

Polarisasjon og Elektrisk ledningsevne i HVDC massekabler som funksjon av spenning og temperatur

Esten Øyen Fremmegaard

Master i energi og miljø
Oppgaven levert: Juni 2011
Hovedveileder: Erling Ildstad, ELKRAFT

Forord

Denne oppgaven er avsluttende masteravhandling i studiet Energi og Miljø med fordypningsområde Elektrisk Energiteknikk. Oppgaven er full studiebelastning i det tiende og avsluttende semesteret.

Formålet med oppgaven er å karakterisere hvilke faktorer som påvirker polarisasjon og elektrisk ledningsevne i HVDC massekabler med hovedfokus på spenning og temperatur.

Arbeidet ble utført ved NTNU (Norges tekniske-naturvitenskaplige universitet), ved Institutt for Elkraftteknikk våren 2011.

Jeg vil gjerne benytte anledningen til å takke min veileder, professor Erling Ildstad for god oppfølging og veiledning under arbeidet med masteroppgaven. Jeg vil også takke alle på verkstedet og alle ved instituttet som har hjulpet meg med oppgaven.

Ellers vil jeg takke for fem flotte år i Trondheim.

Trondheim, juli 2011

Esten Øyen Fremmegaard

Sammendrag

I denne masteroppgaven undersøkes det hvordan polarisasjonsfenomenet og DC ledningsevnen påvirkes av ulike faktorer. Det legges spesiell vekt på å vise hvordan temperatur, tid og spenning påvirker disse fenomenene. Resultatene av analysen brukes til å vurdere retningslinjer for dimensjonering av massekabelisolasjon.

Forsøkene som ble utført for å karakterisere disse faktorene, var måling av polarisasjons- og depolarisasjonsstrømmer både på tvers og på langs av kabelisolasjonen. Spenning og temperatur ble variert for å undersøke hvordan ledningsevnen og polarisasjonen ble endret av dette. For å kunne gjennomføre forsøkene ble det laget en målekrets og to prøveobjekter. Det første prøveobjektet var en 4,5 meter lang kabel som ble brukt til å måle den dielektriske responsen på tvers av kabelisolasjonen. Det andre prøveobjektet var en 25 mm tykk kabelskive som ble brukt til å måle den dielektriske responsen på langs av kabelisolasjonen. Disse prøveobjektene ble tatt ut av en del av NorNed kabelen. Dette er en 450 kV HVDC massekabel. For å logge målingene, ble det utviklet et eget loggerprogram som styrte hele prøvetakningen. En bit av kabel ble også dissekert for å se nærmere på kabelens oppbygning, og de ulike isolasjonsmaterialenes dimensjoner.

Arbeidet med denne masteroppgaven har ledet frem til følgende konklusjoner:

- I kabelisolasjonen vil den mest dominerende polarisasjonsmekanismen være grenseflatepolarisasjon. Det vil likevel foregå to ulike typer grenseflatepolarisasjon, en rask grenseflatepolarisasjon i oljefilmene i isolasjonen, og en tregere grenseflatepolarisasjon i buttgapen.
- På bakgrunn av resultatene og diskusjonen kan en konkludere med dielektriske respons og DC ledningsevne i en massekabel er avhengig av temperatur, tid, påtrykt spenning og kabelisolasjonens oppbygning.
- Når det gjelder den dielektriske responsen kan en ut fra tidskonstantene for de forskjellige forsøksresultatene konkludere med at polarisasjonen i kabelisolasjonen skjer raskere ved temperatur og spenningsøkning. Polarisasjonsstrømmen vil også raskere stabilisere seg ved økning av disse parameterne. Stabiliteten til polarisasjonsstrømmen var f. eks ved $t = 6$ h, 35 ganger mer stabil for forsøket utført ved 60°C og 10 kV enn for forsøket utført ved 20°C og 3 kV.
- Ledningsevnen til kabelisolasjonen er hovedsaklig avhengig av påtrykt E-felt og temperatur, men for massekabler vil også isolasjonsoppbygningen være en avgjørende faktor. For prøveobjektet der ledningsevnen ble målt på tvers av kabelisolasjonen ble ledningsevnen beregnet til:

$$\sigma = 5,79 * 10^{-17} e^{(0,105T+0,155E)}$$

- Ledningsevnen på langs av kabelen kan som en forenkling sees på som ledningsevnen til oljen. Denne ble målt til å være 103 ganger høyere enn ledningsevnen på tvers av kabelen. Dette vil si at konduktiviteten vil stort sett være forårsaket av oljen i isolasjonen. Ladningene vil altså bevege seg i buttgapene og oljefilmene i kabelisolasjonen.
- Som en løsning på dette problemet kan buttgap og oljefilmer gjøres mindre, men det er viktig at dette ikke går utover kabelens mekaniske egenskaper. Siden ledningsevnen er avhengig av temperaturen, og ledertap vil føre til varmetvikling, er det også viktig at den termiske konduktiviteten i isolasjonen er god. Hvis temperaturvariasjonene i kabelisolasjonen er stor vil dette føre til en skjev feltfordeling. Bedre kontroll i produksjonen av hvor brede buttgapene i isolasjonen faktisk lages, og hvor stor variasjon bredden til buttgapene blir, vil også bedre kabelens egenskaper. Hvis bredden på buttgapene varierer mye kan det oppstå "weak spots" i isolasjonen. Det er også mulig å eksperimentere med ulike dimensjoner på papirstrimlene i isolasjonen for å prøve og bedre isolasjonens elektriske egenskaper.

Innholdsfortegnelse

1 - Innledning.....	1
2 - Teori	2
2.1 Oppbygning av massekabler.....	2
2.2 Polarisasjonsmekanismer	4
2.2 Grenseflatepolarisasjon.....	7
2.3 Tidsvarierende polarisasjon	11
2.4 Konduktivitet	16
3 - Instrumentering og målemetoder.....	21
3.1 - Etablering av prøvecelle	21
3.2 - Prøveobjekt	21
3.3 - Målekrets.....	22
3.4 - Forberedelse av prøveobjekt 1 (polarisasjon på tvers av kabelisolasjonen)	24
3.5 - Forberedelse av prøveobjekt 2 (polarisasjon på langs kabelisolasjonen).....	27
3.6 - Loggersystem	30
3.7 - Måleprosedyre	33
4 - Resultater	34
4.1 Måleresultater	34
4.2 Konduktivitet	43
4.3 Disseksjon	45
5 - Diskusjon	48
5.1 Endringer i pol/depolstrøm ved endring av temperatur og E-felt	48
5.2 Konduktivitet	50
5.3 Disseksjon	51
5.4 Dimensjonering av massekabelisolasjon	52
5.5 Feilkilder	52
6 - Konklusjon	54

7 - Litteraturliste.....	56
8 - Vedlegg.....	57

1 - Innledning

Europas kraftsystem bindes stadig mer sammen ved hjelp av undersjøiske kabler. Særlig fra Norge er det mange nåværende og planlagte linker til andre land. Per i dag planlegger Statnett, eller er i gang med produksjonen av, linker til Baltikum, Finland, Danmark, Nederland og Storbritannia. Noen av disse linkene finnes fra før av, men et økende elektrisitetsforbruk krever stadig flere linker for å ha et dynamisk nok europeisk nett for å dekke energibehovet. Alle disse linkene er så lange at HVDC er det eneste alternativet for å holde tapene nede. De aller fleste HVDC kablene er per i dag oljeimpregnerte massekabler. Det pågår mye forskning for å øke maksspenningen til PEX kabler, men disse klarer enda ikke like høye spenninger som massekablene [19]. Med dagens teknologi er maksspenningen til HVDC PEX kabler 320 kV, mens massekablene klarer spenninger opp mot 500 kV. Dette gjør at de største undersjøiske linkene vil være massekabler i en god stund til.

Problemet for de undersjøiske elektrisitetslinkene er at det er stor variasjon i lasten de utsettes for. I det europeiske nettet introduseres det stadig mer vindkraft. Vindkraft er en veldig varierende energikilde. Dette, og andre ujevnheter, gjør at de undersjøiske linkene må eksportere/importere mye av denne overskudds-/underskuddsenergien ved hjelp av disse kablene. Disse lastvariasjonene kan over lang sikt skade kablene.

Til tross for at masseimpregnert papir har blitt brukt som isolasjonsmedium i kabler siden 1950, er fortsatt kunnskapen om kabelens maksimale belastningsevne mangelfull. I denne oppgaven undersøkes eksperimentelt hvordan polarisasjonsfenomenet og DC ledningsevne endrer seg ved ulike parametre. Det legges spesiell vekt på hvordan den elektriske feltfordelingen i isolasjonen varierer ved ulike elektriske felt og temperaturer.

Prøveobjektet i denne oppgaven er en del av en 450 kV HVDC massekabel. De eksperimentelle forsøkene som ble utført på dette prøveobjektet var:

- Måling av dielektrisk respons på langs av kabelisolasjonen med varierende elektrisk stress og varierende temperatur.
- Måling av dielektrisk respons på tvers av kabelisolasjonen med varierende elektrisk stress.
- Måling av ledningsevne både på tvers og på langs.
- Disseksjon av kabelen for å se nærmere på kabelens oppbygning.

For å kunne gjøre disse målingene måtte det utvikles en prøvemethodikk for å få gjennomført forsøkene. Dette innebar oppsetting av en målekrets, og utvikling av et eget loggersystem.

Resultatene fra disse forsøkene brukes til å forklare hva som påvirker polarisasjonen og ledningsevnen i kabelisolasjonen, og hvordan en praktisk kan dimensjonere en HVDC massekabel slik at den får bedre elektriske egenskaper.

2 - Teori

2.1 Oppbygning av massekabler

[13]Kabelen som brukes i dette forsøket er en del av NorNed kabelen. NorNed er en 580 km lang undersjøisk HVDC link mellom Feda i Norge og Eemshaven i Nederland. Kabelen er en bipolar 450 kV massekabel, med en kapasitet på 700 MW. Isolasjonen i kabelen er masseimpregnert papir. På nederlandsk side av kabelen skjedde det et gjennomslag slik at deler av kabelen måtte byttes ut. Det er en liten del av denne utbyttede kabeldelen som utgjør testobjektene i denne oppgaven. Hvordan NorNed ser ut avkuttet kan en se i figur 2-1.



Figur 2-1, NorNed avkuttet [14].

Hva de ulike delene av kabelen i figur 2-1 er, er oppgitt i tabell 2.1.

Tall	Forklaring
1	Bitumenimpregnert tau
2	Armering
3	Stålbånd
4	PEXkappe
5	Blykappe
6	Ytre halvleder (h-bånd og sotpapir)
7	Olje/papirisolasjon
8	Indre halvleder (sotpapir)
9	Kobberleder

Tabell 2.1, Oppbygning av prøveobjekt.

[7][8] En massekabel er bygget opp av mange lag med forskjellige materialer, slik at den får eksakt de egenskapene den skal. De faktorene som har mest å si når en kabel skal designes, er hvor stor kabelspenningen skal være, hvor stor strøm kabelen skal lede og hvor dypt kabelen skal ligge. Andre ting som bøyeradius og feltfordeling er også faktorer en må se på når en slik kabel skal designes.

Lederen er i denne typen kabel bygget opp av profildreide kobbertråder. I midten av lederen er det en tykk rund kobbertråd som de mindre, profilformede, kobbertrådene er lagt utenpå. Disse profilformede kobbertrådene er lagt lagvis, dreid i hver sin retning, slik at det skal være mulig å bøye kabelen uten at lederen ødelegges.

Den neste trinnet i produksjonen av en massekabel er isolasjonen. I en massekabel er det oljeimpregnert papir som utgjør kabelens isolasjon. Isolasjonen kan ha opp mot 290 papirlag som er tvinnet oppå hverandre. Hvor mange papirlag en kabel vil ha kommer an på spesifikasjonene til kabelen. Hvert papirlag er tvunnet rundt lederen som en heliks (et papir overlapper ikke seg selv neste runde rundt lederen). Gapet som dannes mellom hver runde et papirlag blir påtvunnet, kalles et buttgap. Dette buttgapet skal ha en bredde fra 1-4 mm. [15]I denne kabelen skulle buttgapet være 1-3 mm brede. Grunnen til at det er nødvendig med slike buttgap i isolasjonen er at isolasjonen ikke skal bli ødelagt når kabelen bøyes. For å gjøre påleggningen av kabelisolasjonen lettere og for at kabelens bøyeegenskaper opprettholdes, legges papirlagene i bur på 12-16 papirer som tvinnes på i samme retning. Neste bur tvinnes i motsatt retning. I hvert bur tvinnes papirene slik at neste papirlag overlapper det forrige papirlaget med et forhold på 30-70. Dette er vist i figur 2-2.



Figur 2-2, Oppbygning av kabelisolasjon.

Papirene som brukes som isolasjon i en massekabel, er av en meget ren og tørr papirtype. Tykkelsen til papirene kan variere fra 40-180 μm , og bredden kan variere fra 15 - 30 mm. Hvert papirbur er tvunnet på med et spesielt strekk. Hvor kraftig dette strekt er bestemmes ut fra hvordan kabelens egenskaper .

Selve oppbygningen av kabelisolasjonen består av flere ulike papirtyper. Innerst ved lederen tvinnes det på noen lag med sotpapir. Dette sotpapiret fungerer som en halvleder som sikrer god ledning mellom lederen og isolasjonen. De neste papirlagene er ofte av en tynnere papirtype. Dette er fordi en vil forsikre seg at kabelen blir fullstendig impregnert, at kabelen har gode bøyeegenskaper og for å få en "myk" overgang mellom leder og isolasjonen. Resten av papirburene tvinnes på med en tykkere og bredere type papirstrimler. Utenpå papirisolasjonen legges det på en ytre halvleder og et h-bånd. Den ytre halvlederen er der for å forsikre at det er god kontakt mellom isolasjonen og blykappen. I mellom blykappen og den

ytre halvlederen legges det også på h-bånd. Dette er et tynt metall/papirbånd som virker som en halvleder i tillegg til å beskytte kabelisolasjonen mot varme når blykappen legges på.

[8]Det neste steget er å tørke kabelisolasjonen slik at fuktighetsnivået kommer innenfor det akseptable området på 1-2 %. Etter dette impregneres kabelen mer den høyviskos olje. Denne prosessen foregår ved at hele kabelen legges ned i en kjel med olje. Deretter varmes kjelen opp til 120°C og trykksettes slik at oljen impregneres igjennom hele kabelisolasjonen. Varmen gjør at viskositeten til oljen blir mye lavere slik at den lettere trenger inn i kabelisolasjonen. Etter at denne impregneringen er ferdig kjøles kabelen sakte ned. Grunnen til dette er at oljen ekspanderer ved høyere temperaturer, og for å forhindre hulromsdannelse i isolasjonen må denne nedkjølingen kontrolleres nøye.

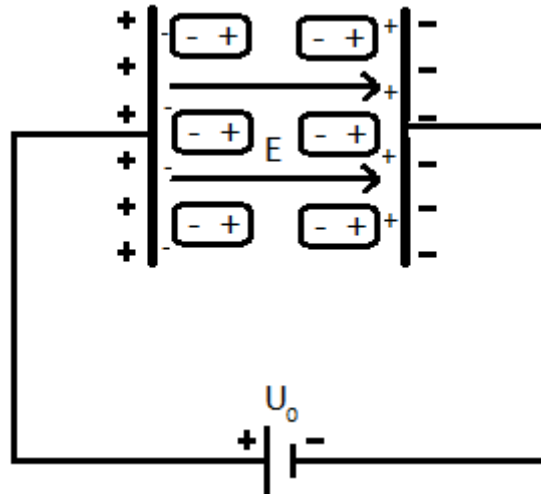
Når impregneringsprosessen er ferdig ekstruderes det på en blykappe med en tykkelse på 2-5 mm. Denne blykappen fungerer som en vanntett barriere mot sjøvannet. Uten på denne blykappen ekstruderes det et tynt PEX-lag som beskytter blykappen igjennom resten av produksjonsleddene. Deretter legges det på et metallbånd som sørger for at blykappen ikke utvides når kabelisolasjonen ekspanderer ved oppvarming.

Hvordan en massekabel er bygget opp etter dette varierer mye. NorNed er bipolar kabel der på tur og retur leder er pakket inn i samme armering. Hvor mye armering som legges på kabelen bestemmes hovedsaklig av hvor dypt kabelen skal ligge. Armeringen tvinnes på kabelen på samme måte som kobberlederen ble tvunnet på. Over armeringen tvinnes det på et taulag. Dette taulaget og armeringen impregneres med bitumen som er en tyktflytende asfalt. Nå bitumenimpregneringen stivner vil tauene og armeringen fungere som et godt skjold mot fysiske påkjenninger.

2.2 Polarisasjonsmekanismer

En massekabel kan forenklet sees på som en kondensator der lederen og blykappen fungerer som elektroder, og isolasjonen imellom fungerer som et dielektrikum.

[1][3]Et dielektrikum er en elektrisk isolator som kan polariseres når det påtrykkes et elektrisk felt. Når et dielektrikum blir plassert i et elektrisk felt, vil ikke de elektriske ladningene bevege seg igjennom materialet. Konsekvensen blir at dipolene i det dielektriske materialet vil rette seg inn etter feltet. På grunn av polarisasjonen i det dielektriske materialet vil de positive ladningene trekke seg i mot den negative elektroden og de negative ladningene trekke seg i mot den positive elektroden(se figur 2-3).



Figur 2-3, Polarisasjon av dielektrikum i en parallell platekondensator

Dette skaper et internt elektrisk felt som delvis kompenserer for det eksterne elektriske feltet som er påtrykket dielektrikumet. Polarisasjonen kan altså sees på som et netto bidrag i distribuert dipolmoment innenfor størstedelen av det dielektrisk materiale. Disse dipolene vil kun bidra til en overflateladning ved grenseflatene. Den totale ladningen vil altså være null bortsett fra ved elektrodene kontaktflater (Se figur 2-3).

Et dielektrikum er karakterisert ut fra dets dielektriske konstant ϵ , som relateres til den elektriske flukstettheten D og det elektriske feltet E , når det påtrykkes en DC-spenning. For en platekondensator kan det elektriske feltet, når det påtrykkes en DC-spenning, uttrykkes som under i likning (2.1).

$$E = \frac{U}{d} \quad (2.1)$$

I denne formelen er d er avstanden mellom kondensatorplatene. Denne likningen tar ikke hensyn til ende-effektene som vil forekomme i en slik kondensator.

Den elektriske flukstettheten uttrykkes som i likning (2.2).

$$D = \epsilon E \quad (2.2)$$

Den dielektriske konstanten er et produkt av permittiviteten til vakuum ϵ_0 ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$) og den relative dielektriske konstanten ϵ_r .

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.3)$$

Ut fra dette kan en si at materialer med lav relativ permeabilitet må påtrykkes et høyt elektrisk felt for å oppnå den samme flukstettheten som et materiale med høy relativ permeabilitet. Materialer med høy relativ permittivitet, som kabelisolasjon, inneholder dipoler. Disse dipolene vil som forklart over rette seg inn etter feltet. Dette er en prosess som bruker litt tid på å stabilisere seg, permittiviteten er altså tidsavhengig.

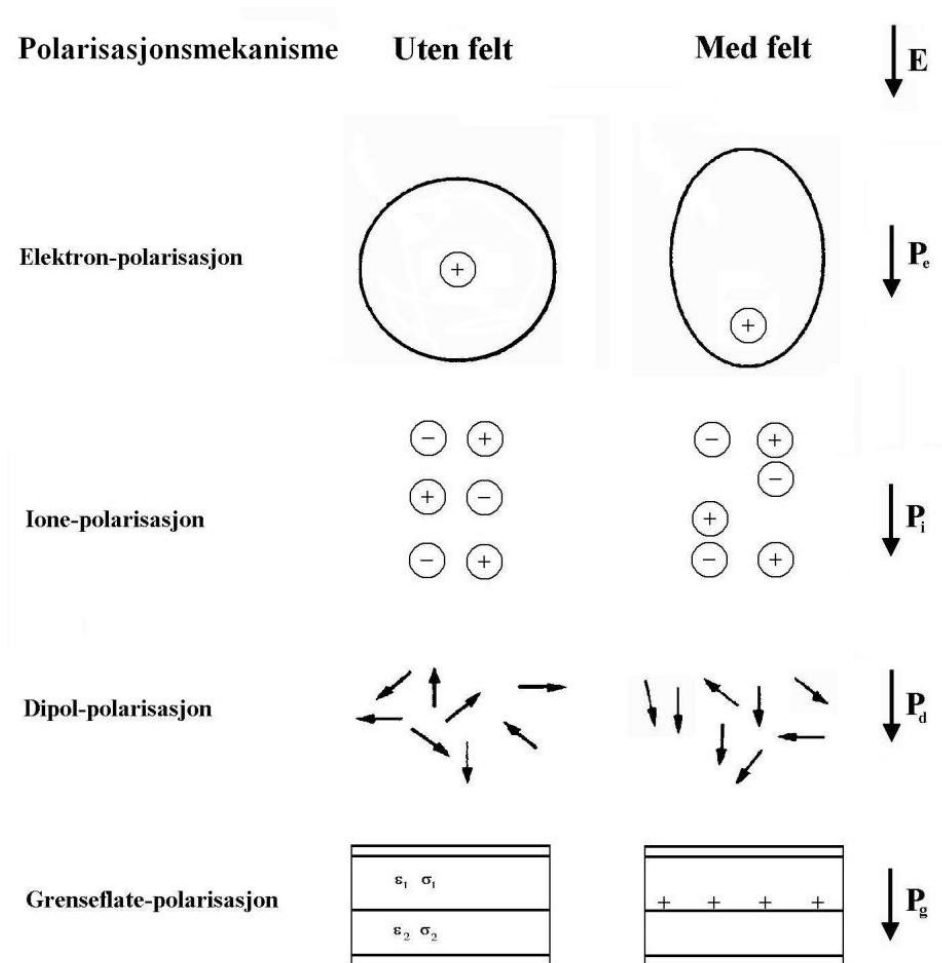
Matematisk kan polarisasjon forklares ved å innføre et ekstra ledd P [C/m^2] i formelen for elektrisk flukstetthet. χ er den dielektriske følsomheten. P representerer her det kombinerte bidraget av alle dipolene som har blitt rettet etter det elektriske feltet.

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 E + \epsilon_0 \chi E \quad (2.4)$$

Ved å sette dette inn i likningen for elektriske flukstettheten (2.2) får en ut likningene for P og χ .

$$P = \epsilon_0 E (\epsilon_r - 1), \quad \chi = \epsilon_r - 1 \quad (2.5)$$

Det finnes fire ulike polarisasjonsmekanismer som vist i figuren under (figur 2-4).



Figur 2-4, De ulike polarisasjonsmekanismene[1]

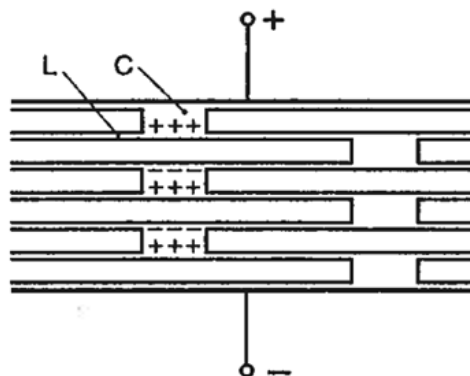
Elektronpolarisasjon: Når et elektrisk felt påtrykkes et atom vil elektronskyen som ligger rundt kjernen trekke hovedkonsentrasjonene av elektronene mot en side av kjernen. Resultatet er en midlertidig indusert dipol som er proporsjonal med det påtrykte feltet. Denne polarisasjonstypen vil fort forsvinne når det elektriske feltet opphører.

Ionepolarisasjon: I ionisk bunnede materialer er i utgangspunktet de positive og de negative ionene symmetrisk posisjonert. Når et slikt materiale utsettes for et elektrisk felt vil negative og positive ionene presses i hver sin retning. Dette resulterer i en usymmetrisk gitter struktur av dipoler. Denne effekten vil som i elektronpolarisasjonen opphøre med en gang det elektriske feltet opphører. Disse to polarisasjonstypene kalles derfor for momentan polarisasjon.

Dipolpolarisasjon: Noen molekyler har usymmetrisk posisjonering av elektronene og er derfor permanente dipoler. Et eksempel på et slikt molekyl er vann (H_2O). Når det ikke påtrykkes et elektrisk felt er derfor disse molekylene retningsorientert i en helt tilfeldig retning. Hvis et elektrisk felt påtrykkes vil molekylene derimot rette seg inn etter feltet. I gasser og væsker kan dipolene bevege seg fritt, og kan relativt flett innrette seg etter feltet. Det kan vises teoretisk at dipolpolarisasjonen P_d tilnærmevis er proporsjonal med påtrykket elektrisk felt, men omvendt proporsjonal med temperaturen. Dipoler i faste materialer kan i motsetning ikke bevege seg fritt. Forholdet mellom P_d , E og T blir derfor mer kompleks og relasjonen mellom dem må bestemmes eksperimentelt for ulike materialer. Dipol polarisasjon er en relaksjonsmekanisme. Dette vil si at polarisasjonen skjer tregt i forhold til momentanreaksjonene.

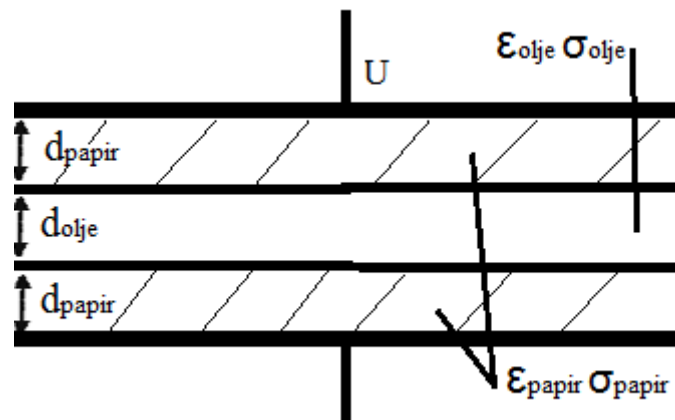
2.2 Grenseflatepolarisasjon

I en massekabel som brukes som prøveobjekt i denne oppgaven vil alle polarisasjonsmekanismene som er forklart i det forrige avsnitte virke inn, men den polarisasjonsmekanismen som er mest dominerende er i dette tilfellet grenseflatepolarisasjon eller Maxwell Wagner effekt. Som forklart i delen oppbygning av massekabler, er isolasjonen bygget opp av mange lag med papir som er impregnert med olje. [7] Dette gjør at isolasjonen består av lag med olje og papir som ligger oppå hverandre. Isolasjonen er også brutt opp av buttgapene, men hva som skjer i disse oljefylte hulrommene vil bli tatt opp litt senere i dette kapitlet. Figur 2-5 viser hvordan kabelisolasjonen ser ut med papirlag, buttgap og oljefilmer.



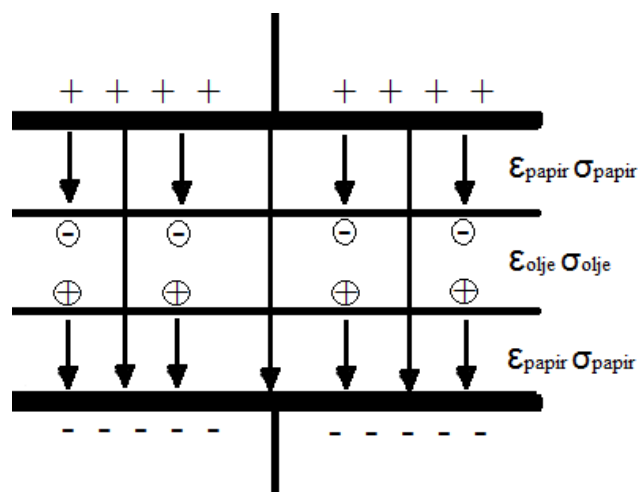
Figur 2-5, I de oljefylte gapene C og oljefilmene L, vil det samle seg overflateladninger på grenseflatene[7].

[1][4]Kabelisolasjonen kan altså sees på som en kondensator med flere lag av dielektrikum imellom. Hvis en ser på en liten del av isolasjonen med to lag papir og et lag med olje (uten noen buttgap) vil det se ut som i figur 2-6.



Figur 2-6, Utsnitt av olje/papirisolasjonen i en massekabel uten buttgap.

I et isolasjonsmateriale vil en ofte ha inhomogeniteter og forurensninger. I dette tilfellet er det med vilje blandet flere materialer i samme isolasjonssystem. Disse materialene har forskjellig relativ permittivitet, og forskjellig ledningsevne. Når disse dielektrikumene påtrykkes et elektrisk felt vil de frie ladningen bevege seg mot overflatene. Dette resulterer i at negative ladninger beveger seg mot den positive elektroden, og positive ladninger vil bevege seg mot den negative elektroden. [10]Siden ledningsevnen i oljen (σ_{olje}) er mye større enn i papiret (σ_{papir}) og den relative permittiviteten til oljen (ϵ_{olje}) og papiret (ϵ_{papir}) er relativt lik, vil de frie ladningene i oljen legge seg i grenseflaten imellom oljen og papiret. [7] Den relative permittiviteten til vanlig impregnert kraftpapir er ca 4,5, og for oljen er denne ca 2,2. [9]Ledningsevnen til papiret ligger i området 10^{-16} S/m og for oljen ligger den i området 10^{-13} . Grenseflatepolarisasjon er, som dipolpolarisasjon, en relaksasjonsmekanisme og vil derfor bruke litt tid på å innrette seg etter det elektriske feltet. Dette er skissert i figur 2-7.

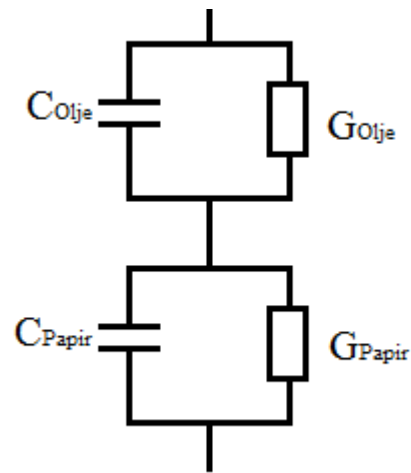


Figur 2-7, Overflateladninger og D felt i olje/papir isolasjon hvis $\sigma_{olje} / \sigma_{papir} > \epsilon_{olje} / \epsilon_{papir}$.

Hvis en nå ser på hele systemet under et, vil ikke den totale polarisasjonen endre seg noe hvis en slår sammen alle oljelagene og alle papirlagene. Dermed kan det lages en forenkling som ser ut som i figur 2-8 og en elektrisk krets ekvivalent som er satt opp i figur 2-9.



Figur 2-8, Forenklet lagvis isolasjonssystem.



Figur 2-9, Elektrisk kretsekvivalent av fig 2-8.

I figur 2-8 representerer d_{olje} og d_{papir} de samlede tykkelsene av henholdsvis oljen og papiret. I kretsen i figur 2-9 kan de ulike kapasitansene og resistansene forklares som i formel 2.6.

$$G_{olje} = \sigma_{olje} \frac{A}{d_{olje}} \quad G_{papir} = \sigma_{papir} \frac{A}{d_{papir}} \quad C_{olje} = \epsilon_{olje} \frac{A}{d_{olje}} \quad C_{papir} = \epsilon_{papir} \frac{A}{d_{papir}} \quad (2.6)$$

Ved å sette opp admittansmatrisen til figur 2-9 og sette inn for resistansene og kapasitansene i formel 2.6 kan en få ut formel 2.7 og 2.8[1].

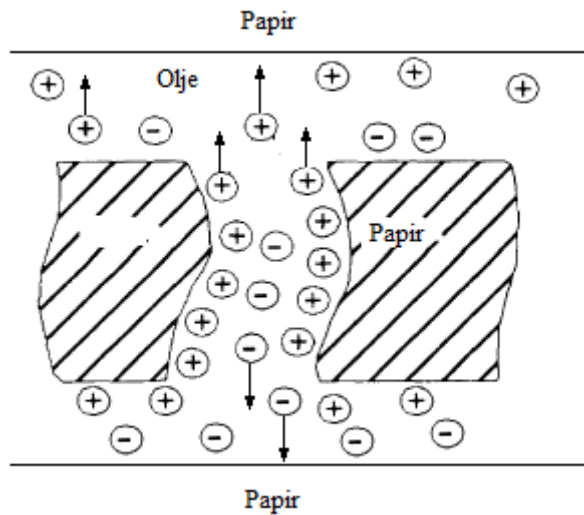
$$\tau = \frac{(d_{olje} \cdot \epsilon_{papir} + d_{papir} \cdot \epsilon_{olje}) \epsilon_0}{\sigma_{olje} \cdot d_{papir} + \sigma_{papir} \cdot d_{olje}} \quad (2.7)$$

I denne formelen (2.7) representerer τ relaksasjonstiden for hele polarisasjonen.

$$\sigma = \frac{(d_{papir} + d_{olje}) \sigma_{olje} \cdot \sigma_{papir}}{\sigma_{papir} \cdot d_{olje} + \sigma_{olje} \cdot d_{papir}} \quad (2.8)$$

I denne formelen representerer σ ledningsevnen for papiret og oljen til sammen.

[9]I buttgapene vil det i prinsippet skje det samme. Hvis en tar for seg et utsnitt av kun et buttgap og papirlagene over og under dette buttgapet, er det et mye større gap med olje her enn mellom to papirlag (oljefilm i figur 2-5). Dette fører til at når det påtrykkes et elektrisk felt over buttgapet vil ladningene ha en mye lengre vei å gå før de når grenseflaten mellom papiret og oljen. Dette er illustrert i figur 2-10.



Figur 2-10, Ladninger som beveger seg igjennom et buttgap ved påtrykket spenning[9].

Med tanke på at oljefilmene er veldig tynne og at papiret har en tykkelse på 40-180 μm vil det ta lengre tid for oljen i buttgapene, enn oljen imellom papirlagene, å bli fullstendig polarisert.

2.3 Tidsvarierende polarisasjon

[1][2][3]I dette avsnitte vil det bli sett på effekten av å påtrykke en trinnspenning på et dielektrikum. Ionepolarisasjon, og elektronpolarisasjon er som tidligere er nevnt momentanreaksjoner. Den totale momentanepolarisasjonen P_m kan derfor forklares som i likning (2.9).

$$P_m = P_e + P_i \quad (2.9)$$

Der P_e er elektronpolarisasjonen og P_i er ionepolarisasjonen.

Momentanpolarisasjonsmekanismene vil skje så raskt at de ikke vil gi noen utslag på målingene foretatt i denne rapporten. De to relaksjonsmekanismene, dipolpolarisasjon og grenseflatepolarisasjon, er som fortalt over, tregere polarisasjonsmekanismer. Derfor kan de ved økende frekvens få problemer med å følge frekvensen på det elektriske feltet, noe som vil føre til tap. I denne rapporten vil det utelukkende sees på polarisasjonsmekanismer ved bruk av DC-spenning. Det vil derfor ikke i denne oppgaven utledes noe om frekvensrespons.

For DC-felt over isolasjonen vil relaksjonsmekanismene være av betydning når trinnspenningen skrur av og på. Relaksjonsmekanismene er i tillegg meget temperaturavhengig fordi dipolene kan bevege seg mye friere ved høye temperaturer. Dette fenomenet er det rapporten omhandler, og det vil bli diskutert nærmere senere i rapporten.

For å forenkle utledningen av polarisasjonsmekanismene kan en se på kun en relaksasjonsmekanisme. Den totale polarisasjonen kan da uttrykkes som i likning (2.10).

$$P(t) = P_m + P_d(t) \quad (2.10)$$

I denne likningen er $P_d(t)$ den aktive dipol relaksjonsmekanismen.

Ifølge Debyes likning varierer dipolpolarisasjonen med en rate proporsjonal med differansen fra en stabilisert tilstand av $P(t)$. Denne raten kalles $P(\infty)$. Debyes likning kan uttrykkes som i likningen under (2.11).

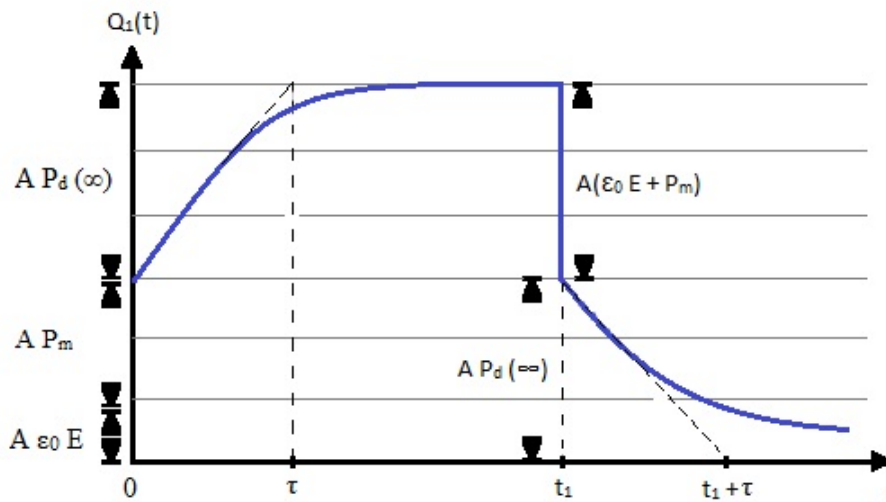
$$\frac{dP_d(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} [P_d(\infty) - P_d(t)] \quad (2.11)$$

Dermed kan polarisasjonsforløpet i isolasjonsmaterialet til en på parallell platekondensator uten noen initialpolarisasjon ($P(0) = 0$) ved påtrykt trinnspenning uttrykkes som i likning (2.12).

$$P_d(t) = P_d(\infty)[1 - e^{-\frac{t}{\tau}}] \quad (2.12)$$

Fra likning (2.12) og Gauss' lov (2.13) kan oppbygningen av ladning i en kondensator med et dielektrikum mellom elektrodene vises grafisk (figur 2-11). Denne figuren viser en kortslutning av kilden ved $t = t_1$.

$$\oint D \, dA = Q \quad (2.13)$$



Figur 2-11, Oppbygning av ladning i en kondensator ved en påtrykket trinnspenning ved $t = 0$ og en kortslutning av kretsen ved $t = t_1$.

Et isolasjonsmateriale vil ha en viss konduktivitet. Denne er i området 10^{-14} til 10^{-16} (avhengig av feltstyrke og temperatur), men det vil likevel gå en liten strøm i dielektrikumet. Denne likningen kan ved hjelp av de nevnte likningene og Maxwells likninger uttrykkes som likning (2.14).

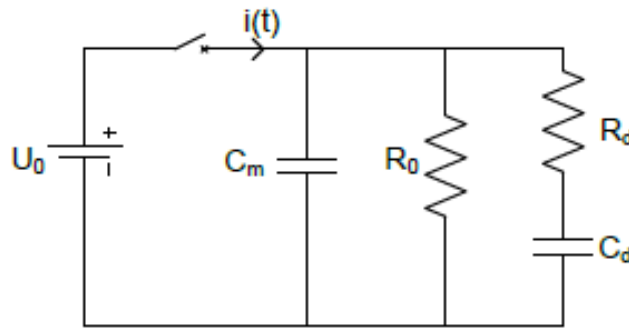
$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{Q_1}{dt} + \sigma EA = \left(\frac{dD}{dt} + \sigma E \right) A = \left(\frac{d(\epsilon_0 E + P)}{dt} + \sigma E \right) A \\ &= \left(\frac{d(\epsilon_0 E + P_m)}{dt} + \frac{dP_d}{dt} + \sigma E \right) A = \left(J_\delta(t) + \frac{P_d(\infty)}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} + \sigma E \right) A \quad (2.14) \end{aligned}$$

I denne likningen er $J_\delta(t) A$ den momentane ladingmengden som tilføres kondensatoren når den påtrykte spenningen økes fra 0 til U . τ er i denne likningen relaksasjonstiden.

$$J_\delta(t) = (\epsilon_0 E + P_m) \delta(t) = (\epsilon_0 + \kappa_m) E \delta(t) = \epsilon_m E \delta(t) \quad (2.15)$$

Hvor $\delta(t)$ er Diracfunksjonen.

Basert på disse antagelsene kan momentanpolarisasjon, relaksjonspolarisasjon og konduktivitet kombineres slik at en får en kretsekivalent. Denne er skissert i figur 2-12. Strømmen $i(t)$ er polarisasjonsstrømmen som vil tilføres prøveobjektet som funksjon av tiden.

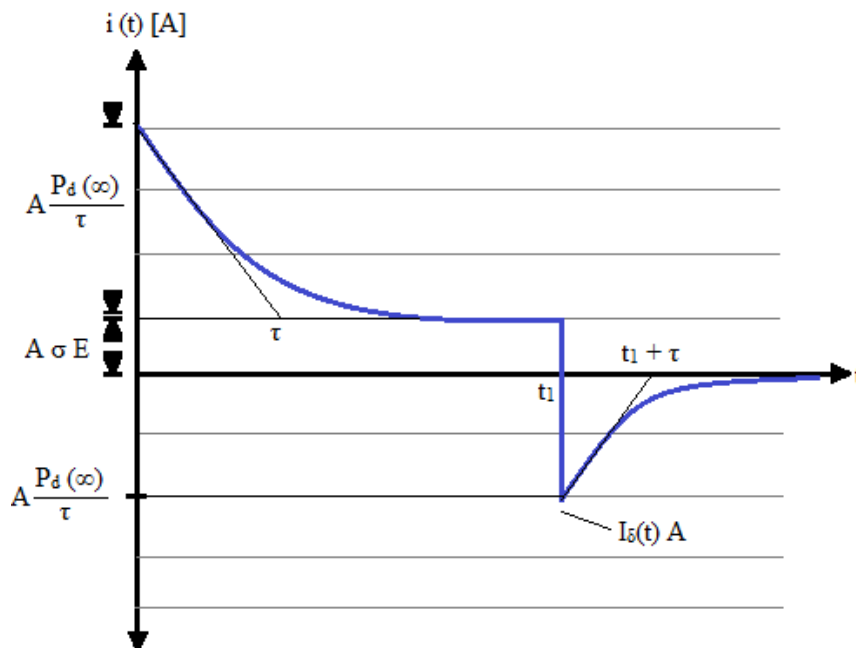


Figur 2-12, Elektrisk ekvivalentsskjema for et dielektrikum forenklet til å inneholde momentanpolarisasjonsmekanismer, en relaksjonsmekanisme og konduktivitet.

I denne figuren 2-12 representerer C_m momentanpolarisasjonen og R_0 konduktiviteten i isolasjonsmaterialet. R_d og C_d representerer en relaksasjonsmekanisme. Disse variablene kan matematisk settes opp som i likningene 2.16.

$$C_m = \epsilon_m \frac{A}{d} \quad R_0 = \frac{d}{A \sigma} \quad C_d = (\epsilon_s - \epsilon_m) \frac{A}{d} \quad R_d = \frac{\tau}{C_d} \quad (2.16)$$

Likning (2.15) kan skisseres grafisk. Dette er gjort i figur (2-13).

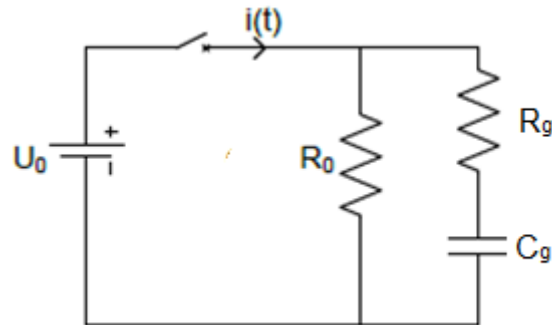


Figur 2-13, Polariserings/depolariseringsstrøm i en kondensator ut fra likning (2.15)

Hvis flere aktive relaksjonsmekanismer spiller inn i isolasjonssystemet, som for eksempel grenseflatepolarisasjon, vil denne kunne integreres i kretsekvivalenten (figur 2-12). Dette gjøres ved å legge til en ekstra RC enheter med den nye polarisasjonsmekanismens

parametere. Deretter integreres dette i C_d . C_d representerer dermed den totale kapasitansen av alle aktive relaksjonsmekanismer.

[9] For dette prøveobjektet vil det, som nevnt i det forrige kapitlet, være flere ulike polarisasjonsmekanismer som virker inn. Ved påtrykking av en DC trinnspenning vil momentanpolarisasjonsmekanismene skje så fort, og ha et så lite bidrag til den totale polarisasjonen, at de kan sees bort fra. Av relaksasjonsmekanismene vil både dipolpolarisasjon og grenseflatepolarisasjon finne sted i isolasjonen, men med tanke på kabelisolasjonens oppbygning er det grenseflatepolarisasjon som vil dominere. Som en forenkling kan derfor grenseflatepolarisasjon sees på som den eneste polarisasjonsmekanismen. Dette er vist i figur 2-14.



Figur 2-14, Elektrisk kretsekvivalent med kun grenseflatepolarisasjon og konduktivitet.

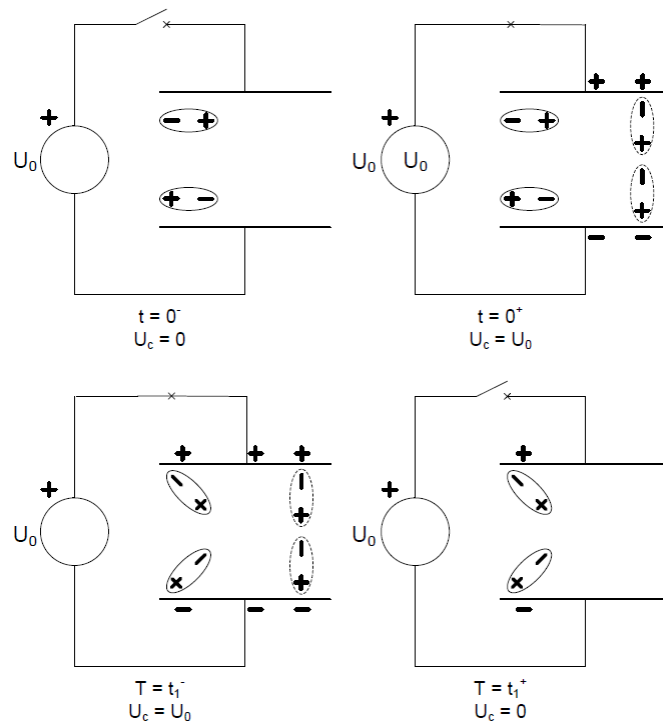
[7] Hvis en skal sette opp en likning for denne kretsen blir den sendes ut som i formel 2.17.

$$I = \frac{U}{R_0} + K e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.17)$$

I denne formelen representerer det første leddet ledingsevnen i kabelisolasjonen. Det andre leddet representerer grenseflatepolarisasjonen. K er i denne likningen en konstant, t er tiden siden spenningen ble påtrykket og τ er tidskonstanten til polarisasjonsstrømmen.

I figur 2-15 er hendelsesforløpet i et dielektrikum som påtrykkes en trinnspenning skissert. Figur 2-15 kan ses i sammenheng med kretsekvivalenten (figur 2-12). De stiplede dipolene i denne figuren representerer momentanpolarisasjonen, C_m i kretsekvivalenten og vil rette seg etter feltet umiddelbart etter at isolasjonsmateriale er spenningsatt, altså ved tid t_0^+ .

Dipolene med hele rundinger i figur 2-15 representerer relaksasjonsmekanismene, som er RC-grenen. I figur 2-15 kan en se at dipolene først vil etter en viss tid begynner å stille seg inn etter feltet. Dette kan i praksis ta alt fra et kvarter til flere dager, og det kommer an på påtrykket spenning, temperatur, isolasjonsmateriale osv. Dipolpolarisasjonen vil vanligvis rette seg etter feltet før grenseflatepolarisasjonen. [10] I for eksempel en olje- og papirisolert kabel kan grenseflatepolarisasjonen bruke flere dager på å få stilt seg inn etter feltet. Dette kommer som nevnt av at massekabler har svært mange grenseflater.



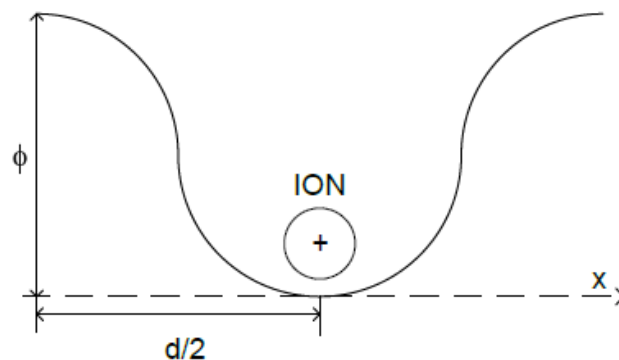
Figur 2-15, Utvikling av polarisasjon ved ladning og utladning.

2.4 Konduktivitet

[4][8] Tap i et isolasjonsmateriale oppstår delvis på grunn av at et materiale ikke er en ideell isolator, men har en viss ledningsevne. I isolasjonssystemer som er beregnet for likespenningspåkjenning, som i denne oppgaven, er det ledningsevnen som bestemmer spenningsfordelingen og dermed også den maksimale påkjenningen i materialet. Ledningsevnen varierer som funksjon av både feltstyrke og temperatur.

Det karakteristiske for både faste og flytende dielektrika er at mange forskjellige fysiske prosesser kan være bestemmende for den elektriske ledningsevnen. I massekabelisolasjon er det i tillegg to forskjellige isolasjonsmedium.

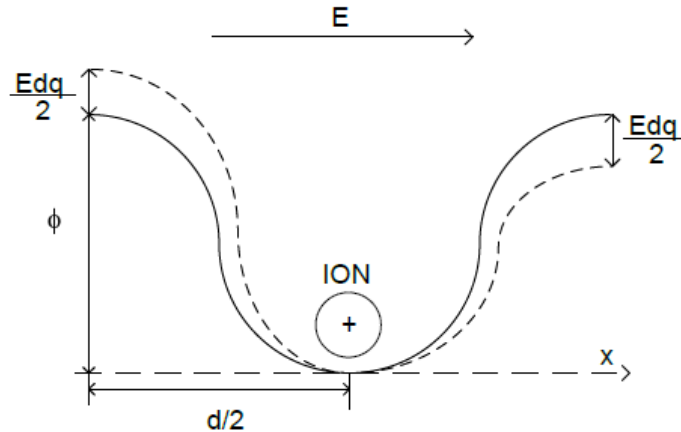
[4][8][11] Akkurat hvilke ledningsmekanismer som virker inn på masseimpregnert papir er ikke lett å avgjøre. Masseimpregnert papir viser mye av de samme karakteristiske trekkene som glass. I amorfe materialer som glass vil det oppstå defekter i krystallstrukturen hvor et positivt eller et negativt ion mangler. Disse defektene vil danne "feller" for ladningsbærere. I disse "fellene" kan ladningsbærerne bli "fanget" i en viss tid før de igjen tar del i ledningsprosessen. Tiden disse ladningsbærerne tilbringer i fellene øker med "dybden" på fellene. Denne dybden er definert som den energien som trengs for å frigjøre den fangede ladningsbæreren. Dette er skissert i figur 2-16.



Figur 2-16, Et ion fanget i en "felle" av potensialbarrierer.

Hvis et område i isolasjonsmaterialet har mange grunne "feller" blir konduktiviteten høy, mens dypere feller tilsier en lavere konduktivitet.

Hvis materialet påtrykkes et elektrisk felt vil potensialbarrieren øke med $Edq/2$ i den ene retningen, og minke med det tilsvarende i motsatt retning (figur 2-17). På grunn av denne endringen i barrierene blir sannsynligheten for at et positivt ion skal hoppe i retning av det elektriske feltet større enn at det skal hoppe imot feltet. Det motsatte vil skje med negative ioner.



Figur 2-17, Et ion fanget i en felle av potensialbarrierer med et påtrykt E-felt.

Når et høyt elektrisk felt påtrykkes isolasjonen vil det injiseres ladninger inn i isolasjonsmaterialet fra elektroden. Disse ladningene samle seg opp i nært elektroden. Det elektriske feltet vil grunnet disse ladningene påvirke ledningsevnen. Et lineært forhold mellom strøm og elektrisk felt, som i Ohms lov, er derfor ikke gyldig her.

[8][11][12] For å forklare hvordan molekylkjede leder ladningene kan det sies at ladningene "hopper" fra hull til hull. Når en ladning har mottatt tilstrekkelig med energi for å overkomme en potensialbarriere vil den hoppe til neste hull. Hvis en potensialbarriere mellom to hull er så stor at ionet ikke kan "hoppe over", og avstanden mellom hullene er veldig liten, kan ionet presse seg igjennom under potensialbarrieren. Denne prosessen forårsaker en konduktivitet forklart i formel 2.18.

$$\sigma(T) = \sigma_0 e^{\alpha T} \quad (2.18)$$

I denne formelen er σ_0 materialets konduktivitet ved lavt elektrisk stress og ved referansetemperatur (0°C). T er temperaturen i grader Celsius og α er temperaturkoeffisienten. Av dette kan en trekke den konklusjonen at konduktiviteten øker med økt temperatur.

Strømmen igjennom et dielektrikum bestemmes av antall ladningsbærere som beveger seg i det påtrykte feltets retning. Ladningsbærerne er som oftest elektroner, protoner og ioner. Konduktiviteten er gitt av ladningsbærernes bevegelse (formel 2.19).

$$\sigma = \sum_i^n |n_i e_i \mu_i| \quad (2.19)$$

I denne formelen representerer n_i en spesifikk ladningsbærer og N er antallet ladningsbærere. Konsentrasjonen av ladningsbærere er n_i , e_i er ladningen til ladningsbærerne og μ_i er mobiliteten til en ladningsbærer. Denne mobiliteten kan beskrives som i formel (2.20).

$$\mu_i = \frac{v_d}{E} \quad (2.20)$$

I denne formelen er v_d driftshastigheten og E det påtrykte elektriske feltet.

Endringer i konduktiviteten grunnet formel 2.19 bestemmes av variasjonen i de tre parameterne. Ladningen for et elektron er konstant og for protoner og ioner vil den være så godt som konstant. Derfor vil ladningen til ladningsbærerne ha liten innvirkning på konduktiviteten. Mobiliteten til ladningsbærerne vil derimot variere mye fra materiale til materiale. Mobiliteten vil også variere mye med isolasjonstemperaturen. Tettheten av atomer i et dielektrikum er temmelig konstant for alle materialer, mens tettheten av ladningsbærere varierer mye. Variasjonene i antall ladningsbærere og deres bevegelighet er dermed hovedgrunnen til at det er store variasjoner i konduktiviteten i forskjellige isolasjonsmedium.

Når et isolasjonsmateriale påtrykkes et elektrisk felt vil det genereres en elektrisk strøm gjennom materialet. Strømtettheten J bestemmes av materialets konduktivitet σ og styrken til det påtrykte feltet E . Sammenhengen mellom disse kan forklares med Ohms lov (formel 2.20).

$$J = \sigma E \quad (2.20)$$

Teoretisk sett vil et ideelt dielektrikum ikke inneholde noen ladningsbærere og ledningsevnen σ være lik null. Dette vil i følge formel 2.20 føre til at det ikke går noen lekkstrøm igjennom isolasjonsmaterialet ($J = 0$). I praksis vil alle isolasjonsmaterialer ha en liten ledningsevne. Hvis det påtrykkes en DC spenning over et dielektrikum over så lang tid at polarisasjonsmekanismene har innstilt seg vil feltdistribusjonen bestemmes av materialets konduktivitet.

[6][8][10]Konduktiviteten i et materiale varierer, som vist over, med temperaturen, men den vil også variere med styrken til det påtrykte feltet. Hvis temperaturen settes til en konstant i et isolasjonssystem, varierer konduktiviteten kun som funksjon av feltstyrken (formel 2.21).

$$\sigma(E) = \sigma_0 e^{(\beta E)} \quad (2.21)$$

Kombineres likning 2.18 og likning 2.21 kan konduktiviteten uttrykkes som funksjon av både temperatur og påtrykt feltstyrke. Dette er vist i formel 2.22.

$$\sigma(T, E) = \sigma_0 e^{(\alpha T + \beta E)} \quad (2.22)$$

I denne formelen er σ_0 materialets konduktivitet ved lavt elektrisk stress og referansetemperatur (0°C). T er temperaturen i grader Celsius, α er temperaturkoeffisienten, E er det påtrykte elektriske feltet og β er den elektriske feltkoeffisienten. I figur 2-16 vil høyden på potensialbarrieren ϕ bli lavere hvis temperaturen og/eller feltstyrken økes. Dette betyr at det trengs mindre energi for å flytte en ladning, som igjen betyr høyere konduktivitet.

For oljen vil det samme fenomenet finne sted, men mengden av ladningsbærere og mobiliteten deres vil være høyere sammenliknet med papiret. Derfor vil også konduktiviteten til oljen være høyere enn i papiret.

For å finne ut hva ledningsevnen i kabelisolasjonen er ved hjelp av dielektrisk respons trenger en i tillegg formelen for kapasitansen til en kondensator (formel 2.23).

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.23)$$

I denne formelen er ϵ_r den relative dielektriske konstanten til isolasjonsmediet, ϵ_0 permittiviteten til vakuum, A arealet til kondensatoren og d er tykkelsen til dielektrikumet.

Formelen er for en koaksialkabel satt opp i formel 2.24.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \frac{d_{\text{isolasjon}}}{d_{\text{leder}}}} \quad (2.24)$$

I denne formelen er $d_{\text{isolasjon}}$ diameteren til isolasjonen og d_{leder} er diameteren til lederen.

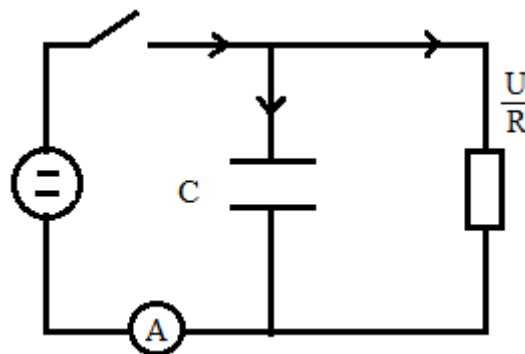
Ut fra Ohms lov kan en utlede formel 2.25.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{A} \quad (2.25)$$

Ved å sette inn formel 2.25 i formel 2.23 kan en komme frem til en formel for konduktivitet (formel 2.26).

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{C} \frac{I}{U} \quad (2.26)$$

[8][11] Strømmen I, er i denne formelen forskjellen mellom I_{pol} og I_{depol} . Dette kan forklares ved at en bruker superposisjon på kretsekvivalenten til kabelisolasjonen (figur 2-18).



Figur 2-18, Forenkling av dielektrisk responskrets.

I denne figuren representerer R ledningsevnen og C polarisasjonen. Likningen som kan settes opp for denne kretsen kan en se i formel 2.27.

$$I = \frac{U}{R} + C \frac{dU}{dt} + U \frac{dC}{dt} \quad (2.27)$$

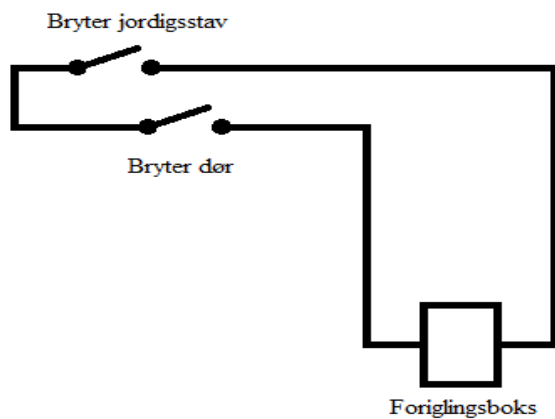
Ved å bruke superposisjonsprinsippet på denne likningen ved å sette $U = 0$, og $U = U_0$ (U_0 er her spenningen som påtrykkes av en fullt oppladet jordet kabel) kan en få ut formel 2.28.

$$I_{DC} = I_{pol} - I_{depol} \quad (2.28)$$

3 - Instrumentering og målemetoder

3.1 - Etablering av prøvecelle

Da forsøket skulle påbegynnes måtte først alle sikkerhetskriteriene oppfylles. Dette bestod blant annet av å bygge et bur slik at det ikke var mulig å komme i kontakt med spenningspåsatte deler. Deretter ble det laget et felles jordingspunkt (her en jordskinne) siden dette ikke fantes på elektrovarmelabben fra før av. Dermed kunne sikkerhetsgitteret jordes. Dette ble gjort å koble sammen alle grindene i buret med ledninger. Når buret skulle jordes, ble det kun koblet til jordingskinnen i den ene enden. Dette ble gjort for å forhindre ringstrømmer i buret. Det neste sikkerhetstiltaket som måtte gjøres var å anskaffe en jordstav og lage/koble opp foriglingssystemet. Foriglingssystemet besto av en boks som bryter strømforsyningen til spenningskilden hvis en av bryterne i figur 3-1 åpnes. Hvordan dette så på selve buret så ut kan en se i figur 3-2.



Figur 3-1, Foriglings system.



Figur 3-2, Bilde av brytere og farelampe.

3.2 - Prøveobjekt

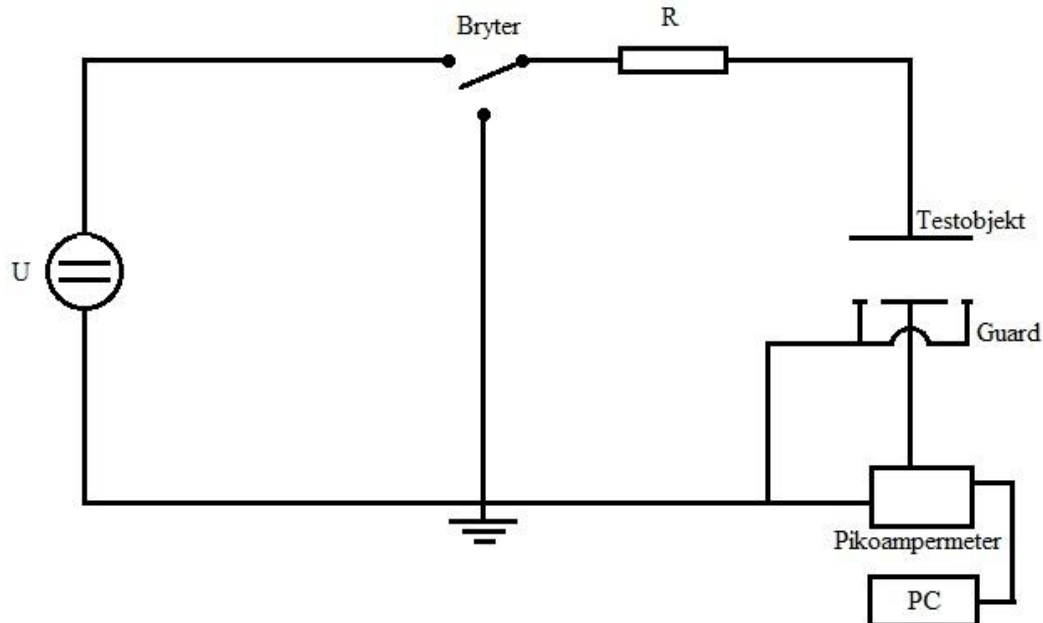
For å komme til det som skulle brukes som prøveobjekter i denne oppgaven ble bitumentaue, armering og stålbånd fjernet på en 5 meter lang del av kabelen. Deretter ble en av de gjenstående lederne (med isolasjon, blykappe og PEXkappe) kappet i 3 deler. Den første delen var på 4,5m. Denne delen skulle brukes til å måle tidsvarierende polarisasjonen på tvers av kabelisolasjonen. Den andre delen som ble kuttet ut var en 25 mm tykk skive som skulle brukes til måling av den tidsvarierende polarisasjonen langs kabelisolasjonen. Det tredje objektet som ble kuttet ut, var en halv meter lang kabeldel som skulle dissekeres.

For å se nærmere på hvordan kabelisolasjonen var bygd opp ble en halv meter av kabelen dissekert. Ved disseksjonen ble det sett på hvor stor forskjellen mellom de ulike buttgapene var, isolasjonens oppbygning og dimensjonene til de ulike papirtypene som er brukt i isolasjonen. For å få den eksakte tykkelse på de ulike papirene i isolasjonen ble dette målt

med et mikroskop. Det ble også foretatt gjennomsnitts målinger av hvor tykke oljefilmene mellom papirlagene var.

3.3 - Målekrets

Selve kretsen som ble brukt for å måle den dielektriske responsen er skissert i figur 3-3.



Figur 3-3, Målekrets for forsøket.

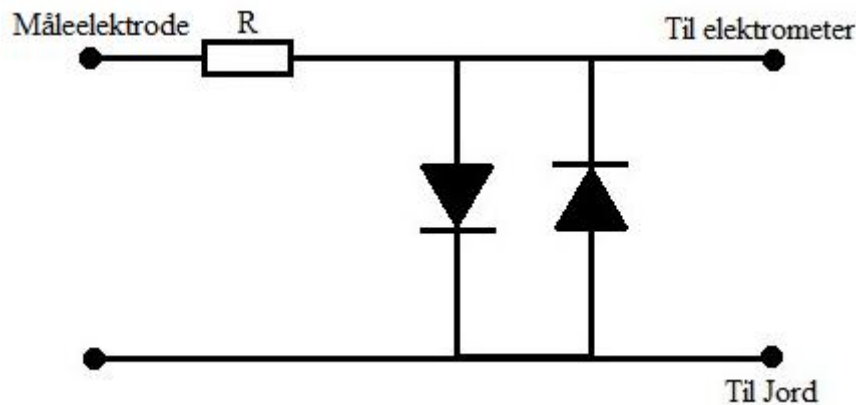
Denne kretsen består av en DC spenningskilde U, en høyspenningsbryter, en resistans, et testobjekt med guard, et elektrometer og en logger med en tilkoblet PC.

Spenningskilden i den første delen av forsøket som ble kjørt ved en påtrykt spenning på 3kV var en Keithley 247, 3 kV HVDC kilde. [16] Denne kilden har en stabilitet på $\pm 0,02\%$ / 8h. Stabiliteten til kilden har mye å si for å få gode resultater. Momentane endringer i påtrykket spenning vil kunne sees på som påtrykte trinnspenninger. Dette vil føre til utslag i polarisasjonsstrømmen. Under forsøkene som ble gjort med en påtrykt spenning på 10 kV, og for forsøkene på langs av kabelisolasjonen, ble det brukt en Fug HCP 140 (datablade i vedlegg D). Dette er en 35 kV spenningskilde med en stabilitet på $\pm 10^{-4}\%$ / 8h. For å kunne koble denne spenningskilden inn i kretsen måtte det lages til en spesialtilpasset kobling. Hvordan dette ble gjort kan en se i vedlegg E. Spenningskilden er koblet til bryteren som videre er koblet til prøveobjektet.

Høyspenningsbryteren er en enkel trepunktsbryter som er drevet av en 230V AC spenning og utløses med en 5 V DC spenning. Selve drivmekanismen til bryteren vil det ikke gås nærmere inn på i denne oppgaven. Drivmekanismen til bryteren ble koblet til en enkel variac som ble stilt til 230 V. Utløsermekanismen ble koblet til DC kilden på elektrometeret. Bryteren ble koblet til lederen til prøveobjektet og kunne veksle mellom jord og DC kilden.

Motstanden som ble satt inn i systemet var på 220 M Ω . Denne måtte være så stor for å begrense lade/kortslutningsstrømmen inn i elektrometeret. Maks strøm inn på elektrometeret er 1 mA. Med denne motstanden og en påtrykket spenning på 10 kV, blir maksstrømmen 0,045 mA.

Elektrometeret som er brukt i systemet er et Keithley 6517b elektrometer. Apparatet er koblet til kretsen med en triaksialkobling som igjen er koblet til elektroden på måleobjektet, og videre til jord. Elektrometer som brukes i denne oppgaven er et ekstremt følsomt instrument som kan måle strømmen ned til 0,1 pA. Dette gjør at det også blir ekstremt følsomt for høye strømmen og spenninger inn på apparatet. Maksspenningen inn på dette apparatet er 250 VDC. Akkurat i det bryteren i kretsen slår over vil det gå en transientspenning som er mye høyere enn spenningen ut fra kilden i kretsen. Dette transientleddet er $J \delta(t)$ i likning 2.14. Dette vil resultere i en høy tilbakevendende spenning som kan ødelegge apparatet. For å forhindre dette ble det satt inn en ekstra liten krets som skulle beskytte elektrometeret (figur 3-4). Ved alle kretser der høye spenninger inn på apparatet kan forekomme, anbefaler Keithley dette.



Figur 3-4, Beskyttelseskrets for elektrometeret.

Denne kretsen består av en motstad og to dioder av 1N3595 (detaljer i vedlegg B). Motstanden i kretsen er der for å begrense strømmen når diodene leder. Motstanden må være så stor at den motstår maks påtrykt spenning. Størrelsen til motstanden blir altså så stor at den klarer forårsake et spenningsfall ved maks polarisasjonsstrøm. I dette tilfellet ble var motstanden som ble satt inn på 12 k Ω . Diodene trenger en spenning på 0,6 V for å lede. Ved normalt signal er denne spenningen i størrelsesorden nV- pV, og diodene vil ikke lede. Målesignalet vil da kunne gå uforstyrret til elektrometeret. Hvis strømmen inn i denne kretsen blir større enn 50 μ A (0,6 V), vil dioden åpnes og signalet bli sendt rett til jord. Elektrometeret har egentlig en maks inngangsstrøm på 1 mA, men kretsen ble laget slik for at en skulle være på den sikre siden.

I en slik krets er det mange deler som trenger jording. Kabler, instrumenter og gitter må jordes, i tillegg til at alle løse metalldele inne i buret må jordes. Dette er på grunn av at det her dreier seg om å påtrykke en DC spenning. Hvis løse metalldele ligger nært uskjermede ledninger med påtrykket DC spenning vil dette kunne føre til forstyrrelser i målesignalet.

Siden pol-/depolstrømmen som måles er i pA størrelse, kan små forstyrrelser gi utslag. Det er også viktig at alle deler kun jordes i en ende. Ved å kun jorde gjenstander på et sted i tillegg til å trekke alle jordingsledninger til et felles jordingspunkt, slipper en at det går sirkelstrømmer i jordingsystemet.

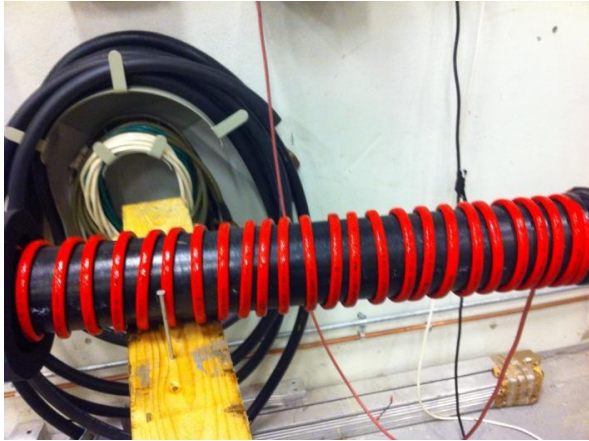
3.4 - Forberedelse av prøveobjekt 1 (polarisasjon på tvers av kabelisolasjonen)

Som forklart over ble det i denne delen av forsøket brukt en 4,5 meter lang kabel. Det som ble gjort med kabelen var ta bort blykappen og PEXkappen ca 10 cm inn på hver kablende. Dette ble gjort for å lettere kunne kommet til blykappen og lederen som ble brukt som henholdsvis ble brukt som måleelektrode og spenningsleder i dette forsøket. Det ble også gjort for at det skulle bli mulig å lage en guard for måleelektroden. Hvordan dette ble gjort og hvordan guarden fungerer blir forklart senere i dette kapittelet. Dimensjonene og kapasitansen til kabelen ble nøyaktig målt slik at de kunne brukes i beregninger av resultatene. Kapasitansen til kabelen ble målt med et Agilent U1701b. I tabell 3.1 finner en kapasitansen og dimensjonene til dette prøveobjektet.

Enhet	Målt verdi
C	1040 pF
r_{leder}	15 mm
r_{ytre}	41 mm
$r_{\text{isolasjon}}$	26 mm
l_{kabel} (kun med elektrode)	448 cm

Tabell 3.1

For at kabelens temperatur skulle kunne styres, ble kabelen kledd med en varmekabel. Denne varmekabelen var av den selvregulerende typen som kun styres ved hjelp av en termostat. Varmekabelen, som var 50 m lang, ble surret rundt prøveobjektet som en spiral (vist i figur 3-4). For å beskytte måleelektroden mot forstyrrelser fra varmekablene ble det lagt på en skjerm, mellom PEXlaget og varmekablene, som besto av aluminiumsfolie og aluminiumsteip, som så ble jordet.



Figur 3-4, Prøveobjekt med varmekabel



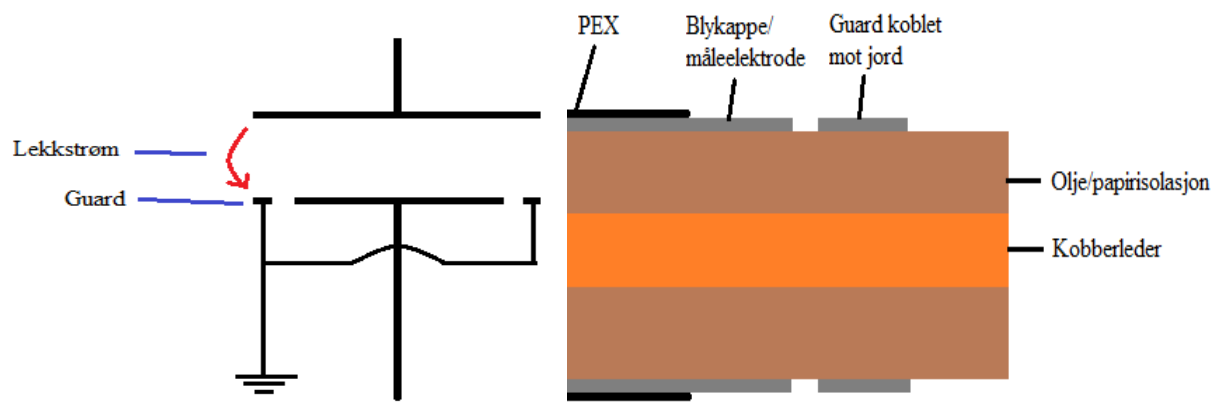
Figur 3-5, Prøveobjekt med isolasjon pålagt

Kapasiteten til varmekabelen var på 1 kW, men den hadde en makstemperatur på 65 °C så dermed ble makstemperaturen til forsøket avgrenset til 60 °C.

Utenpå varmekablene ble det tredd på en 5 cm tykk skumgummiisolasjon. Hvordan prøveobjektet så ut med skumgummiisolasjon er vist i figur 3-5. For å måle at temperaturen var det den skulle være ved de ulike forsøkene, ble det tilkoblet to eksternt termometre, et på ledere og et på PEXkappen. Under drift ble kun kabeltemperaturen målt på PEXkappen, men under oppvarmingsfasen ble ledertemperaturen også målt. Dette ble gjort for å være sikker på at hele kabelisolasjonen holdt riktig temperatur.

På dette prøveobjektet fungerer kobberlederen som den spenningsatte elektroden, og blykappen som målingselektroden. Måten en fikk koblet seg inn på kobberlederen var ved å bruke en kobberspiker som ble slått inn i ledere, som så ble koblet til kretsen. For å koble seg inn på blykappen ble det skrudd inn en kobber skrue, som så ble loddet fast for å forsikre at det var god kontakt.

For å kunne foreta nøyaktige målinger på prøveobjektet, måtte det lages en guard. [5]En guard består av å bruke et ledende materiale som omringer materialer som fører et høyimpedanssignal. Denne ringen blir da koblet mot jord slik at det er en guard med nullpotensiale på hver side av side av målelektroden. Grunnen til at dette gjøres er å lede lekkstrømmene i kabelendene til jord, og ikke igjennom elektrometeret (skissert i figur 3-6). Måten guarden ble laget på var å kutte ut en 1 cm tykk ring av blykappen i hver ende, med en avstand på 5mm fra resten av blykappen. Disse ble så koblet sammen til jord. I figur 3-7 kan en se en skisse av hvordan guarden så ut.



Figur 3-6, Elektronisk skisse av guarden. Figur 3-7, Skisse av hvordan guarden fysisk ble laget.

3.5 - Forberedelse av prøveobjekt 2 (polarisasjon på langs kabelisolasjonen)

For å kunne måle den dielektriske responsen av prøveobjektet på langs ble det, som nevnt over, kappet en 2,5 cm tykk skive av kabelen. Grunnen til valget av denne tykkelsen var at dette var tykkelsen til kabelisolasjonen på tvers. Dermed kunne de to prøveobjektene egenskaper sammenliknes direkte. Fra prøveobjektet ble alt bortsett fra selve isolasjonen fjernet. Dette ble gjort for at det ikke skulle være noen ledende materialer på langs av prøveobjektet. Dette innebar å fjerne lederen, indrehalvleder, ytre halvleder, h-bånd, blykappe og PEXkappe. For å forhindre at isolasjonen skulle kollapse, ble det dreiet en plastikk tapp som akkurat passet der lederen og indre halvleder ble tatt ut. I ytterkant ble lagt på et lag med isolasjonsteip slik at isolasjonen skulle holde seg på plass. Hvordan det ferdige prøveobjektet så ut, kan en se i figur 3-8.



Figur 3-8, Prøveobjekt med kun isolasjon.

Dimensjonene og kapasitansen til prøveobjektet kan en se i tabell 3.2.

Enhet	Målt verdi
C	37 pF
r_{indre}	16 mm
r_{ytre}	40 mm
d	25 mm

Tabell 3.2, Dimensjoner til prøveobjekt (kabelskive).

For prøveobjekt 1 kunne en bruke deler som alt satt på kabelen som målelektroder, men på dette prøveobjektet måtte det lages til noe som kunne brukes. Det ble laget flere ulike løsninger som viste seg å ikke være gode nok. Løsningen på problemet ble å dreie en 2 mm tykk skive av aluminium som fungerte som den spenningspåsatte elektroden. Aluminiumsskiven ble laget slik at den dekket hele kabelisolasjonen. Som forklart i det forrige kapitlet, trengs det en guard som leder lekkstrømmene fra målelektroden. Dette ble

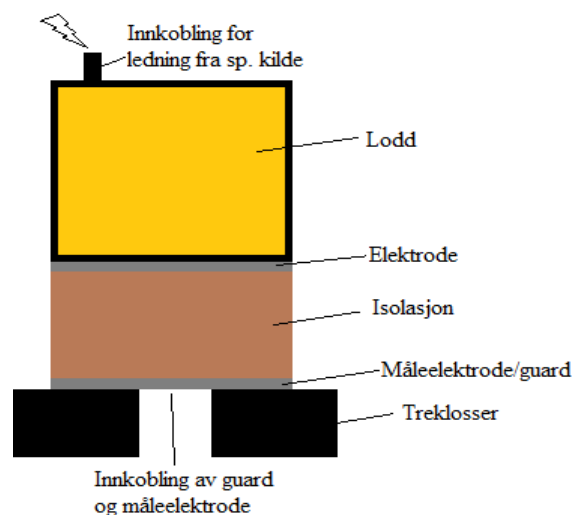
løst ved å dreie tre ringer av aluminium og å lage to silikonringer. Hvordan dette er satt sammen er vist i figur 3-9.



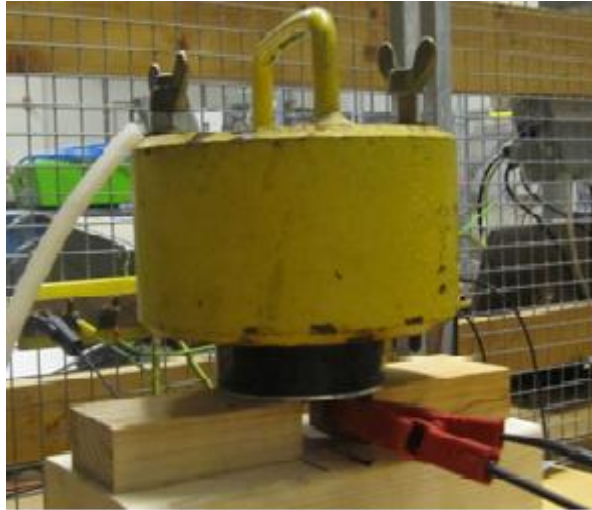
Figur 3-9, Måleelektrode for måling av langsgående polarisasjon.

I figur 3-9 kan en se hvordan måleelektroden, som er den bredeste ringen, omringes av to guarder i inner- og ytterkant. For prøveobjekt 1 var gapet mellom guarden og måleelektroden kun et luftgap, men for dette prøveobjektet var det nødvendig å fylle dette gapet med silikon for å forhindre kontakt. For å kunne koble seg inn på måleelektroden ble det satt inn små kobberskruer i måleelektroden og guardene. Disse ble felt inn i aluminiumet slik at overflaten som var i kontakt med isolasjonen ble helt slett.

For å sørge for at det var god kontakt mellom elektrodene og isolasjonen ble et jordingslodd plassert oppå elektroden som skulle påtrykkes spenning. For at dette oppsettet skulle ha en stødig plattform og for at det skulle bli mulig å komme til kontaktene på måleelektroden, ble det laget et støtteanlegg av tre. Hvordan dette oppsettet så ut kan en se i figur 3-10 og 3-11.



Figur 3-10, Skjematisk tegning av oppsettet av prøveobjekt 2.



Figur 3-11, bilde av oppsett.

Spenningen ble påtrykt jordingsloddet som forklart i figur 3-10. For å forsikre at kontakten mellom loddet og den øvre elektroden var god, ble loddet pusset rent for maling på undersiden. Dette oppsettet ble til slutt satt inn i et jordet varmeskap som fungerte som et faradaybur.

3.6 - Loggersystem

For forsøkene som ble gjort i prosjektoppgaven (3 kV påtrykt spenning) var loggersystemet meget enkelt. Målingene ble da tatt manuelt de første 15 minuttene (se vedlegg C), for så å logge strømmen hvert minutt ved hjelp av en datalogger. På elektrometeret er det analog utgang som gir en spenning mellom 0 V og 2 V. Strømmen som måles av apparatet ledes igjennom en 10 k Ω motstand. Det er altså spenningen over denne motstanden som blir utsignalet på den analoge utgangen. Dataloggeren som er koblet til denne utgangen er igjen koblet til en datamaskin som logger signalet med gitte tidsintervall. I denne delen av oppgaven ble dette tidsintervallet satt til et minutt.

For forsøkene som ble gjort i denne oppgaven ble det brukt mye tid på å lage et eget loggersystem. For det forrige forsøket ble alt eksperimentelt utført manuelt. Dette programmet er et Labviewprogram som styrer hele forsøket samtidig som det logger signalet direkte fra elektrometeret.

For å kunne gjøre dette trengtes det et programmerbart elektrometer med en innebygget spenningskilde. I tillegg trengtes det en GPIB til USB enhet som er en toveis kommunikasjonsenhet som både kan overføre måledata til pcen og kan sende signaler til elektrometeret.

Selve programmet som ble laget har 3 hovedfunksjoner. Det logger en gjennomsnittsmåling av strømmen, det kan skru av og på "Zero check", og det kan skru av og på spenningskilden til elektrometeret. "Zero check" er en beskyttelsesfunksjon som gjør at inngangen til elektrometeret kobles over en 10 M Ω motstand istedenfor igjennom selve apparatet der inngangsimpedansen er $> T\Omega$. På grunn av denne høye inngangsimpedansen skal det lite til før apparatet overbelastes. Det er derfor viktig at "Zero check" er koblet inn når bryteren i kretsen skal kobles inn og ut. For at elektrometeret alltid skulle være beskyttet mot transientspenningene som kan genereres akkurat når bryteren slår over setter programmet på "Zero check" i 10 sekunder både før og etter bryteren skifter posisjon. Det er på grunn av dette at den første målingen av polarisasjons/depolarisasjonsstrømmen er etter 10 sekunder. For å få programmet til å kunne kommunisere med elektrometeret måtte det også lages et en funksjon som implementerer Keithleys Labviewdriver for akkurat dette elektrometeret.

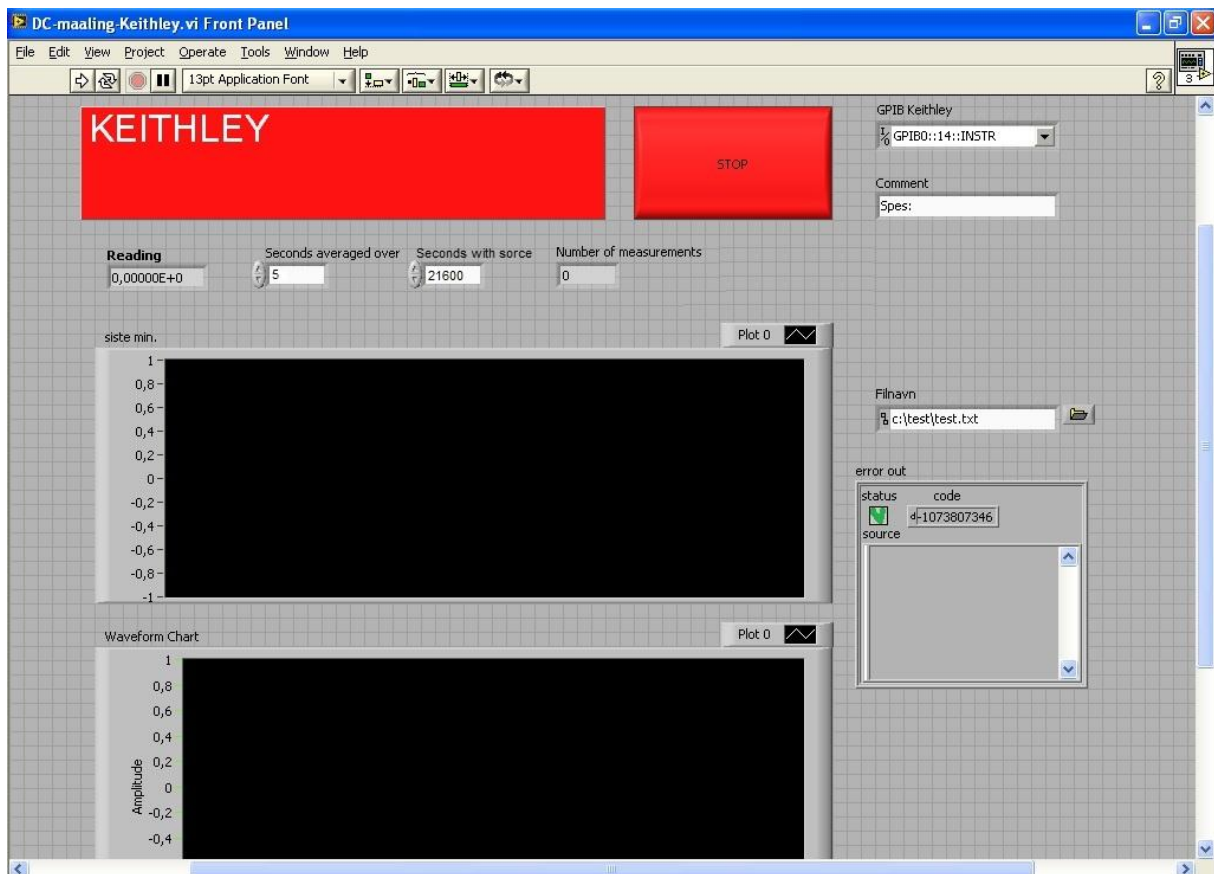
Selve loggingen av målesignalet foregår i dette programmet ved hjelp av en gjennomsnittsmåling som går over et antall sekunder, som så lagres i en datafil. Hvor mange sekunder dette tidsintervallet skal være, kan bestemmes i programmet. I disse forsøkene ble dette tidsintervallet satt til 5 sekunder. Programmet har også en funksjon der en kan bestemme hvor lenge kilden til elektrometeret skal være påskrudd. Da forsøkene ble gjort ble denne tiden satt til 6 timer, eller 21600 sekunder.

Hvordan programmet fungerer og i hvilken rekkefølge programmet utfører ulike operasjoner fra en starter programmet er satt opp i tabell 3.3.

Tid []	Funksjon
0 s	Programmet startes
0 s	Zero check aktiveres
10 s	Logg startes
10 s	Bryteren slår over til spenningskilden
20 s	Zero check deaktiveres
6 h	Zero check aktiveres
6 h 10 s	Bryteren slår over til jord
6 h 20 s	Bryteren deaktiveres
12 h	Programmet avsluttes manuelt

Tabell 3.3, Programmets operasjonsmønster.

Hvordan selve programvinduet så ut kan en se i figur 3-12.



Figur 3-12, Programvindu for loggerprogram.

Her kan en se hvordan programmet så ut. Hvordan flytdiagrammet som er programmets oppbygning ser ut kan en se i vedlegg F.

De første fem minuttene av polarisasjonen og depolarisasjonen ender strømmen seg veldig mye på kort tid. Det er derfor lite egnet å ha en gjennomsnittsmåling for disse delene av loggingen. Det ble derfor også foretatt en logging med loggersystemet som ble brukt for forsøkene med 3 kV spenning påtrykt. Dette systemet ble satt opp slik at det logget strømmen hvert sekund. For å få ut resultatene måtte derfor disse to loggingene settes sammen for å få ut kurvene til polarisasjons/depolarisasjonsstrømmen.

3.7 - Måleprosedyre

Målingene som ble gjort på prøveobjekt 1 fra i prosjektoppgaven, ble utført ved en påtrykket spenning på 3 kV. Det ble da gjort forsøk med en isolasjonstemperatur på 20, 30, 40, 50 og 60 °C. Romtemperaturen i forsøkshallen var ca 20 °C, så derfor ble temperaturen til det første forsøket avgrenset av dette. Grunnen til at maksimaltemperaturen ble satt til 60 °C var, som nevnt over, at varmekablene ikke var beregnet for mer enn 65 °C. For disse forsøkene ble det påtrykt spenning i 12 timer (måling av polarisasjonsstrøm). Deretter ble depolarisasjonsstrømmen målt i 12 timer. Mellom hvert forsøk ble kabelen satt til utladning/oppvarming i et døgn. Under oppvarmingsfasen ble temperaturen i isolasjonen målt på to steder. En temperaturmåler var festet på PEXlaget under varmekablene og den andre ble satt på lederen. Når disse to temperaturene var like ble neste forsøk igangsatt.

De samme målingene ble utført ved en påtrykket spenning på 10 kV. Temperaturene var her de samme som ved det første forsøket. For disse forsøkene ble polarisasjonsstrømmen og depolarisasjonsstrømmen målt i 6 timer hver. Etter hvert forsøk ble kabelen satt til utladning/oppvarming i minst 3 døgn.

For prøveobjekt 2, måling av dielektrisk respons på langs av kabelen, ble det foretatt 3 forsøk. Temperaturen ved disse forsøkene var 20 °C. Det som ble endret på under disse forsøkene var spenningen. Spenningene forsøkene ble utført på var 0,5 kV, 3 kV og 10 kV. Måten disse målingene ble utført på var den samme som for 10 kV forsøkene for prøveobjekt 1. Mellom hvert av disse forsøkene ble det ventet i et døgn før neste forsøk ble utført.

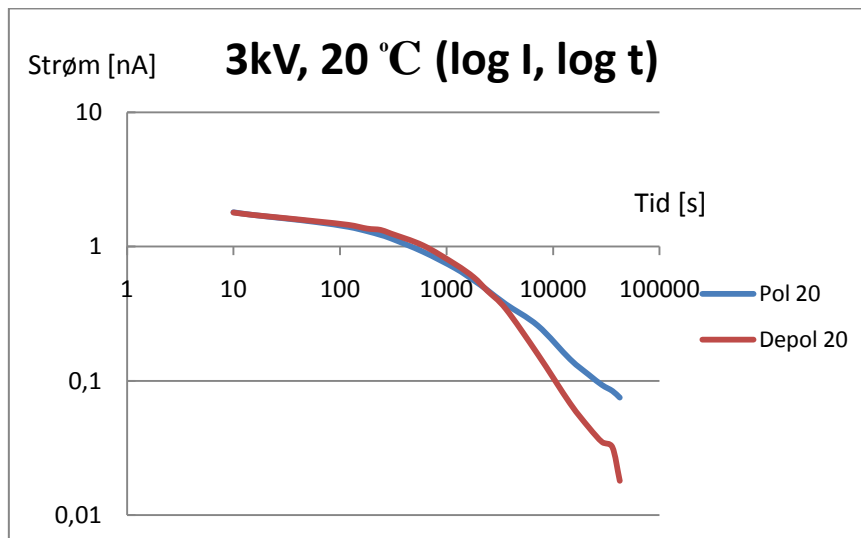
4 - Resultater

I denne oppgaven er det gjort forsøk ved 3 kV og 10 kV for det første prøveobjektet. Disse forsøkene ble gjort med temperaturer fra 20 - 60 °C, med en temperaturøkning på 10 °C mellom hvert forsøk. I tillegg ble det utført tre forsøk på prøveobjekt 2. I resultatene er det bare tatt med noen av fremstillingene av resultatene. Resten av målingene som ikke er tatt med i dette delkapittelet kan en finne i vedlegg A.

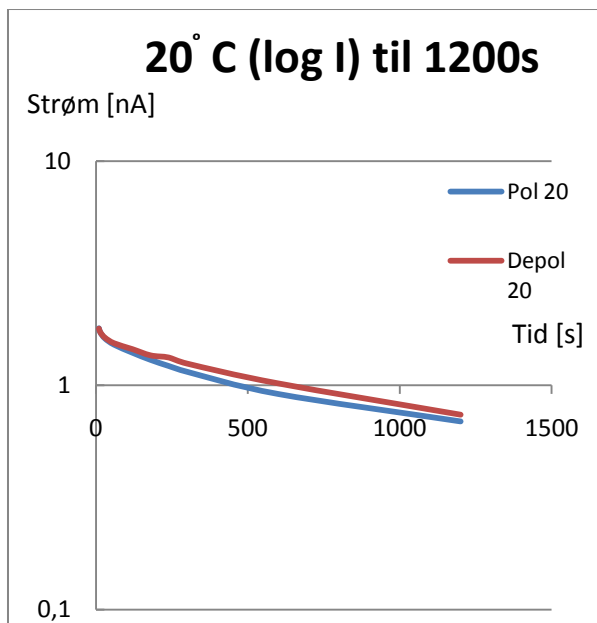
4.1 Måleresultater

I måleresultatene for det første prøveobjektet kan en se at både polarisasjonsgrafene og depolarisasjonsgrafene har en knekk på ca 1200s. Hva som forårsaker dette vil bli tatt opp i diskusjonen, men dette er grunnen til at noen av resultatene har blitt splittet i to grafer. De grafene som er plottet av hele tidsrommet (som i figur 4-1), er plottet med både logaritmisk strøm og tidsskala. Depolarisasjonsstrømmen er i alle grafer plottet som tallverdi. De delte gradene er plottet med kun logaritmisk y-akse(strøm). For forsøkene som er utført med en påtrykt spenning på 3 kV er $t = 12$ h.

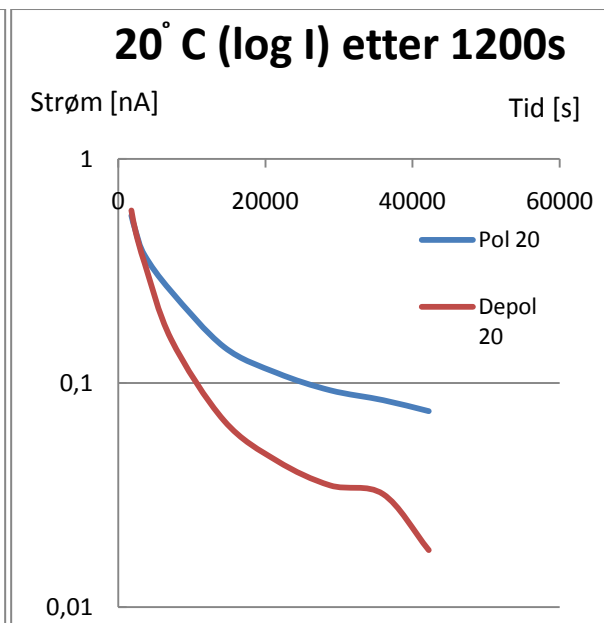
Resultater med 3 kV påtrykt spenning



Figur 4-1, 20 °C, 3 kV plottet med logaritmisk strøm og tidsskala.

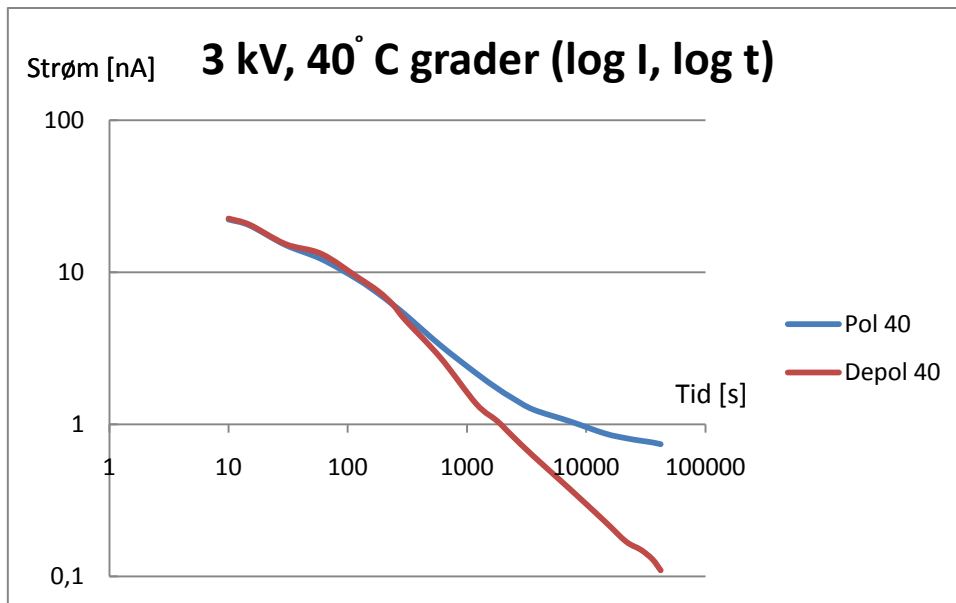


Figur 4-2, 20 °C, 3 kV, $t < 1200s$

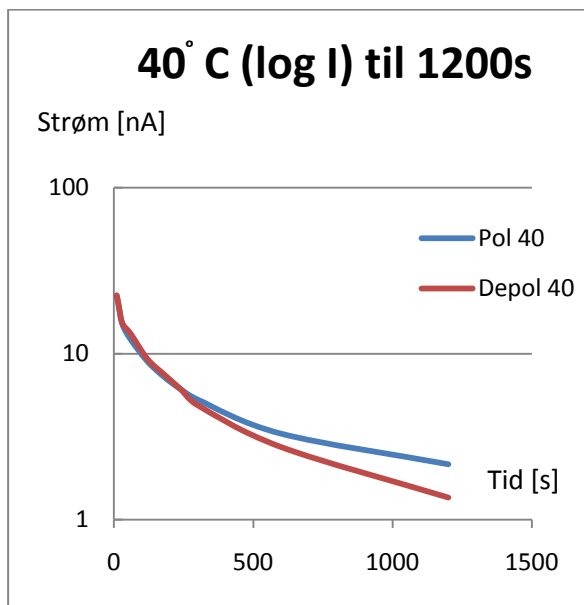


Figur 4-3, 20 °C, 3 kV, $t > 1200s$

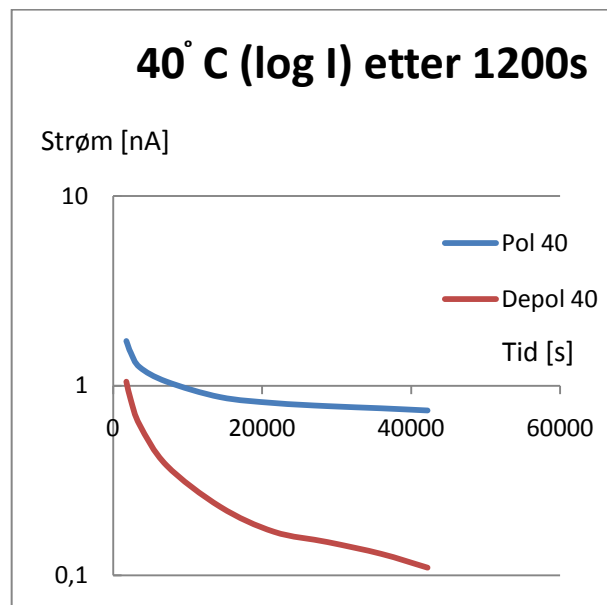
Grafene over (4-1 - 4-3) viser polarisasjonsstrøm og depolarisasjonsstrøm ved en påtrykt spenning på 3 kV og en kabeltemperatur på 20 °C.



Figur 4-4, 40 °C, 3 kV plottet med logaritmisk strøm og tidsskala.

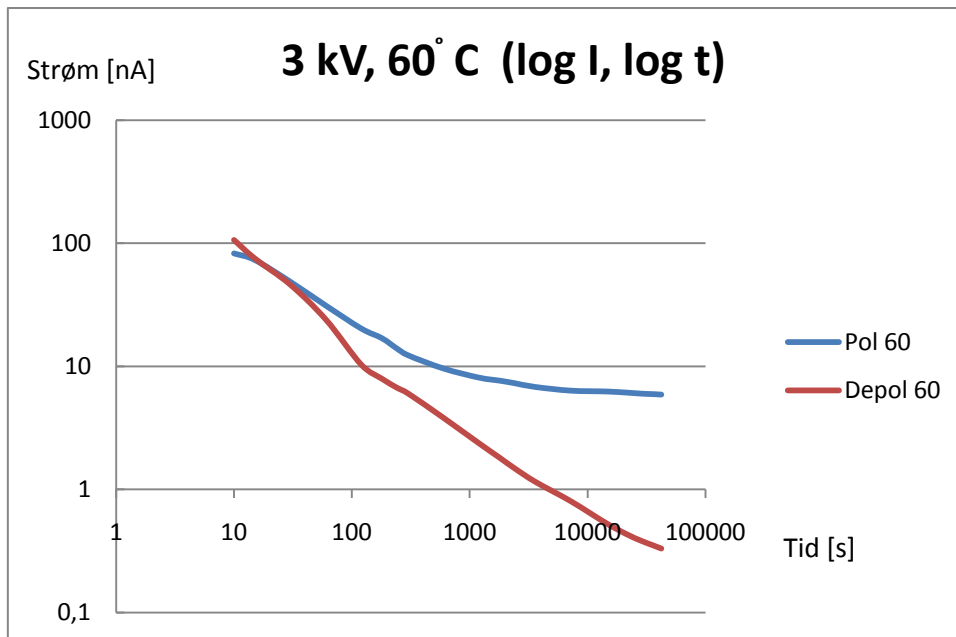


Figur 4-5, 40 °C, 3 kV, t < 1200s

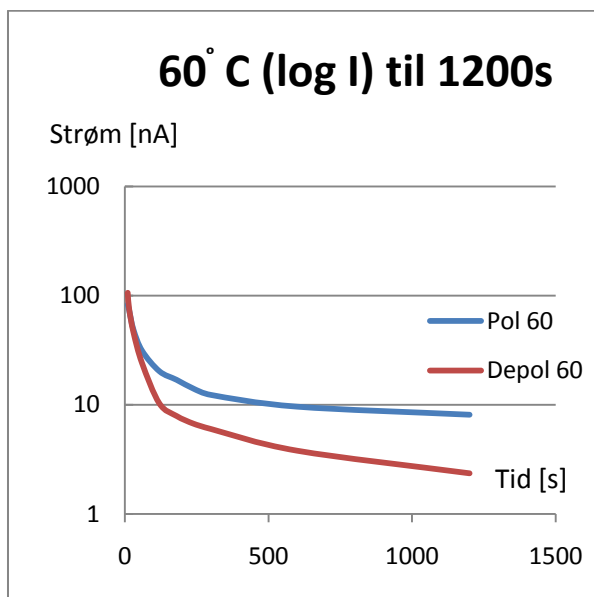


Figur 4-6, 40 °C, 3 kV, t > 1200s

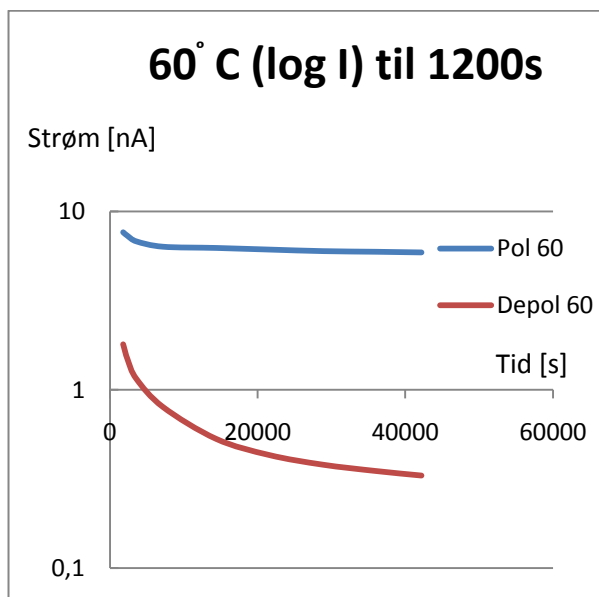
Disse grafene (figur 4-4 - 4-6) viser polarisasjonsstrøm og depolarisasjonsstrøm ved en påtrykt spenning på 3 kV og en kabeltemperatur på 40 °C. Hvordan resultatene for forsøkene som ble kjørt ved en systemtemperatur 30 °C og 50 °C så ut, kan en se i vedlegg A.



Figur 4-7, 60 °C, 3 kV plottet med logaritmisk strøm og tidsskala.



Figur 4-8, 60 °C, 3 kV, t < 1200s

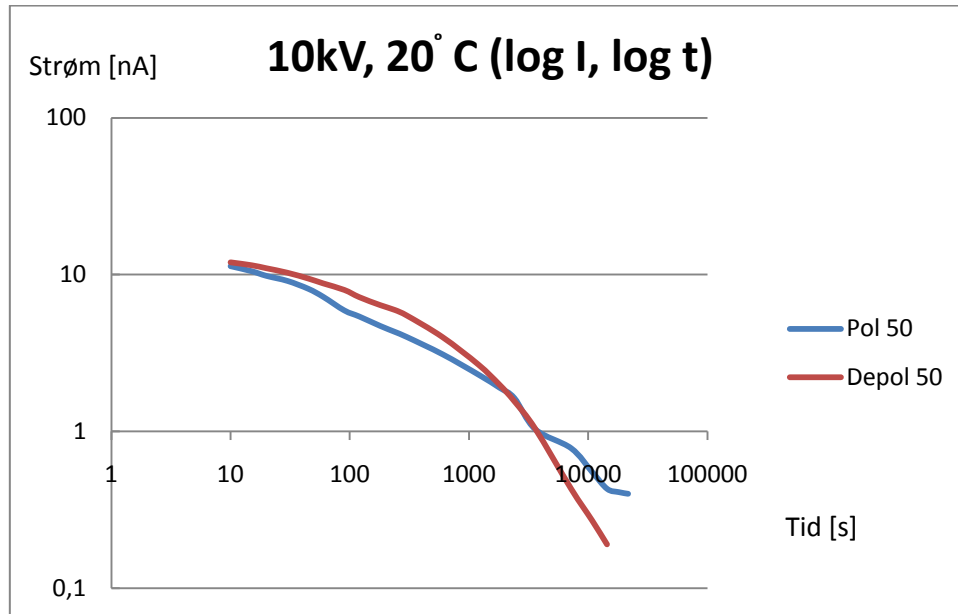


Figur 4-9, 60 °C, 3 kV, t > 1200s

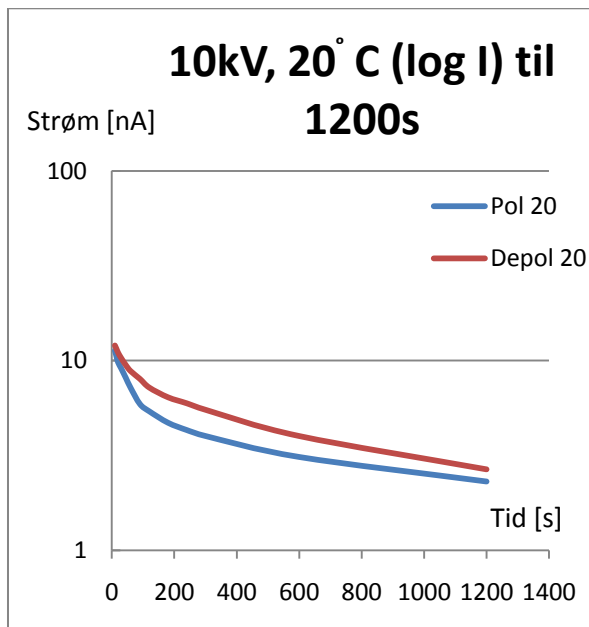
Grafene over (figur 4-7 - 4-9) viser polarisasjonsstrøm og depolarisasjonsstrøm ved en påtrykt spenning på 3 kV og en kabeltemperatur på 60 °C.

Resultater med 10 kV påtrykt spenning

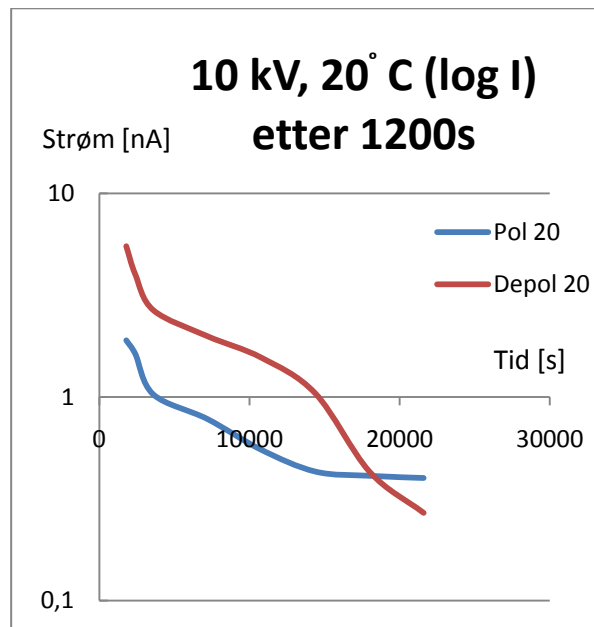
De neste grafene er for forsøkene som ble utført med påtrykt spenning på 10 kV. Disse forsøkene er $t = 6$ timer for både polarisasjon og depolarisasjon.



Figur 4-10, 20 °C, 10 kV plottet med logaritmisk strøm og tidsskala.

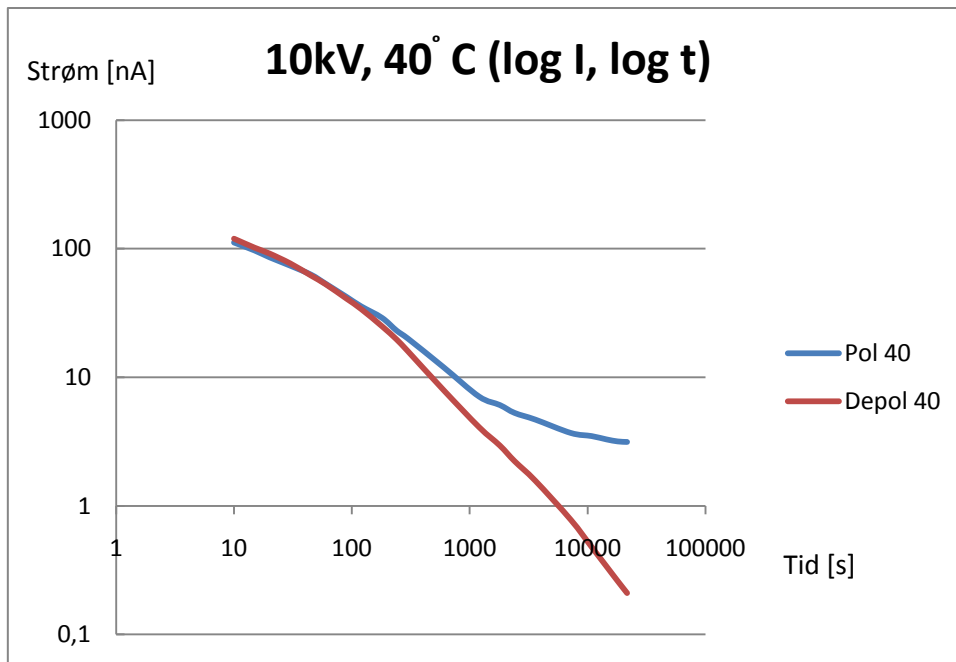


Figur 4-11, 20 °C, 10 kV, $t < 1200s$

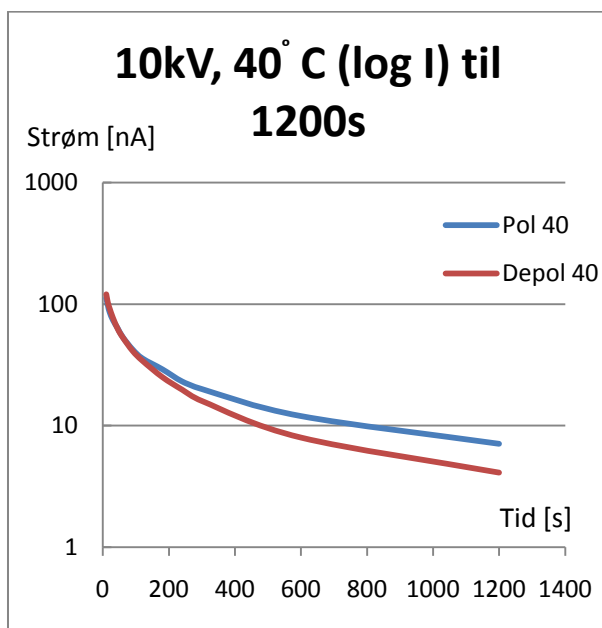


Figur 4-12, 20 °C, 10 kV, $t > 1200s$

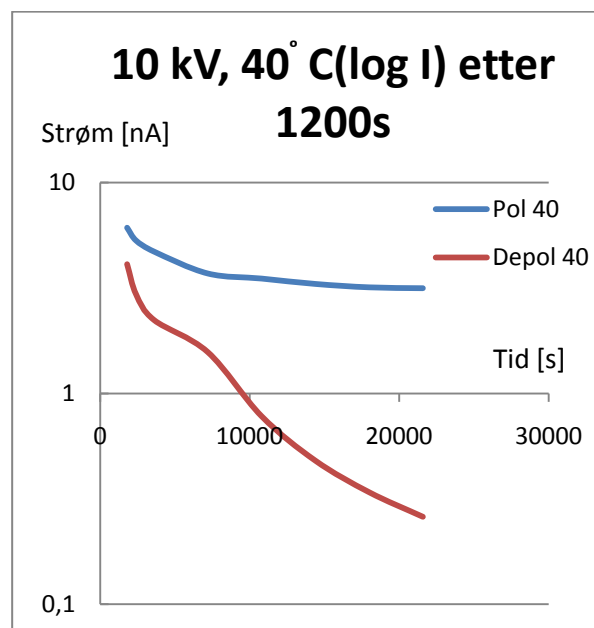
Figurene over (4-10 - 4-12) er fra forsøket som ble utført med en påtrykt spenning på 10 kV og en systemtemperatur på 20 °C. Grafene for forsøkene som ble utført ved 30 og 50 °C kan en finne i vedlegg A.



Figur 4-13, 40 °C, 10 kV plottet med logaritmisk strøm og tidsskala.

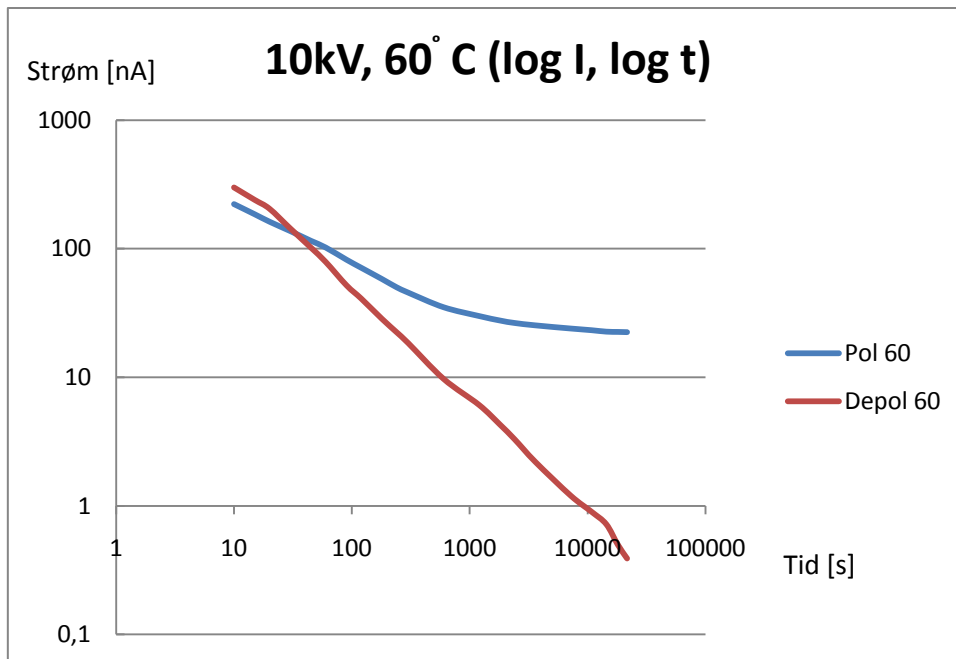


Figur 4-14, 40 °C, 10 kV, t < 1200s

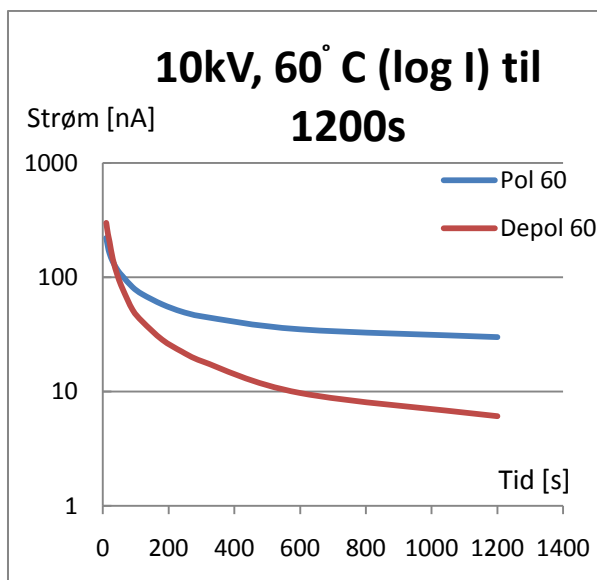


Figur 4-15, 40 °C, 10 kV, t > 1200s

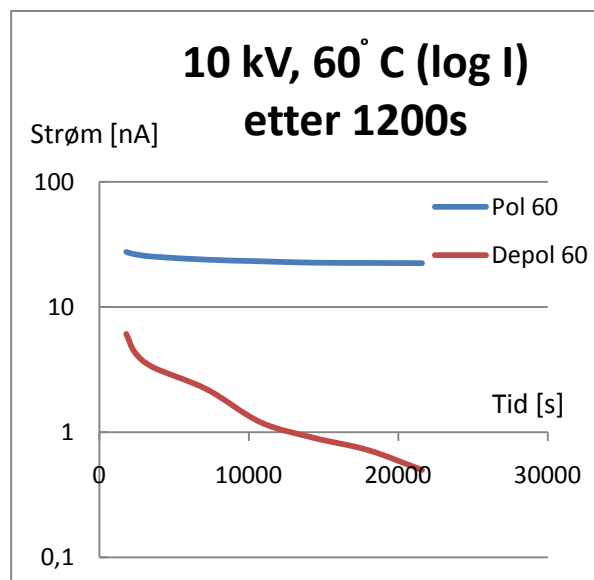
Disse grafene (figur 4-13 - 4-15) viser polarisasjonsstrøm og depolarisasjonsstrøm ved en påtrykt spenning på 10 kV og en kabeltemperatur på 40 °C



Figur 4-16, 60 °C, 10 kV plottet med logaritmisk strøm og tidsskala.



Figur 4-17, 60 °C, 10 kV, $t < 1200s$

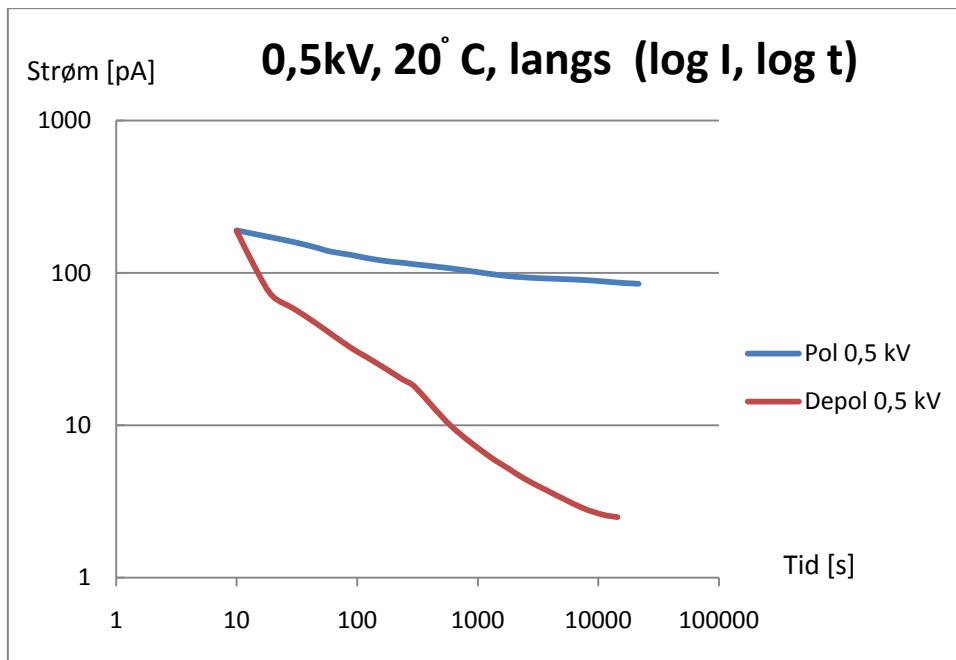


Figur 4-18, 60 °C, 10 kV, $t > 1200s$

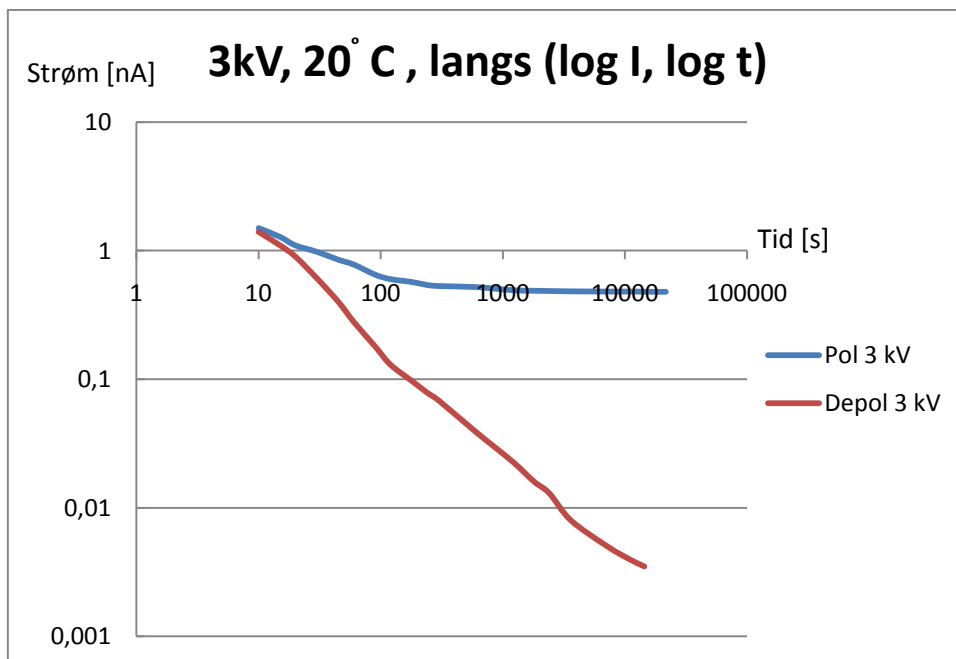
Disse grafene (figur 4-16 - 4-17) viser polarisasjonsstrøm og depolarisasjonsstrøm ved en påtrykt spenning på 10 kV og en kabeltemperatur på 60 °C

Resultater fra forsøkene av dielektrisk respons langs kabelisolasjonen

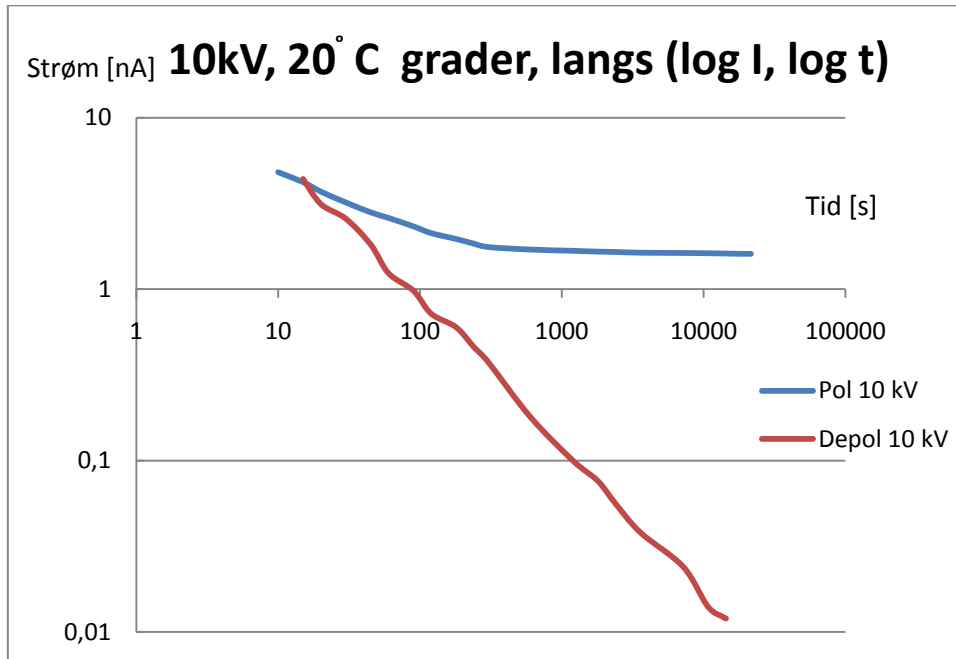
De neste målingene er for prøveobjekt 2. Grafene under viser den dielektriske responsen målt på langs av kabelisolasjonen. Alle disse forsøkene ble utført ved en isolasjonstemperatur på 20 °C. Den første figuren (figur 4-19) viser polarisasjon/depolarisasjonsstrøm for forsøket som ble utført med 0,5 kV påtrykt spenning, den andre (figur 4-20) ved 3kV og den tredje (figur 4-21) ved 10 kV. Disse grafene er plottet med logaritmisk x og y-akse.



Figur 4-19, Pol/depolstrøm for prøveobjekt 2 ved 0,5 kV



Figur 4-20, Pol/depolstrøm for prøveobjekt 2 ved 3 kV



Figur 4-21, Pol/depolstrøm for prøveobjekt 2 ved 10 kV

Figurer med kun logaritmisk tidsakse kan en finne i vedlegg A.

4.2 Konduktivitet

For å kunne beregne konduktiviteten ved de ulike forsøkene måtte først den relative permittiviteten, ϵ_r , regnes ut for begge prøveobjektene. Dette ble gjort ved å sette verdiene i tabell 3.1 og tabell 3.2 inn i formel 2.23 og 2.24. De utregnede verdiene for ϵ_r kan en se i tabell 4.1.

Prøveobjekt	Relativ permittivitet ϵ_r
1 (hel kabel)	3,48
2 (kabelskive)	2,24

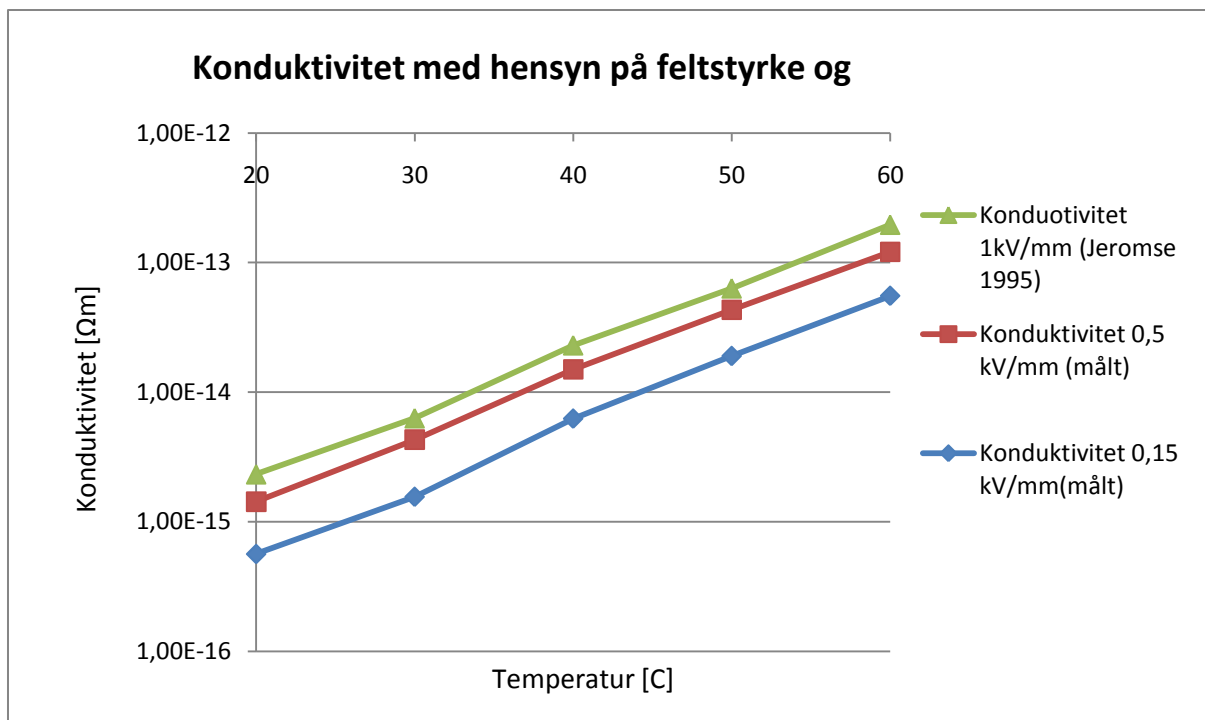
Tabell 4.1, Relativ permittivitet for prøveobjektene.

For å regne ut konduktiviteten ved de ulike forsøkene måtte I_{DC} regnes ut for alle forsøkene. Dette ble gjort ved hjelp av formel 2.28. De beregnede verdiene er satt opp i tabell 4.2.

Forsøksparametre	I_{dc} [nA]
3 kV, 20 °C	0,057
3 kV, 30 °C	0,158
3 kV, 40 °C	0,63
3 kV, 50 °C	1,92
3 kV, 60 °C	5,57
10 kV, 20 °C	0,29
10 kV, 30 °C	0,922
10 kV, 40 °C	2,94
10 kV, 50 °C	8,13
10 kV, 60 °C	21,98
0,5 kV, 20 °C, langs	0,0785
3 kV, 20 °C, langs	0,475
10 kV, 20 °C, langs	1,595

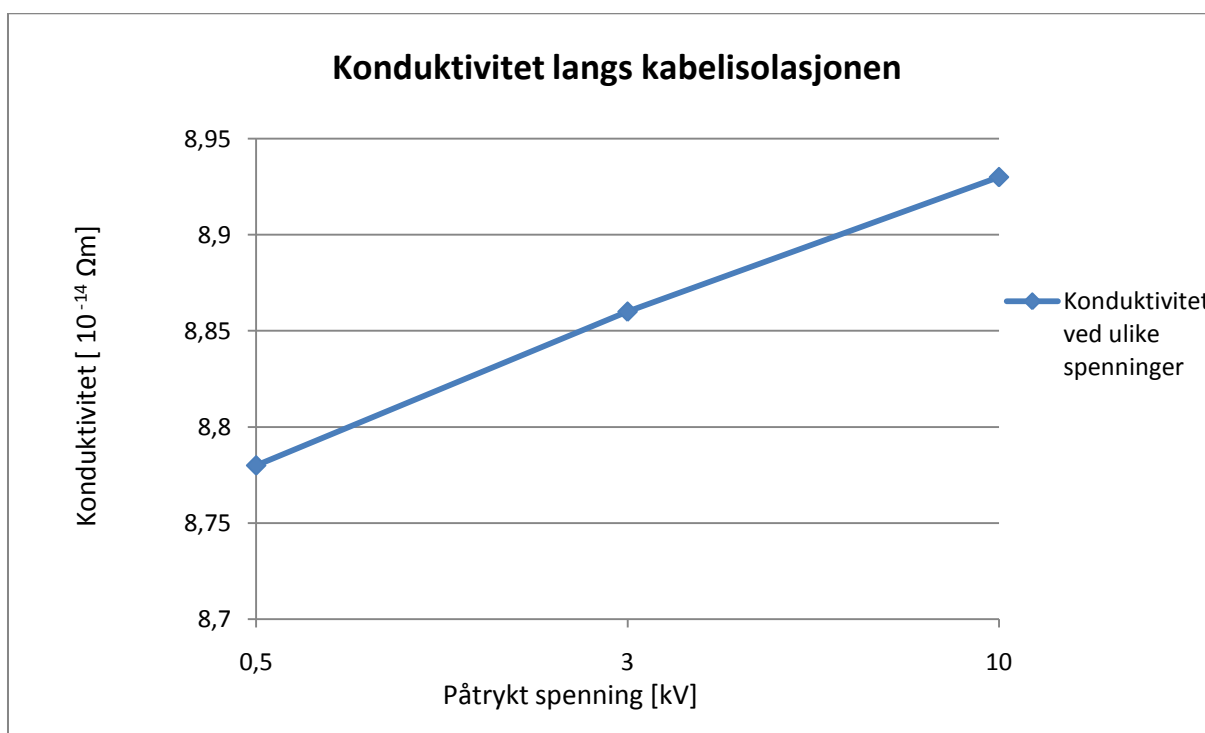
Tabell 4.2, Forskjell mellom polarisasjonsstrøm og depolarisasjonsstrøm for de ulike forsøkene.

Ved å sette disse verdiene inn i formel 2.26 får en ut konduktiviteten i isolasjonsmaterialene ved de forskjellige temperaturene og påtrykte spenningene. I figur 4-22 kan en se konduktivitetendringene for det første prøveobjektet, og i figur 4-23 kan en se dette for det andre prøveobjektet. Verdiene for 3 kV forsøkene er regnet ut ved $t = 12h$, og verdiene for 10 kV forsøkene er regnet ut ved $t = 6 h$, men de kunne like godt ha blitt beregnet ved et tidligere tidspunkt.



Figur 4-22, Konduktiviteten for prøveobjekt 1

I denne figuren (4.22) er den røde og den blå grafen målte ledningsevner. Den grønne grafen er fra et tilsvarende forsøk som er utført i en annen rapport [9].



Figur 4-23, Konduktiviteten for prøveobjekt 2

4.3 Disseksjon

Ved disseksjonen av prøveobjektet ble det sett på hvordan kabelisolasjonen var bygget opp, og størrelsen på buttgapene i de ulike papirlagene. Selve disseksjonen foregikk ved at et og et bur ble rullet av kabelen, for så å se på papirtypen og buttgapbredden i de ulike burene.

Ytterst på kabelisolasjonen var det et h-bånd og en ytre halvleder. Selve papirisolasjonen var bygget opp av bur med 16 papirlag som var viklet i samme retning. I de 11 første burene var det brukt et tykt papir, og i de 5 siste burene var det brukt en tynnere og smalere type papir. De første og de siste papirburene besto av mindre enn 16 papirlag. Dette er fordi at diameteren til lederen, med isolasjon, skal bli som i de planlagte spesifikasjonene[7]. Disse burene kalles også styringsbur. Innerst på kabelen var det en indre halvleder besto den samme papirtypen som ytre halvleder, men kuttet i smalere papirstrimler.

I figur 4-24 kan en se hvordan det så ut når papirlagene ble rullet av.



Figur 4-24, Avrulling av isolasjonslag.

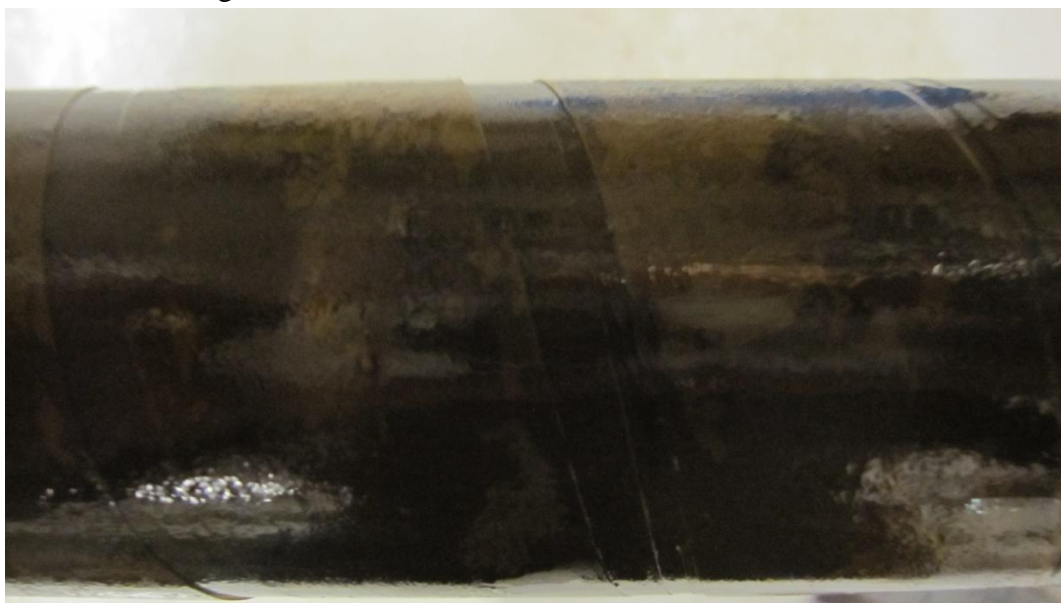
I figuren over (4-24) kan en se at oljefilmen som ligger mellom papirlagene rives opp som et tykt lag av oljestråder. Dette var gjennomgående for alle papirlagene i kabelen. Oljeimpregneringen av kabelen var altså god gjennom alle lagene.

I tabellen på neste side kan en se hvordan lagene i isolasjonen var bygd opp i tillegg til bredden på det bredeste og det tynneste buttgapet i hvert bur (tabell 4.3).

Burnummer	Type isolasjon	Antall papirer i bur	Buttgap min [mm]	Buttgap maks [mm]	Avvik [mm]
1	Blykappe	1			
2	H- bånd	1			
3	Sotpapir 27x0,125 mm	3	2,5	3,1	0,6
4	Papir 27x0,115 mm	12	1,8	2,7	1,9
5	Papir 27x0,115 mm	11	1,9	2,9	1
6	Papir 27x0,115 mm	16	1,5	2,6	0,9
7	Papir 27x0,115 mm	16	1,3	2,5	1,2
8	Papir 27x0,115 mm	16	1,65	3,3	1,65
9	Papir 27x0,115 mm	16	1,3	2,3	1
10	Papir 27x0,115 mm	16	1,2	3	1,8
11	Papir 27x0,115 mm	16	1,25	2,1	0,85
12	Papir 27x0,115 mm	16	1,5	3,35	1,85
13	Papir 27x0,115 mm	16	1,2	3,2	2
14	Papir 27x0,115 mm	16	1,8	7,1	5,3
15	Papir 19x0,065 mm	16	1,4	2,2	0,8
16	Papir 19x0,065 mm	16	1	1,75	0,75
17	Papir 19x0,065 mm	16	0,9	1,6	0,7
18	Papir 19x0,065 mm	16	0,8	1,2	0,4
19	Papir 19x0,065 mm	13	0,7	1	0,3
20	Sotpapir 19x0,125 mm	4	0,9	1,6	0,7

Tabell 4.3, Oppbygning av kabelisolasjon og bredde på buttgap

I denne tabellen kan en se at forskjellene i bredden på buttgapene varierer en del fra bur til bur. Det største avviket finner en i bur 14. Her har det skjedd en feiltvinning som forårsaker at flere buttgap ligger ovenfor hverandre, uten at det er noe papirlag imellom dem. Hvordan dette så ut an en se i figur 4-25.



Figur 4-25, Feiltvinning i bur 14.

Hvordan et bur uten feiltvinning ser ut kan en se i figur 4-26.



Figur 4-26, Bilde fra avrulling av bur 6.

I figuren over (figur 4-26) kan en også se hvordan papirlagene ligger med en 30-70 % overlapping.

For å måle tykkelsen til de ulike papirtypene ble det brukt mikroskop. Tykkelsen til de ulike papirene er oppgitt i tabell 4.4.

Type	Bredde [mm]	Tykkelse [mm]
Smalt kraftpapir	19	0,065
Bredt Kraftpapir	27	0,115
Sotpapir indre halvleder	19	0,125
Sotpapir ytre halvleder	27	0,125
H-bånd	27	0,2

Tabell 4.4, Papirenes dimensjoner.

For å finne ut hvor tykke oljefilmene mellom papirlagene var, ble tykkelsen til 4 ulike bur av det tykke kraftpapiret. For det tykke kraftpapiret var burtykkelsen i gjennomsnitt 2,01 mm tykk. Dette gir en gjennomsnittlig tykkelse på oljelagene på 0,011 mm. Det samme ble gjort for det tynne kraftpapiret. Her ble den gjennomsnittlige tykkelsen til oljelagene 0,007mm.

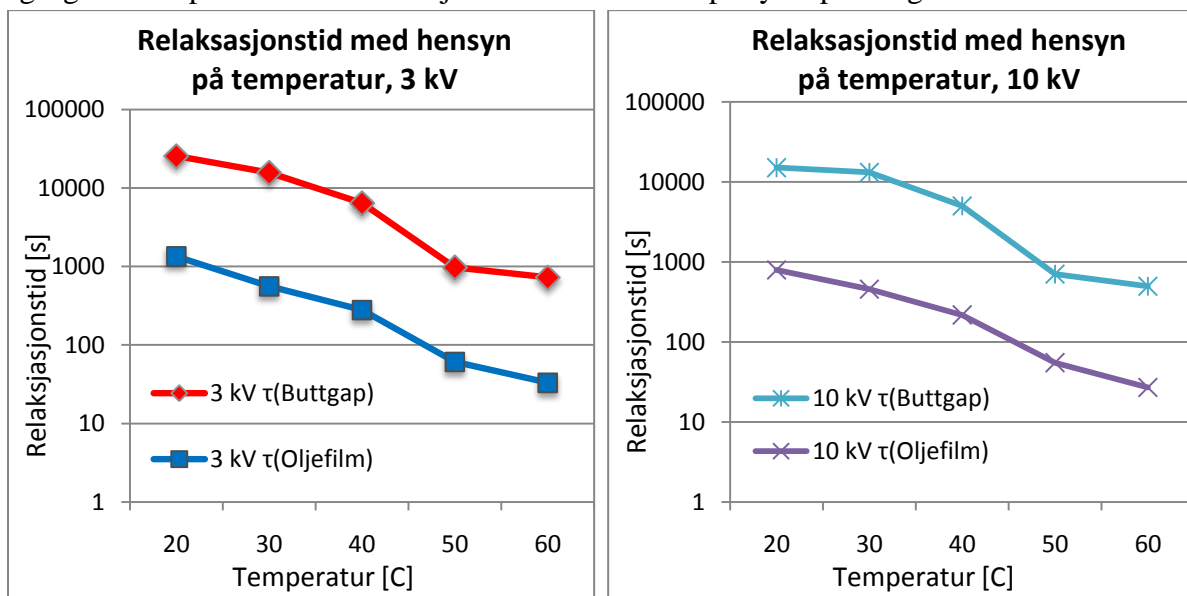
Hvordan de ulike papirlagene så ut kan en se i vedlegg G, og flere bilder fra disseksjonen kan en se i vedlegg H.

5 - Diskusjon

5.1 Endringer i pol/depolstrøm ved endring av temperatur og E-felt

For å forklare hvorfor noen av grafene i resultatene er delt opp ved tiden $t = 1200\text{s}$ må en se nærmere på polarisasjonsmekanismene. I en masseimpregnert papirkabel er det grenseflatepolarisasjonen som er den største polarisasjonsfaktoren. Som en kan se i teorien, er kabelisolasjonen bygget av mange lag med papir med en tynn oljefilm mellom hvert lag. Papirene er tvunnet med et lite gap imellom hver runde rundt lederen. Dette gapet er det som er buttgapet. Tykkelsen på disse buttgapene er altså mye større enn for oljefilmene som er imellom papirlagene. Dette kan en se i figur 2-5. Tykkelsen til oljelagene ble målt til å være 0,011 mm mellom de tykke papirlagene. Tykkelsen til et buttgap må da bli to ganger tykkelsen til en oljefilm pluss tykkelsen til et papirlag, altså 0,137 mm. Det vil altså ta lengre tid å fullstendig polarisere buttgapene enn oljefilmene. En god antagelse er da at oljefilmene vil bli fullstendig polarisert lenge før buttgapene. Grafene som har en tidsakse fra 0s til 1200s representerer derfor de tynne oljefilmenes bidrag til polarisasjonsstrømmen, og grafene som viser I_{pol} og I_{depol} for $t > 1200\text{s}$ representerer bidraget fra polarisasjonen i buttgapene. Grunnen til at akkurat 1200 sekunder ble valg som tiden der oljefilmene er fullstendig polarisert, er at en kan se i resultatene at det er en knekk i grafene rundt denne tiden (dette er lett å se i figur 4-4 og 4-13). Denne knekken er mest sannsynlig at oljefilmene er fullstendig polarisert.

Når det gjelder hvordan polarisasjon og depolarisasjonen endrer seg med tiden kan en se på hvordan relaksasjonstiden endrer seg ved endret E-felt og temperatur. I grafene under (figur 5-1 og 5-2) kan en se hvordan relaksasjonstiden τ for depolarisasjonen i prøveobjekt 1 endrer seg med temperaturen. Figur 5-1 representerer relaksasjonstiden ved 3 kV påtrykt spenning, og figur 5-2 representerer relaksasjonstiden ved 10 kV påtrykt spenning.



Figur 5-1(t.v.), Figur 5-2(t.h.), Relaksasjonstid for buttgap og oljefilm ved 3 kV og 10 kV.

Måten relaksasjonstiden har blitt regnet ut på er ved å ta to punkter like etter $t = 0$ og $t = 1200$ på depolarisasjonskurven, og deretter regne ut en tilnærmet relaksasjonstid. Av figurene over kan en se at relaksasjonstiden blir kortere når temperaturen øker både for buttgapene og for oljefilmene. Dette vil si at polarisasjonen skjer raskere ved økende temperatur. Hvis en sammenlikner de to grafene kan en se at relaksasjonstiden også blir mindre hvis det påtrykte elektriske feltet økes. Den gjennomsnittlige senkningen av relaksasjonstiden fra en påtrykt spenning på 3 kV til 10 kV, er 28 % for τ_{buttgap} og 22 % for τ_{oljefilm} . Det kan ut fra dette konkluderes med at elektrisk felt og temperatur har stor innvirkning på hvordan polarisasjonen av prøveobjekt 1 utarter seg.

Som følge av at polarisasjonen i isolasjonen skjer raskere ved høyere temperatur vil også polarisasjonsstrømmen stabilisere seg raskere. Dette kan en se i figurene 4-1 - 4-16. Her kan en se at polarisasjonsstrømmen gradvis flater ut tidligere når temperaturen økes. Det samme skjer når den påtrykte spenningen over isolasjonen øker. For å forklare dette litt nærmere kan en for eksempel se på hvordan polarisasjonsstrømmen endrer seg fra $t = 5$ h til $t = 6$ h for de ulike forsøkene. Dette er vist i tabell 5.1

T [°C]	U [kV]	Endring mellom t = 5 h til t = 6 h [%]
20	3	15,31
30	3	7,84
40	3	4,4
50	3	2,8
60	3	1,6
20	10	2,43
30	10	1,73
40	10	0,94
50	10	0,82
60	10	0,44

Tabell 5.1, Endring i polarisasjonsstrøm fra t = 5 h til t = 6 h.

I tabellen over kan en se at polarisasjonsstrømmen blir mer stasjonær ved økt temperatur. Det samme gjelder hvis spenning økes. Det at polarisasjonsstrømmen ikke rekker å stabilisere seg i løpet av 6 timer ved en påtrykt spenning på 3 kV, er grunnen til at det under disse forsøkene ble påtrykt spenning i 12 timer.

Når det gjelder prøveobjekt 2 kan en se ut fra grafene (figur 4-19 - 4-21) at polarisasjonsstrømmen her blir stasjonær mye raskere enn for prøveobjekt 1. Dette kommer av at mengden isolasjon som polariseres her er 180 ganger mindre. Ut fra grafene kan en se at en når en stabil polarisasjonsstrøm alt ved $t = 20$ min. For disse forsøkene hadde det derfor ikke vært nødvendig å påtrykke spenning så lenge som 6 timer.

5.2 Konduktivitet

Ledningsevnen er i formel 2.22 en funksjon av både elektrisk felt og temperatur. Det som antas å skje når E-feltet og temperaturen øker, er at en får en eksponentiell økning i ledningsevnen. I figur 4-22 kan en se at når temperaturen øker skjer akkurat dette. Siden figur 4-22 er plottet med en logaritmisk konduktivitetsakse, og ledningsevnene ved de ulike temperaturene danner en rett linje, kan en si at økningen er tilnærmet eksponentiell. Når det elektriske feltet økes kan en se at også denne økningen skjer tilnærmet eksponentielt. Sammenhengen med ledningsevnen og E-feltet og temperaturen kan derfor settes opp som i formel 2.22. Forholdet mellom disse faktorene er for prøveobjekt 1 satt opp i formel 5.1.

$$\sigma = 5,79 * 10^{-17} e^{(0,105T+0,155E)} \quad (5.1)$$

I denne formelen er T isolasjonstemperaturen i grader celsius og E det påtrykte elektriske feltet i kV/mm. Ut fra likning 5.1 kan en se at ledningsevnen er mest avhengig av det elektriske feltet. Men siden isolasjonstemperaturen i en kabel som dette kan variere mellom 0 og 80 grader, og maksimalt E-felt er 18 kV/mm (450 kV), vil også isolasjonstemperaturen ha mye å si. For en HVDC kabel i drift vil det påtrykte E-feltet alltid være konstant, og temperaturen være den faktoren som endrer ledningsevnen og feltfordelingen.

I dette forsøket er temperaturen høyest på ytterst på isolasjonen siden varmekablene er plassert utenpå selve kablen. For en HVDC kabel i drift, vil resistansen i lederen forårsake et tap som fører til varmeutvikling. Da vil temperaturen i isolasjonen være høyest innerst ved lederen, og en vil få en temperaturgradient utover i isolasjonen. Dette blir akkurat motsatt av temperaturgradienten i disse forsøkene på prøveobjekt 1. Det en kan trekke ut av dette er at økende temperatur gir en økende ledningsevne. Isolasjonen nærmest lederen vil derfor ha en høyere konduktivitet og en vil få en ujevn feltfordeling i isolasjonen hvor det elektriske feltet er sterkest nær lederen.

For prøveobjekt 2 var hovedpoenget å måle hvordan konduktiviteten på langs av kablen var. For dette prøveobjektet vil det i isolasjonen være lange ubrutte oljefilmer i mellom elektrodene. Som en kan se fra teorien er ledningsevnen mye høyere for olje enn for papir. Det som antas å skje i dette tilfelle er derfor at ledningsevnen på langs av isolasjonen er mye høyere enn på tvers av kablen. Dette skjer på grunn av at nesten alle ladningene nå vil bevege seg i oljefilmene hvor mobiliteten og tettheten til ladningene er høyere. Som en forenkling kan altså ledningsevnen i dette prøveobjektet sees på som ledningsevnen i kun oljefilmene. For å få et godt sammenlikningsgrunnlag er prøveobjekt 2 akkurat like bredt som tykkelsen på prøveobjekt 1, 25 mm. I figur 4-23 kan en se hvordan ledningsevnen øker med økt spenning. En kan også se at ledningsevnen øker lite i prøveobjekt 2 i forhold til prøveobjekt 1. Formelen for konduktiviteten i prøveobjekt 2 er satt opp i formel 5.2.

$$\sigma = 8,795 * 10^{-14} e^{(0,025E)} \quad (5.2)$$

Temperaturleddet er fjernet i likningen over på grunn av at det ikke ble gjort noen forsøk på prøveobjekt 2 der temperaturen ble variert. Det vil dermed ikke si at dette prøveobjektet er temperaturuavhengig. Det er mest sannsynlig like temperaturavhengig som prøveobjekt 1.

Hvis verdiene i figur 4-22 og 4-23 sammenliknes kan en se at ved lik temperatur og likt påtrykt E-felt er ledningsevnen til prøveobjekt 2 103 ganger større enn for prøveobjekt 1. Det kan derfor, med bakgrunn i disse resultatene, konkluderes med at de fleste av ladningene vil bevege seg i oljen også for prøveobjekt 1. Hvis en ser på hvordan isolasjonen er bygget opp i figur 2-1 kan en se at flesteparten ladningene vil bevege seg i oljefilmene og i buttgapene. Dette er også grunnen til at gjennomslag i massekabler ofte skjer på skrå av kabelisolasjonen. Når det gjelder feltfordelingen mellom oljen og papiret vil en få en ujevn fordeling gjennom hele kabelen grunnet forskjellen i ledningsevnene.

5.3 Disseksjon

Disseksjonen av prøveobjektene ble utført for å se hvordan isolasjonen i en massekabel er bygget opp. Det som skulle evalueres var papirenes dimensjoner, oljefilmens og buttgapenes dimensjoner. Som en kan se i vedlegg G var det brukt to ulike typer papirer. Innerst ved lederen var det brukt en tynnere og smalere typepapir enn for resten av isolasjonen. Buttgapene mellom disse papirene var også smalere og på grunn av den at papirtykkelsen for denne papirtypen var mindre ble også dybden til buttgapene mindre. Polarisasjonen innerst ved lederen skjer altså mest sannsynlig fortere enn for resten av isolasjonen. Hovedgrunnen til at det er brukt en mindre papirtype innerst ved lederen er at kabelens mekaniske fleksibilitet skal være best mulig. Dette er også grunnen til at isolasjonen må ha buttgap. Hvis en ikke har noen buttgap i mellom hver runde et papir er tvunnet rundt lederen vil en få en mekanisk ødeleggelse hvis kabelen bøyes. Med buttgap vil papirene kunne flyte mot og fra hverandre når kabelen bøyes.

For å at kabelens holdefasthet skal være god, er det også viktig at disse buttgapene ikke er for brede. Hvis kabelen består av mange brede buttgap vil mengden olje i forhold til papir bli høyere, og ledningsevnen i isolasjonsmaterialet vil derfor bli høyere. I følge konstruksjonstegningene av denne kabelen skulle buttgapene være 1 mm brede for den tynne papirtypen og 2 mm brede for den tykke papirtypen [15]. Som en kan se i tabell 4.3 er det store avvik fra den planlagte buttgapbredden. På det meste er buttgapene 5,1 mm bredere enn planlagt, og flere buttgap ligger over hverandre (figur 4-25). Det er også mange andre steder i isolasjonen hvor buttgapene avviker fra den planlagte bredden. Feilrullinger av papirlagene av denne typen forårsaker "weak spots" i isolasjonen, der holdefastheten er mindre. Når kabelisolasjonen da varmes opp i tillegg til at det påtrykkes et E-felt på 18 kV/mm(450 kV) kan dette føre til gjennomslag. Isolasjonen i en massekabel vil alltid i en viss grad avvike fra konstruksjonstegningene, og det er dette som gjør det vanskelig å beskrive akkurat hvordan feltfordelingen og ledningsevnen i isolasjonen utarte seg.

5.4 Dimensjonering av massekabelisolasjon

Hvis en ser å se fra resultatene av disseksjonen i sammenheng med teorien kan også oppbygningen av isolasjonen i stor grad virker inn på den elektriske feltfordelingen og ledningsevnen til isolasjonen. Det som er viktig er å finne en gylden middelvei slik at isolasjonens holdefasthet blir så høy som mulig uten at det går ut over kabelens mekaniske egenskaper. Noe av det som kan endres på er buttgapenes bredde, men det er viktig å ikke forminske buttgapenes bredde så mye at papirlagene krøller seg når kabelen bøyes. Et mulig forsøk, for å finne ut av dette, er å lage en kabel med mindre buttgap for så å bøye den med samme radius som kabelen blir bøyd i impregneringskjelen. Denne bøyeradiusen er den minste som en massekabel blir utsatt for. En annen dimensjoneringsendring er å påføre papirlagene med høyere strekk. Da vil oljefilmene i isolasjonen bli tynnere og en vil få en lavere konduktivitet i isolasjonen. Det som er viktig her er at isolasjonen i strekkes på så stramt at det går utover impregneringsgraden. Hvis ikke kabelen blir helt impregnert vil en få hulromsdannelser i isolasjonen. Bedre kontroll under produksjonen av kabelen, slik at isolasjonen får de egenskapene den skal ha er også en løsning på dette problemet. Hvis isolasjonen får for mange "weak spots" som følge av feiltvinning, kan holdefastheten bli mye mindre. Et annen måte å få senket kabelens ledningsevne på er å bruke smalere og tynnere papir igjennom hele isolasjonen. Dette vil minske størrelsen på buttgapene og oljefilmene, med det er også her viktig at de mekaniske egenskapene ikke blir dårligere.

Som nevnt over vil motstanden i lederen føre til varmetap som varmer opp isolasjonen. Siden både konduktivitet og polarisasjon avhenger av temperaturen er det viktig at den termiske konduktiviteten i isolasjonsmaterialet også er god. Dette er også viktig for å få en mest mulig jevn feltfordeling igjennom isolasjonen.

5.5 Feilkilder

Stabiliteten til DC kilden har mye å si for polarisasjonen i kabelen. Med en ustabil kilde vil polarisasjonen i isolasjonen få et ujevnt forløp. Endringer i den påtykte spenningen vil virke inn som momentane endringer i E-feltet, og derfor forstyrre polarisasjonsforløpet. Begge spenningskildene som er brukt i denne oppgaven er i utgangspunktet meget stabile, men når en ser på forskjellen mellom gjevheten til polarisasjonsstrømmen kontra depolarisasjonsstrømmen kan en se en viss forskjell. Under depolarisasjonen vil den jordede kabelen virke som en tilnærmet ideell kilde og det vil da kun være eksterne feilkilder som påvirker målingene.

Under målingen på prøveobjekt 1, med 3kV påtrykt spenning, var det ikke laget noen skjerm i mellom varmekabelen og måleelektroden (blykappen). Dette gjorde at det ble forstyrrelser hver gang termostaten til varmekabelen slo seg på. Før forsøkene med 10 kV spenning påtrykt ble det lagt inn en slik skjerm. Dette gjorde at denne feilkilden kunne neglisjeres.

Den største feilkilden var at kablet, i noen tilfeller, ikke var godt nok utladet før et nytt forsøk ble iverksatt. Selv om det for 10 kV forsøkene ble ventet minst 3 døgn i mellom hvert forsøk, kan en for eksempel se i figur 4-10 se at det tar lag tid før depolarisasjonen tar igjen ledningsevnen.

I en krets som denne der det foretas målinger på strømmer som er i pA området, skal det kun små forstyrrelser til for at måleverdiene påvirkes. Andre forsøk i laboratoriet som skrues av og på er nok til at det blir en målefeil. For å prøve å unngå mest mulig av denne typen støy ble alle forsøkene gjort uten for normal arbeidstid. På denne måte ble mye av laboratorieaktiviteten unngått. God skjerming er også viktig, som et eksempel ble støyet under målingene på prøveobjekt 2 nesten helt borte da prøveobjektet ble satt inn i et faradaybur.

6 - Konklusjon

Arbeidet med denne masteroppgaven har ledet frem til følgende konklusjoner:

- I kabelisolasjonen vil den mest dominerende polarisasjonsmekanismen være grenseflatepolarisasjon. Det vil likevel foregå to ulike typer grenseflatepolarisasjon, en rask grenseflatepolarisasjon i oljefilmene i isolasjonen, og en tregere grenseflatepolarisasjon i buttgapen.
- På bakgrunn av resultatene og diskusjonen kan en konkludere med dielektriske respons og DC ledningsevne i en massekabel er avhengig av temperatur, tid, påtrykt spenning og kabelisolasjonens oppbygning.
- Når det gjelder den dielektriske responsen kan en ut fra tidskonstantene for de forskjellige forsøksresultatene konkludere med at polarisasjonen i kabelisolasjonen skjer raskere ved temperatur og spenningsøkning. Polarisasjonsstrømmen vil også raskere stabilisere seg ved økning av disse parameterne. Stabiliteten til polarisasjonsstrømmen var f. eks ved $t = 6$ h, 35 ganger mer stabil for forsøket utført ved 60°C og 10 kV enn for forsøket utført ved 20°C og 3 kV.
- Ledningsevnen til kabelisolasjonen er hovedsaklig avhengig av påtrykt E-felt og temperatur, men for massekabler vil også isolasjonsoppbygningen være en avgjørende faktor. For prøveobjektet der ledningsevnen ble målt på tvers av kabelisolasjonen ble ledningsevnen beregnet til:

$$\sigma = 5,79 * 10^{-17} e^{(0,105T+0,155E)}$$

- Ledningsevnen på langs av kabelen kan som en forenkling sees på som ledningsevnen til oljen. Denne ble målt til å være 103 ganger høyere enn ledningsevnen på tvers av kabelen. Dette vil si at konduktiviteten vil stort sett være forårsaket av oljen i isolasjonen. Ladningene vil altså bevege seg i buttgapene og oljefilmene i kabelisolasjonen.
- Som en løsning på dette problemet kan buttgap og oljefilmer gjøres mindre, men det er viktig at dette ikke går utover kabelens mekaniske egenskaper. Siden ledningsevnen er avhengig av temperaturen, og ledertap vil føre til varmeutvikling, er det også viktig at den termiske konduktiviteten i isolasjonen er god. Hvis temperaturvariasjonene i kabelisolasjonen er stor vil dette føre til en skjev feltfordeling. Bedre kontroll i produksjonen av hvor brede buttgapene i isolasjonen faktisk lages, og hvor stor variasjon bredden til buttgapene blir, vil også bedre kabelens egenskaper. Hvis bredden på buttgapene varierer mye kan det oppstå "weak spots" i isolasjonen. Det er

også mulig å eksperimentere med ulike dimensjoner på papirstrimlene i isolasjonen for å prøve og bedre isolasjonens elektriske egenskaper.

7 - Litteraturliste

- [1] Erling Ildstad, "TET 4160 Høgh voltige insulating materials", Trondheim: NTNU, 2009
- [2] Erling Ildstad, Uno Gäfvert, Peter Thärning , "Relation between return voltage and other methods for measurements of dielectric response", Pittsburgh USA, 1994
- [3] Sverre Hvidsten, SINTEF energy research, ELK-30 "Condition Assessment of high voltage apparatus", Trondheim: NTNU, 2005
- [4] J. Sletbak, "DIE 1911 Elektrisk ledningsevne, dielektrisk tap og gjennom i fast og flytende isolasjon", Trondheim: NTNU, 2008
- [5] Erling Ildstad, "TET 4195 High voltage equipment cable technology", Trondheim: NTNU, 2009
- [6] Gunnar Evenset, " Cavitation as a Precursor to Breakdown of Mass-Impregnated HVDC Cables", Trondheim: Dr. Thesis NTNU, 1999.
- [7] Thomas Worzyk, "Submarine power cables", ABB Karlskrona, 2009
- [8] F. H. Kreuger, "Industrial high DC voltage", Delft: Delft University, 1995
- [9] M. J. P Jeroense, F. H. Kreuger "Electrical conduction in HVDC mass-impregnated paper cables", Delft: Delft University, 1995
- [10] D. Morton, J. H. Calderwood, "Electrical conduction at high fields in oil-impregnated paper", Bolton: Bolton Institute, 1996
- [11] M. J. P. Jeroense, P. H. F. Morshuis, "Electric Fields in HVDC Paper- Insulated Cables", Delft: Delft University, 1998
- [12] Erling Ildstad, J. Sletbak, "Factors affecting the choice of Insulation system for extruded HVDC power cables", Trondheim: NTNU, 2004
- [13] http://www.tennet.org/english/images/NorNed%20-%20Europe%27s%20link%20for%20the%20future_tcm43-18745.pdf , Tennet og Statkraft, Besøkt 04.05.11
- [14] <http://www.powergenworldwide.com/index/display/articledisplay/359238/articles/power-engineering-international/volume-17/issue-4/features/where-power-generation-leads-the-grid-must-follow.html>, Power-Gen worldwide, Besøkt 7.6.11

[15] Lars Lervik, Telefonsamtale med Lars Lervik utført 09.05.11 hvor han refererte fra deres kabelhåndbok, Halden: Nexans Norway

[16] Enis Tuncer, Georgios Polizos, Isidor Sauers, D. Randy James, "Electrical Insulation Paper and Its Physical Properties at Cryogenic Temperatures", IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 21, no. 3, 2011

[17] <http://www.keithley.com/support/data?asset=5443>, Keithley, Besøkt 16.04.11

[18] <http://www.keithley.com/support/data?asset=5391>, Keithley, Besøkt 16.04.11

[19] http://www.nexans.no/eservice/Norway-no_NO/fileLibrary/Download_540200470/Norway/files/Kabelboka%20090206.pdf, Besøkt 05.06.11

8 - Vedlegg

Vedlegg A:

- Resultater fra alle forsøkene

Vedlegg B:

- Datablad for beskyttelsesdioder

Vedlegg C:

- Manuelt måleskjema for målingene tatt ved 3 kV

Vedlegg D:

- Datablad Fug spenningskilde

Vedlegg E:

- Montering av kabel fra kilde til bryter

Vedlegg F:

- Flytdiagram for loggerprogram

Vedlegg G:

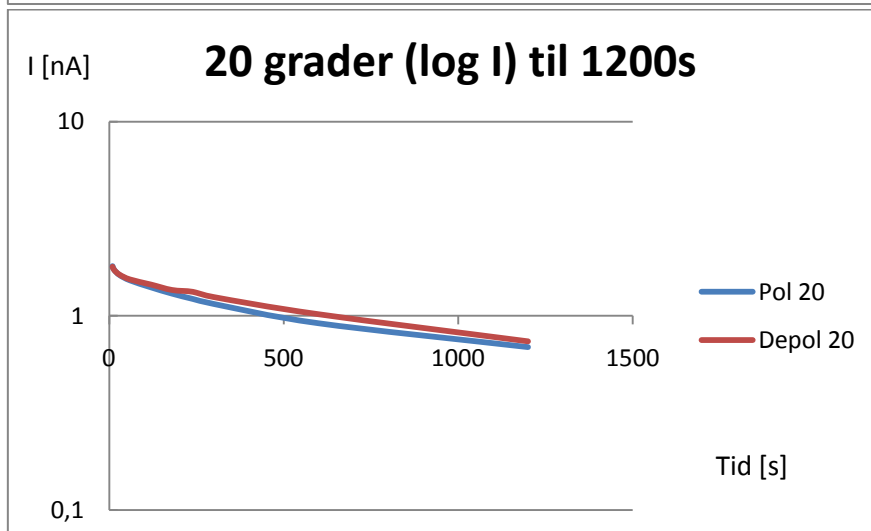
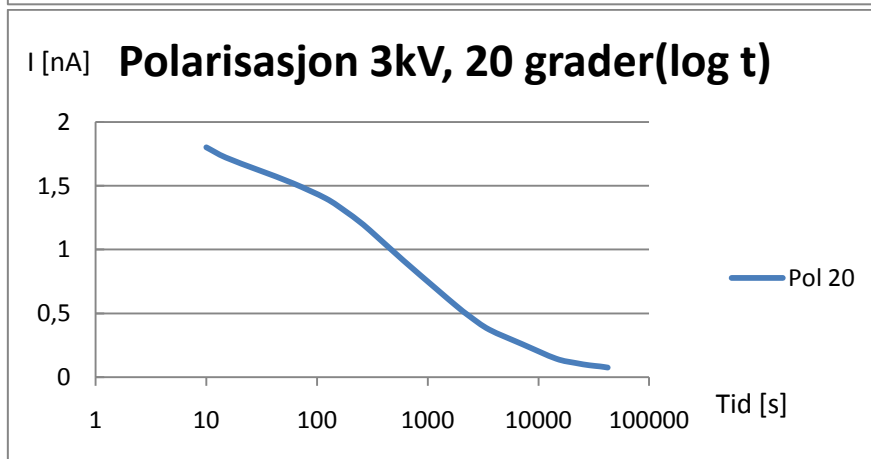
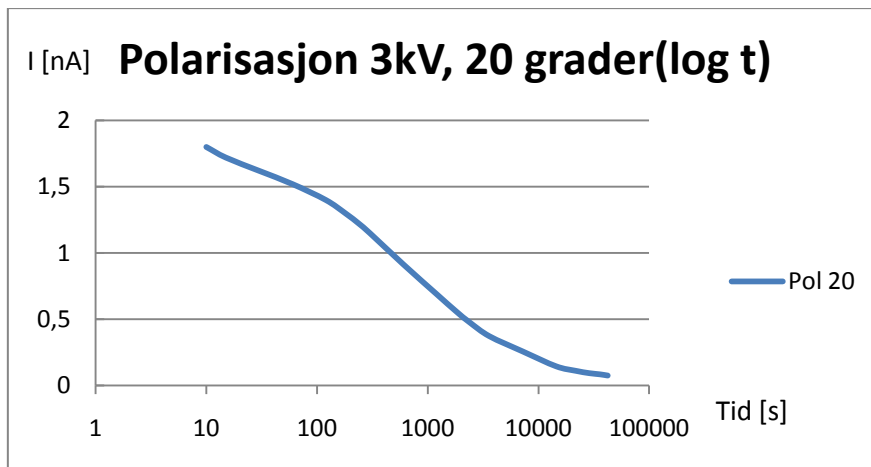
- Papirtyper i isolasjonen

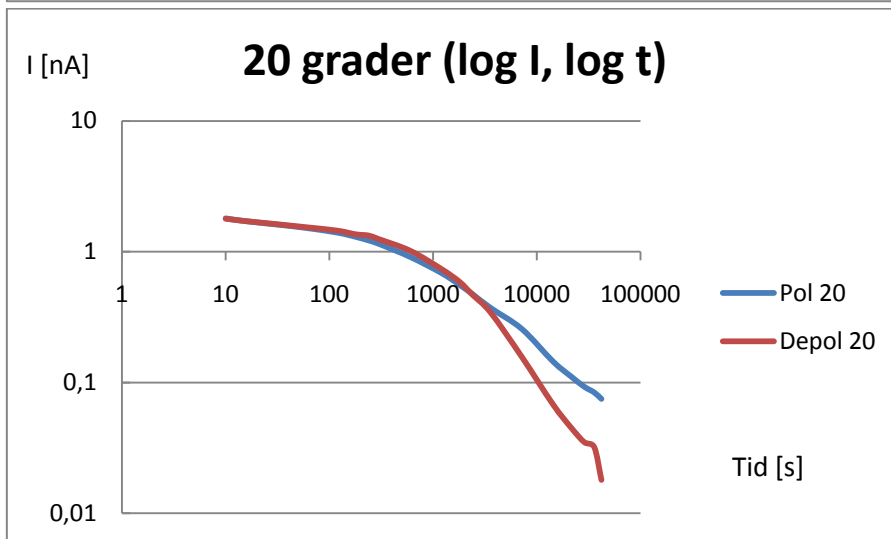
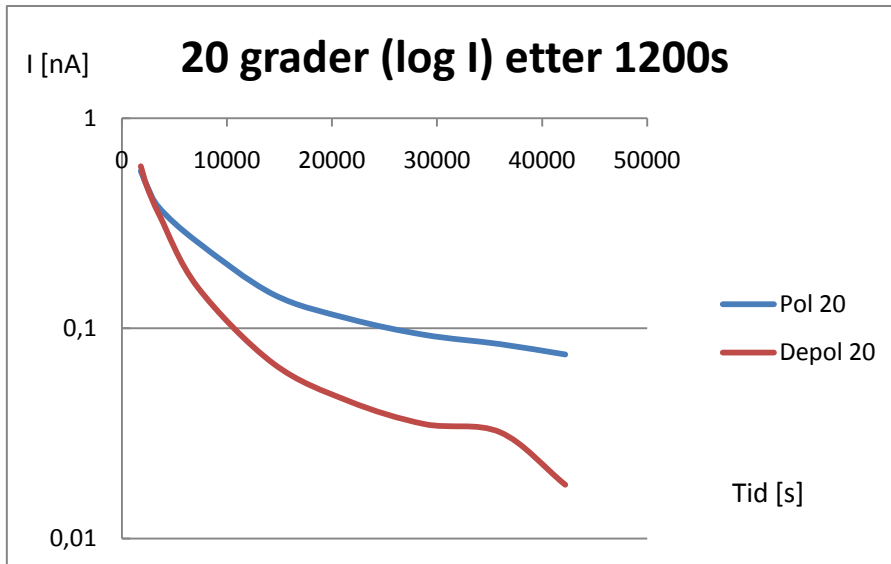
Vedlegg H:

- Bilder fra disseksjonen

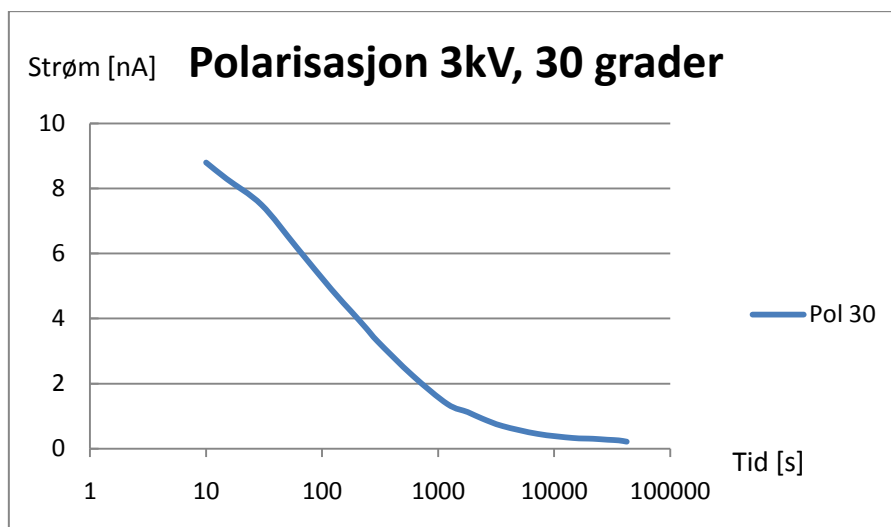
Vedlegg A: Resultater fra alle forsøkene

Spenning 3kv, Temperatur 20°C

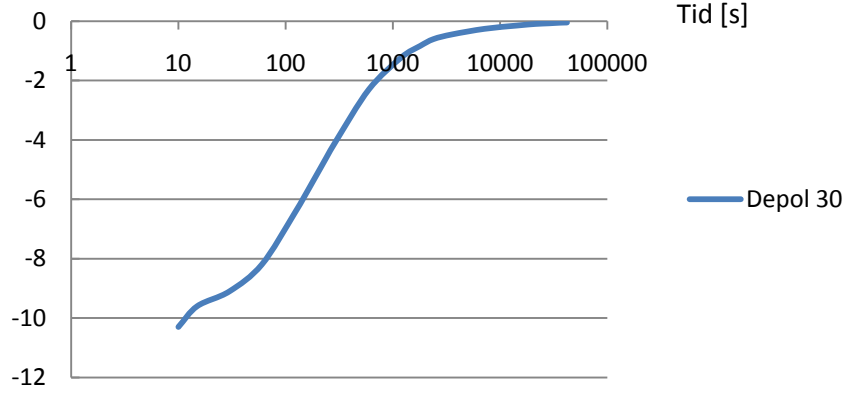




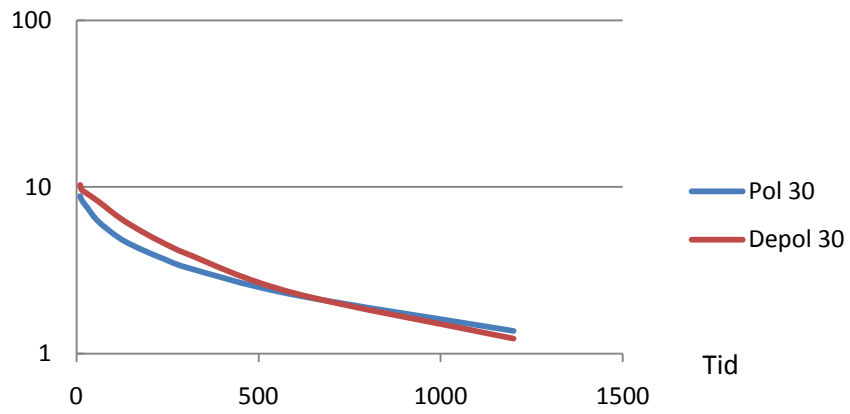
Spenning 3kv, Temperatur 30°C



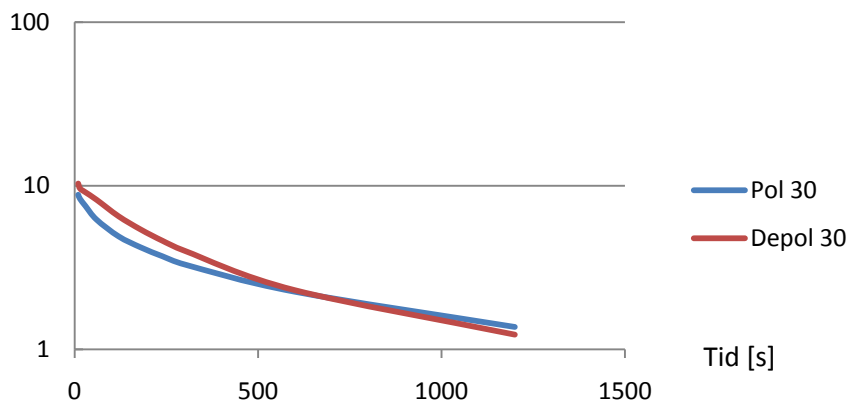
Strøm [nA] **Depolarisasjon 3kV, 30 grader**

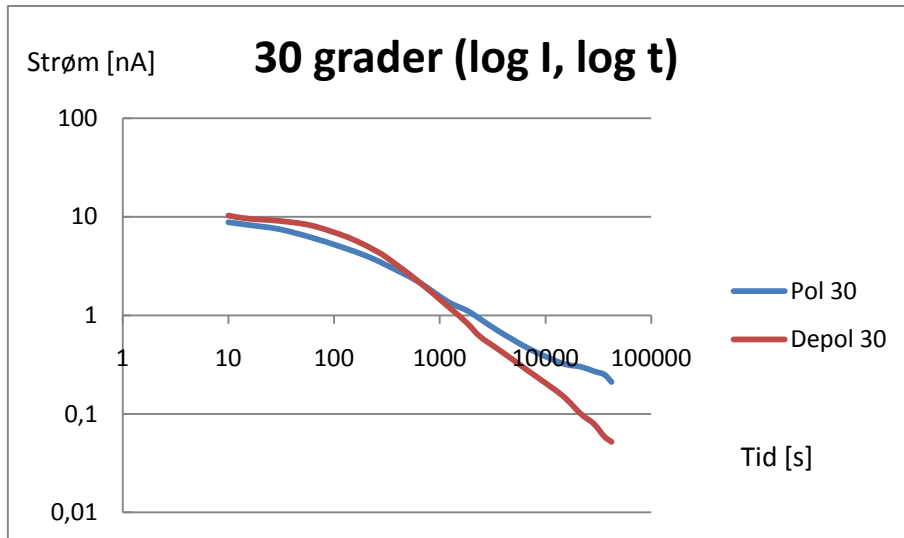


Strøm [nA] **30 grader (log I) til 1200s**

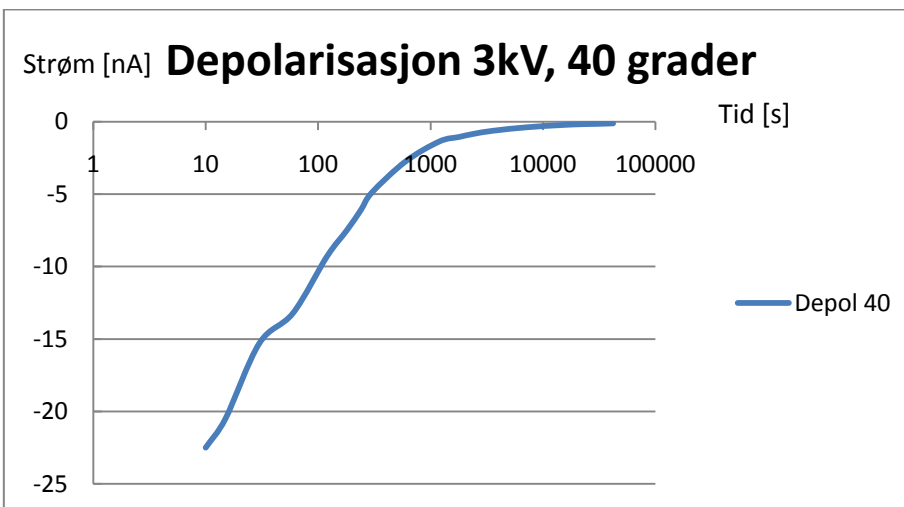
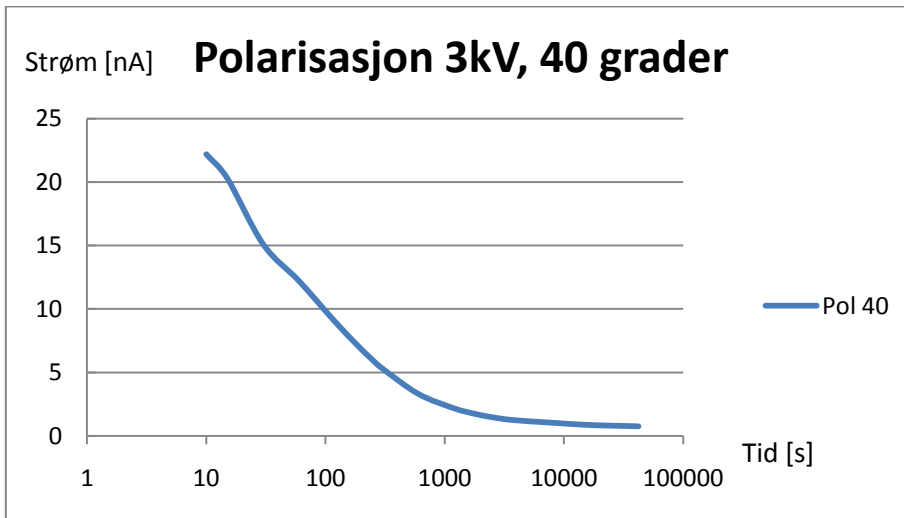


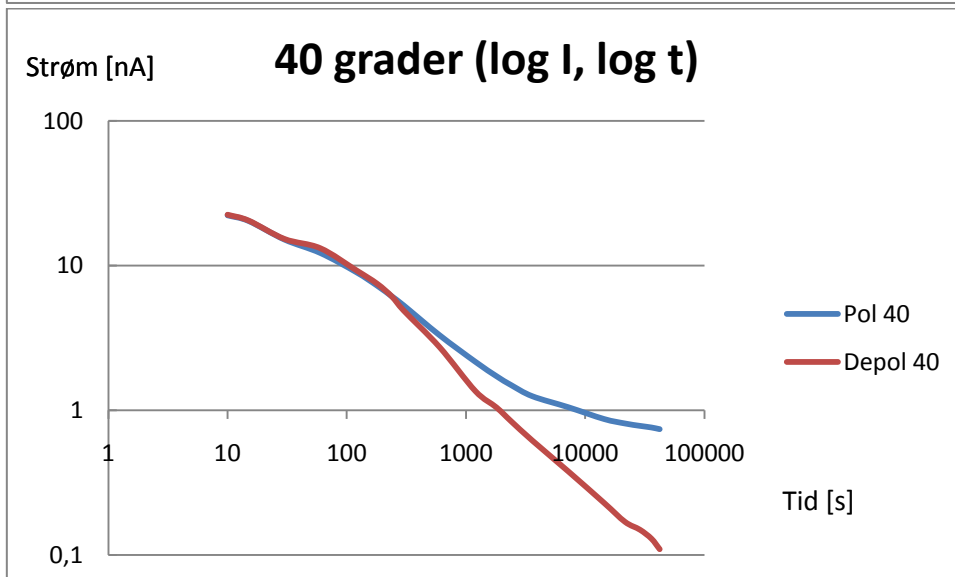
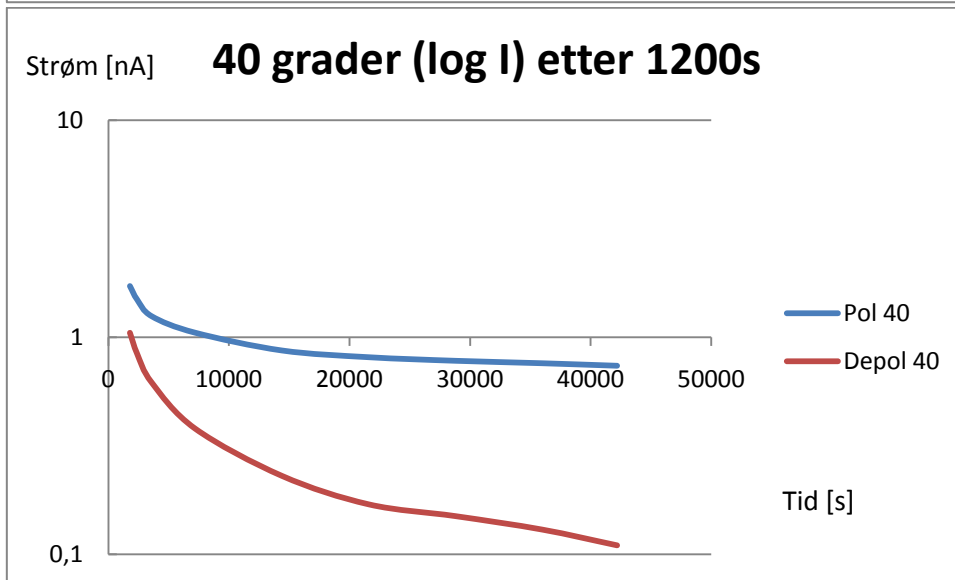
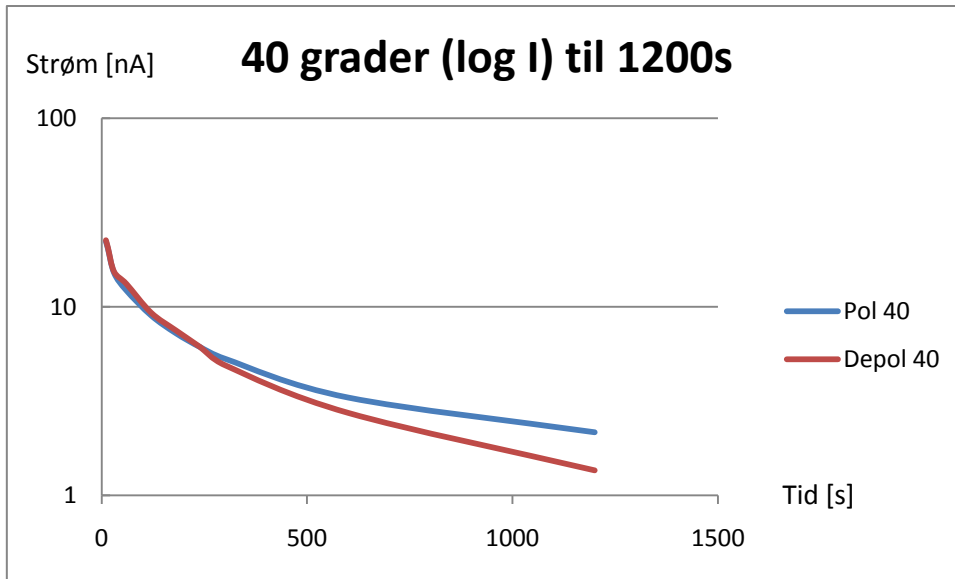
Strøm [nA] **30 grader (log I) til 1200s**



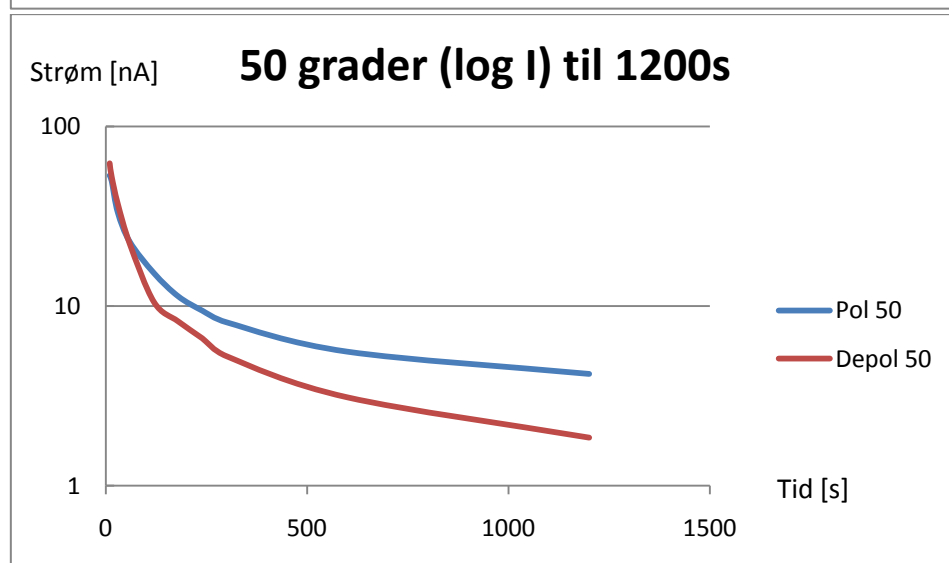
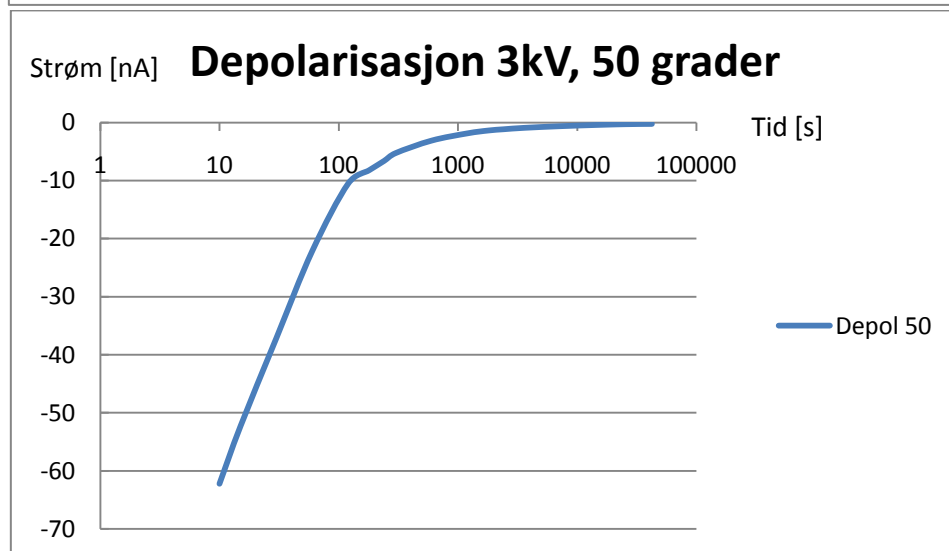
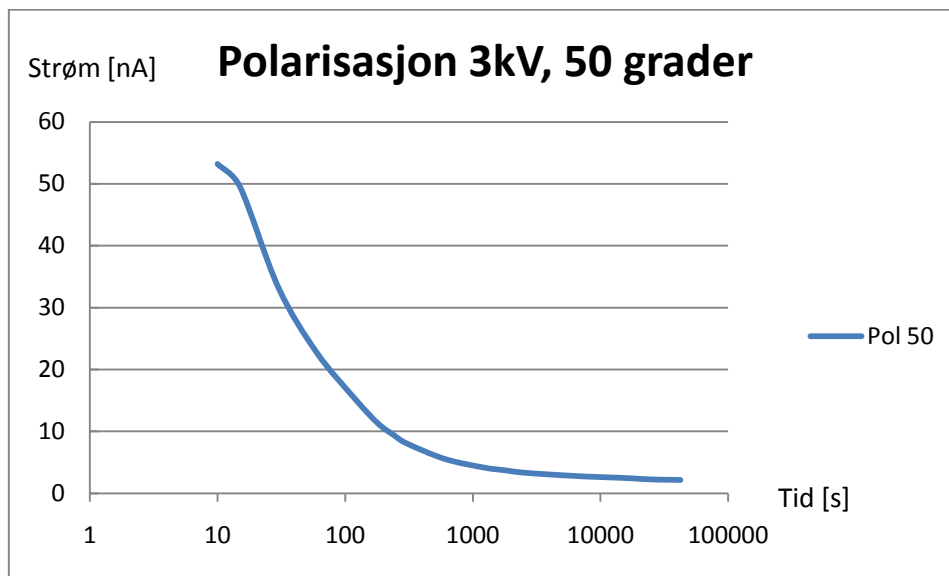


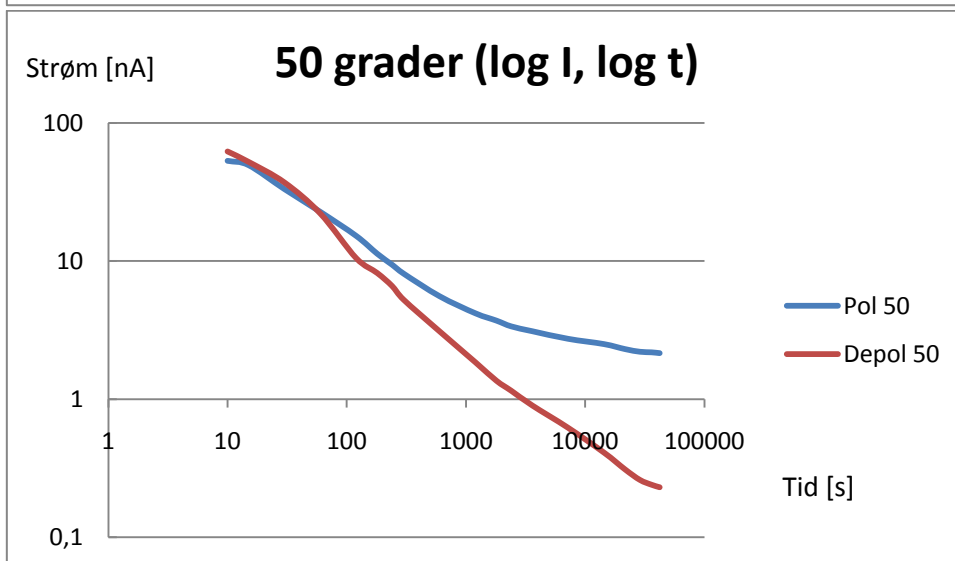
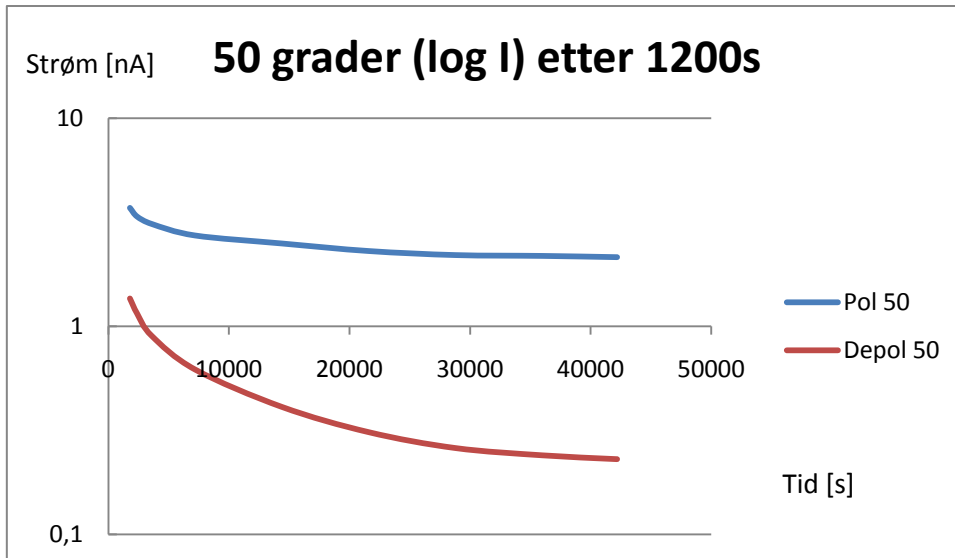
Spennning 3kv, Temperatur 40°C



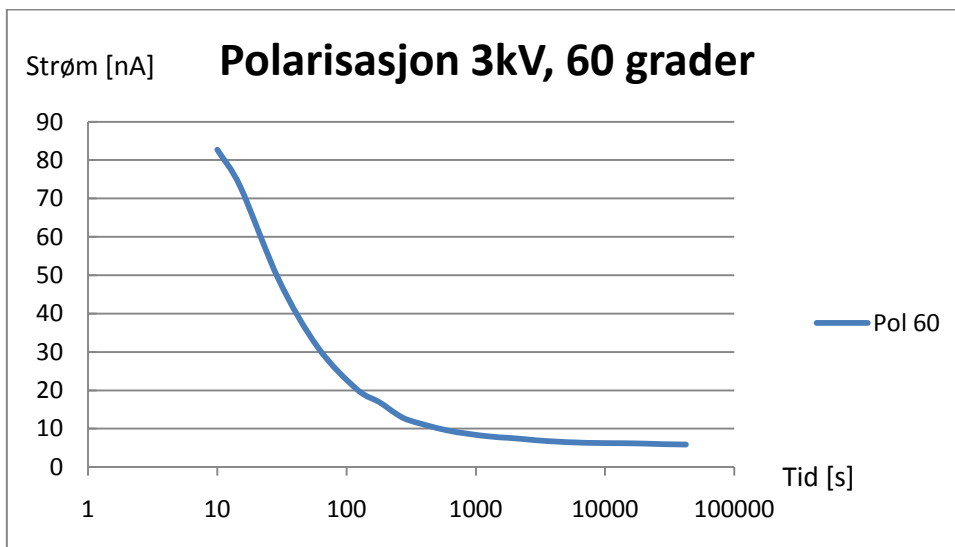


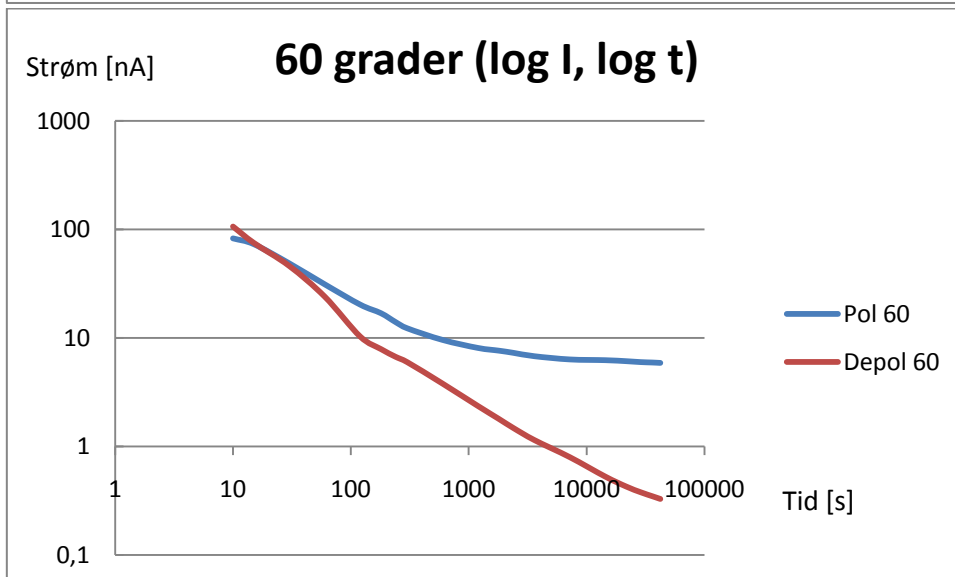
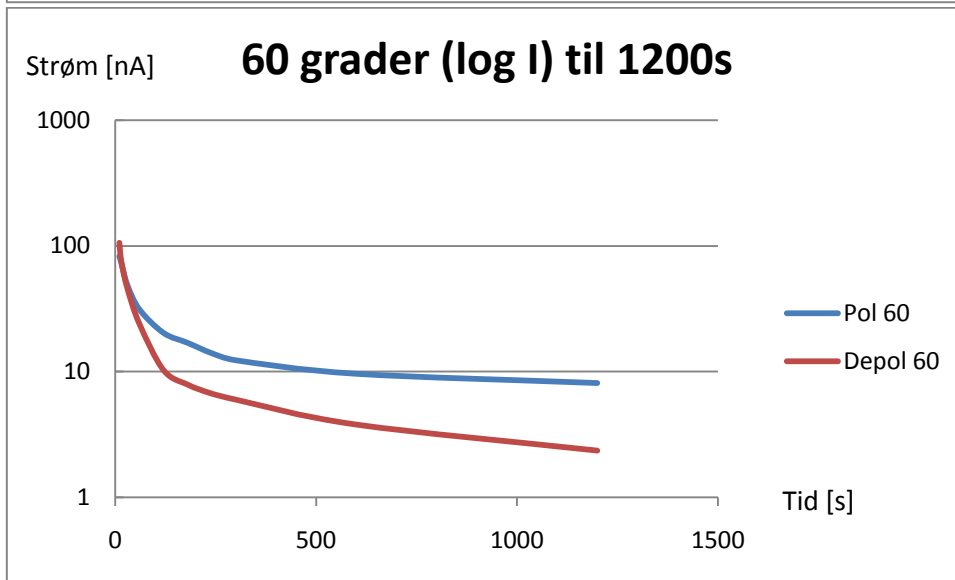
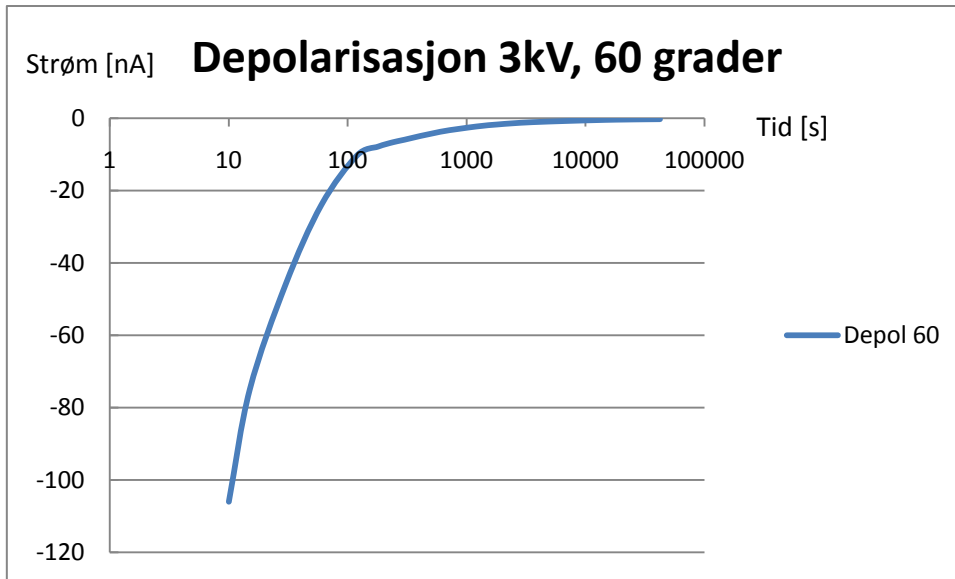
Spenning 3kv, Temperatur 50°C



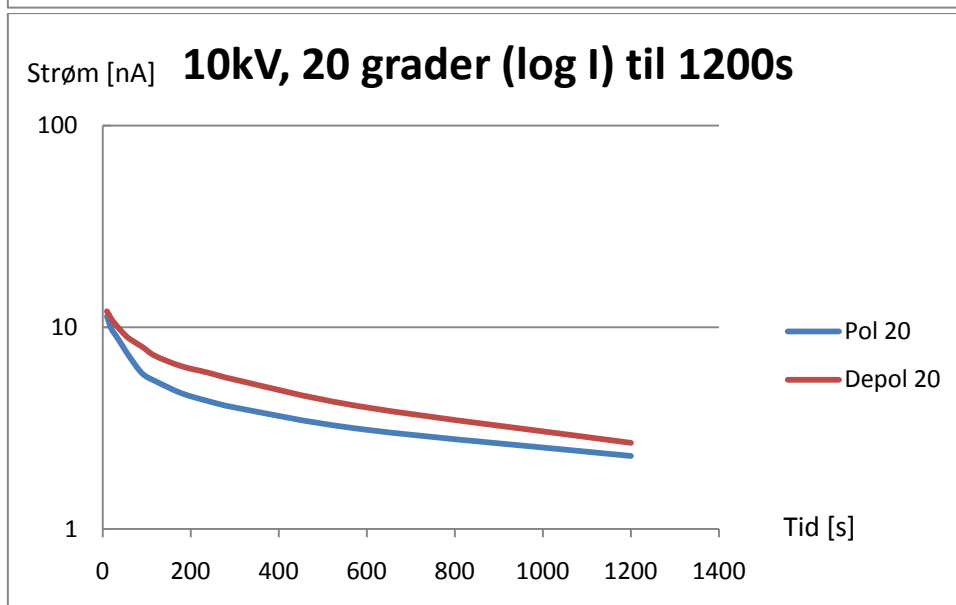
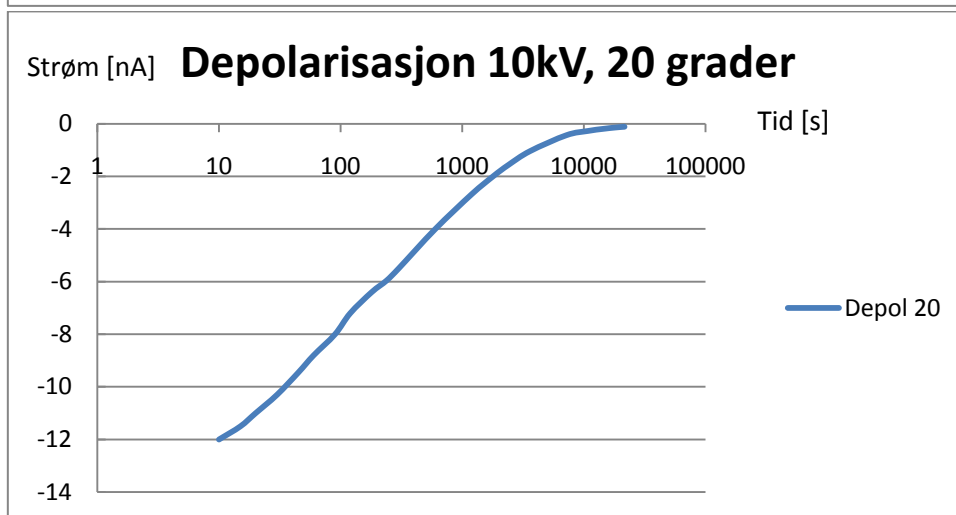
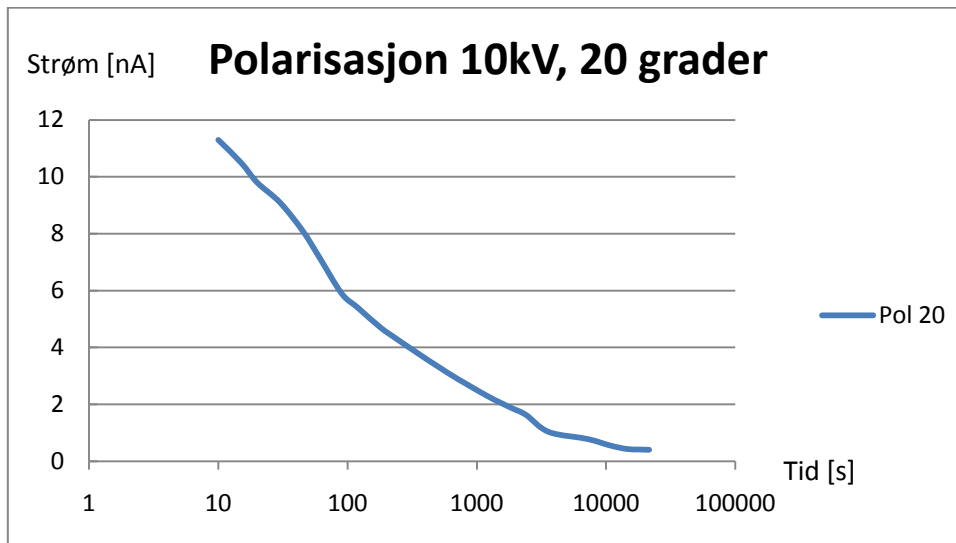


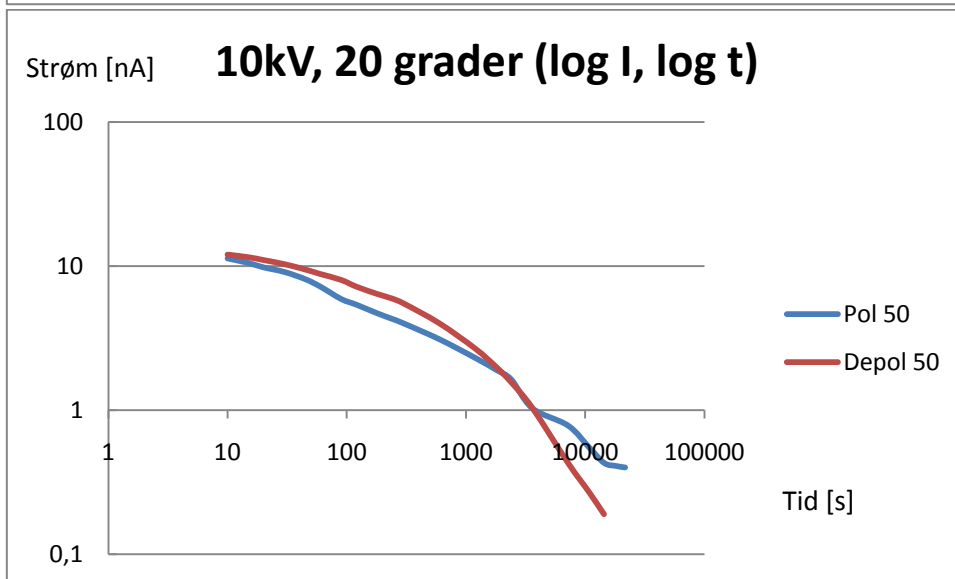
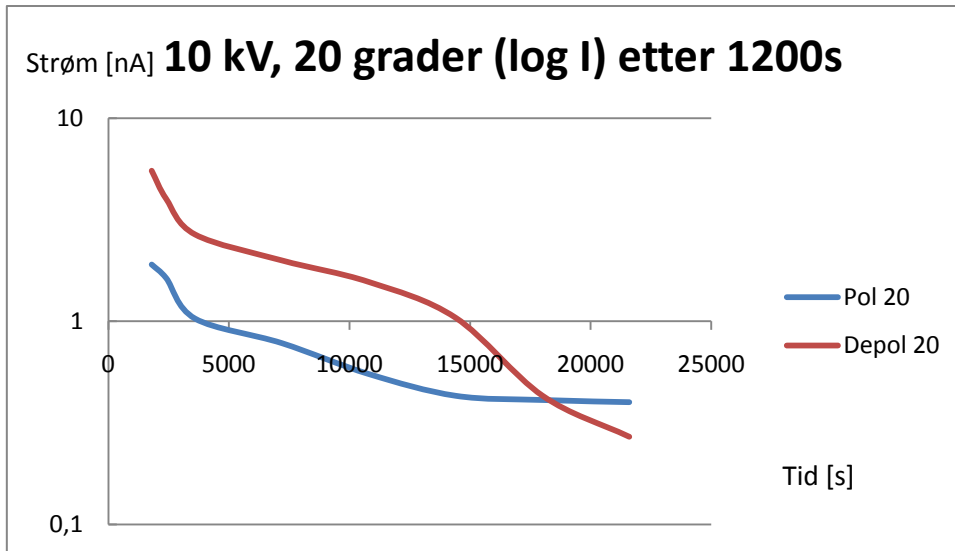
Spenning 3kv, Temperatur 60°C



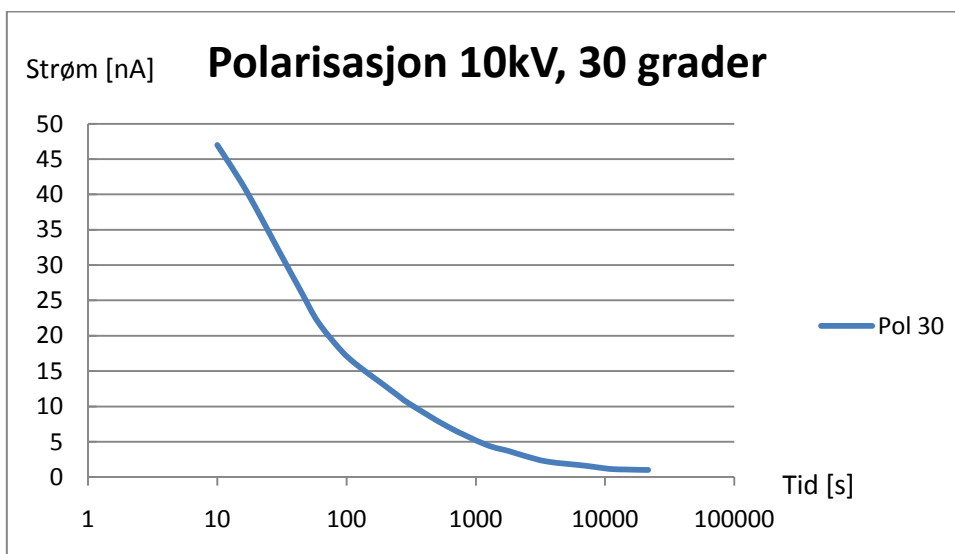


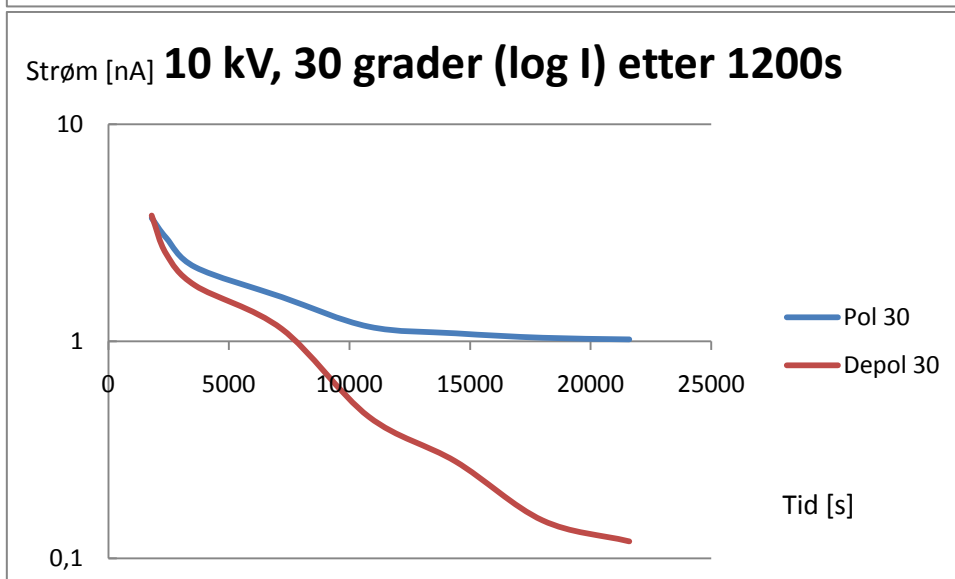
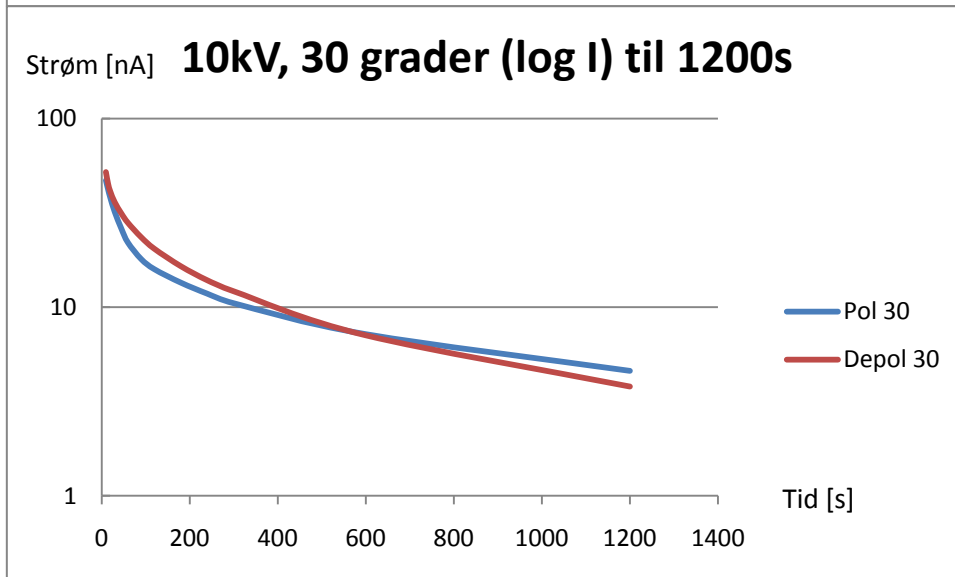
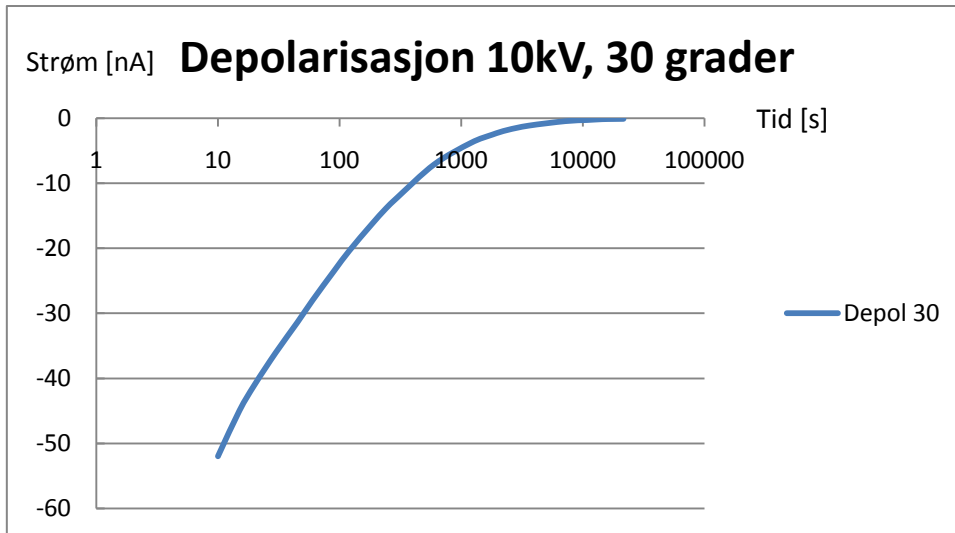
Spenning 10kv, Temperatur 20°C

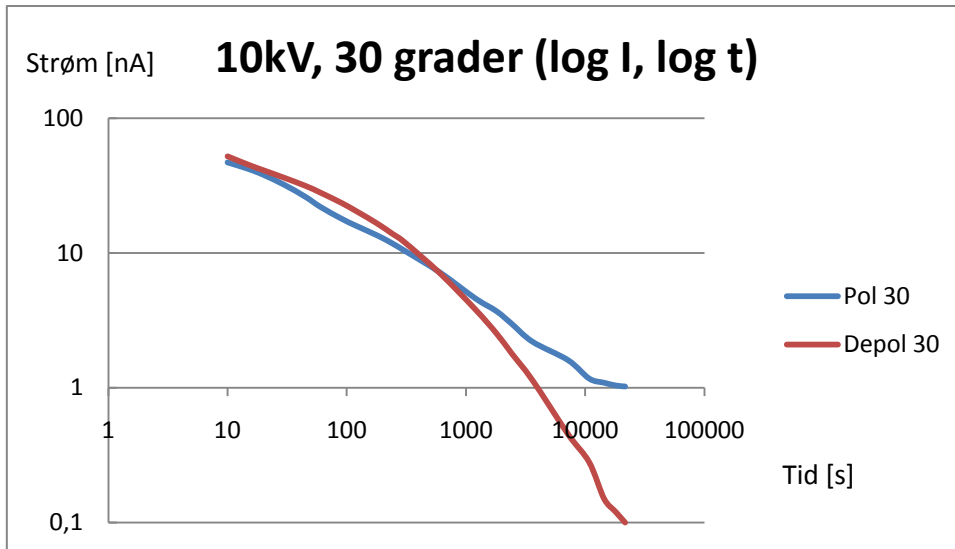




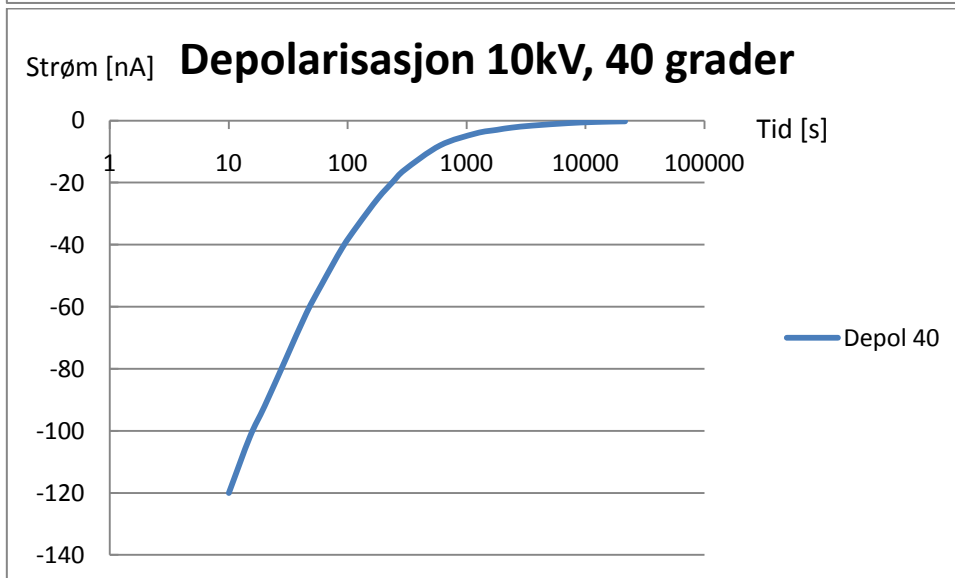
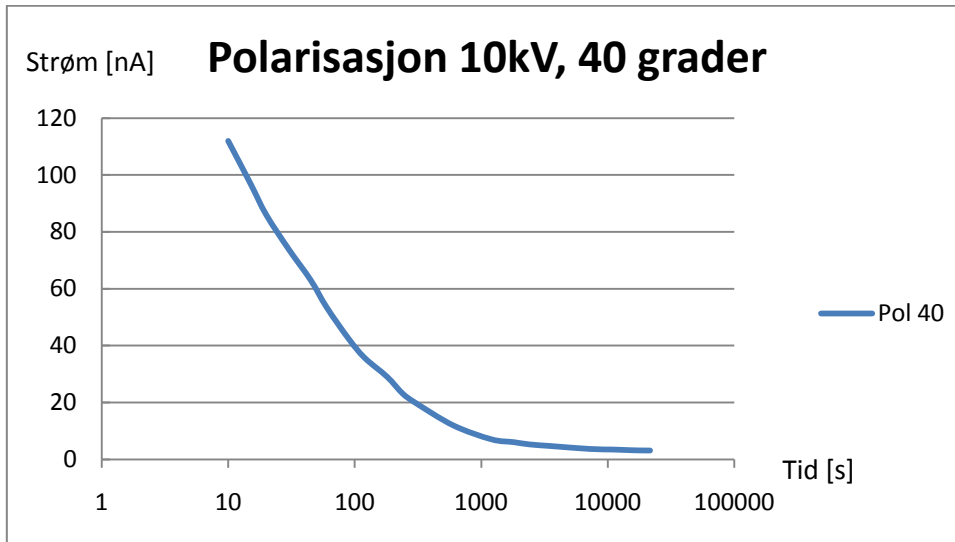
Spenning 10kv, Temperatur 30°C

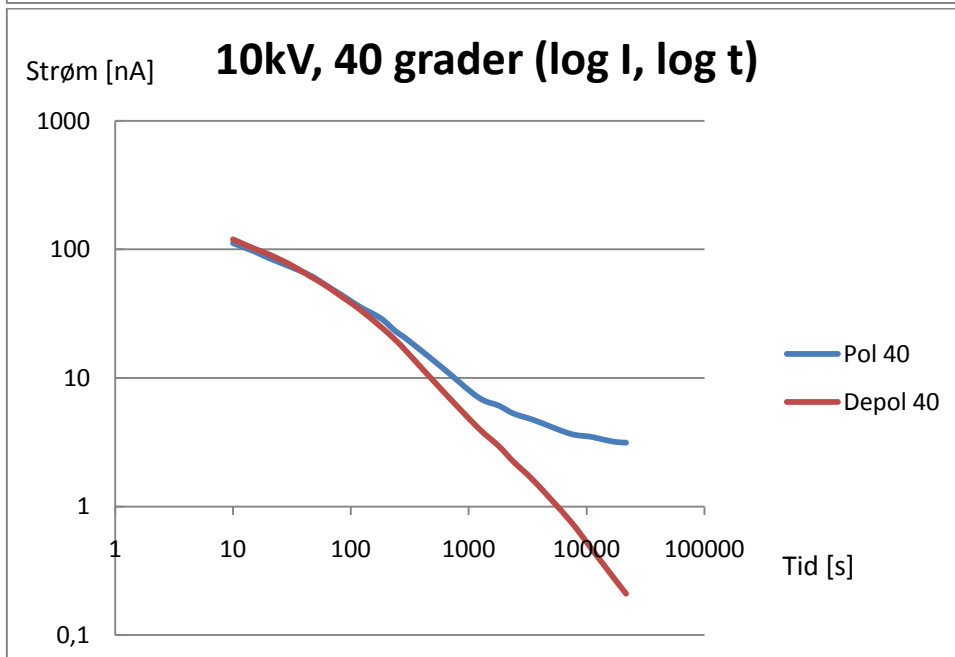
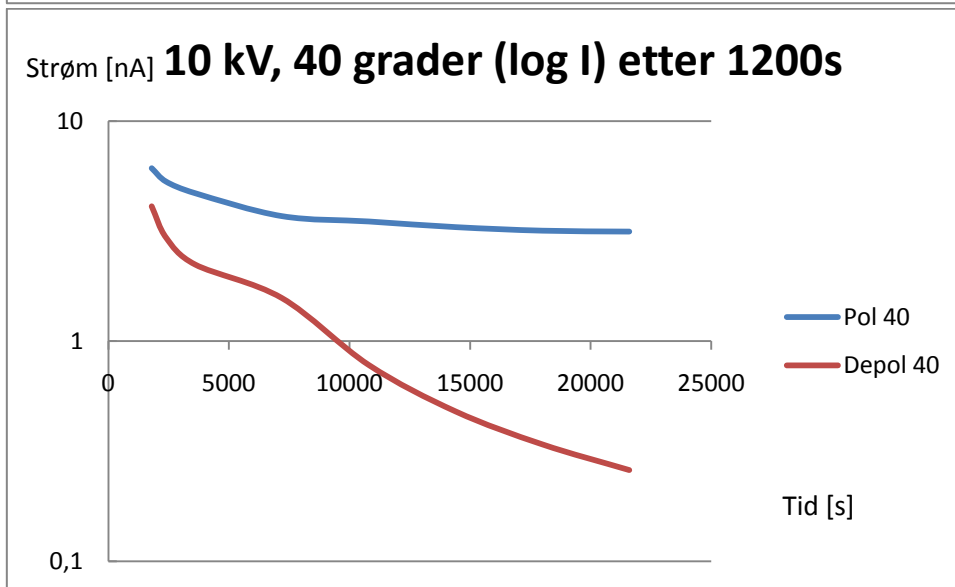
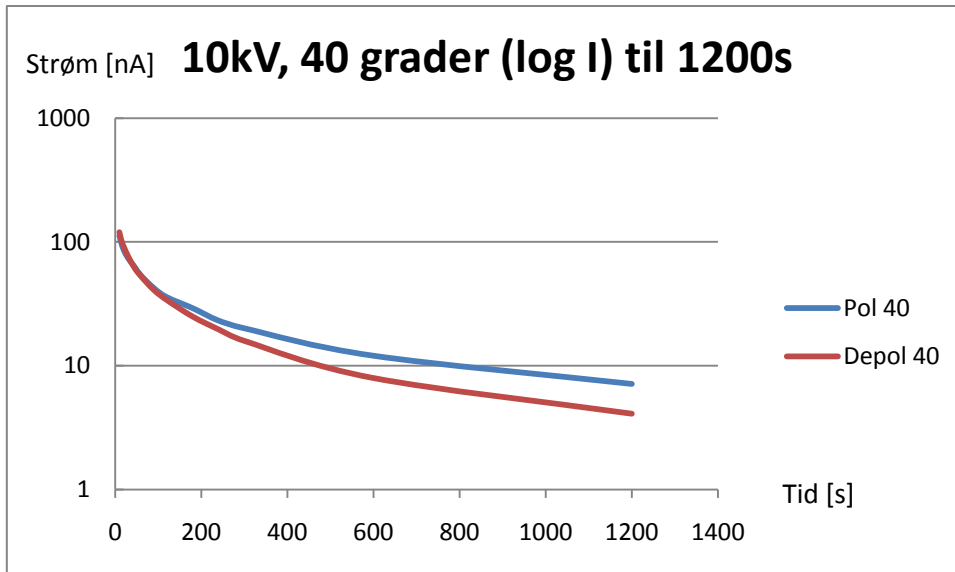




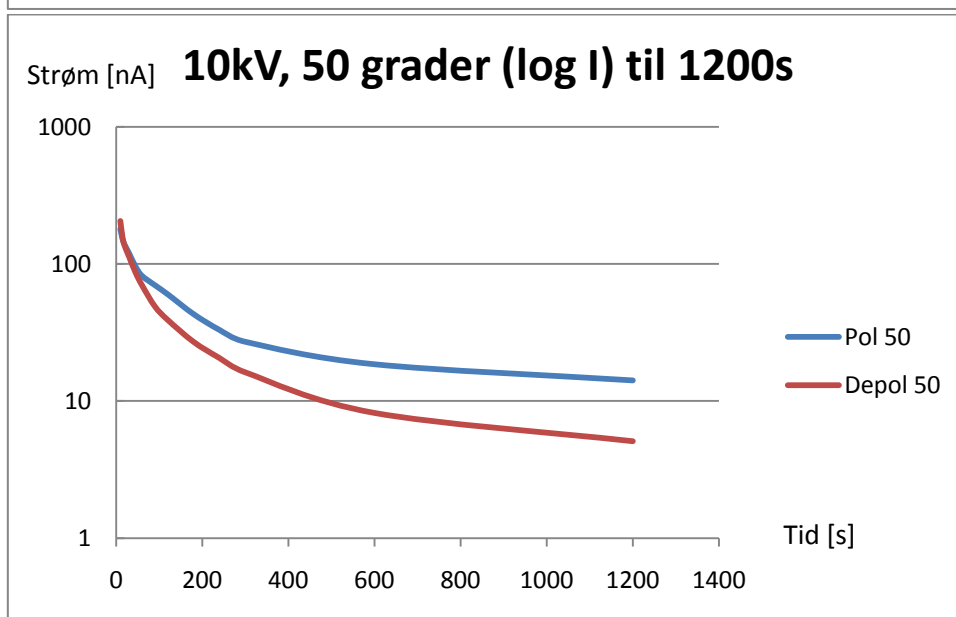
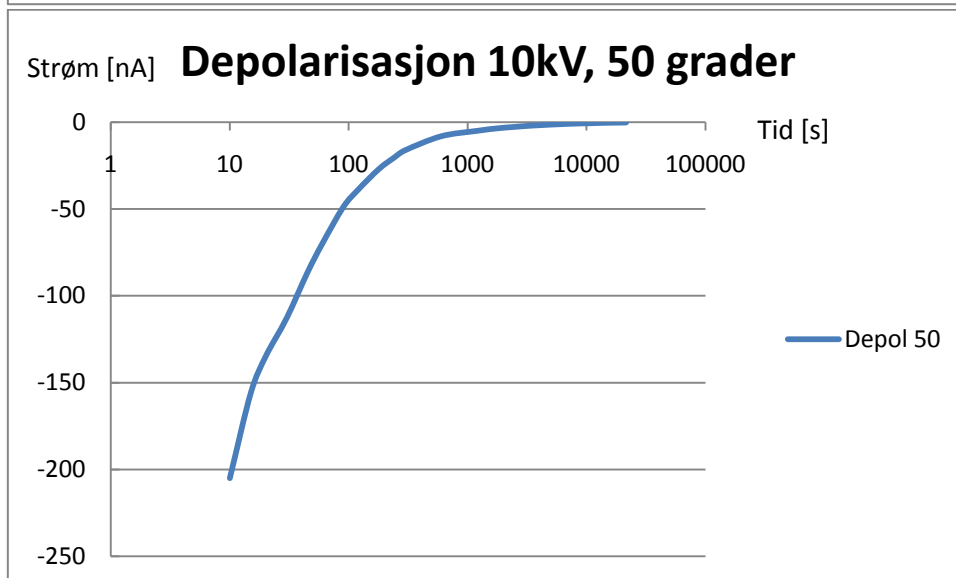
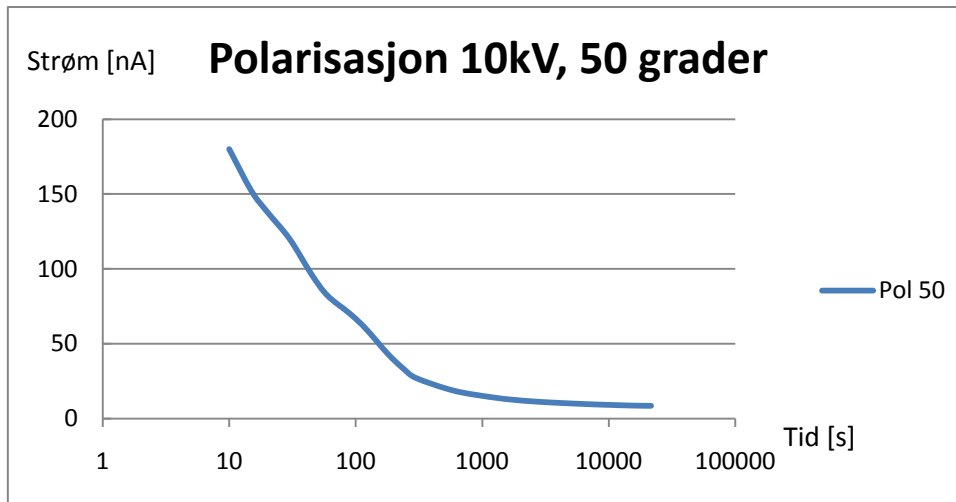


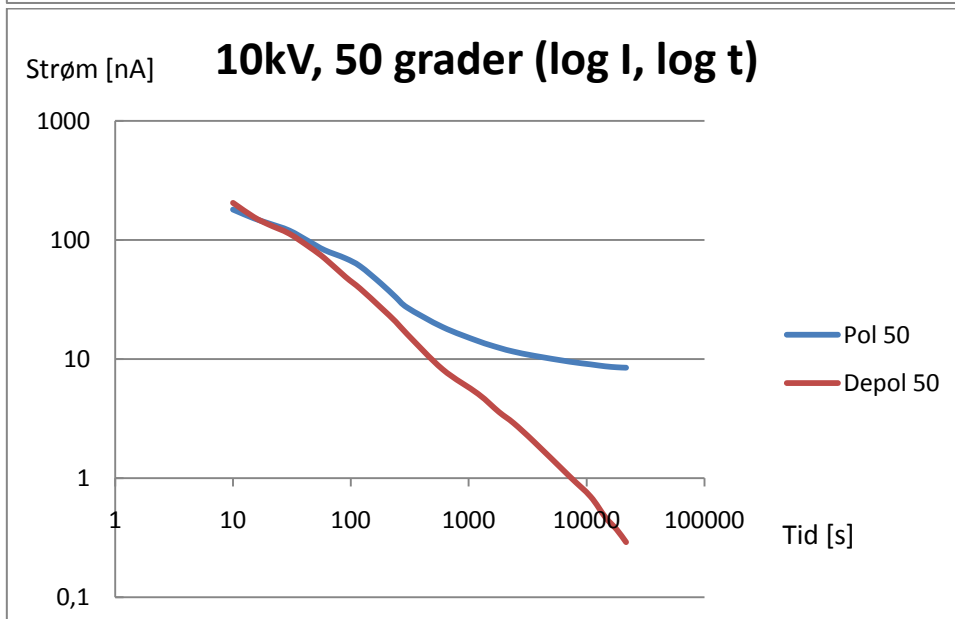
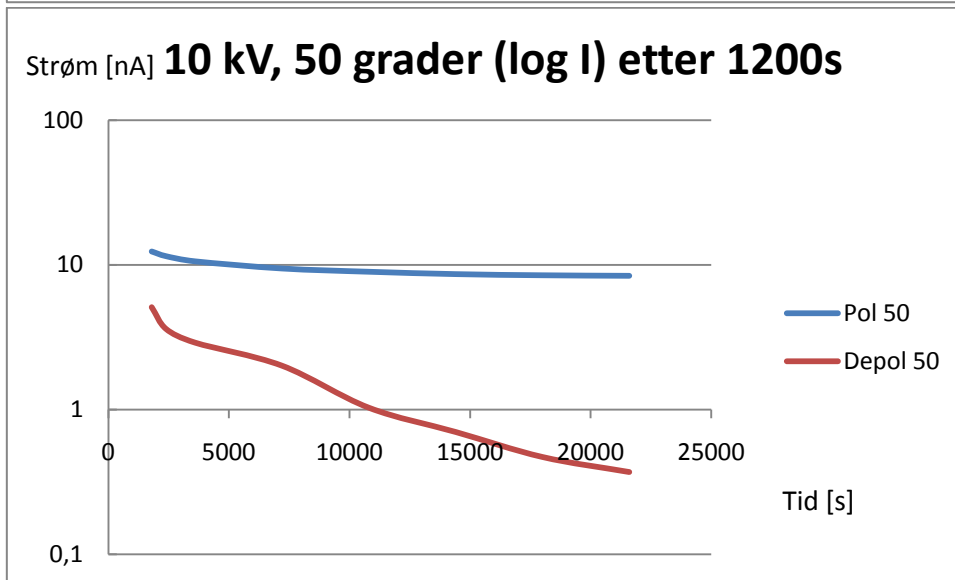
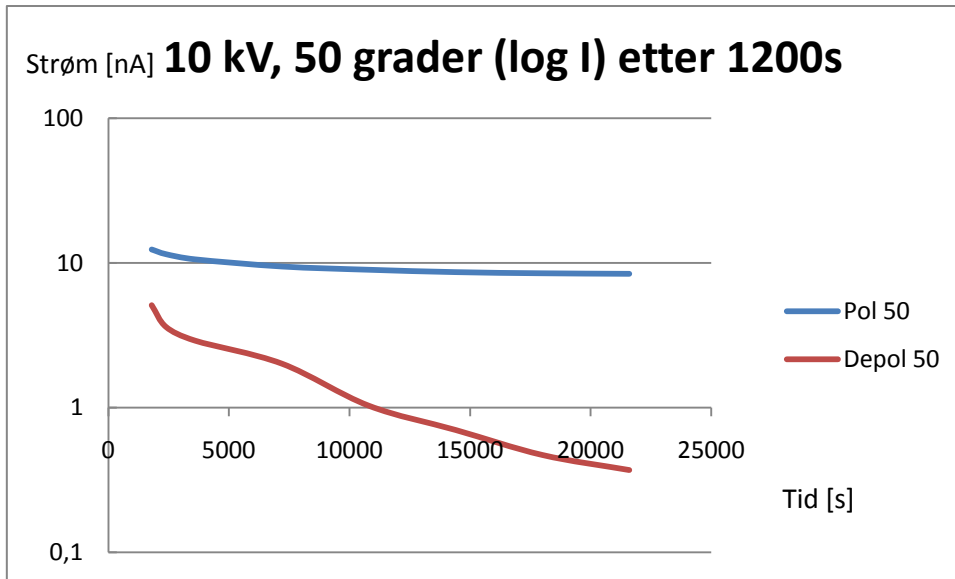
Spenning 10kv, Temperatur 40°C

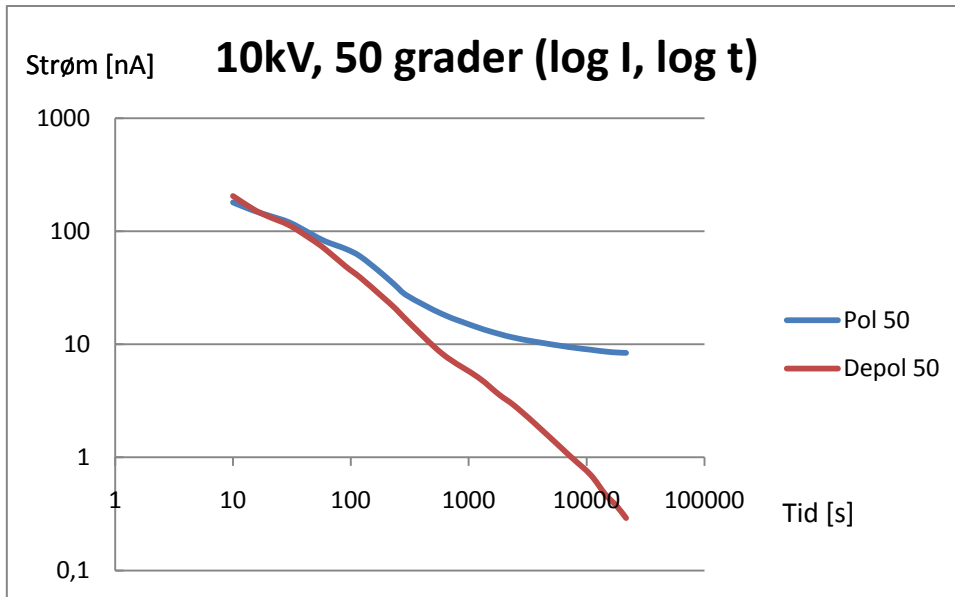




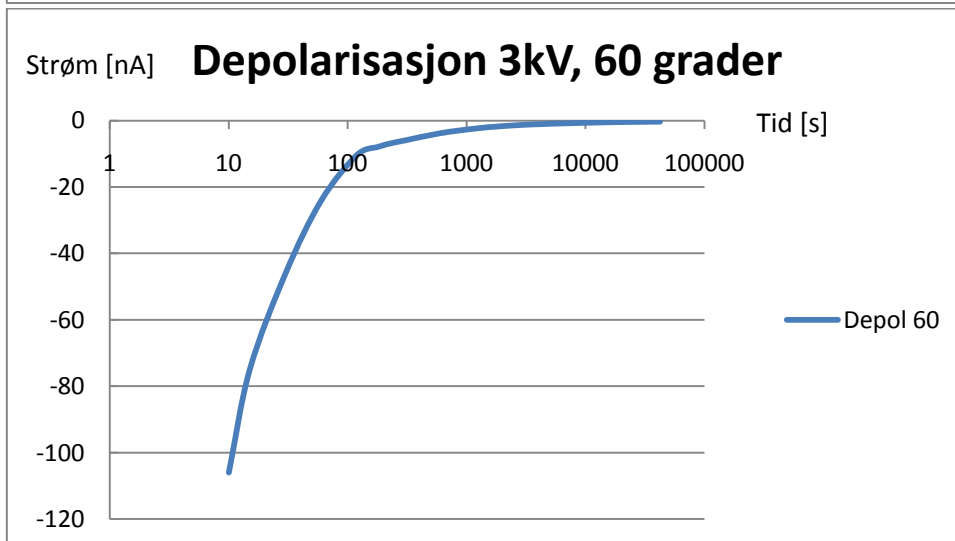
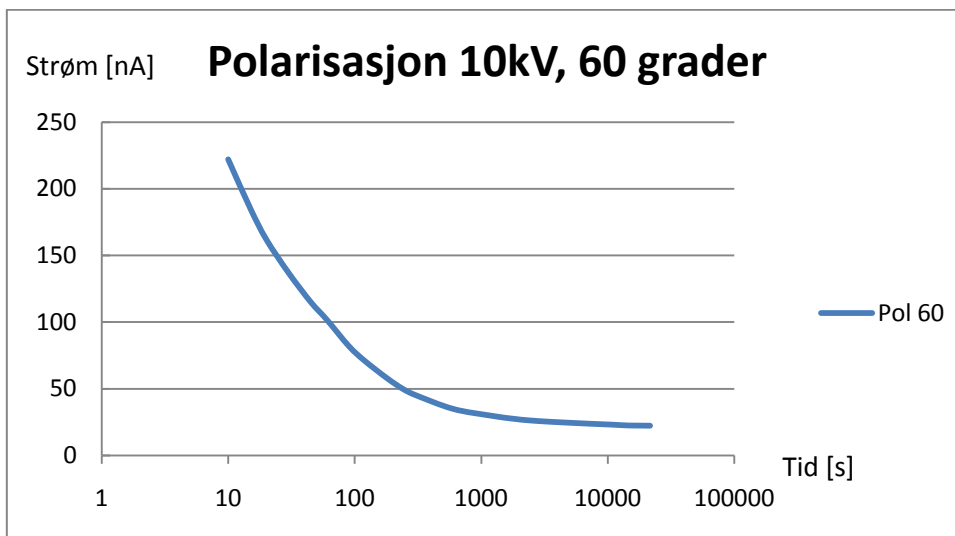
Spenning 10kv, Temperatur 50°C

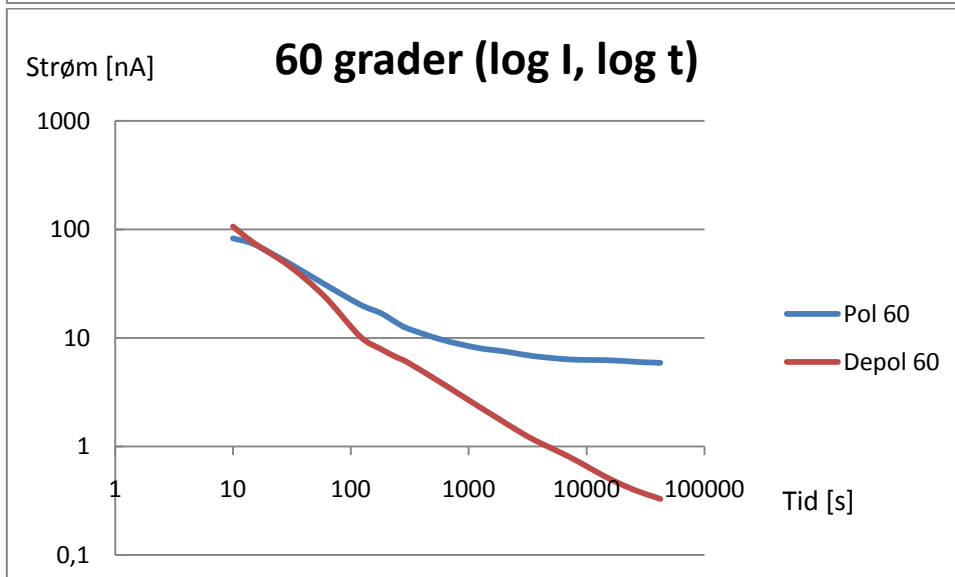
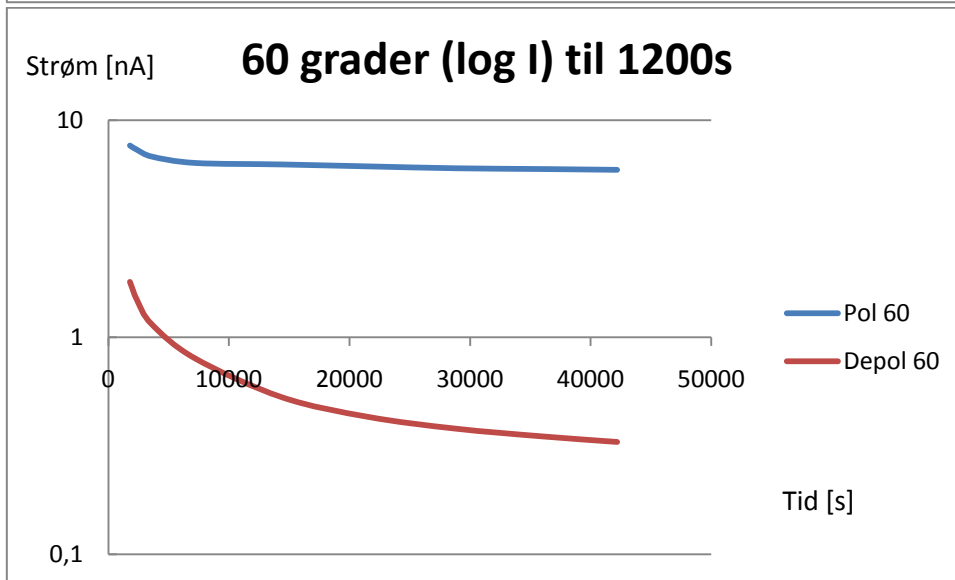
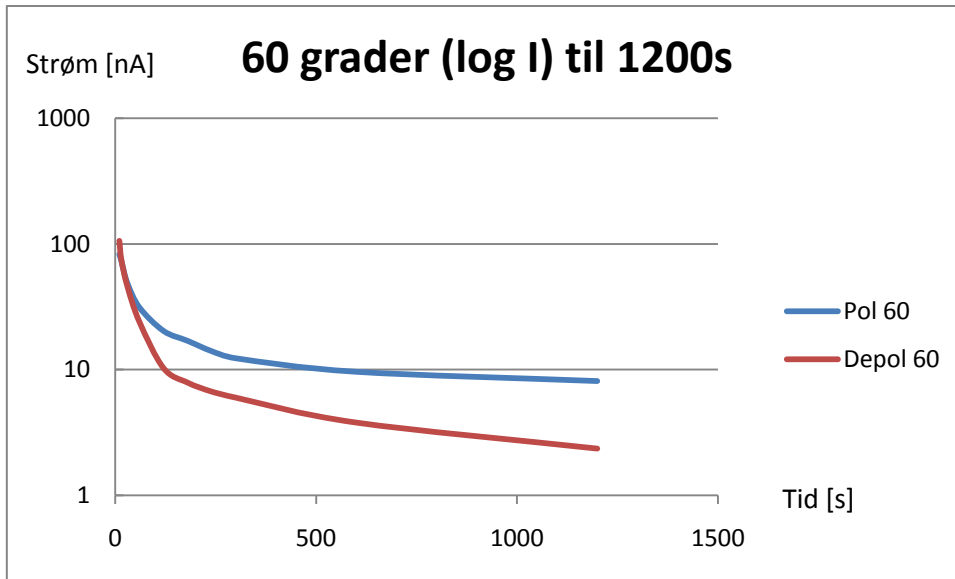




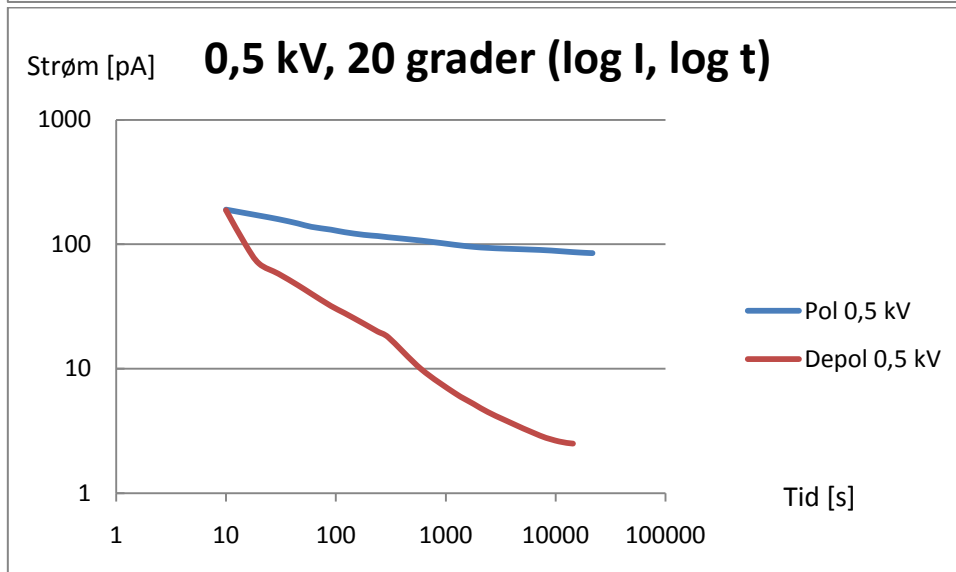
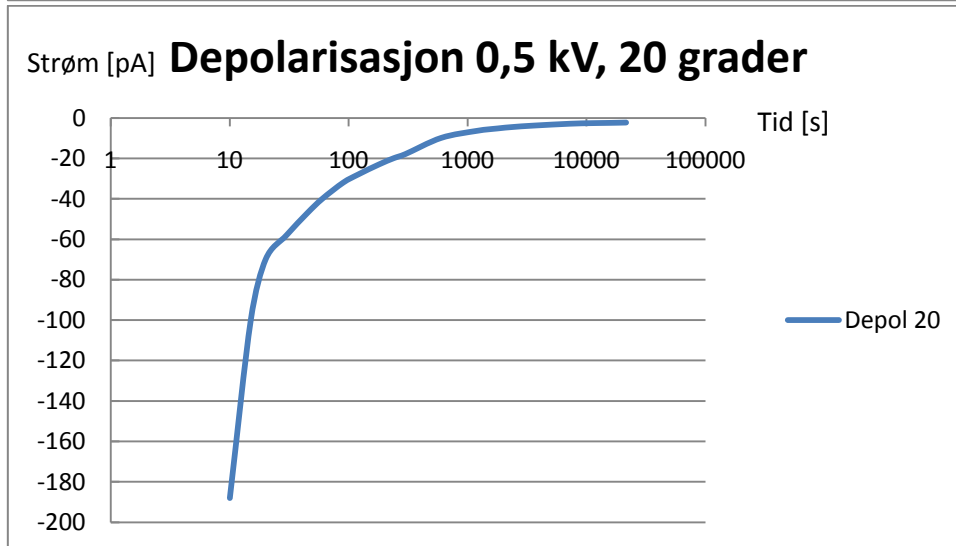
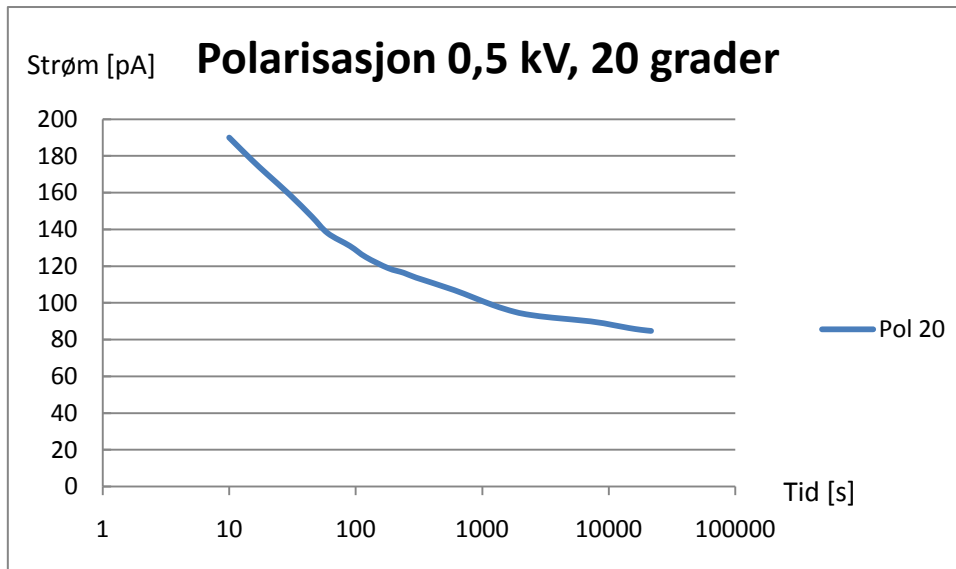


Spenning 10kv, Temperatur 60°C

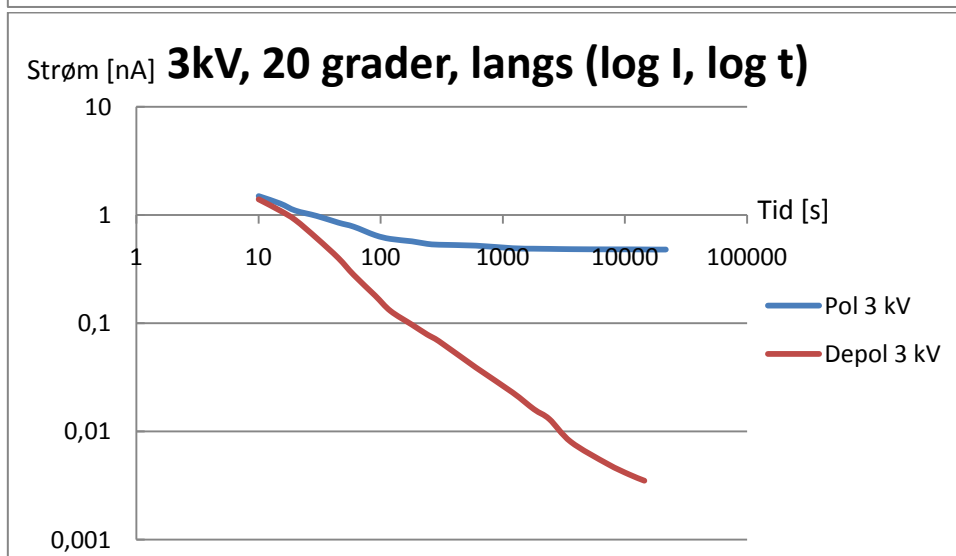
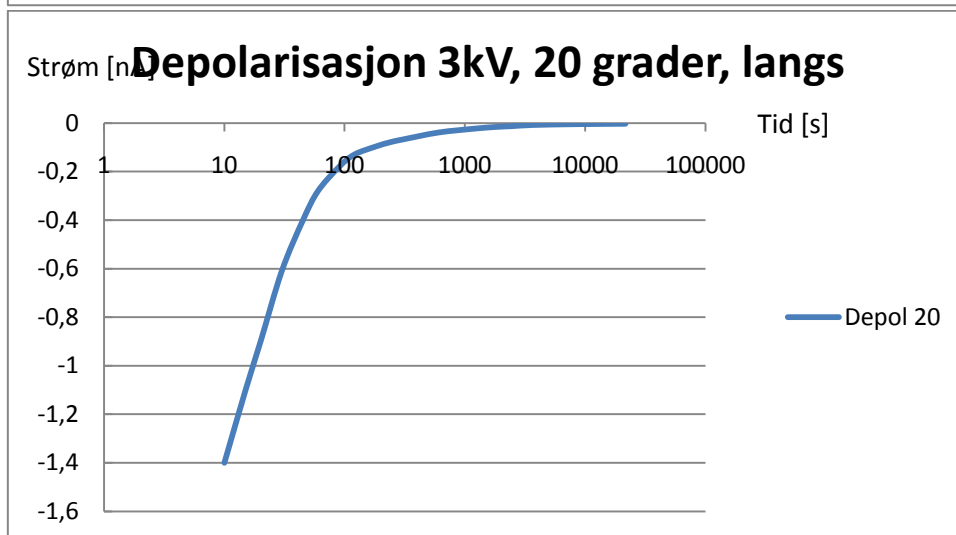
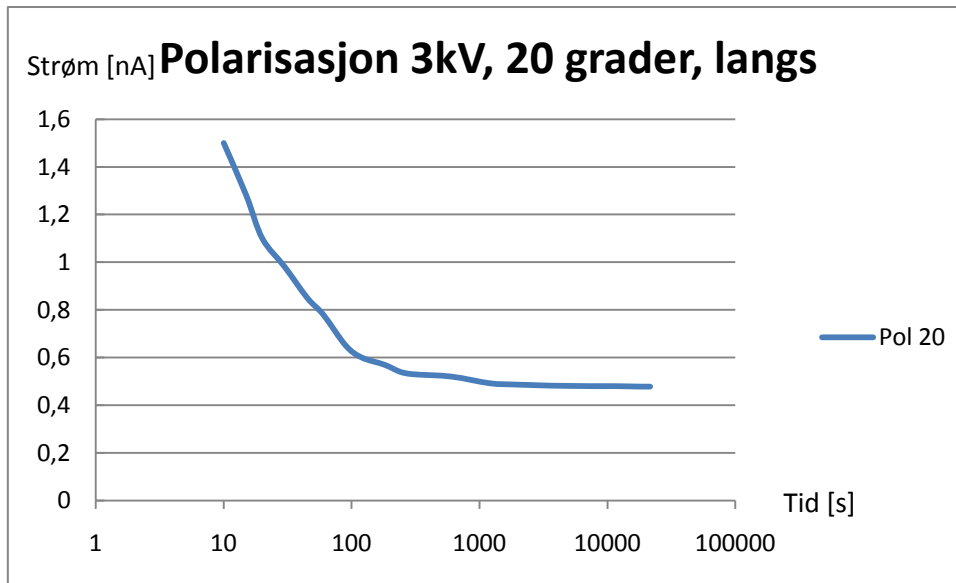




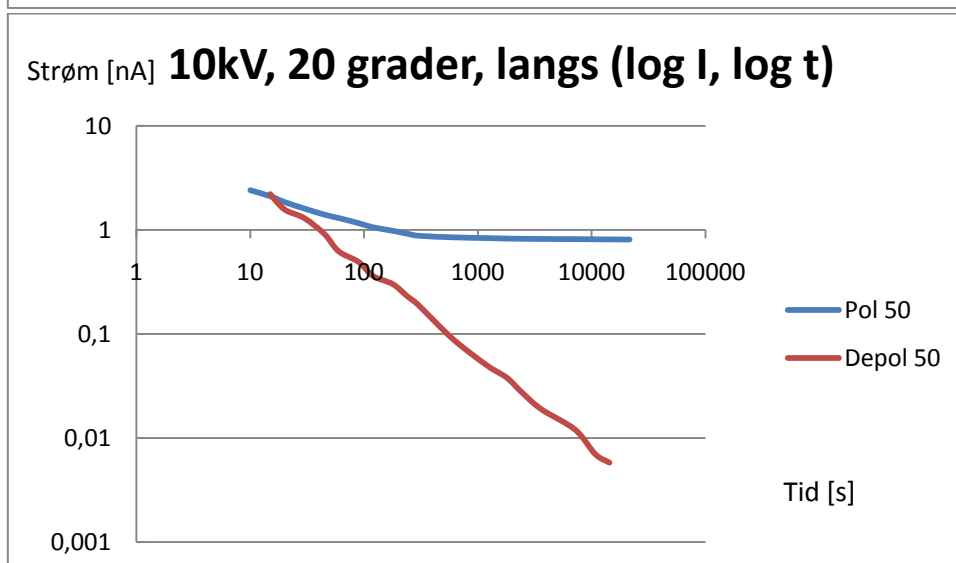
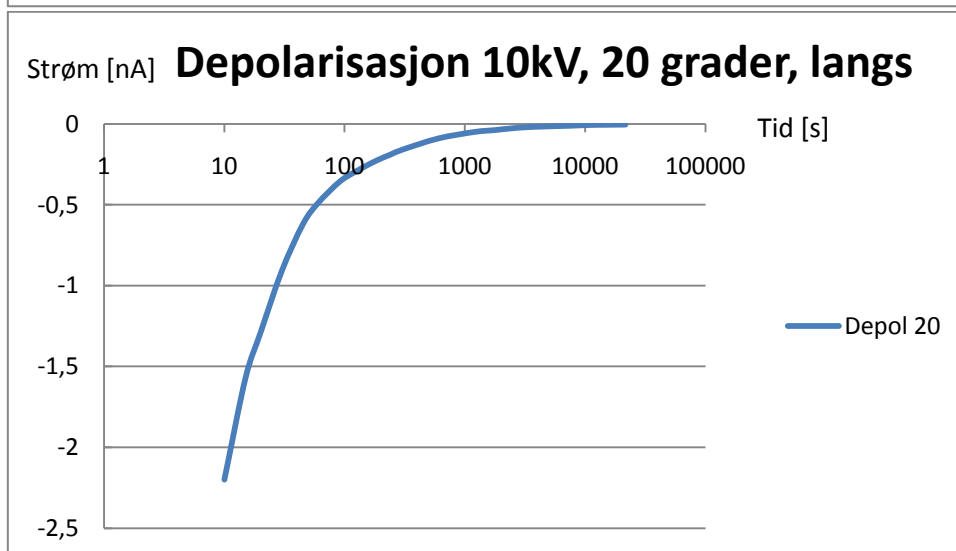
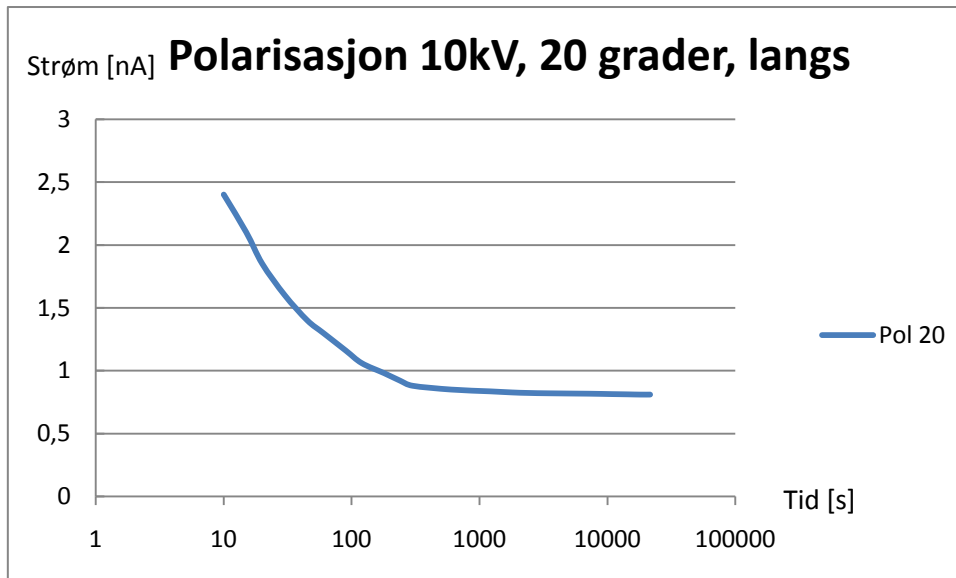
Spenning 0,5 kV, Temperatur 20°C (prøveobjekt 2)



Spenning 3 kV, Temperatur 20°C (prøveobjekt 2)



Spenning 10 kV, Temperatur 20°C (prøveobjekt 2)



Vedlegg B: Datablad for beskyttelsesdioder

Central™ Semiconductor Corp. 145 Adams Ave., Hauppauge, NY 11786 USA Phone (631) 435-1110 FAX (631) 435-1824 Manufacturers of World Class Discrete Semiconductors www.centrasemi.com	1N3595 SILICON LOW LEAKAGE DIODE JEDEC DO-35 CASE
---	--

DESCRIPTION

The CENTRAL SEMICONDUCTOR 1N3595 is an epitaxial planar silicon diode designed for low leakage, high conductance applications. Higher breakdown voltage devices are available on special order.

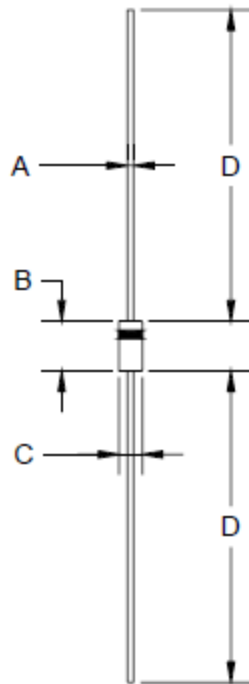
MAXIMUM RATINGS: (T_A=25°C)

	<u>SYMBOL</u>		<u>UNITS</u>
Peak Repetitive Reverse Voltage	V _{RRM}	150	V
Peak Working Reverse Voltage	V _{RWM}	125	V
Average Forward Current	I _O	150	mA
Forward Steady-State Current	I _F	225	mA
Recurrent Peak Forward Current	i _f	600	mA
Peak Forward Surge Current (1.0s pulse)	I _{FSM}	500	mA
Peak Forward Surge Current (1.0μs pulse)	I _{FSM}	4.0	A
Power Dissipation	P _D	500	mW
Operating and Storage Junction Temperature	T _J , T _{stg}	-65 to +200	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS: (T_A=25°C unless otherwise noted)

<u>SYMBOL</u>	<u>TEST CONDITIONS</u>	<u>MIN</u>	<u>MAX</u>	<u>UNITS</u>
I _R	V _R =125V		1.0	nA
I _R	V _R =125V, T _A =125°C		500	nA
I _R	V _R =125V, T _A =150°C		3.0	μA
I _R	V _R =30V, T _A =125°C		300	nA
BV _R	I _R =100μA	150		V
V _F	I _F =1.0mA	0.54	0.69	V
V _F	I _F =5.0mA	0.62	0.77	V
V _F	I _F =10mA	0.65	0.80	V
V _F	I _F =50mA	0.75	0.88	V
V _F	I _F =100mA	0.79	0.92	V
V _F	I _F =200mA	0.83	1.0	V
C _T	V _R =0, f=1.0MHz		8.0	pF
t _{rr}	V _R =3.5V, I _F =10mA, R _L =1.0kΩ		3.0	μs

JEDEC DO-35 CASE - MECHCANICAL OUTLINE



SYMBOL	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.018	0.022	0.46	0.56
B	0.120	0.200	3.05	5.08
C	0.060	0.090	1.52	2.29
D	1.000	-	25.40	-

DO-35 (REV: R0)

R1

Marking Code: C1N3595

Vedlegg C: Manuelt måleskjema for målingene tatt ved 3 kV

Tid [s]	Strøm μA	Kommentar
10		
15		
30		
60		
120		2 min
180		3 min
240		4 min
300		5 min
600		10 min
1200		20 min
2400		40 min
3600		1 h
7200		2 h

Vedlegg D: Datablad Fug spenningskilde

7. Technical Data

All here stated data are valid for voltage and current control in internal operation.

For changes of the technical data with the options analog and digital programming see corresponding sections.

AC - Input	230V ±10% 47 - 63 Hz or 400V ±10% 3phasig 47 - 63 Hz, depending on the type, see type label. Overvoltage category II according to IEC664. N-connection and PE (non fused earth) always necessary! At plug-type connections: performance according to ICE 309
EMC Standards	The units are designed to meet the emission requirements for household environment and the susceptibility requirements for industrial environments. See also 9. Certificate of Conformity Length of signal- and control lines ≤ 3m
Safety	The units are in accordance with EN 61010
Environment Conditions	Operating room : Only for indoor usage (see section 2.1.) Temperature : 0 °C to 40 °C Air humidity : Max. relative humidity 80% until 31 °C, linear decreasing until 50% relative humidity at 40 °C Atm press : Altitude max. 2000 m over sea level Contamination : 2, according to IEC664
Protection Class	IP20
Output Voltage / Current	See front panel of the power supply.
Output Polarity	Positive or negative, see indication on the unit, the motor driven polarity reversal switch is an option.
Output Isolation	The 0V terminal is connected internally to EARTH. This connection can be removed. In this case, the 0V potential is internally protected by a 350V spark arrestor. Refer to "2.2 Preparation for Installation"
Setting Range Voltage Current	With Potentiometer VOLTAGE appr. 0,1% to 100% from nominal value With Potentiometer CURRENT appr. 0,1% to 100% from nominal value
Reproducibility	$\pm 1 \times 10^{-3}$ from nominal value,
Setting Resolution	With potentiometer on the front panel 1×10^{-4} from nominal value
Residual Ripple	$< 1 \times 10^{-7}$ pp, typ. 5×10^{-8} pp from nominal value
Deviation	$< \pm 1 \times 10^{-6}$ from nominal value, for ±10% mains voltage variation $< 1 \times 10^{-8}$ from nominal value, for 0 to 100% load variation $< \pm 1 \times 10^{-7}$ from nominal value, over 8 hours $< \pm 1.5 \times 10^{-4} / K$ from nominal value at temperature variation
Regulating Time voltage control current control	< 1 ms for load variations from 10% to 100% or 100% to 10% < 10 ms for load variations causing an output voltage variation less than 10% of the nominal voltage.
Discharging Time Constant	at unloaded output max. 10 sec
Discharging Time	down to < 50 V max. 1 minute
Programming speed at nominal load	< 100 ms... 500 ms for changes of output voltage from 10% to 90% resp. 90% to 10%
Voltage and Current Display	DVM for voltage and current, range ± 20000 Digits
Status Display	LEDs for constant voltage, constant current, set value limitation active, setting of programming switch, Output ON, overtemperature, polarity
Mechanical size	Depending on type, changes reserved.

Vedlegg E: Montering av kabel fra kilde til bryter

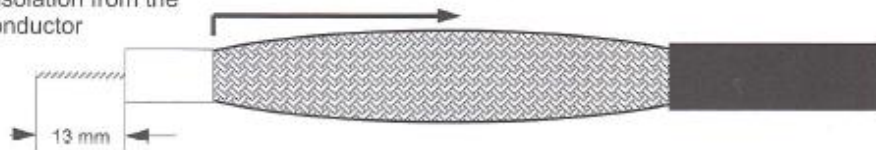


Mounting Instruction Plug F3430 + Cable RG11

- 1) Remove the cable sheath



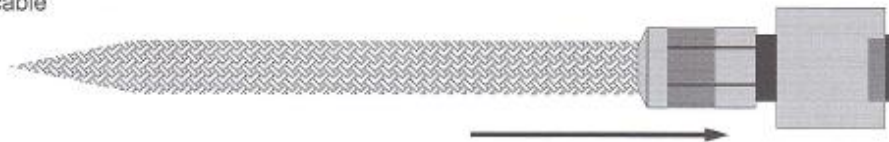
- 2) Push back the braided shield and strip the isolation from the center conductor



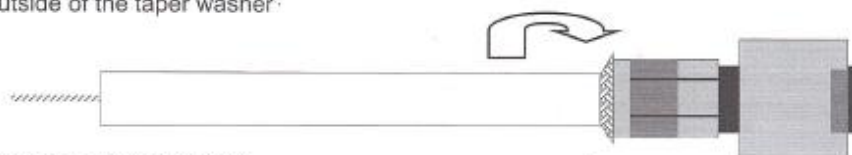
- 3) Push back the screen to the front and twist it together on the front end



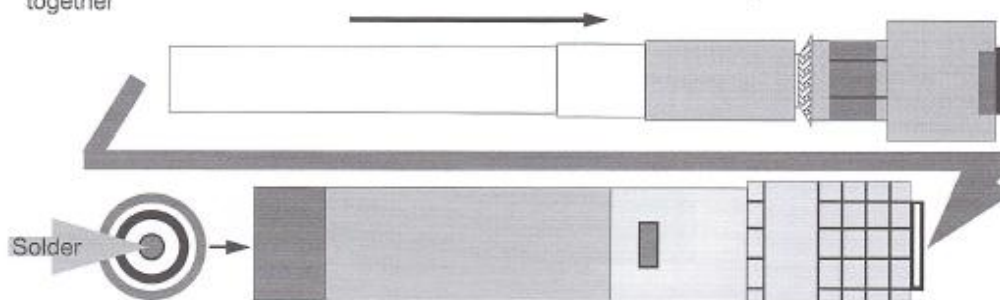
- 4) Put the rear screw and the collet on the cable



- 5) Push back the braided shield and cut it along the outside of the taper washer



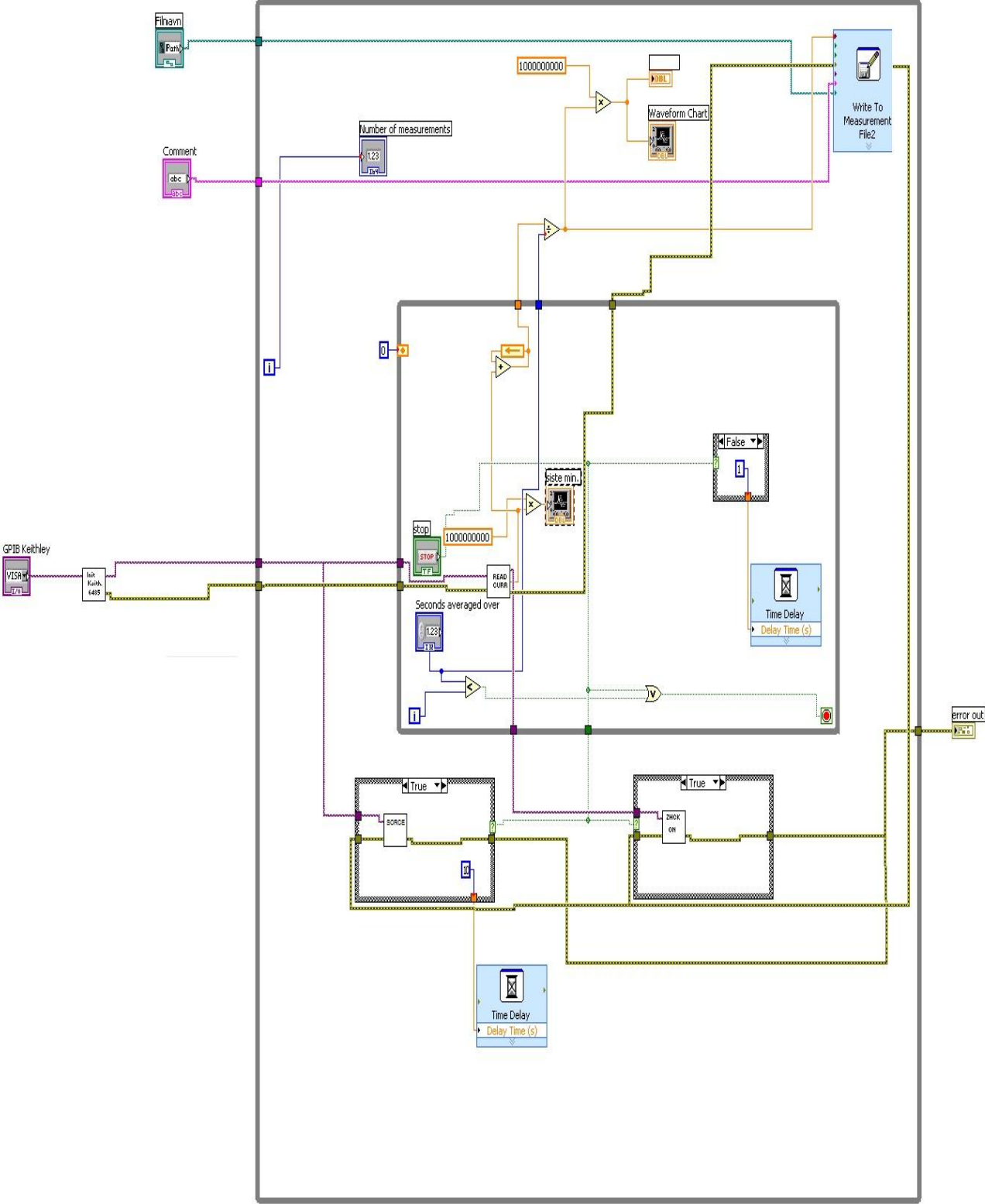
- 6) Put on the isolation sleeve and the connector case and screw them together



- 7) Solder the cable center conductor with the plug center contact

SC 01/2008

Vedlegg F: Flytdiagram for loggerprogram



Vedlegg G: Papirtyper i isolasjonen

H - Bånd



Sotpapir 19x0,125 mm



Sotpapir 27x0,125 mm



Papir 27x0,115 mm



Papir 19x0,065 mm



Vedlegg H: Bilder fra disseksjonen



Objekt som ble dissekert



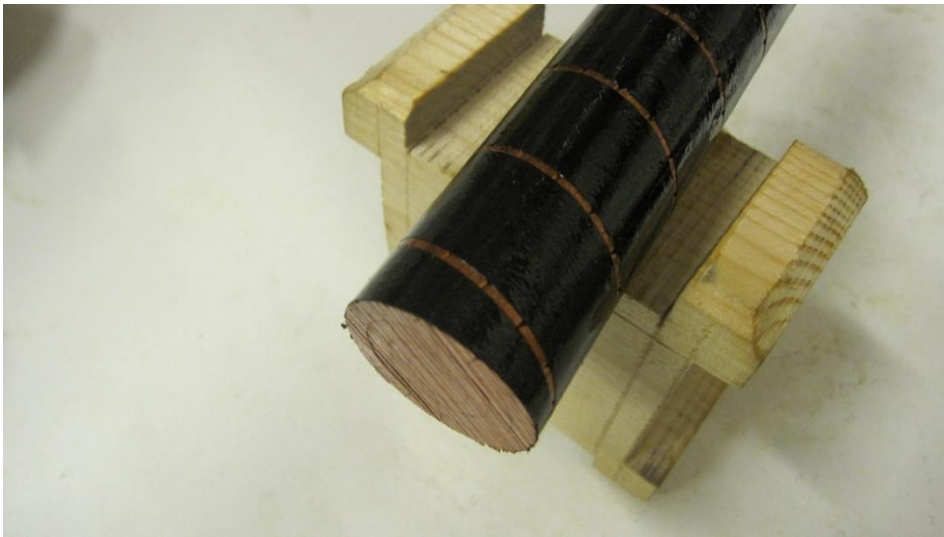
Fjerning av H-bånd



Siste lag av ytre halvleder



Ujevnheter i papirlagene



Leder med et lag sotpapier