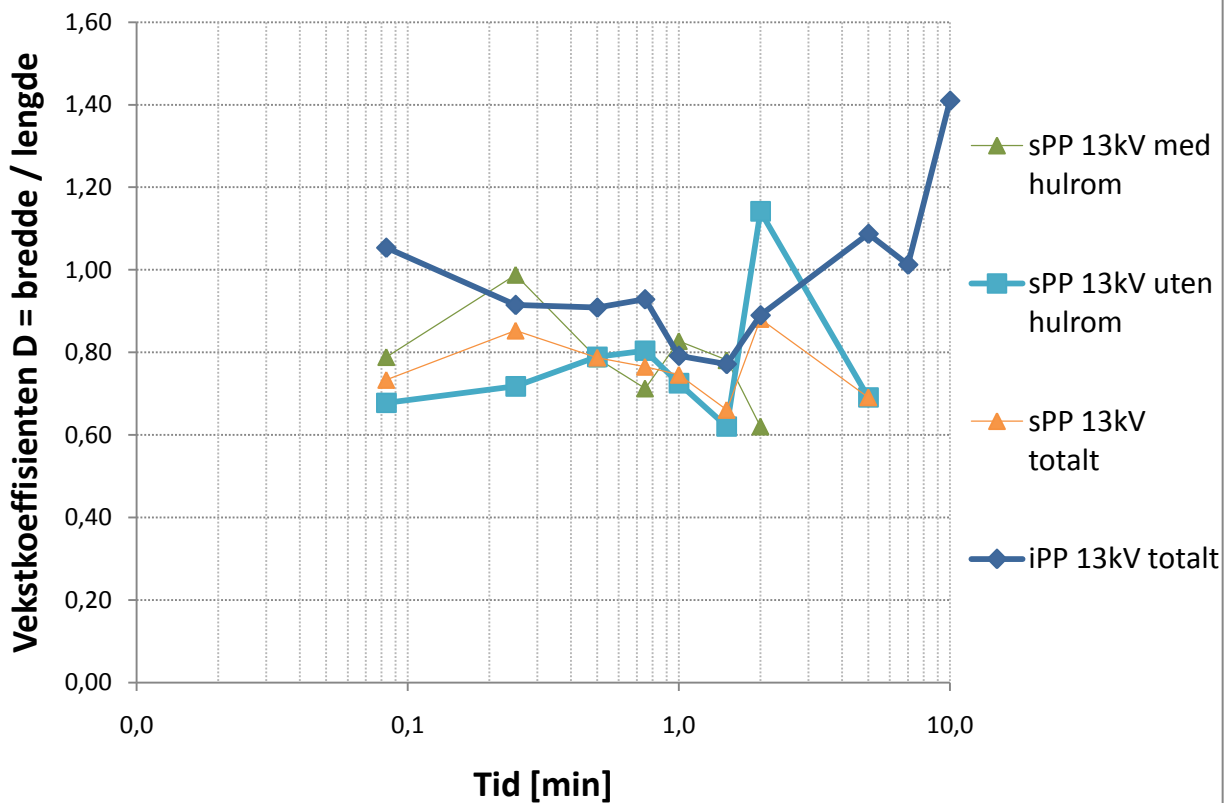


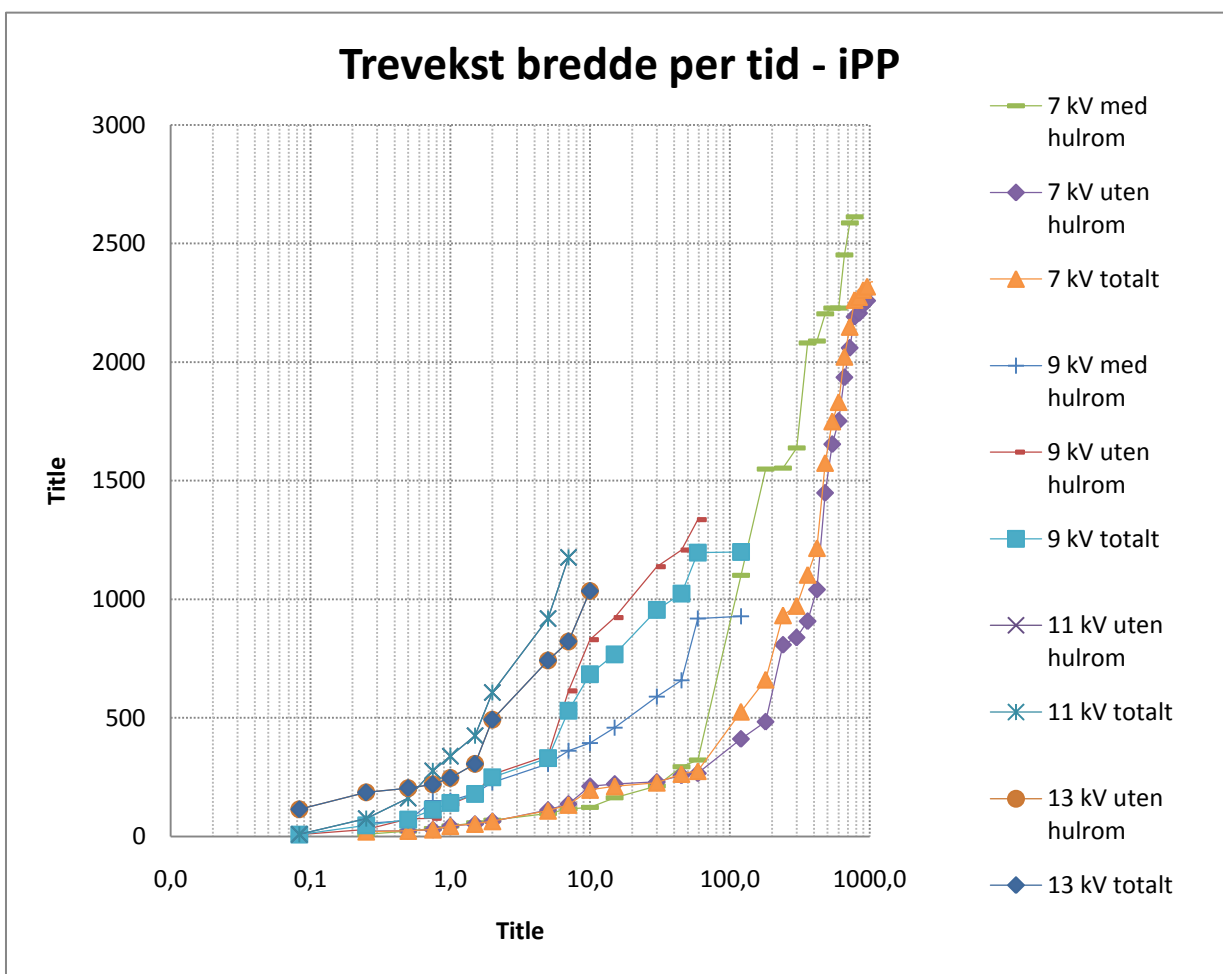
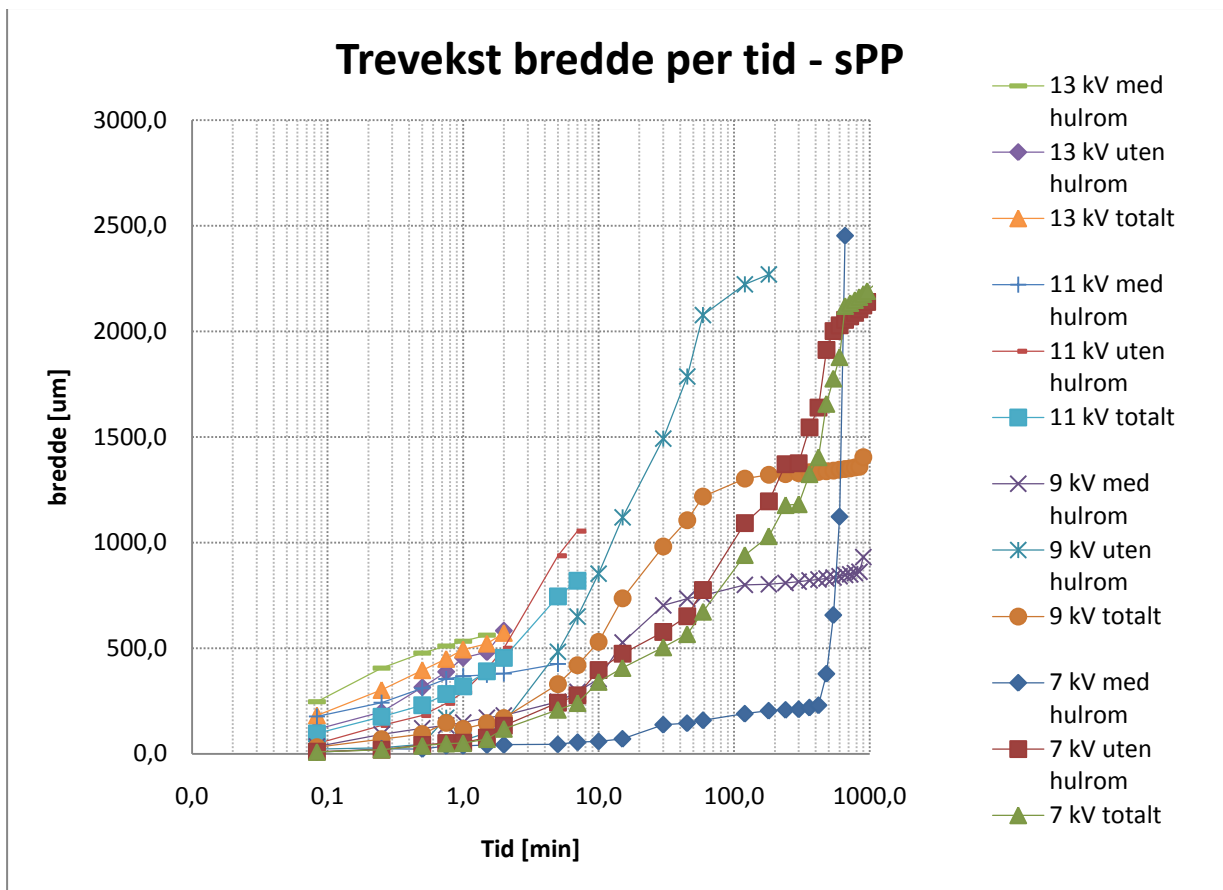


Trevekst i sPP ved ulike spenningsnivåer

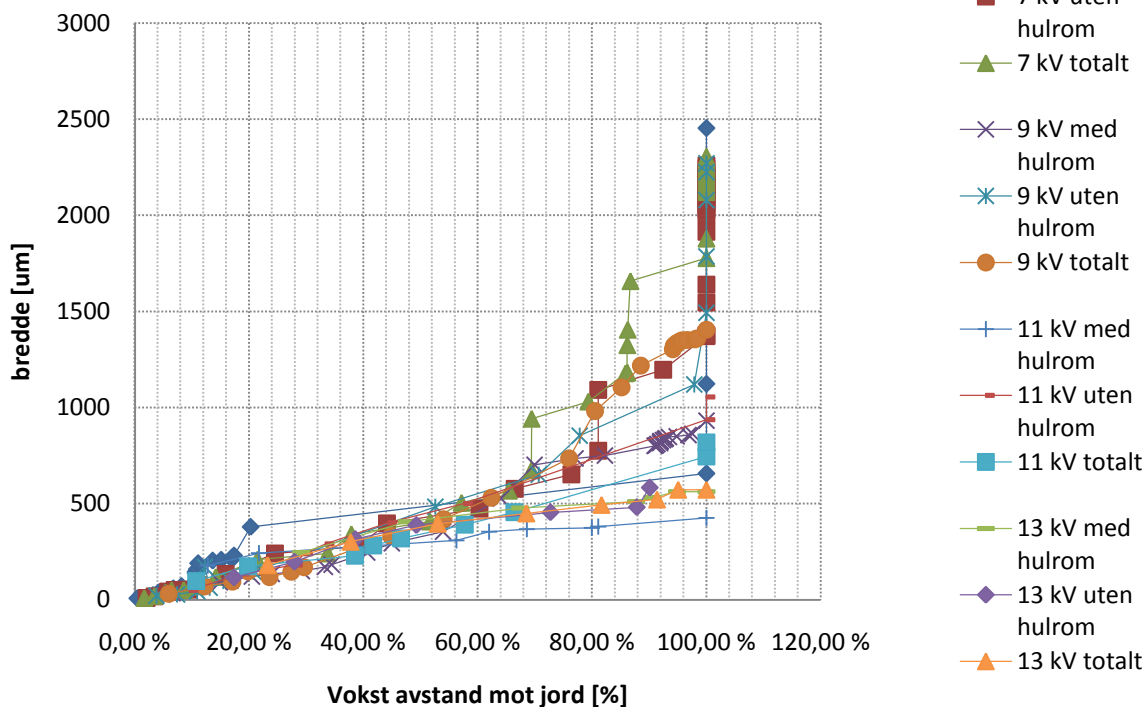


Trevekst i sPP ved ulike spenningsnivåer

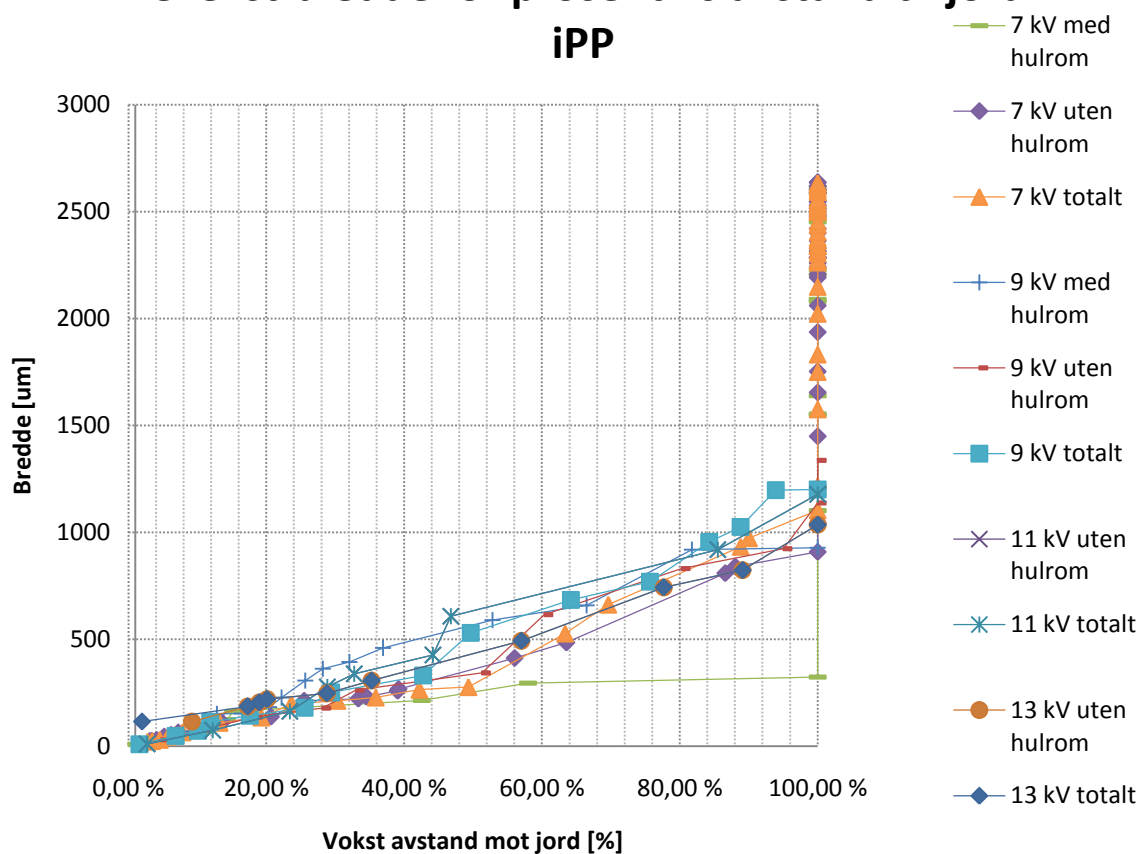


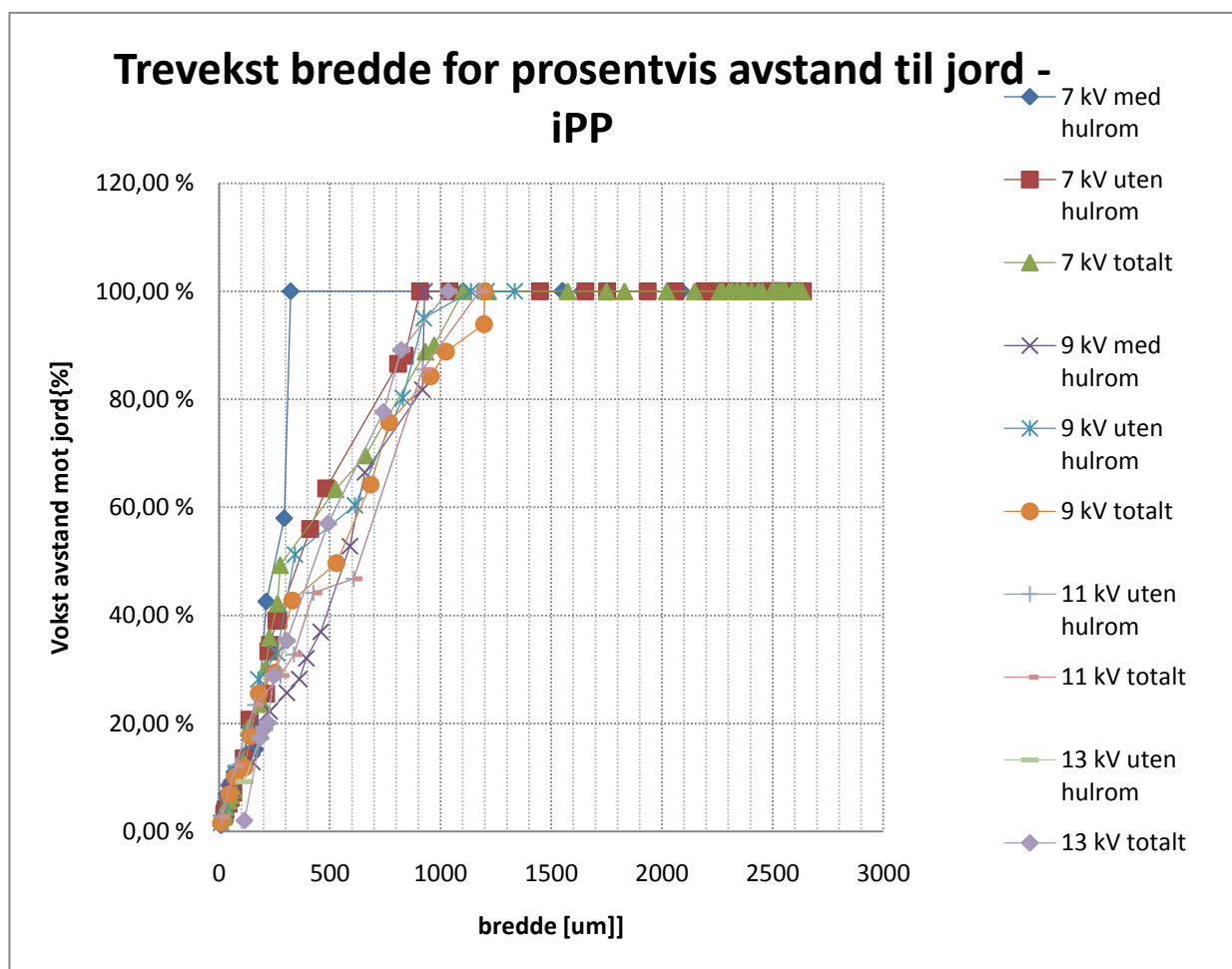
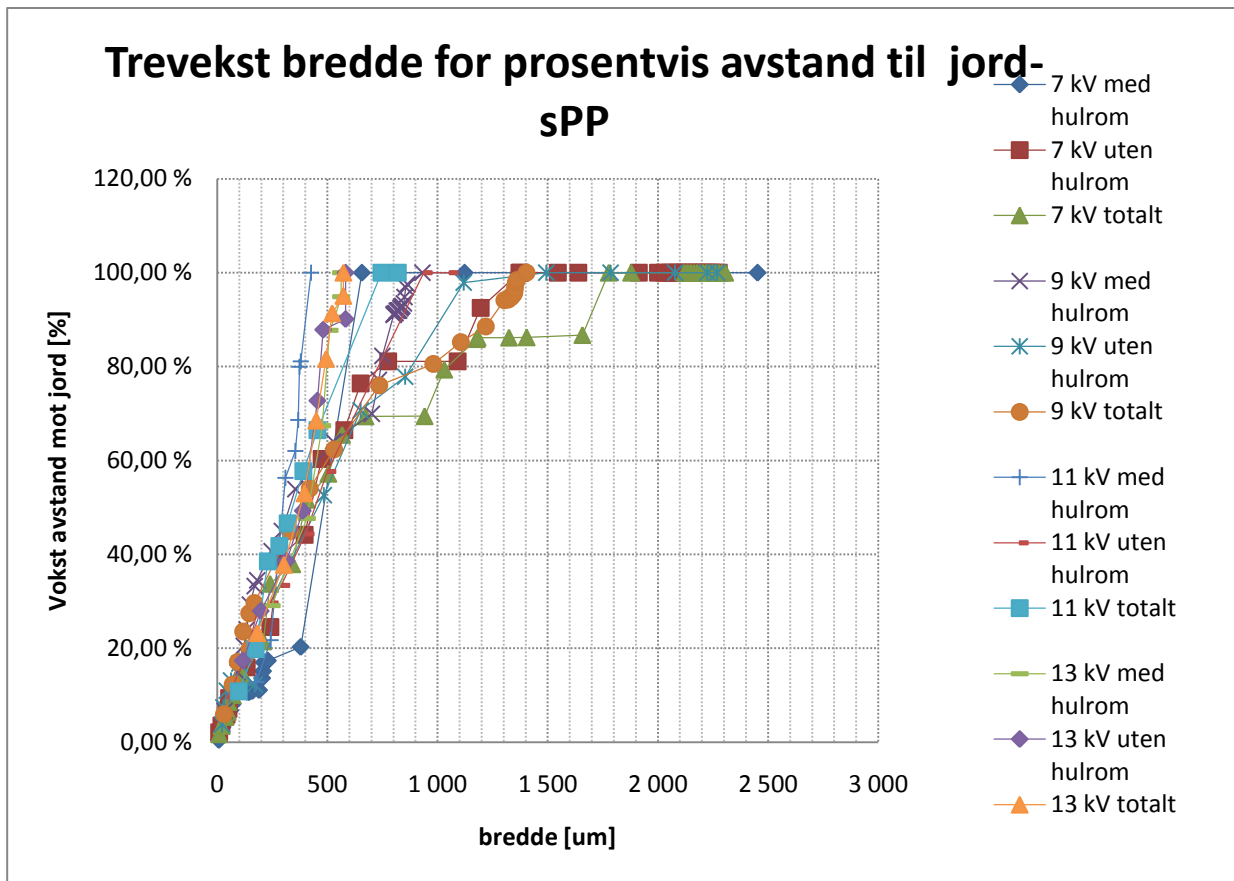


Trevekst bredde for prosentvis avstand til jord- sPP

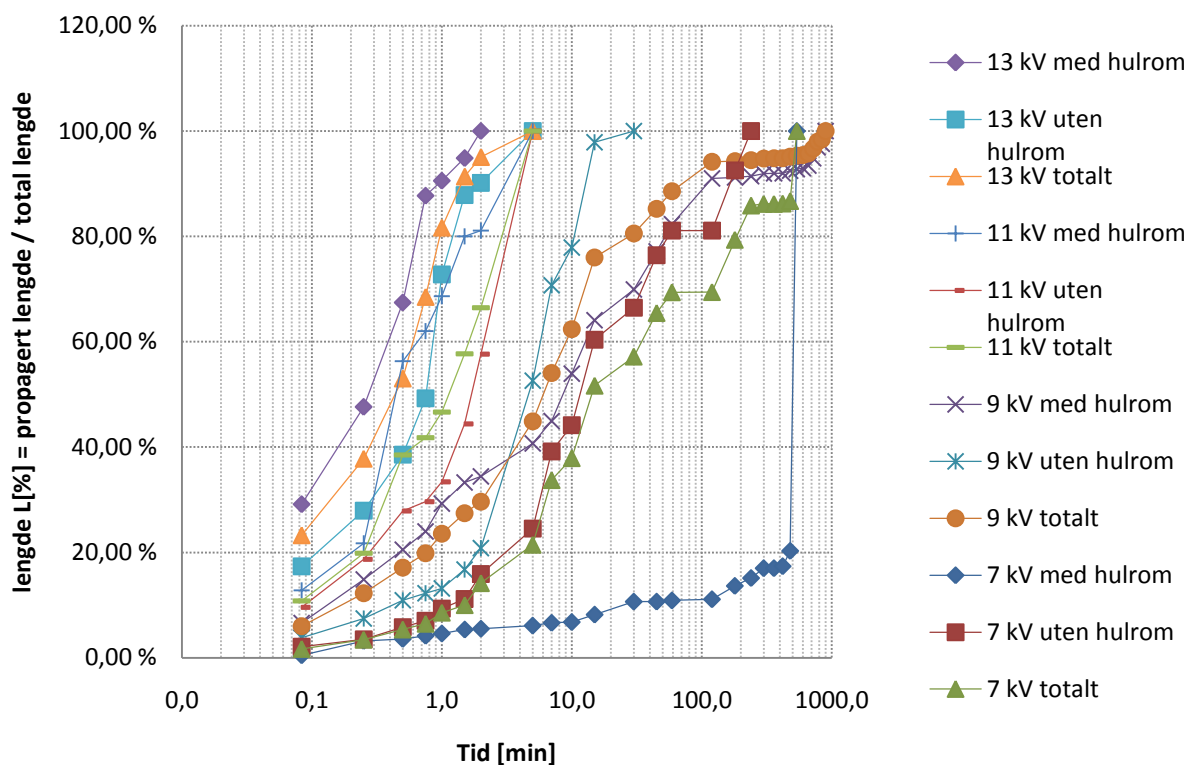


Trevekst bredde for prosentvis avstand til jord - iPP

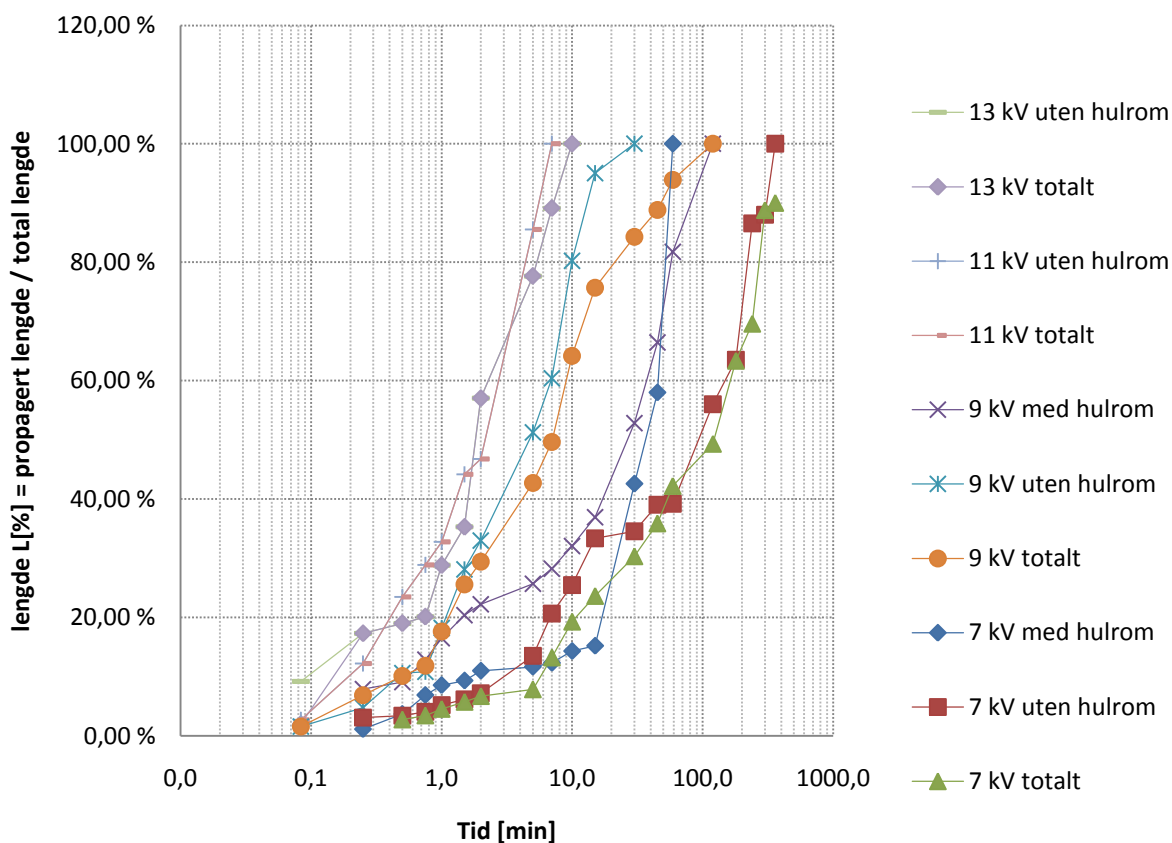


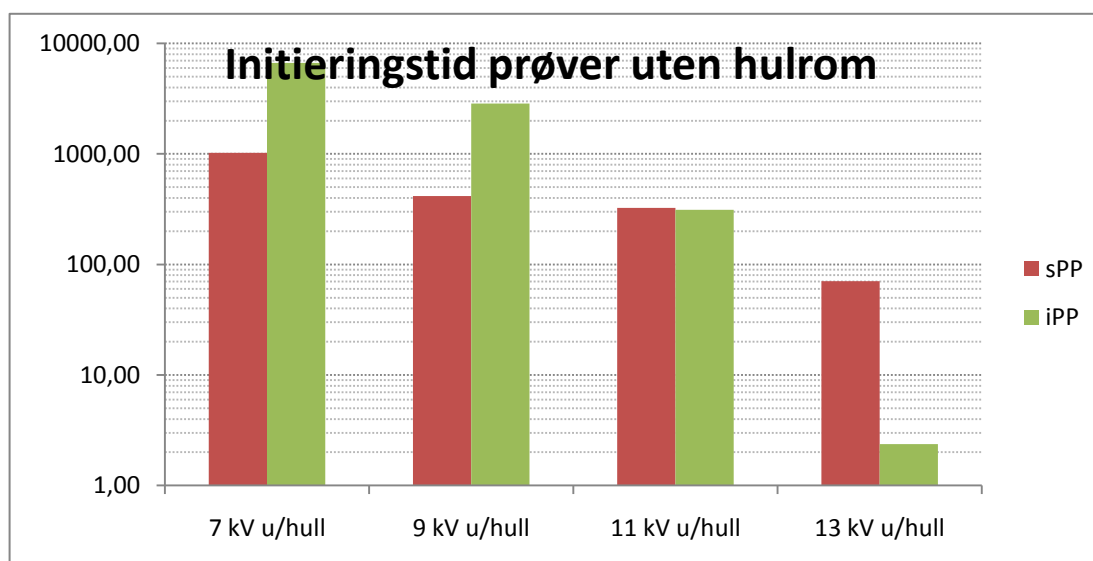
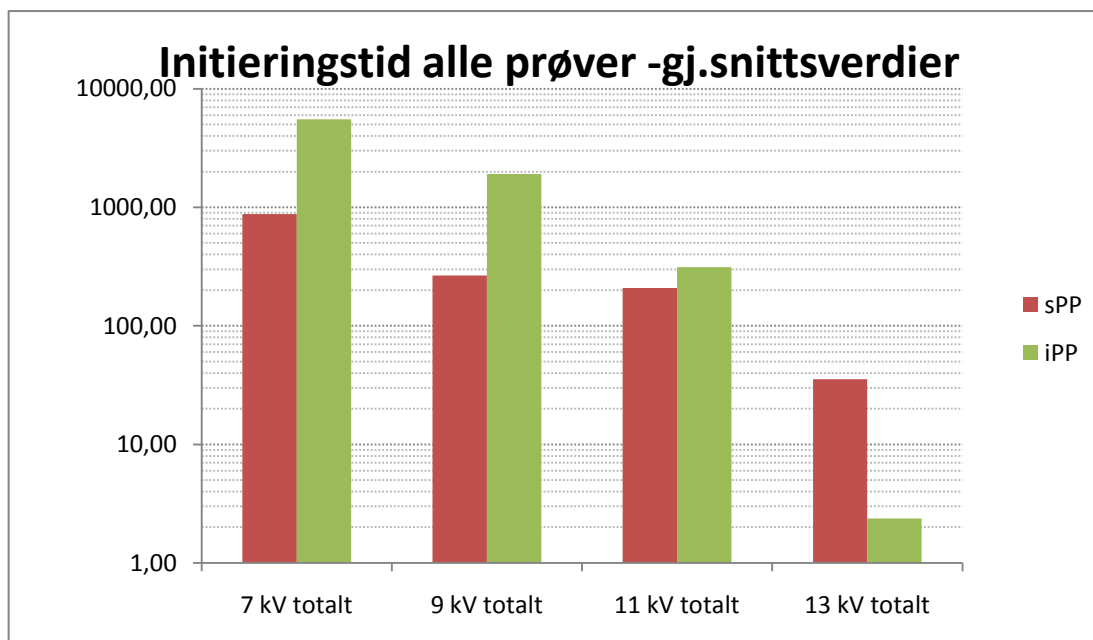
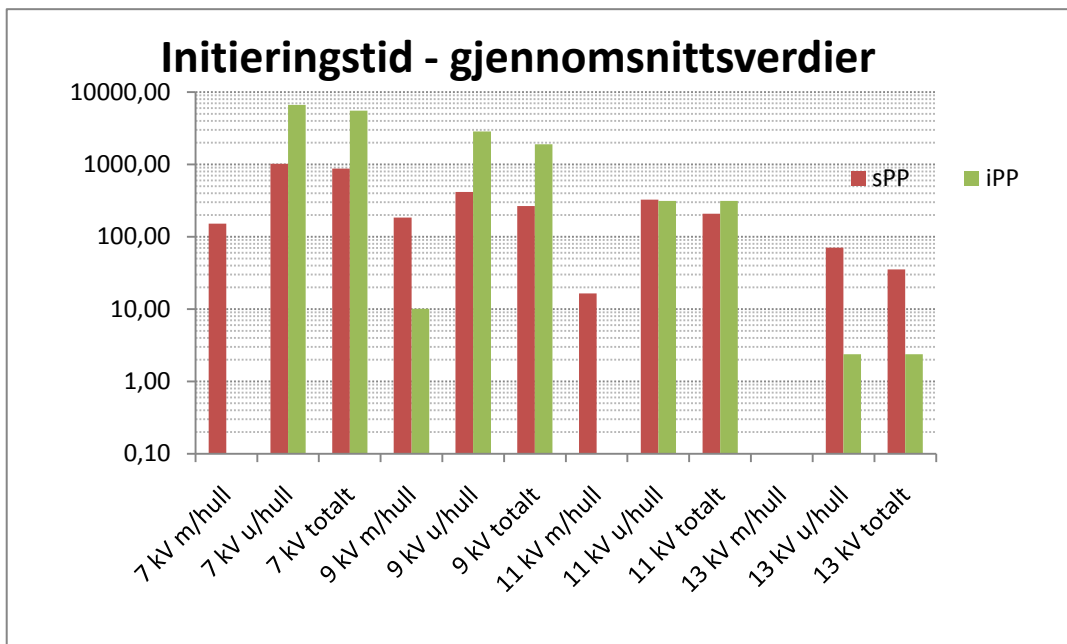


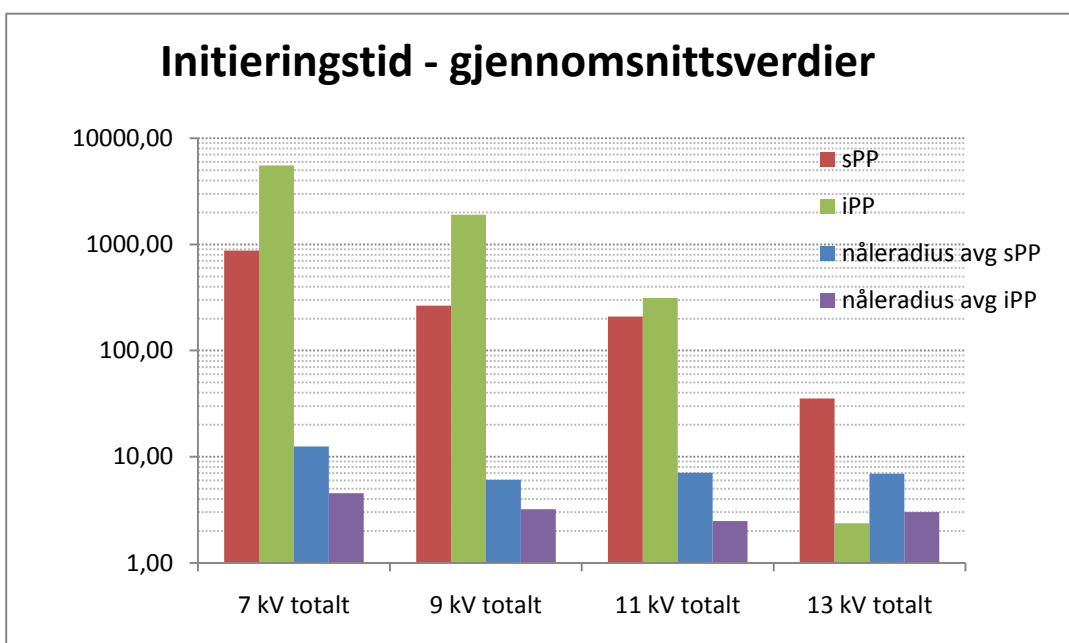
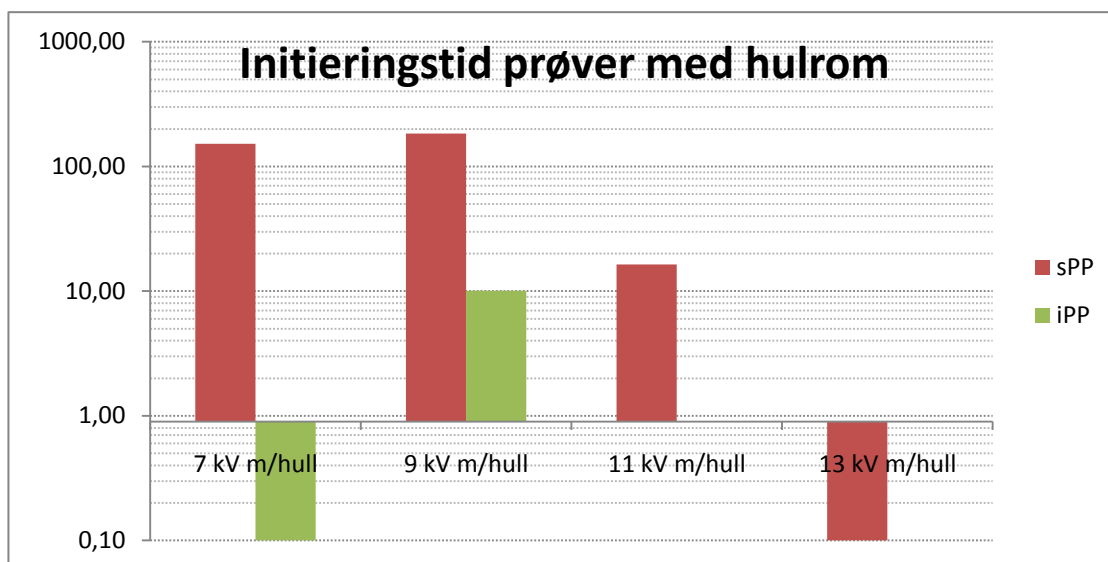
Trelengde i prosent av total lengde per tid - sPP



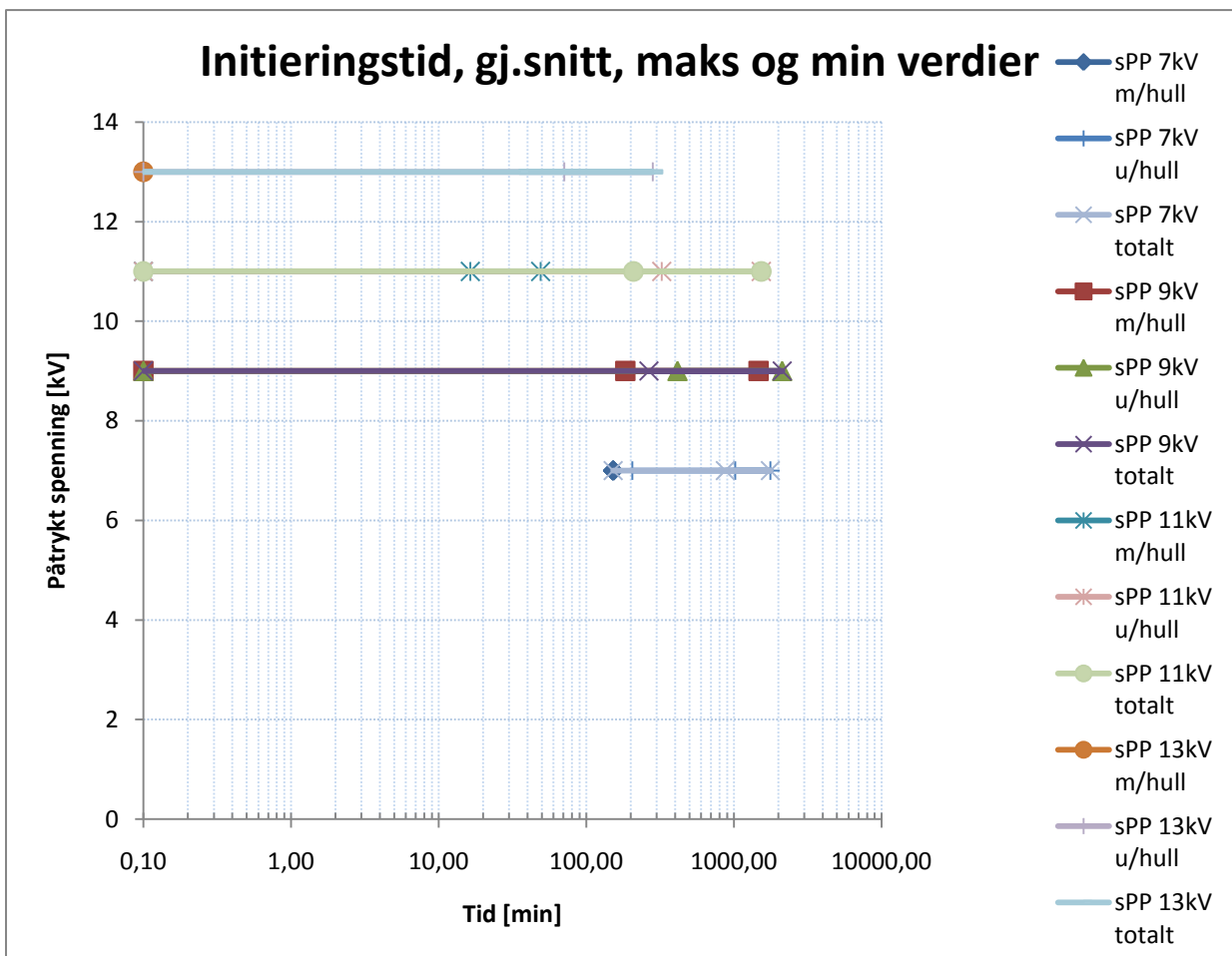
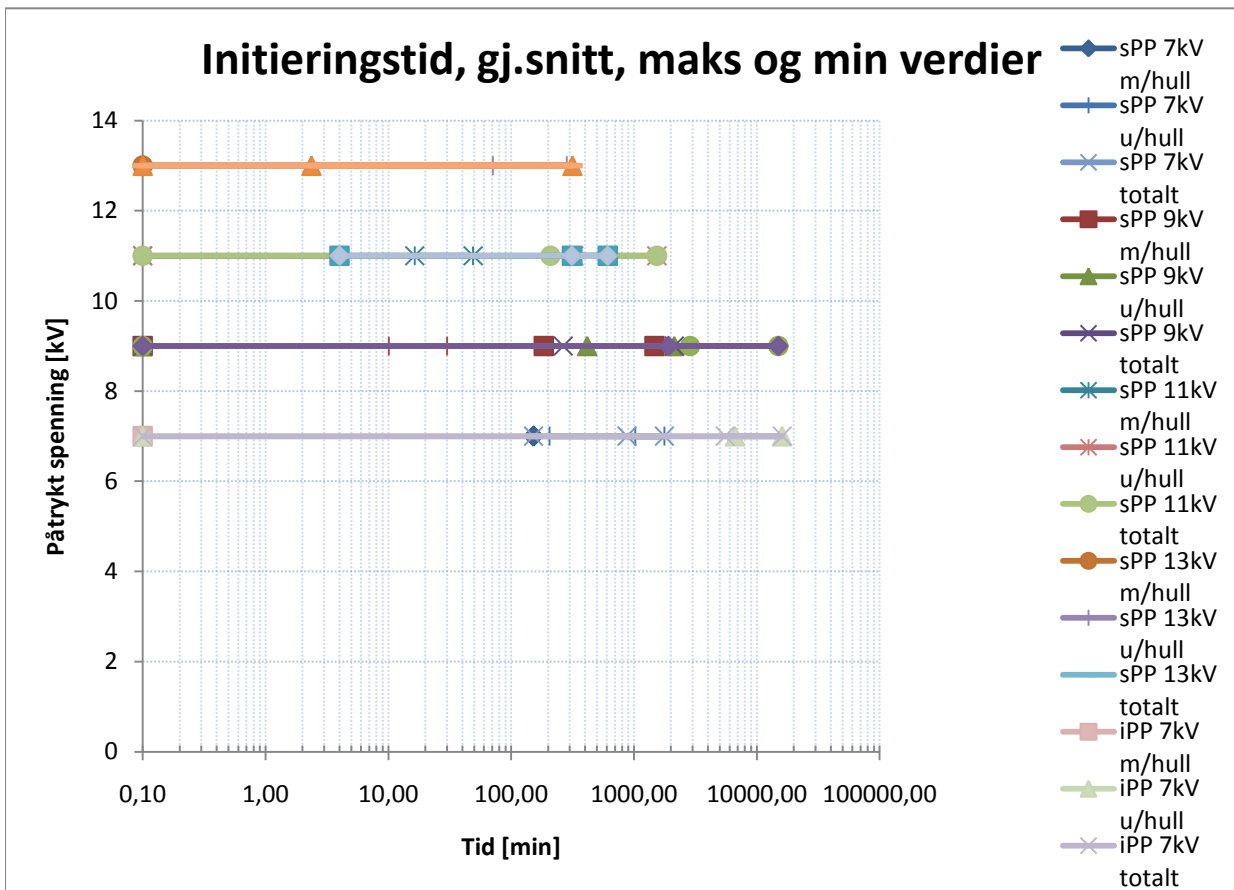
Trelengde i prosent av total lengde per tid - iPP

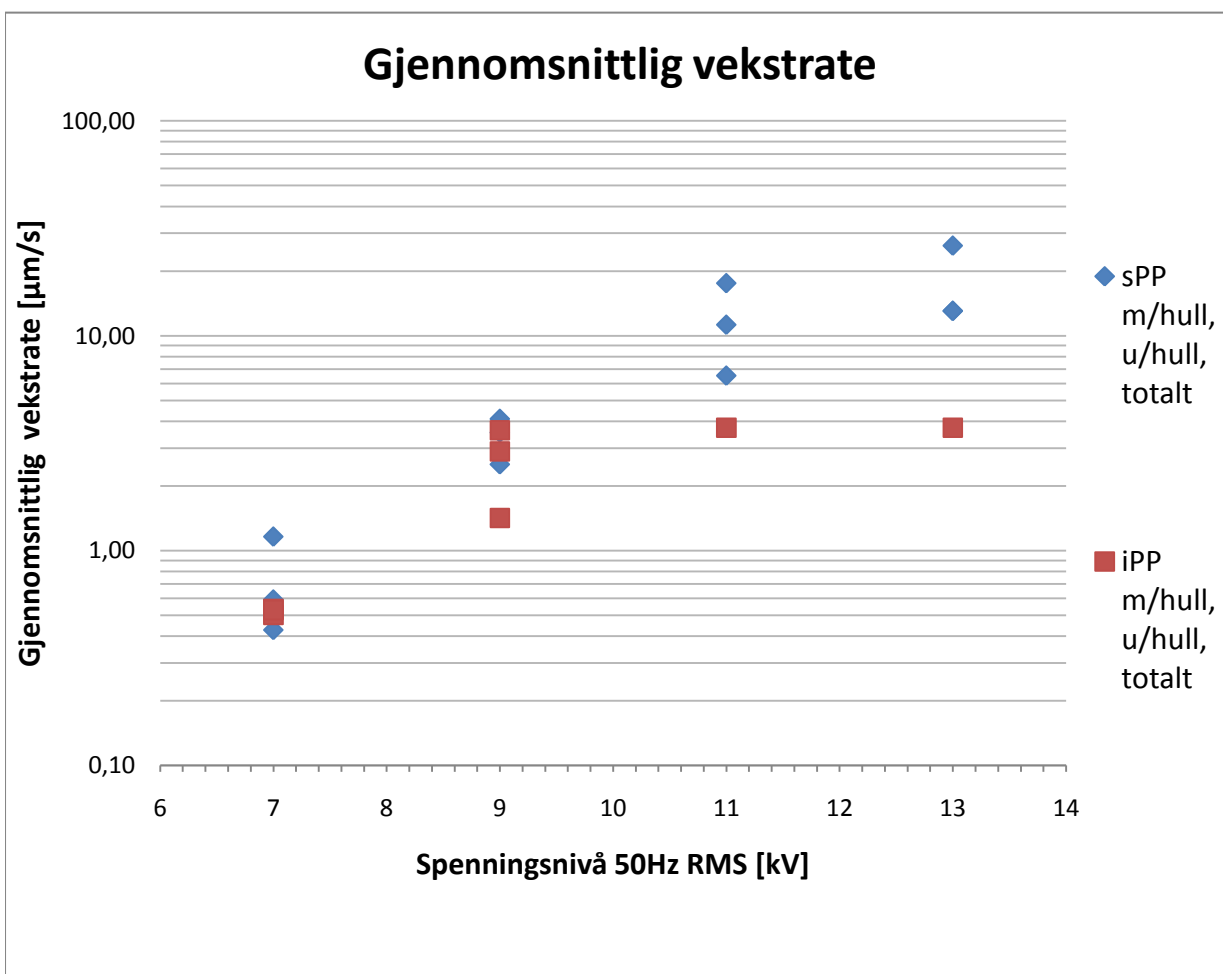
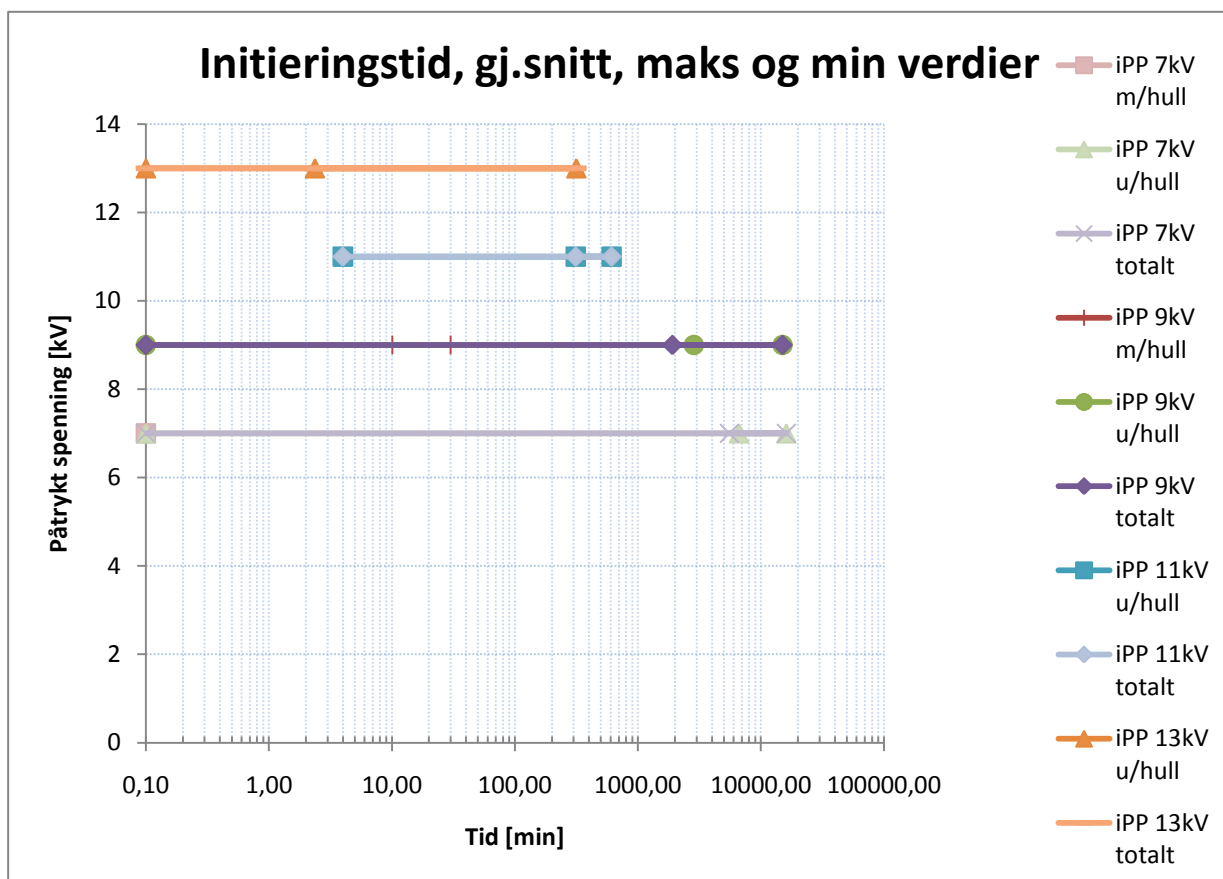


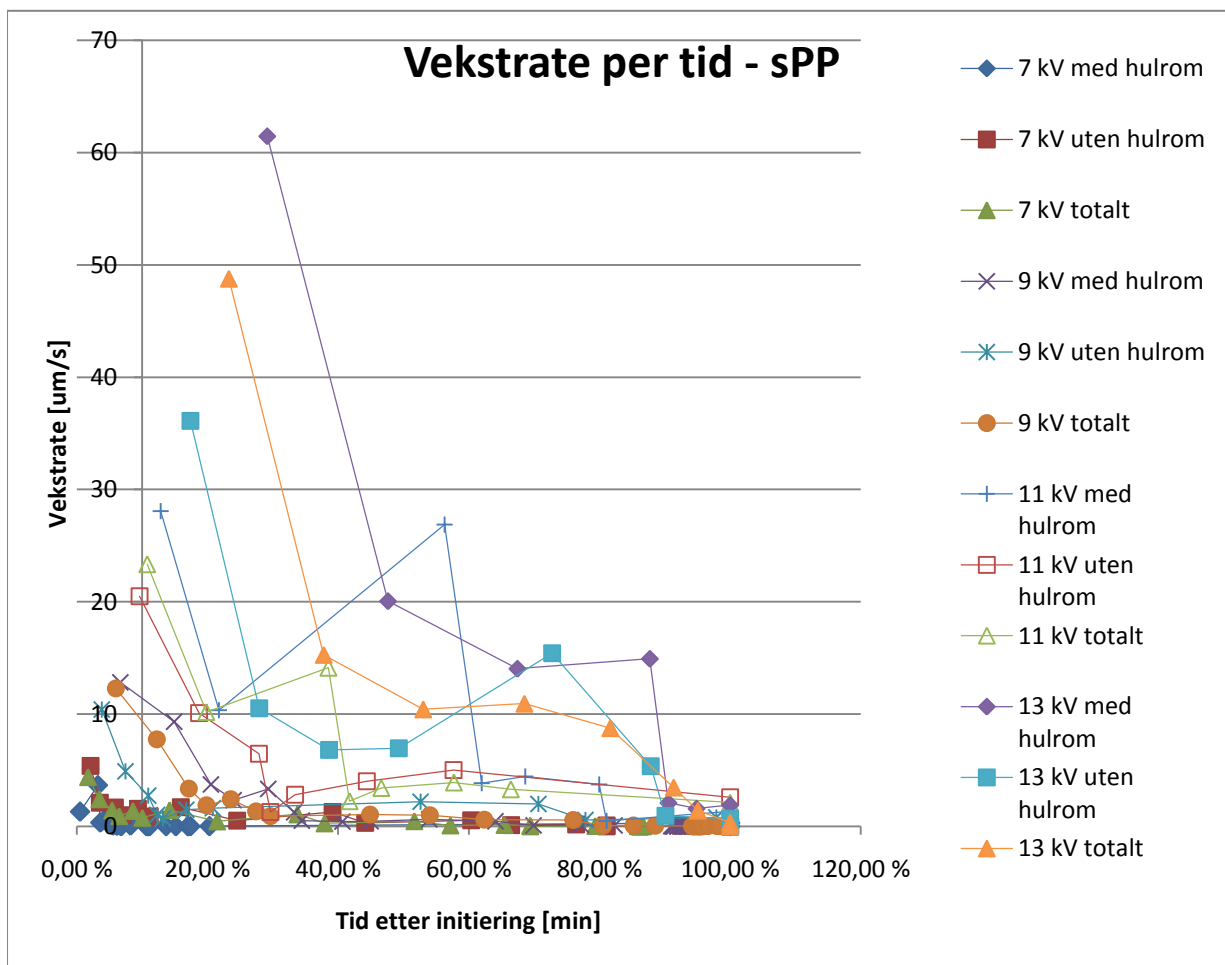
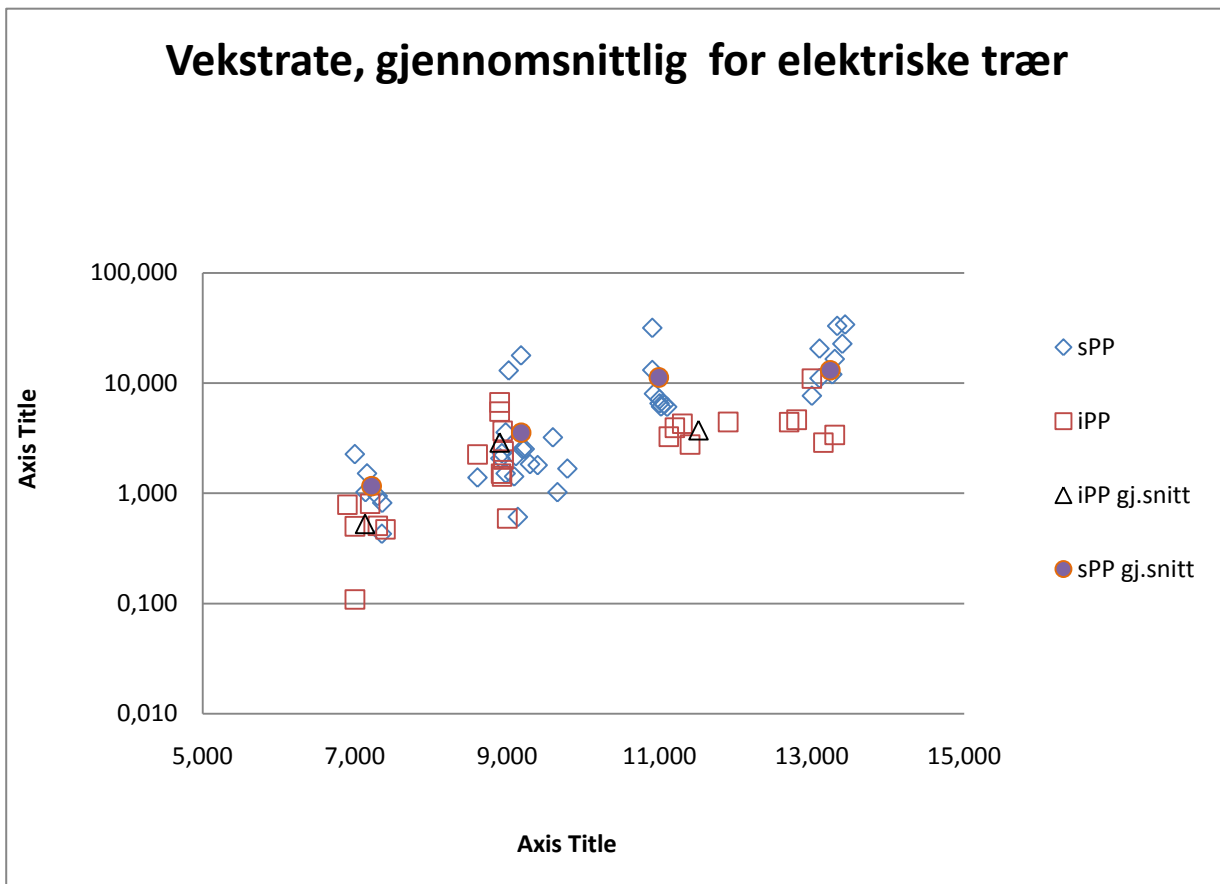




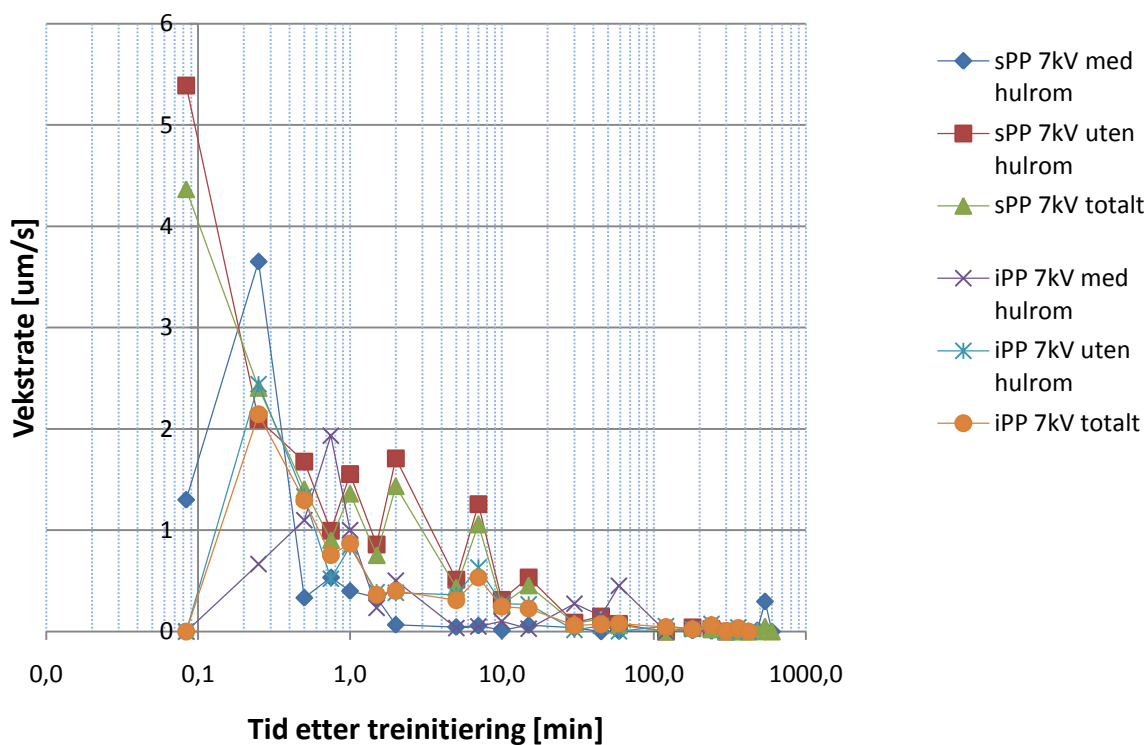
Initieringstid	sPP	iPP	Differanse	Differanse
Gjennomsnitt	[sek]	[sek]	[sek]	[%]
7 kV m/hull	152,0	0,1	151,9	
7 kV u/hull	21563,4	6651,0	14912,4	2,24
7 kV totalt	17994,9	5542,5	12452,3	2,25
9 kV m/hull	184,0	10,1	174,0	17,28
9 kV u/hull	416,1	2855,0	2439,0	5,86
9 kV totalt	265,9	1906,7	1640,8	6,17
11 kV m/hull	16,4		16,4	
11 kV u/hull	324,2	313,0	11,2	0,04
11 kV totalt	208,8	313,0	104,2	0,50
13 kV m/hull	0,1		0,1	
13 kV u/hull	70,8	2,4	68,5	28,93
13 kV totalt	35,5	2,4	33,1	13,98



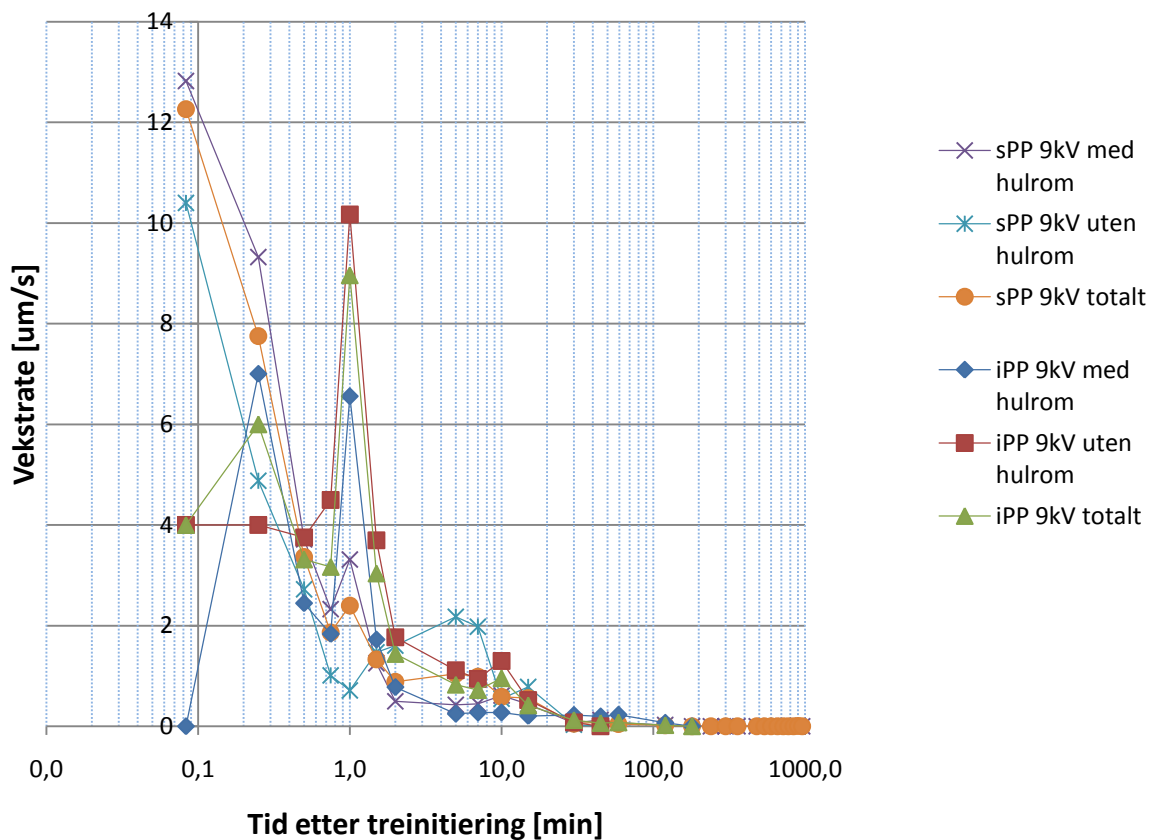




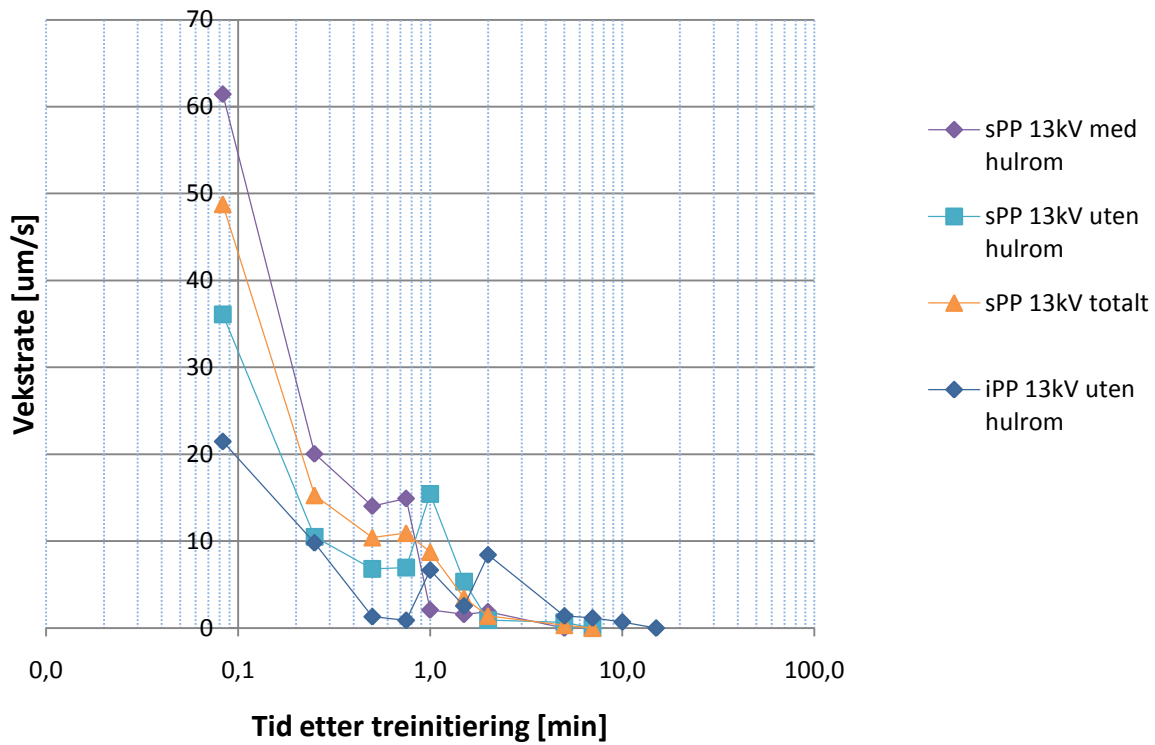
Vekstrate per tid - 7kV



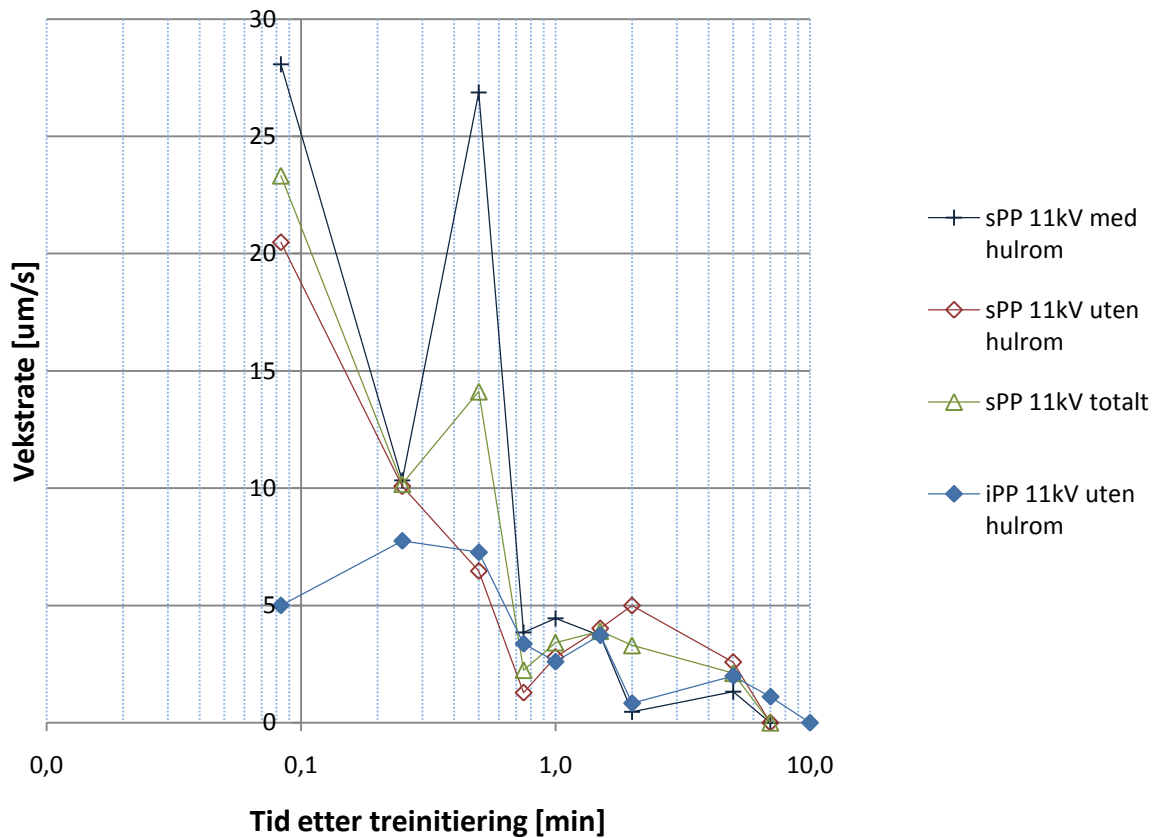
Vekstrate per tid - 9kV

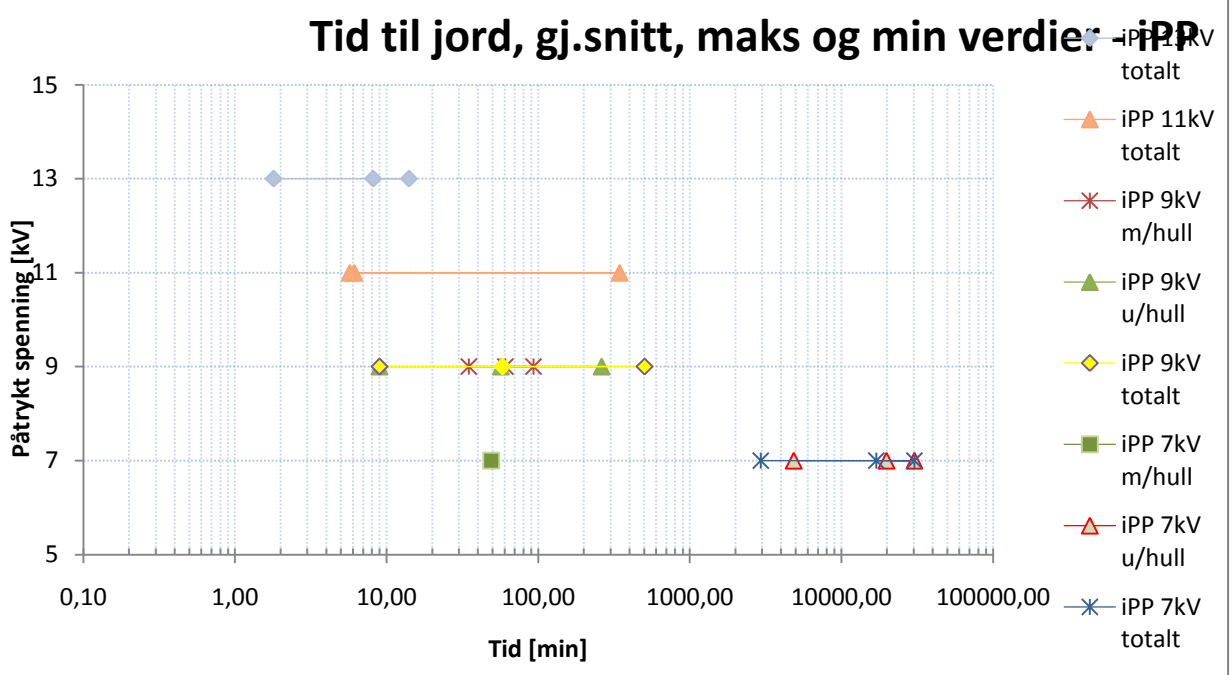
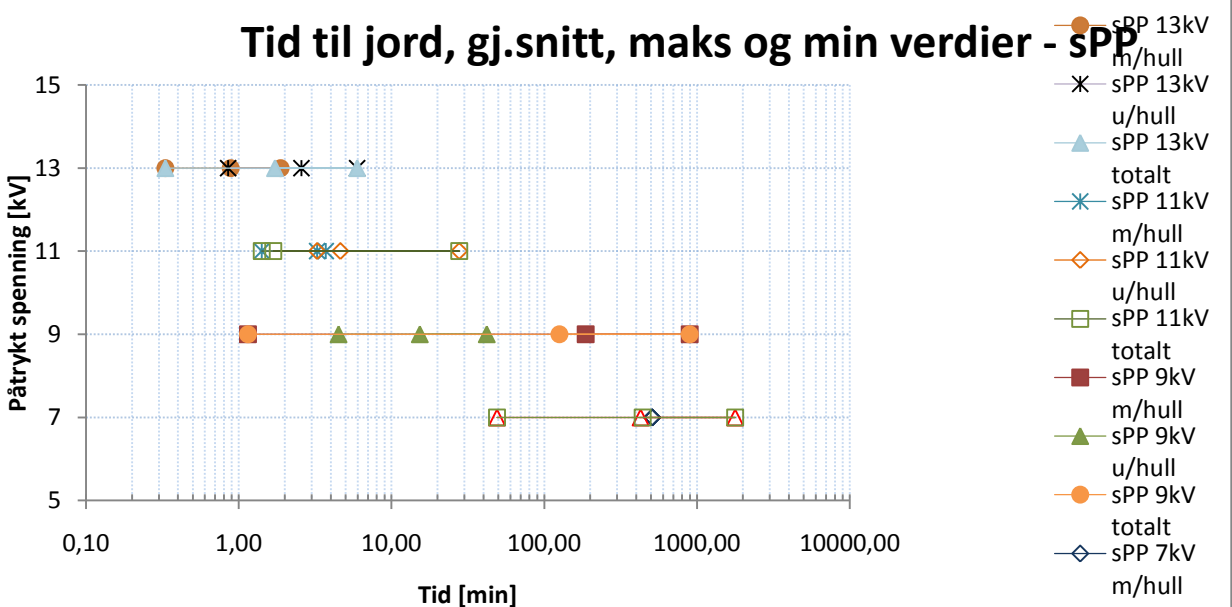
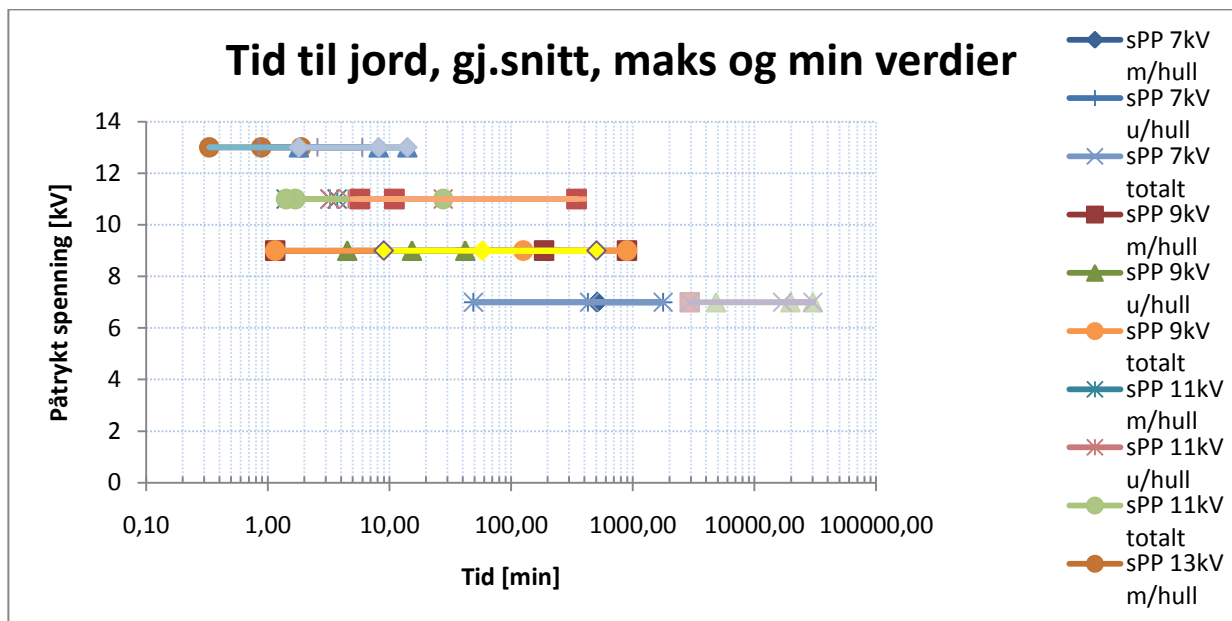


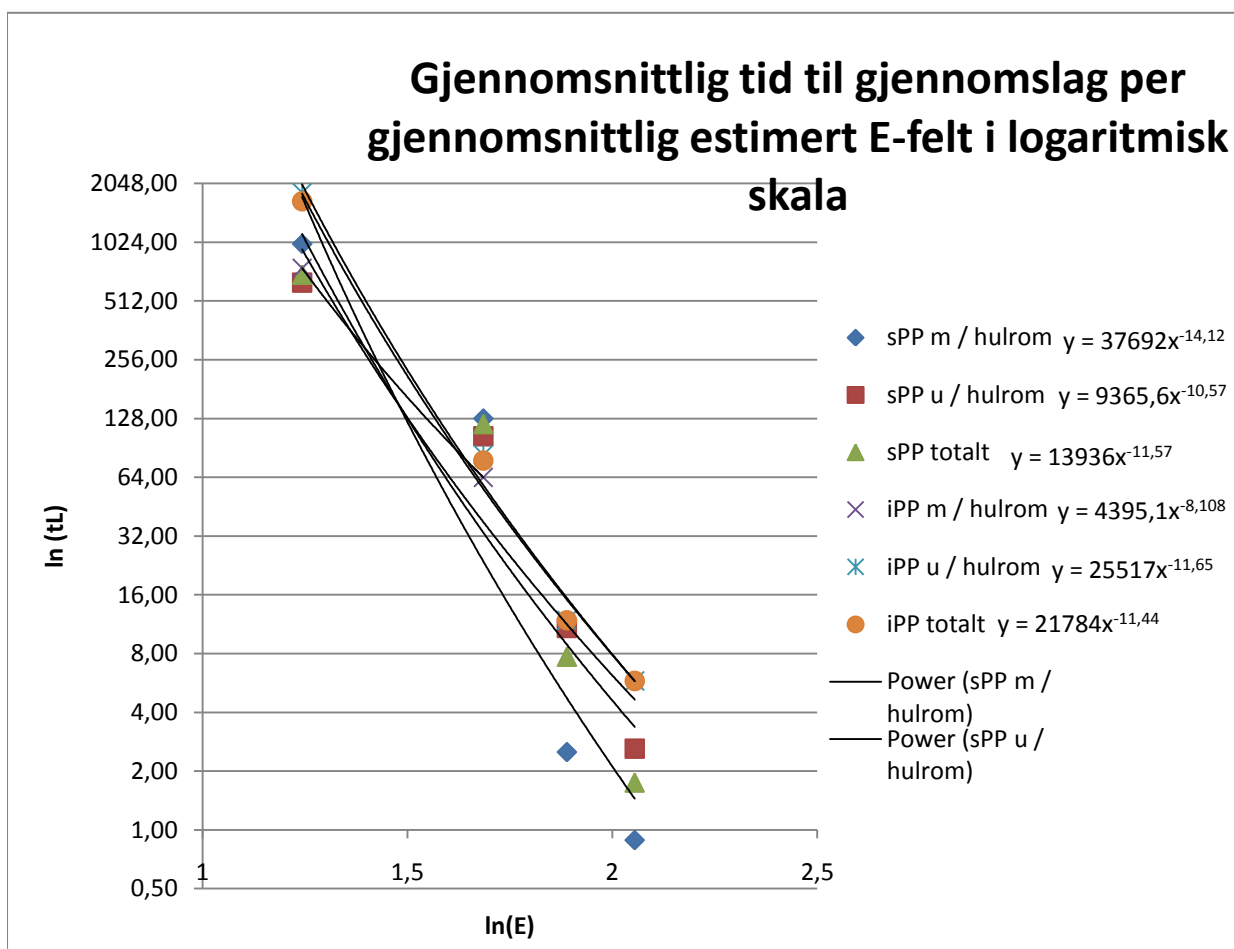
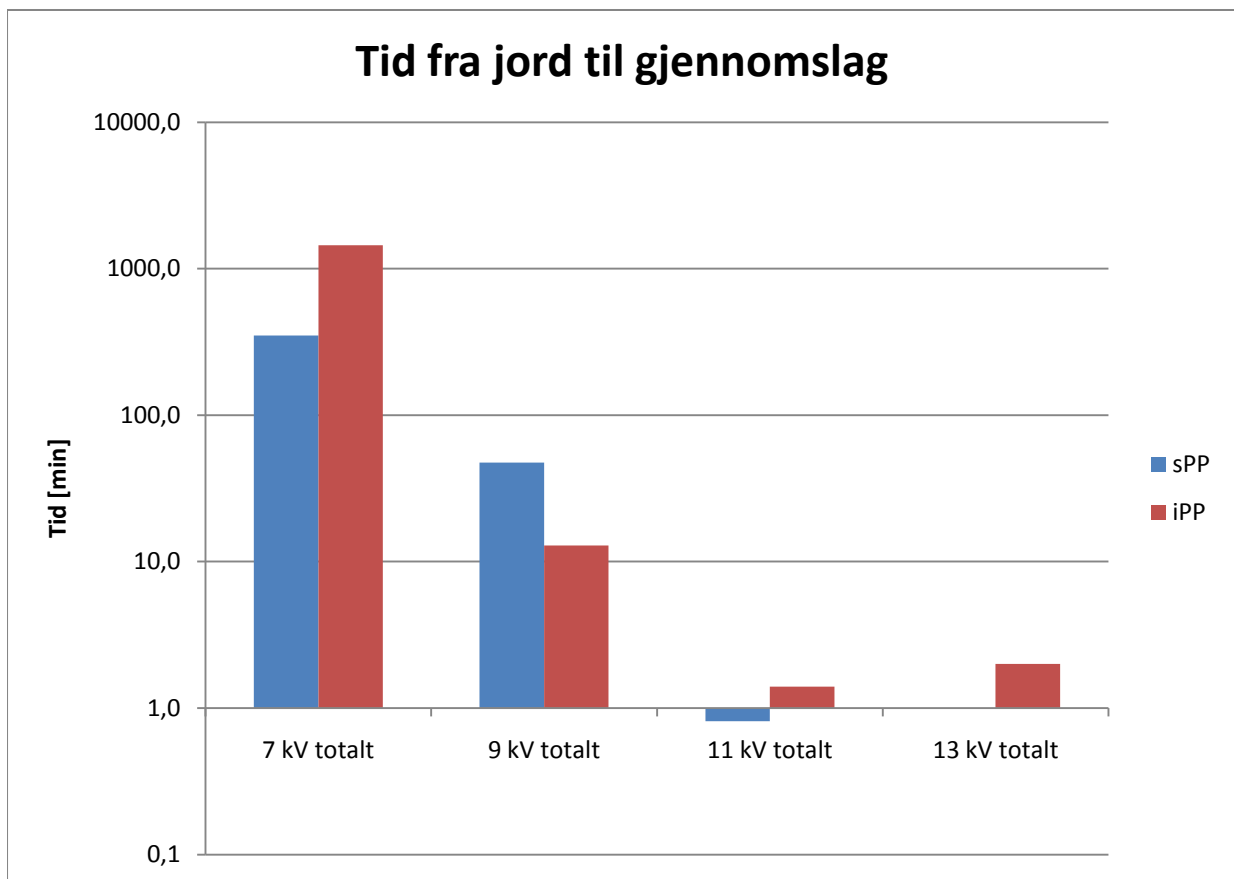
Vekstrate per tid - 13kV

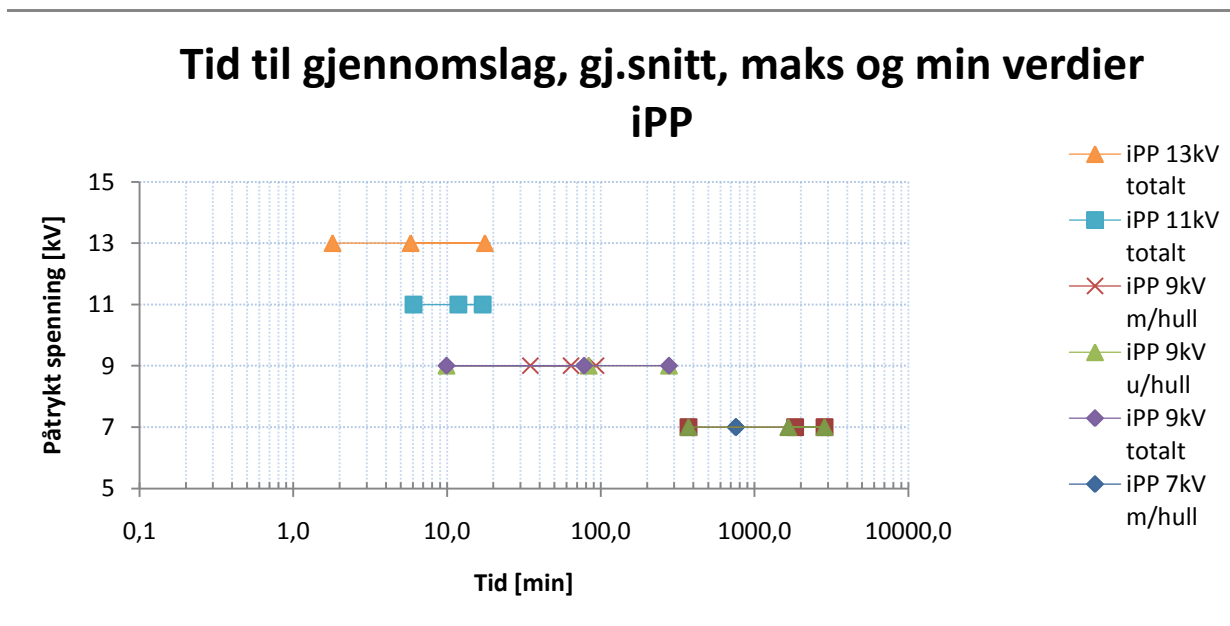
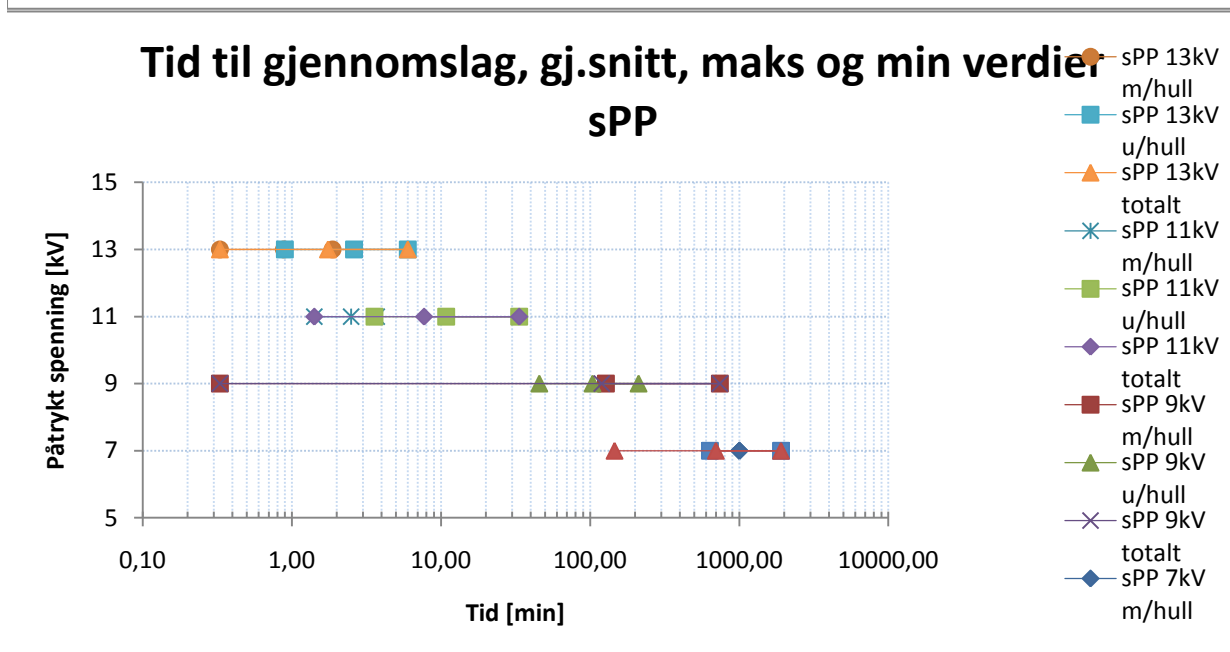
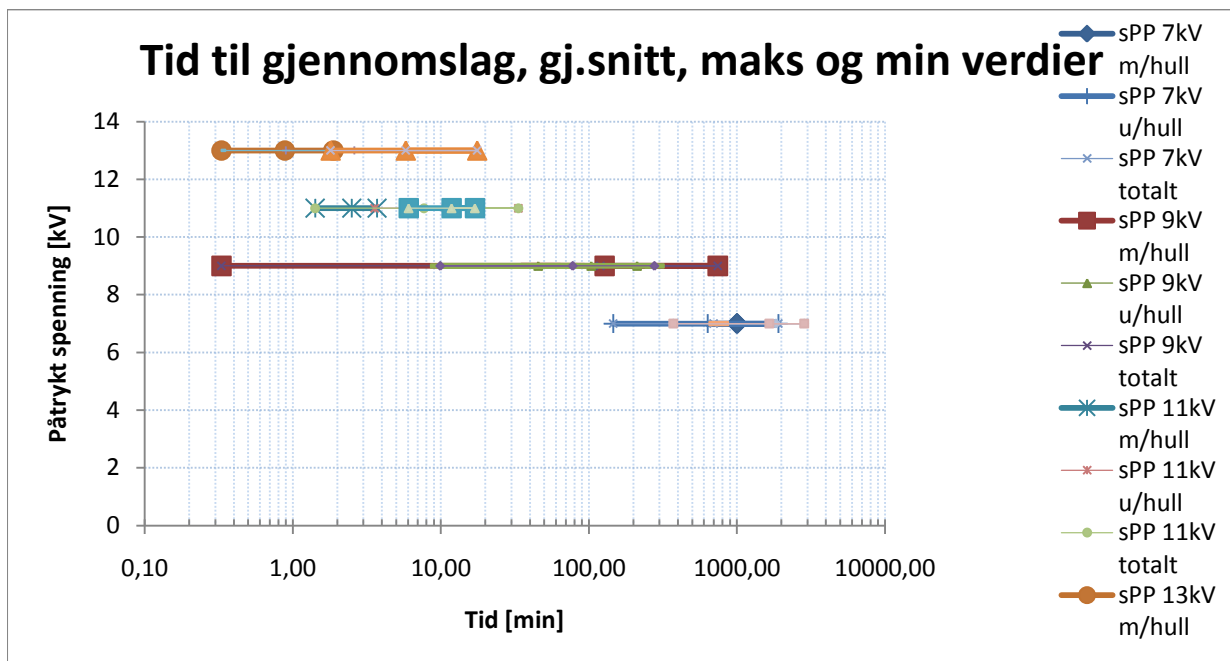


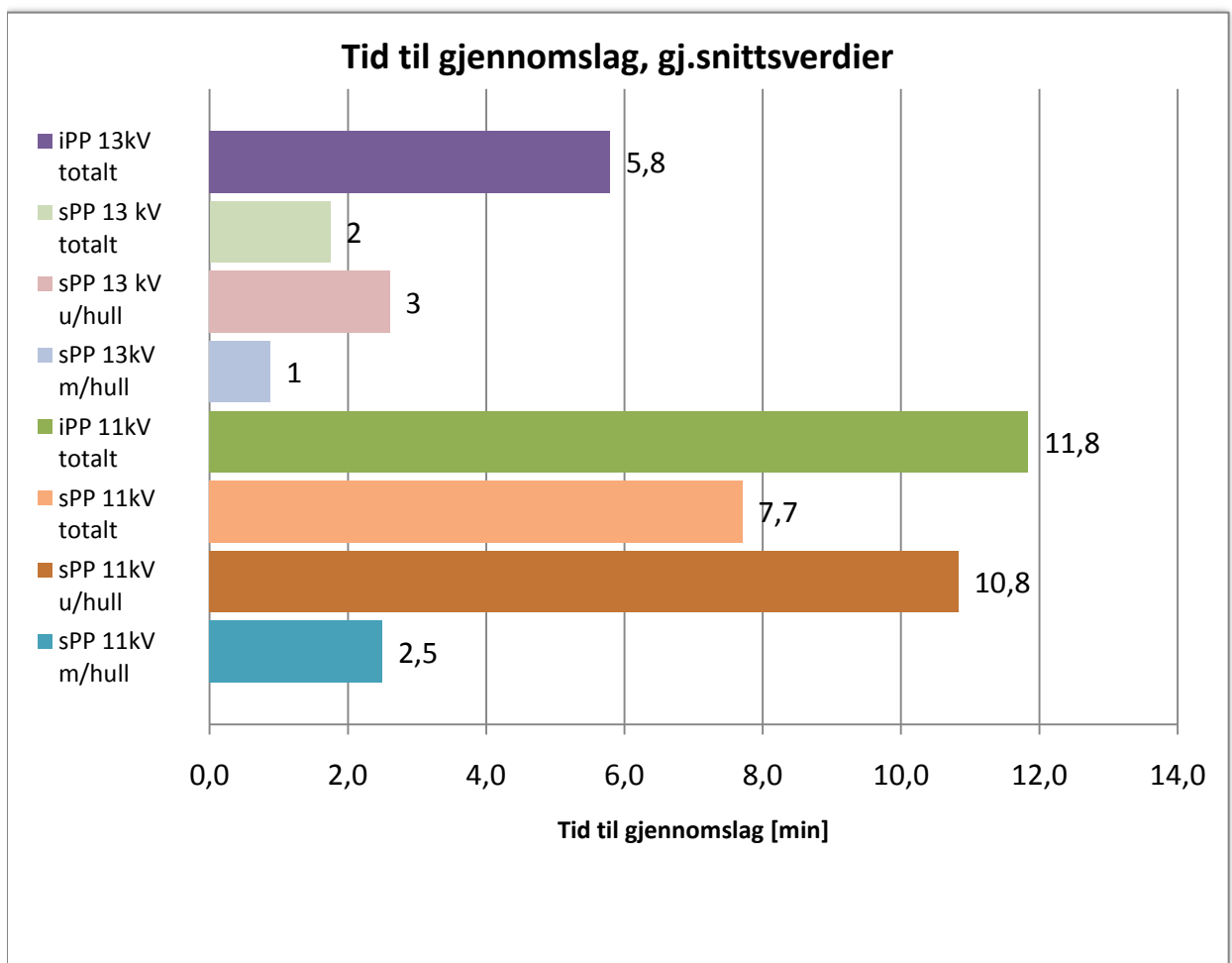
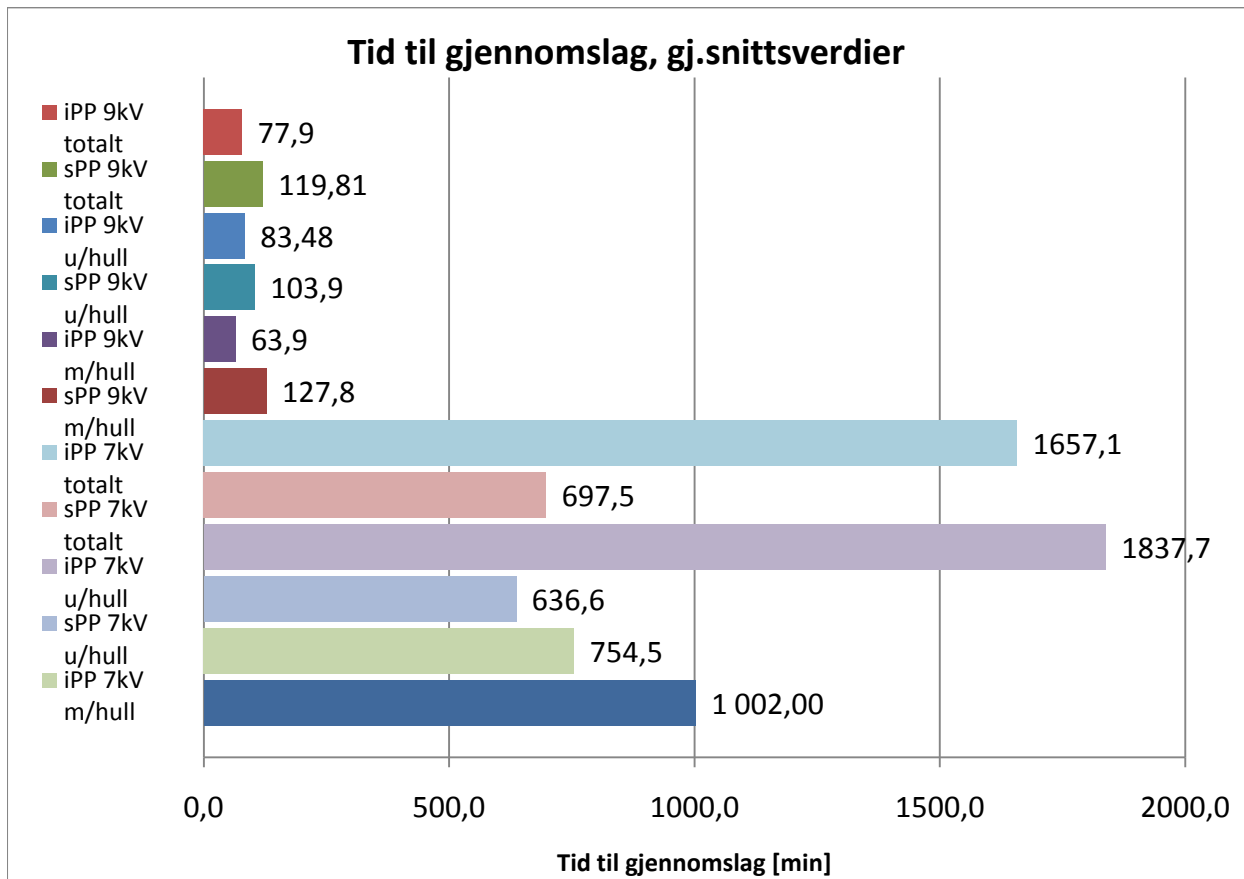
Vekstrate per tid - 11kV

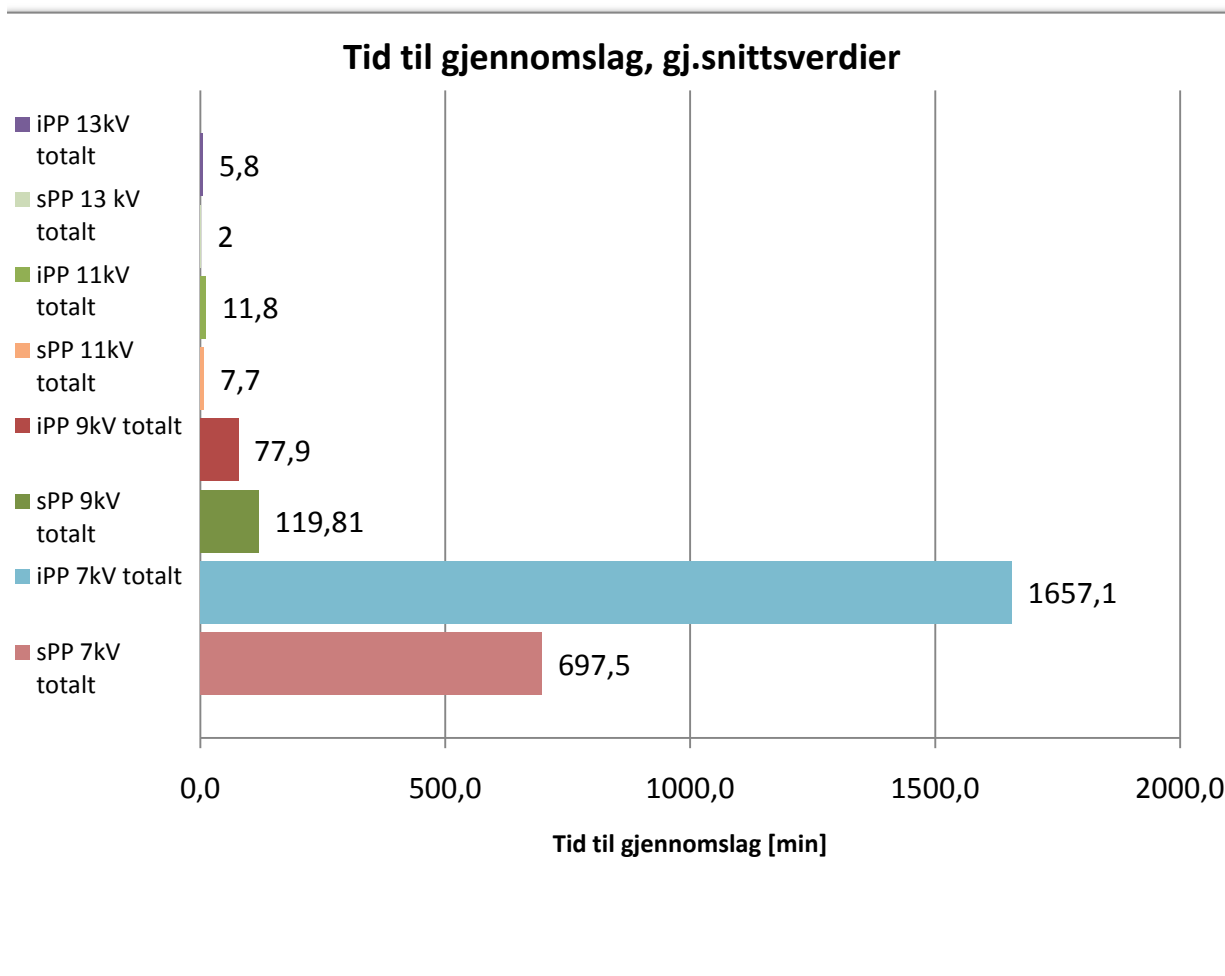
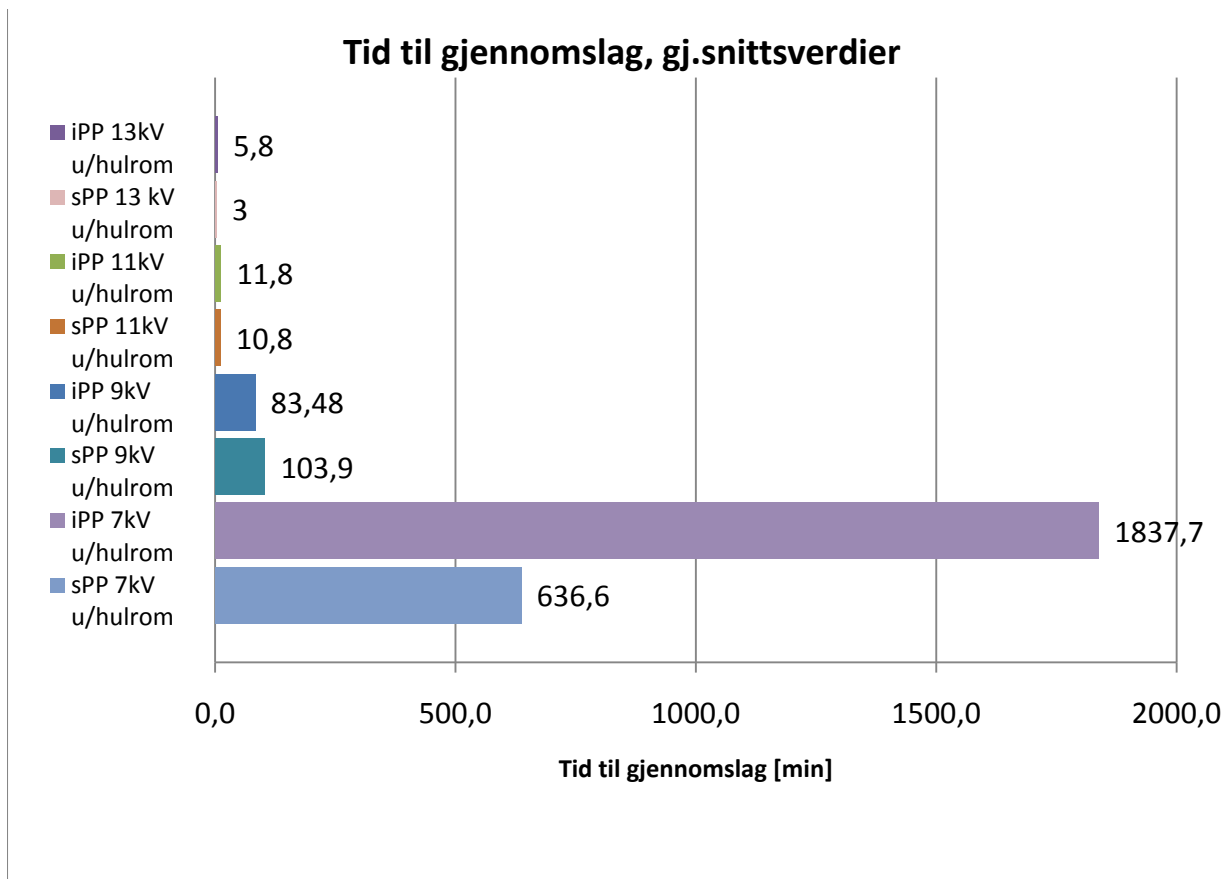




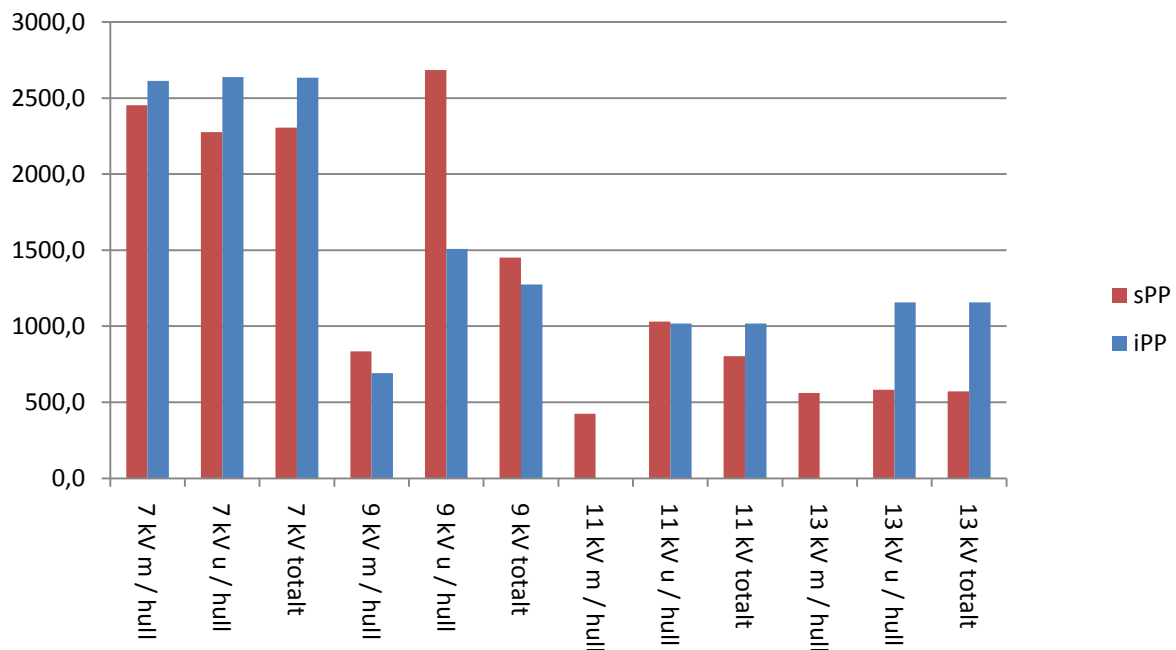








Gjennomsnittlig trevektbredde ved gjennomslag



Gjennomsnittlig trevektbredde i forhold til jordavstand ved gjennomslag

