

Polarisasjon og Elektrisk ledningsevne i HVDC masse- og PEX isolerte kabler som funksjon av spenning og temperatur.

Jonas Alstad

Master i energi og miljø

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Erling Ildstad, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Oppgavetekst

Selv om masseimpregnert papir har vært benyttet som isolasjon i slike kabler siden ca 1950 så er kunnskapen om kablenes maksimale belastningsevne svært mangelfull. Aktuelle spørsmål knyttet til dette er: Hva slags konsekvenser vil det få dersom dagens installerte kabler overbelastes? Hva vil dagens isolasjonskvalitet tåle av maksimal temperatur- og feltpåkjønning? Hvordan påvirkes den elektriske feltfordelingen i isolasjonen av temperatur- og spenningsvariasjoner? Hva er forskjellen på PEX og masse isolasjon som HVDC isolasjon?

Formålet med denne hovedoppgaven er å belyse noen av disse spørsmål, ved å i hovedsak prioritere eksperimentelle undersøkelser av polarisasjonsfenomen og elektrisk ledningsevne i korte prøveobjekt av 450 kV HVDC papir/masseisolert og 12 kV PEX kabel. Det skal legges spesiell vekt på å studere hvordan disse parameterne vil variere med temperatur og elektrisk feltpåkjønning. Målsettingen er at de oppnådde resultatene skal danne grunnlag for økt forståelse for kritiske designkriterier for HVDC kabelisolasjon.

Oppgavens deler:

1. Gi en kortfattet litteraturoversikt over hvilke faktorene som påvirker polarisasjonsstrøm og elektrisk ledningsevne i PEX og masseimpregnert HVDC kabelisolasjon.
2. Presenter teori for elektrisk feltfordeling i HVDC isolasjon som funksjon av temperatur og tid for spenningspåkjønning.
3. Etabler en egnet målekrets for eksperimentell undersøkelse av:
 - i) Elektrisk ledningsevne som funksjon av påtrykt spenning og temperatur.
 - ii) Transiente polarisasjonsfenomen i forbindelse med polaritetsvekslinger eller raske spenningsendringer.
4. Gjennomføre måling av polarisjons-, lednings- og depolarisjonsstrømmer opp til ca 35 kV DC spenning for både PEX og HVDC massekabel i temperaturområdet fra 20 °C til ca 80 °C.
5. Drøfte resultatene i lys av litteraturstudiet, teori og egne antagelser.

Det detaljerte prøveprogrammet fastlegges i samarbeid med veilederne.

Oppgaven gitt : 20. Januar 2012

Faglærer: Prof. Erling Ildstad
Veileder: Over.ing. Vladimir Klubicka

Forord

Denne oppgaven er avsluttende masteroppgave i sivilingeniørstudiet Energi & Miljø, med fordypningsområde Elektrisk Energiteknikk.

Formålet med denne oppgaven har vært å studere opp og utladningsfenomener knyttet til ulike typer HVDC kabel isolasjon.

Arbeidet ble utført ved Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet (NTNU), ved institutt for Elkraftteknikk våren 2012.

Jeg vil gjerne benytte anledningen til å takke min faglærer og veileder, professor Erling Ildstad for tett og god oppfølging og veiledning under arbeidet med masteroppgaven.

Jeg vil også takke min veileder, overingeniør Vladimir Klubicka, for hans hjelp med å lage logger- og styringsprogram i LabVIEW.

Til slutt vil jeg takke ingeniør Bård Almås, for hans hjelp med å lage og skaffe nødvendige kretskomponenter.

Sammendrag

Formålet med masteroppgaven har vært å studere opp og utladninger knyttet til ulike HVDC kabel isolasjonsmaterialer. Eksperimentelle forsøk ble gjennomført for å beskrive disse fenomenene for en 450 kV HVDC massekabel, og en 12 kV PEX kabel.

Litteraturstudier tilsier at den dominerende polarisasjonsmekanismen for en massekabel er grenseflatepolarisasjon. Ledningsevnen til denne kabeltypen kan estimeres ved å bruke:

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

Polarisasjonsstrømmen kan beskrives med:

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

Denne formelen kan brukes til å estimere relaksjonstiden, τ , til polarisasjonsmekanismene i massekabelen.

Litteraturstudier for PEX kabelen viser at dipol polarisasjon, pga grenseflatepolarisasjon mellom to flater, er den dominerende polarisasjonsmekanismen. Det vil i denne rapporten bli brukt samme forenklinger for begge kablene for å finne ledningsevne og relaksjonstid.

For å kunne gjennomføre de nødvendige forsøkene, ble det laget en datastyrt målekrets. Denne bestod i all enkelhet av en spenningskilde, en bryter, et måleinstrument og testobjektet. Kretsen ble styrt, og resultatene logget, av et dataprogram laget i LabVIEW.

Resultatene fra forsøkene viste at polarisasjonsstrømmen i massekabelen kunne uttrykkes som:

$$i(t) = K_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + K_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \frac{U}{R_0}$$

Hvor τ_2 er relaksjonstiden til oljen (10,388-56,163 s), mens τ_1 (53,345-1114,1 s) er relaksjonstiden til papiret. Det siste leddet representerer DC-strømmen i isolasjonen.

Polarisasjonsstrømmen til PEX:

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

Hvor τ er relaksjonstiden i PEX (59,406-3,103 s).

Ledningsevnen og relaksjonstiden ble estimert som funksjon av elektrisk felt og temperatur, og ut fra disse resultatene kan man trekke følgende konklusjoner:

- Ledningsevnen er størst i massekabelen ($8 \cdot 10^{-16} - 6,2 \cdot 10^{-14} \Omega^{-1}m^{-1}$, mot $7,2 \cdot 10^{-18} - 3,2 \cdot 10^{-16} \Omega^{-1}m^{-1}$ for PEX)
- Ledningsevnen er temperaturavhengig for begge kablene.
- Ledningsevnen er kun felt avhengig ved de høyeste temperaturene, for PEX kabelen.
- Relaksjonstiden reduseres med økende spenning og temperatur, for massekabelen.
- Relaksjonstiden PEX lavere enn for massekabel.

Innholdsfortegnelse

1. Innledning	1
2. Teori.....	2
2.1 Kablenes oppbygning.....	2
2.1.1 450 kV Papir/masseisolert kabel	2
2.1.2 12 kV PEX kabel	5
2.2 Polarisasjon.....	6
2.2.1 Polarisasjonsmekanismer	7
2.2.2 Tidsvarierende polarisasjon.....	8
2.3 Elektrisk felt i kabelen.....	12
2.3.1 Kabelens operasjonsforhold	12
2.3.2 Elektriske felt i HVDC massekabler.....	15
2.4 Konduktivitet	20
2.4.1 Ionisk ledningsevne	21
3. Instrumentering og målemetode.....	28
3.1 Prøveobjektet	28
3.1.1 450 kV Papir/masseisolert kabel	28
3.1.2 12 kV PEX kabel.....	31
3.2- Målekrets.....	33
3.2.1 Vern 1.....	34
3.2.2 Vern 2.....	35
3.2.3 Vern 3.....	36
3.3 Logger- og styringssystem.....	38
3.4 Måleprosedyre	42
4- Resultater	45
4.1 Måleresultater	45
4.1.1 Massekabel.....	45
4.1.2 PEX kabel.....	52
4.2 Konduktivitet	59
4.2.1 Massekabel.....	59
4.2.2 PEX kabel.....	63
4.3 Tidskonstanter.....	67
4.3.1 Massekabel.....	67

4.3.2 PEX kabel.....	70
5 Diskusjon	72
5.1 Målemetodikk	72
5.2 Polarisasjon og konduktivitet.....	73
5.3 Feilkilder.....	75
5.4 Videre arbeid.....	76
6 Konklusjon	77
7 Litteraturliste	78
8 Vedlegg	80

1. Innledning

Dagens energipolitiske situasjon med stort fokus på miljøet, har ført til at flere atomkraftverk og kullkraftverk legges ned på kontinentet. EU har blant annet satt seg som mål at unionen skal oppnå 20 prosent andel fornybar energi av dens totale energiproduksjonen[1]. Dette vil føre til en merkbar økning i andelen ikke-regulerbar kraft, samtidig som andelen regulerbar kraft reduseres. EU landene vil med dette bli mer og mer avhengig av å få levert energi i de periodene de har behov for det, i tillegg til lagring av eventuell overskuddsenergi.

Per dags dato er den mest miljøvennlige løsningen på denne utfordringen, å utnytte land som Sverige og Norges vannkraftressurser. Da vannkraftverkene kan levere strøm ved behov, samt bruke overskuddsenergien til å pumpe vannet opp til reservoaret igjen. For at landene på kontinentet som ikke har slike muligheter, skal kunne koble seg til disse lands kraftnett, vil man være avhengig av mange lange undersjøiske kabelforbindelser. Noen slike finnes allerede i dag mellom blant annet Norge og Nederland, men dette antallet vil i framtiden bare øke. Ny fornybar kraft fra Offshore vindfarmer, i blant annet Nordsjøen, vil også øke behovet for sjøkabelforbindelser til land. Disse kabelforbindelsene er per i dag for det meste HVDC kabler av typen oljeimpregnerte massekabler. Siden det er stort fokus på miljøpåvirkningen slike kabelforbindelser har, ser man på muligheten til å benytte seg av andre kabelisolasjonstyper.

PEX, tverrbundet polyetylen, er et isolasjonsmateriale som både er billigere å produsere og mer miljøvennlig enn olje/papir løsningen som brukes i dagens sjøkabler. Denne kabeltypen har så langt vært begrenset av problemer med å forutse og kontrollere romladninger i isolasjonen, men kan produseres opp til et spenningsnivå på 500 kV.

Med et økende antall kabelforbindelser blir bare kunnskapen om isolasjonsmaterialet som brukes viktigere og viktigere. Selv om oljeimpregnerte massekabler har vært benyttet som isolasjon i siden ca 1950, så er kunnskapen om kablenes maksimale belastningsevne svært mangelfull. Siden disse kablene skal brukes til å eksportere/importere kraft til og fra kontinentet ved behov, er kablene ofte utsatt for store lastvariasjoner. Disse lastvariasjonene kan med tiden skade kablene.

Formålet med denne masteroppgaven er å eksperimentelt undersøke målinger av polarisasjons fenomen og elektrisk ledningsevne på tvers av kabelisolasjonen, med varierende spenning og temperatur. Prøveobjektene som ble brukt var en 450 kV papir/masseisolert kabel, og en 12 kV PEX kabel. For å kunne gjennomføre disse målingene måtte det utvikles en egnet prøvemethodikk. Dette bestod i all hovedsak i å få laget et dataloggingsprogram i LabVIEW, med både styring og logger egenskaper. De oppnådde resultatene vil brukes til å forklare hva som påvirker polarisasjonen og ledningsevnen i kabelisolasjonen. Dette vil igjen danne grunnlaget for økt forståelse for kritiske faktorer, og etablering av nye design- og dimensjoneringskriterier for HVDC kabler.

2. Teori

2.1 Kablenes oppbygning

2.1.1 450 kV Papir/masseisolert kabel

Den papir/masseisolerte kabelen brukt i denne masteroppgaven var en del av NorNed kabel linken, mellom Norge og Nederland. Denne kabellinken strekker seg hele 580 km noe som gjør den til den lengste HVDC kabellinken i verden, og har en kapasitet på 700 MW [2]. Deler av denne kabellinken måtte byttes ut som følge av et gjennomslag på den nederlandske siden. Det er en del av denne utbyttede kabeldelen som brukes i denne masteroppgaven. Kabelen er en bipolar massekabel på 450 kV. Isolasjonen i kabelen er masseimpregnert papir, et bilde av hvordan en del av NorNed kabelen ser ut kan ses i figur 2.1.



Figur 2.1, NorNed kabelen avkuttet [4]

Som figur 2.1 viser er en masseimpregnert kabel bygd opp av flere lag av forskjellig materialer, med ulike funksjoner. Disse er med på å bestemme hvilke egenskaper kabelen skal ha, disse delene er nevnt i tabell 2.1, fra ytterst til innerst.

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

Tabell 2.1, Oppbygning av kabelen [3]

Lederen er den første delen av kabelen som produseres. Kabellederen lages enten i aluminium eller kobber. Kobber har den beste ledningsevnen, og den største mekaniske styrken [4]. Kobber motstår også korrosjon bedre enn aluminium, og dette fører til at kobber som regel brukes i sjøkabler.

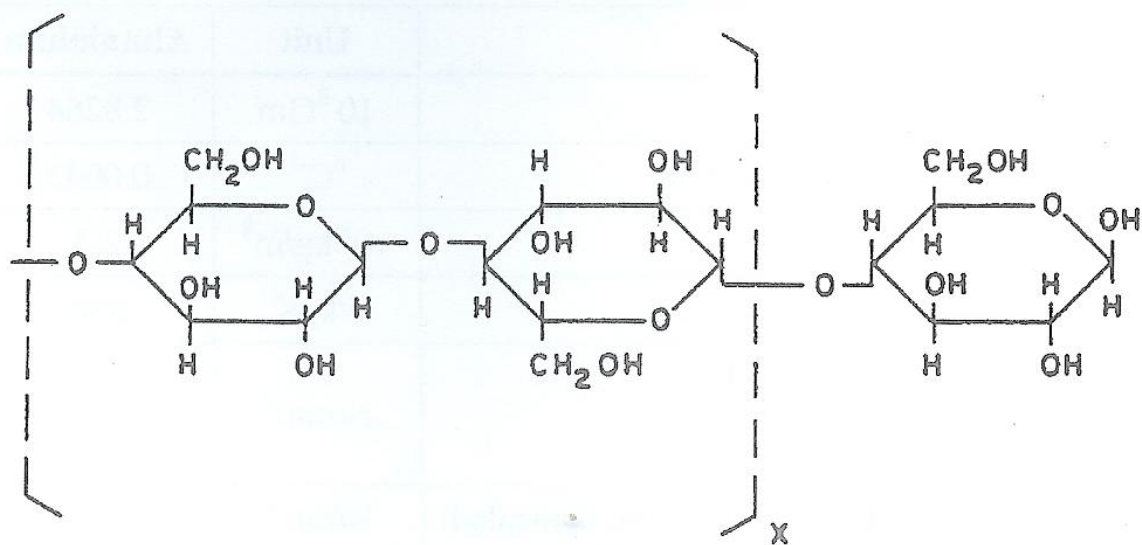
I kabelen brukt i dette prosjektet er lederen bygd opp av profildreide kobbertråder. I midten av lederen er det en tykk rund kobbertråd, som de mindre, profilformede, kobbertrådene er lagt utenpå. Disse kobbertrådene er lagt lagvis rundt den midterste kobbertråden, og er dreid i hver sin retning. Dette er gjort for at kabelen skal kunne bøyes uten at lederen ødelegges.

Innerst ved lederen tvinnes det på noen lag med sot papir. Funksjonen til disse papirlagene er å virke som en halvleder, denne skal sikre god ledning mellom lederen og isolasjonen. De neste papirlagene er ofte av en tynnere papirtype. Dette gjøres for å sikre at kabelen blir fullstendig impregnert, og for å få en myk overgang mellom leder og isolasjonen.

Kabelens isolasjon er bygd opp av oljeimpregnert papir. Papiret er tvunnet lagvis rundt lederen, som en heliks (se figur 2.3). Hvor mange papirlag som brukes kommer an på spesifikasjonene til kabelen. Isolasjonen kan ha opp mot 290 papirlag som er tvunnet oppå hverandre.

DC kabler er ikke utsatt for dielektriske tap, noe som gjør det mulig å velge papir med høy tetthet for å oppnå best mulig dielektrisk styrke. Papiret som brukes består av cellulose, og har vanligvis en tetthet på $0,75 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ (ren cellulose, $1,54 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) [5]. Dette fører til at papiret som brukes inneholder en god del porer. For å unngå partielle utladninger i disse porene, må kabelen impregneres. Dette gjøres ved at kabelen puttes inn i en impregneringstank der papiret blir tørket og vakuumert, noe som skjer ved høy temperatur. Når dette er gjort tilsettes impregneringsstoffet, noe som er olje for oljeimpregnerte kabler, dette skjer i vakuum før den trykkesett.

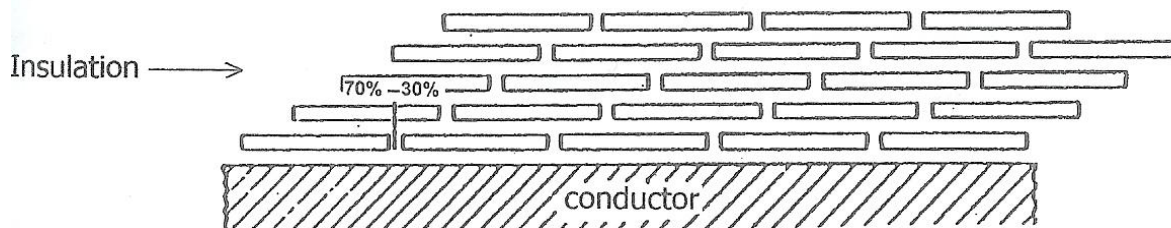
Papiret som brukes har en kjemisk struktur som vist i figur 2.2.



Figur 2.2, Papirets molekylstruktur [5]

Papiret som tvinnes rundt kabelen har en tykkelse på rundt 0,1 mm, og en bredde på rundt 20 mm. Gapet som dannes mellom hver runde et papirlag blir tvunnet rundt kabelen, kalles buttgap. Disse gapene er nødvendige for å unngå mekanisk ødeleggelse av kabelen, når den bøyes. Buttgapene har som regel en bredde fra 1 til 4 mm[4].

For å opprettholde kabelens bøyeegenskaper legges papirlagene i bru på 12-16 papirlag som tvinnes 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 prosent. Dette er vist i figur 2.3.



Figur 2.3, Isolasjonens oppbygning [5]

Etter å ha lagt på papirisolasjonen legges det på en ytre halvleder og et h-bånd (Hochstädter-bånd). Den ytre halvlederen sikrer god kontakt mellom isolasjonen og blykappen, mens h-båndet er et tynt metall/papirbånd som virker som en halvleder. Dette båndet beskytter også kabelisolasjonen mot varmen som oppstår, når blykappen legges på kabelen.

Blykappen ekstruderes utenpå isolasjonen, med en tykkelse på 2-5 mm. Funksjonen til denne kabeldelen er å beskytte kabelen mot vanninntrengning. Utenpå blykappen ekstruderes det på en tynn PEX-kappe, for å beskytte blykappen mot resten av produksjonsleddene.

Stålbåndet legges utenpå der igjen. Ytterst legges det et armerings og bitumentau for å beskytte mot ytre fysiske påkjenninger.

2.1.2 12 kV PEX kabel

Den 12 kV PEX kabelen som ble bruk i denne masteroppgaven er den samme som brukes i laboratorieøvelse 2, i faget TET 4160 Høyspenningisolasjonsmateriale.



Figur 2.4 12 kV PEX kabel

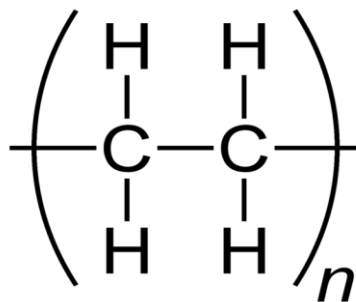
De delene av kabelen som brukes under dette forsøket er nevnt i tabell 2.2 nedenfor, fra innerst til ytterst.

Tall	Forklaring
1	Aluminiums leder
2	Indre Halvleder
3	PEX
4	Ytre halvleder
5	Kobberskjerm
6	PVC-kappe

Tabell 2.2, Oppbygning av kabelen

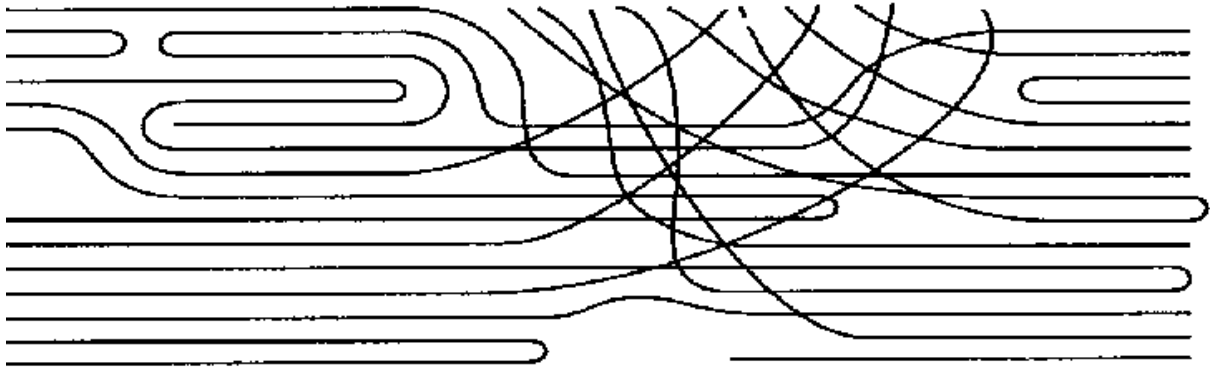
Det kan også ses på figur 2.4 at det er laget ende avslutninger på kabelen.

Polyetylen består av lange molekylkjeder på tusener til titusener av CH₂-grupper, vist i Figur 2.5 [4]. Det kan også forekomme sidekjeder enkelte steder, som vil forstyrre den vanlige formen til makromolekylene.



Figur 2.5 Polyetylens kjemiske sammensetning

De lange molekylkjedene som dannes i polyetylen ligger delvis parallelt med andre kjeder, som vist i figur 2.6. Disse parallelle regionene utgjør den krystallinske delen av polymeren. En annen del av kjeden kan følge en vilkårlig vei og dermed utgjøre en amorf region av polymeren. I disse amorfe områdene vil tilsetningsstoffer, som urenheter og antioksidanter, samles opp.



Figur 2.6, molekylkjeder i polyetylen. [4]

Polyetylen går gjennom en vulkaniseringsprosess for å tverrbindes, og danne PEX. Mer informasjon om kan finnes i [4].

2.2 Polarisasjon

I vårt moderne samfunn er man veldig avhengig av pålitelig levering av energi. Dermed er det veldig viktig å ha god informasjon om tilstanden til de ulike komponentene i kraftsystemet.

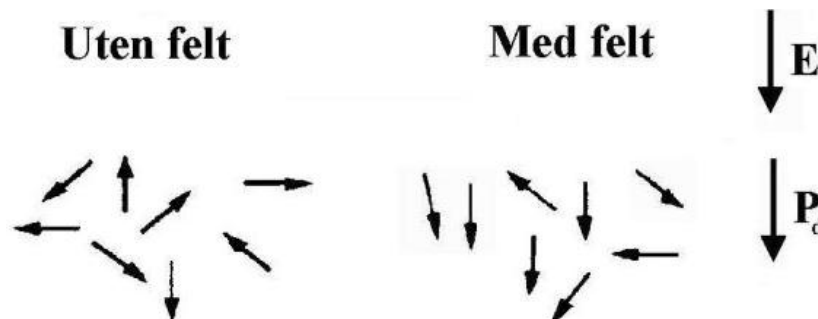
Måling av polarisasjonsstrøm og depolarisasjonsstrøm brukes som en ikke-destruktiv dielektrisk test for å bestemme ledningsevnen til isolasjonen. Denne type testing har blitt veldig populær i det siste, da den gjør det mulig å vurdere tilstanden til høyspenningsisolasjon [5].

2.2.1 Polarisasjonsmekanismer

Isolasjonen i en massekabel, kan ses på som et dielektrikum mellom to elektroder. Et dielektrikum er en elektrisk isolator som kan polariseres når det påtrykkes et elektrisk felt.

Det finnes fire ulike polarisasjonsmekanismer, noen av disse er momentane mens andre er tidsvarierende. De momentane mekanismene kan det leses nærmere om i [6]. De tidsvarierende mekanismene, relaksjonsmekanismene, er:

- Dipol polarisasjon: Materialer med høy relativ permittivitet inneholder dipoler. Når et elektrisk felt påtrykkes dipoler vil disse rette seg inn etter feltet, og siden det vil ta tid før disse innretter seg i en ny stabil posisjon skiller denne seg fra de momentane reaksjonene. Når feltet ikke er påtykt vil derimot disse molekylene ha en helt tilfeldig retningsorientering.

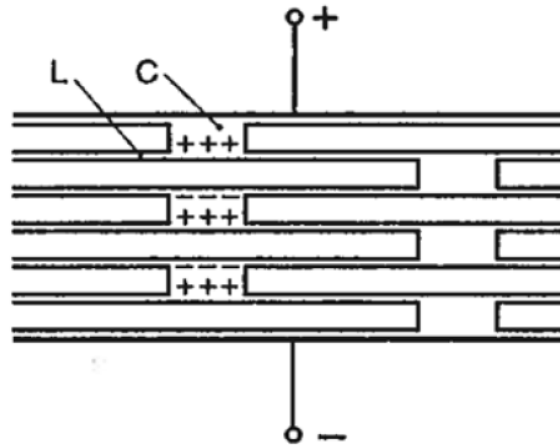


Figur 2.7 Dipol polarisasjon [6]

I en massekabel vil flere polarisasjonsmekanismene virke inn, men den mest dominerende polarisasjonsmekanismen er grenseflatepolarisasjon. Derfor vil det nå bli sett nærmere på denne mekanismen. I PEX vil polarisasjon skje ved ladningsinjeksjon mellom halvlederen og isolasjonen. Polarisasjonsmekanismen som dominerer vil være grenseflatepolarisasjon mellom disse to flatene. Da dette vil være fysisk likt dipol polarisasjon, vil polarisasjon i PEX for resten av denne rapporten benevnes som, dipol polarisasjon.

Grenseflatepolarisasjon:

Grenseflatepolarisasjon er som dipolpolarisasjon en relaksjonsmekanisme, og molekylene i dielektrikumet vil dermed bruke tid på å innrette seg etter det elektriske feltet.

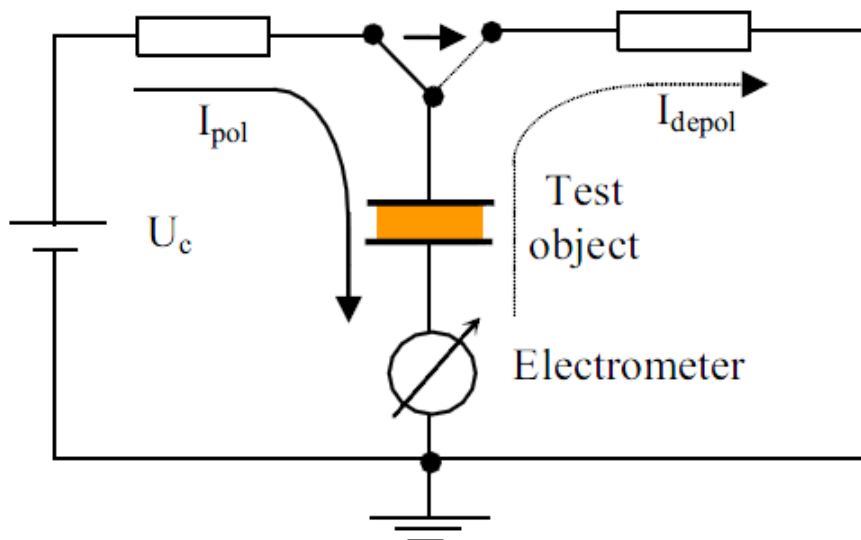


Figur 2.8, Grenseflatepolarisasjon i isolasjonen [7]

Isolasjonsmaterialet brukt i en massekabel består av flere materialer (se kapittel 2.1), med ulike relativ permittivitet, og forskjellig ledningsevne. Når de ulike dielektrikaene påtrykkes et elektrisk felt vil de frie ladningene bevege seg mot grenseflatene til materialene. Denne bevegelsen skjer ved at de negative partiklene beveger seg mot den positive elektroden, og motsatt (se figur 2.8). Dette fenomenet vil både skje i oljelagene (vist som L i figur 2.8), og i buttgapene (vist som C i figur 2.8). Siden ledningsevnen i oljen er mye større enn i papiret, og den relative permittiviteten er relativt lik, vil de frie ladningene i oljelagene legge seg i grenseflaten mellom oljen og papiret.

Det samme vil skje i buttgapene, men siden dette laget er vesentlig større enn oljelagene mellom papirlagene vil det ta lengre tid for oljen i buttgapene å bli fullstendig polarisert. Mer utdypende rundt hva som skjer i isolasjonsmaterialet er beskrevet i del kapittel 2.3.2.

2.2.2 Tidsvarierende polarisasjon



Figur 2.9 Prinsipielt oppsett for pol/depol testing [9]

I det bryteren i kretsen slås på, slik at testobjektet påtrykkes en gitt spenning, dannes det et elektrisk felt i isolasjonsmaterialet, $E(t)$.

For DC-felt vil det være i start- og stoppfasen, altså når trinnspenningen skrues på eller av, at effekten av relaksjonsmekanismene har betydning. Relaksjonsmekanismene er også svært temperaturavhengige, ettersom dipolene og ionene kan bevege seg friere ved høye temperaturer, dette vil bli beskrevet nærmere senere.

Strømtettheten i materialet kan beskrives som:

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Hvor σ er dc ledningsevnen til dielektrikumet, og $D(t)$ er den elektriske forskyvningen (flukstettheten):

$$D(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r E(t) + \Delta P(t) \quad (2.2)$$

$P(t)$ er den totale polarisasjonsfunksjonen, og for å gjøre utledningene av denne enklere tar man kun med den mest dominerende relaksjonsmekanismen i dielektrikumet. Dette vil si dipol-polarisasjon for PEX kablet og grenseflatepolarisasjon for den oljeimpregnerte massekablet.

$$P(t) = P_{momentan} + P_{dominerende\ relaksjonsmekanisme}(t) \quad (2.3)$$

$P(t)$ kan bestemmes ut fra responsfunksjonen til det dielektriske materialet, ved å bruke ligning 2.4:

$$\Delta P(t) = \varepsilon_0 \int_0^\infty f(t - \tau) E(\tau) d\tau \quad (2.4) \quad [8]$$

Ved å kombinere likning 2.1 og 2.2:

$$J(t) = \sigma E(t) + \varepsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t - \tau) E(\tau) d\tau \quad (2.5)$$

Da man kan se på testobjektet som en kapasitans, C_0 , kan strømmen gjennom den beregnes ved å bruke likning 2.6.

$$i(t) = C_0 \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0} U(t) + \varepsilon \frac{dU(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t - \tau) U(\tau) d\tau \right] \quad (2.6)$$

Siden testobjektet både kan bestå av et homogent materiale (PEX), og et heterogent materiale (oljeimpregnert massekabel) vil σ , ε_r og $f(t)$ også kunne representere de sammensatte verdiene til det heterogene testobjektet. C_0 er isolasjonssystemets geometriske kapasitans, denne er lik den målte kapasitansen delt på den relative permittiviteten til kablet.

Responsfunksjonen til olje/papir isolasjonen kan beskrives som [8]:

$$f(t) = \frac{A}{\left(\frac{t}{t_0}\right)^n + \left(\frac{t}{t_0}\right)^m} \quad (2.7)$$

Hvor er A en konstant, $t_0 > 0$, $m > n > 0$, og $m > 1$.

Hvis man antar at testobjektet er helt utladet i spenningen påtrykkes, og spenningen kan karakteriseres som:

$$U(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ U_c & 0 \leq t \leq t_c \\ 0 & t > t_c \end{cases} \quad (2.9)$$

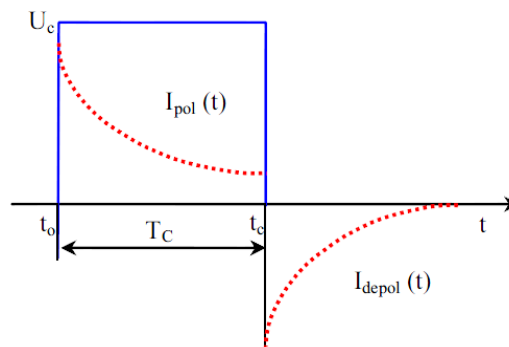
Dette vil si at det ikke går noe strøm i testobjektet før $t=0$, og at det går en DC polarisasjonsstrøm fra $t=0$ til $t=t_c$ (se figur 2.10). Denne polarisasjonsstrømmen er bygget opp av to deler.

$$i_p(t) = C_0 U_0 \left[\frac{\sigma}{\epsilon_0} + f(t) \right] \quad (2.10)$$

Den ene delen er styrt av ledningsevnen til materialet, mens den andre delen bestemmes av aktiveringen av de ulike polarisasjonsmekanismene.

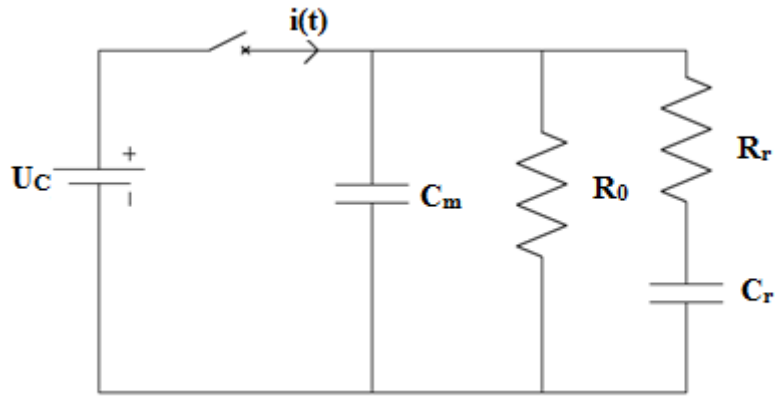
I det testobjektet kortsluttes (bryteren slås av) vil det bygge seg opp en depolarisasjonsfunksjon.

$$i_d(t) = -C_0 U_0 [f(t) + f(t + t_c)] \quad (2.11)$$



Figur 2.10, Forløpet til polarisasjons- og depolarisasjonsstrømmen, ved påtrykt DC spenning

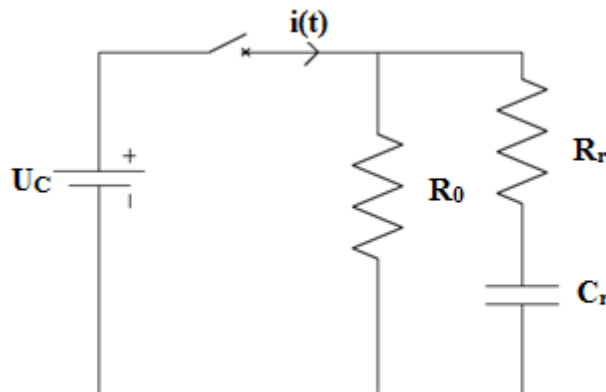
Det er også mulig å uttrykke forholdet mellom momentanpolarisasjon mekanismene, relaksjonspolarisasjon mekanismene og konduktiviteten, som en kretsekvivalent. Denne kretsekvivalenten er vist i figur 2.9.



Figur 2.11 Kretsekvivalent for isolasjonsmateriale.

I kretsekvivalenten representerer C_m momentanpolarisasjonens mekanismene, og R_0 konduktiviteten i isolasjonsmateriale. Relaksjonspolarisasjonen kan som nevnt forenkles, ved å kunne se på den mest dominerende mekanismen. Den dominerende mekanismen beskrives elektrisk av R_r og C_r .

Denne kretsen kan forenkles ytterligere ved å se bort fra momentanpolarisasjonens mekanismene, da disse vil ha lite å si for den totale polarisasjonsstrømmen. Den ytterlig forenklete kretsen kan ses i figur 2.12.



Figur 2.12 Kretsekvivalent for konduktivitet og dominerende relaksjonsmekanisme

Likningen for denne endelige kretsen:

$$i(t) = \frac{U_c}{R_0} + K e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.12)$$

Det første leddet er DC-strømmen i kretsen, mens K er i denne likningen en konstant, og τ er tidskonstanten til polarisasjonsstrømmen.

$$\tau = R_r C_r \quad (2.13)$$

2.3 Elektrisk felt i kabelen

2.3.1 Kabelens operasjonsforhold

Kvantitativ kunnskap rundt elektriske felt er viktig da dette er en sentral designparameter for kabler.

En DC kabel vil ikke bare oppleve DC spenninger, den vil også oppleve AC gjennom impulser, bryteroperasjoner og polaritets vekslinger [9].

I det en DC spenning slås på eller av blir dielektrikumet påvirket, som om det var påtrykt en AC spenning. Dette får konsekvenser for den elektriske feltfordelingen, i tillegg til at det vil ta tid før det oppnås stabile DC forhold i en HVDC kabel. Det å snu polariteten i en kabel ved å f. eks kortslutte den, kan føre til betydelig økning eller reduksjon i lokale felt.

Dette kan forklares ytterligere ved å se nærmere på oppbygningen av polyetylen, som er forklart i kapittel 2.1.2. Urenhetene i de amorfe områdene vil fange ladninger, kalt romladninger. Siden et DC spennings påtrykk ikke endrer retningen på ladningsflyten, vil ladningene akkumuleres. Ladningsansamlingene vil så løsrives fra dielektrikumet, når det eksterne feltet fjernes og isolasjonsmaterialet kortsluttes. Utladningstiden av romladning i polymerer er generelt sett lang. En konsekvens av dette fenomenet er at de ladningsansamlingene vil være fanget i dielektrikumet, også etter at kabelen er blitt kortsluttet. Når dette skjer vil isolasjonsmaterialet oppleve summen av romladningsfeltet og feltet introdusert av DC-spenningen, hvis polaritet er snudd. Dette fører til feltforsterkning i områder med akkumulering av romladninger med motsatt polaritet av nærliggende elektrode (heteroladninger), mens det vil føre til svekking av feltet i områder med akkumulering av romladninger med motsatt polaritet av nærliggende elektrode (heteroladninger) [7]. Dette fører til at ledningsevnen til kabelen varierer i isolasjonen, da denne er avhengig av feltet[7]. Variasjonen fører igjen til at den elektriske feltfordelingen i kabelen endres. Endringer i feltfordelingen i kabelen vil redusere påliteligheten til kabelen.

I massekabler kan vi også definere en annen type romladninger [10]. Disse ladningene er ikke et lokalt fenomen, men er fordelt jevnt utover hele kabelisolasjonen. Dette vil bli forklart nærmere i kapittel 2.3.2.

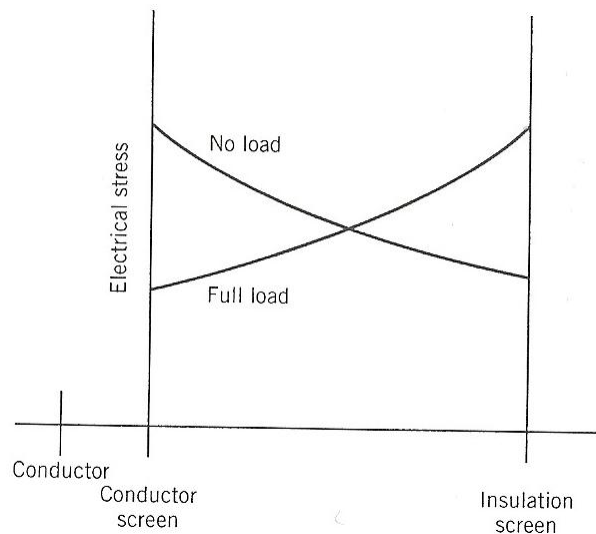
Ledningsevnen varierer med både temperatur og spenning, noe som fører til at det elektriske feltet endres som følge av kabelens operasjonsforhold.

Det elektriske feltet i en HVDC kan derfor deles inn i ulike faser, avhengig av operasjonstilstanden til kabelen. De ulike fasene vil ha mye og si for hvordan feltet i kabelen er, spesielt for massekabler der isolasjonen er bygd opp av to ulike materialer. De ulike elektriske egenskapene til olje og papir fører til at de belastes ulikt i de ulike fasene.

I det en DC spenning slås på eller av blir dielektrikumet påvirket, som om det var påtrykt en AC spenning. Noe som gir en kapasitiv startstrøm gitt av likning 2.14.[7]

$$i_c = C \frac{dU}{dt} \quad (2.14)$$

Dette kan forklares ved at det elektriske feltet i kabelen. I det spenningen slås på inneholder kabelen ingen ladning, og det er heller ikke noen temperaturfall over isolasjonen. Det elektriske feltet er i denne fasen (fase 1, se figur 2.14) bare bestemt av kabelens geometri og permittivitet (ϵ)[9]. Feltet vil i dette tilfellet være størst nærmest lederen, se figur 2.13, og ikke være påvirket av kabelens temperatur eller det påtrykte feltet.



Figur 2.13, Feltpåvirkning HVDC kabel [11]

Den tiden det tar å påtrykke spenning over kabelen er kortere enn tidskonstanten til polarisasjonen av isolasjonsmaterialet. Av denne grunn er det elektriske feltet i denne fasen kapasitivt, og kan bestemmes ved likning 2.15. Dette feltet vil være størst i oljen, da motstandene og kapasitansene i buttgapene vist i figur 2.15 vil være dominerende. [7]

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{r_{kabel}}{r_{leder}}} \quad (2.15)$$

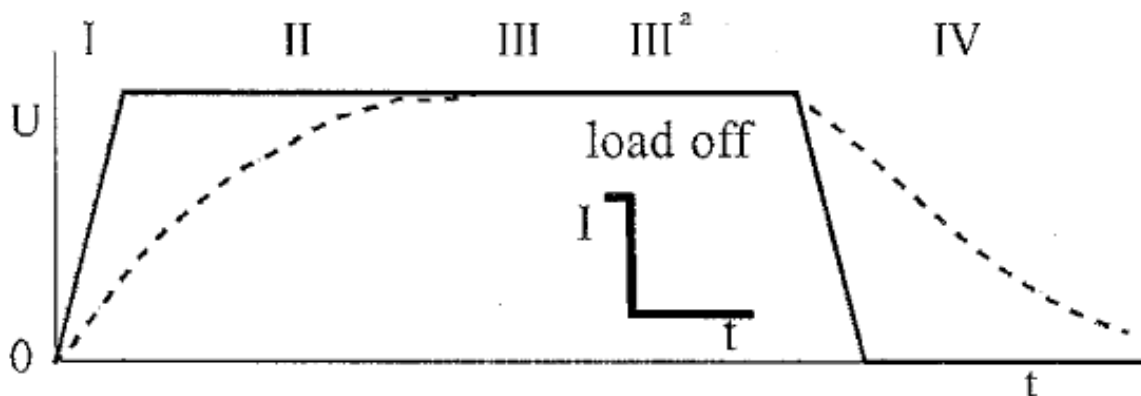
I fase 2 oppnås den maksimale spenningen, i denne fasen er det elektriske feltet tidsavhengig[9]. I denne fasen påvirkes kabelen av et transient fenomen, polarisasjon. De ulike polarisasjonsmekanismer som er nevnt tidligere påvirker kabelens elektriske felt. Strømmen i denne fasen vil dermed også være tidsavhengig, og er kabelens polarisasjonsstrøm. Denne strømmen kan beskrives av likning 2.10.

Denne strømmen reduseres sakte, og det kan ta flere timer før det elektriske feltet går over i neste fase (fase 3). I dette feltet jevnes strømmen ut til en statisk lekkstrøm, noe som vises i figur 2.10 ved at $I_{pol}(t)$ flater ut mot en bestemt verdi.

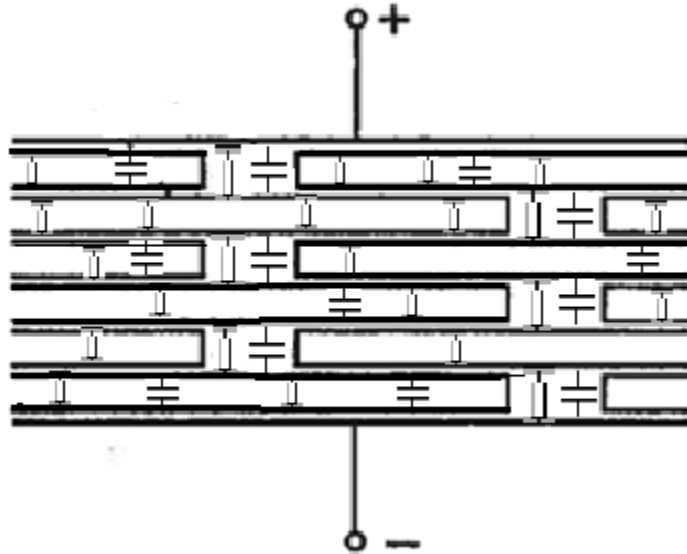
I fase 3 har den elektriske feltfordelingen blitt stabilt resistivt, og man har oppnådd DC forhold. Tiden det tar å oppnå DCforhold bestemmes av relaksjonstiden, τ (se likning 2.12). Dette feltet vil være størst i papirlagene, da det ikke vil være felt i buttgapene, dette kan vises ved å kortslutte kretselementene i buttgapene (se figur 2.15) [7]. I denne fasen vil det elektriske feltet bestemmes av ledningsevnen til isolasjonsmaterialet, og dermed være påvirket av både temperaturen og det påtrykte feltet. Dette vil føre til problemer med å bestemme det elektriske feltet i kabelen, da temperaturen ikke er den samme i alle delene av kabelen. En fullt belastet massekabel kan ha en temperatur på 40 grader ved lederen, mens temperaturen bare er 10 grader ved blykappen [7]. Dette vil si at en temperaturgradient genereres i isolasjonen. Siden resistansen i kabelisolasjonen er påvirket av temperaturen, vil temperaturgradienten føre til en mange ganger lavere resistans ved lederen enn ute ved blykappen. Lavere resistans fører så til lavere felt ved lederen (se figur 2.13), som igjen gir en ujevn feltfordeling i isolasjonen. Denne temperaturforskjellen vil også generere en konduktivitetsgradient i isolasjonen, siden ledningsevnen er avhengig av temperaturen (se kapittel 2.4)

Bryteren slår så av spenningspåtrykket i fase 4, og kabelen jordes (se figur 2.14). Det elektriske feltet vil fremdeles være til stede i kabelen i en lengre tid, som følge av polarisasjonsmekanismene beskrevet tidligere i dette kapittelet.

I denne fasen oppnår man en tidsavhengig strøm som lader ut den oppladede kabelen. Denne strømmen, depolarisasjonsstrømmen bestemmes av likning 2.11. Denne strømmen vil være i kabelisolasjonen til kabelen er utladet ($I_{\text{depol}}(t)=0$).



Figur 2.14, De forskjellige fasene til det elektriske feltet.



Figur 2.15, Feltforholdene i buttgapene og papirlagene, representert ved motstander og kapasitanser.

2.3.2 Elektriske felt i HVDC massekabler

En massekabel kan forenklet sees på som det som kalles en Maxwell kondensator. Denne kondensatoren er en hypotetisk fremstilling av fenomenene som oppstår mellom to forskjellige dielektrikum[7].

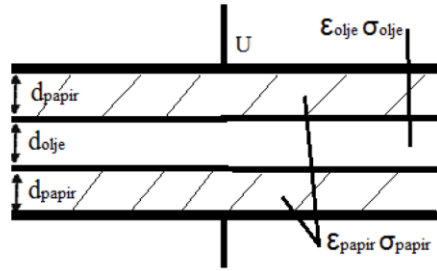
En Maxwell kondensator består av to parallelle elektroder, som i dette prosjektet vil være kabelens blykappe og kobberleder. Disse elektrodene er avskilt fra hverandre av to dielektrikum plater med bestemt tykkelse. Dette vil når man ser på en olje-/papirisolert kabel, være lagene av papir (d_{papir}) og olje (d_{olje})[7].

Ved å påtrykke denne kondensatoren med en DC spenning, U , vil man ut fra Ohm og Maxwells lover få følgende forhold:

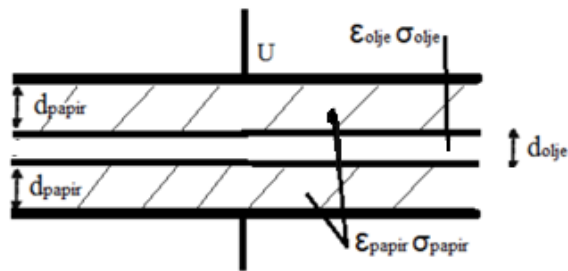
$$\rho = \nabla \cdot D = \nabla \cdot \epsilon E \quad (\text{Maxwell})(2.16)$$

Og

$$j = \sigma E \quad (\text{Ohm})(2.17)$$



Figur 2.16, Kondensator med flere dielektrikum, her vises forholdet buttgap og papirlag.



Figur 2.17, Kondensator med flere dielektrikum, her vises forholdet de tynne oljelagene og papirlag.

Videre får man:

$$\nabla \cdot j + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \text{ (kontinuitets loven)} \quad (2.18)$$

Som følge av dette kan man skrive:

$$\nabla \cdot \sigma E + \frac{d}{dt} \nabla \varepsilon E = 0 \quad (2.19)$$

I et homogent felt med en steg funksjon fra olje til papir:

$$(\sigma_{olje} E_{olje} - \sigma_{papir} E_{papir}) + \frac{d}{dt} (\varepsilon_{olje} E_{olje} - \varepsilon_{papir} E_{papir}) = 0 \quad (2.20)$$

Spenningen mellom elektrodene er gitt av:

$$d_{olje} E_{olje} + d_{papir} E_{papir} = u \quad (2.21)$$

Ved å fjerne E_{papir} :

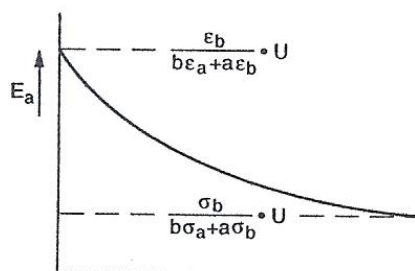
$$\begin{aligned} (d_{\text{papir}}\epsilon_{\text{olje}} + d_{\text{olje}}\epsilon_{\text{papir}})\frac{dE_{\text{olje}}}{dt} + (d_{\text{papir}}\sigma_{\text{olje}} + d_{\text{olje}}\sigma_{\text{papir}})E_{\text{olje}} \\ = \sigma_{\text{papir}}U + \epsilon_{\text{papir}}\frac{du}{dt} \quad (2.22) \end{aligned}$$

Dette er en differensiallikning med:

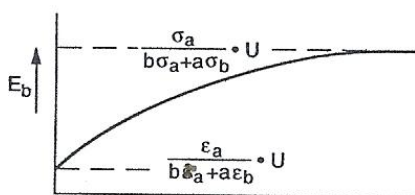
$$u = U \text{ og } \frac{dU}{dt} = 0 \text{ for } t > 0 \quad (2.23)$$

Løsningen på denne likningen er:

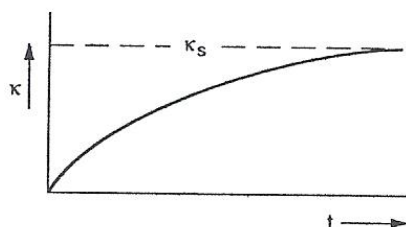
$$E_{\text{olje}} = \frac{\sigma_{\text{papir}}U}{d_{\text{papir}}\sigma_{\text{olje}} + d_{\text{olje}}\sigma_{\text{papir}}}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \frac{\epsilon_{\text{papir}}U}{d_{\text{papir}}\epsilon_{\text{olje}} + d_{\text{olje}}\epsilon_{\text{papir}}}e^{-t/\tau} \quad (2.24)$$



a) Feltstyrken i olje (a=olje)



b) Feltstyrken i papir (b=papir)



c) Økningen i overflateladning i grenseflatene.

Figur 2.18 Viser det sakte ladende fenomenet i en Maxwell kondensator[7]

Hvor:

$$\tau = \frac{d_{\text{papir}}\epsilon_{\text{olje}} + d_{\text{olje}}\epsilon_{\text{papir}}}{d_{\text{papir}}\sigma_{\text{olje}} + d_{\text{olje}}\sigma_{\text{papir}}} \quad (2.25)$$

Dette resultatet viser overgangen fra den kapasitive feltfordelingen ved $t = 0$, til den resistive feltfordelingen ved $t = \infty$. Hvis $t = 0$ og $t = \infty$ settes inn i likning 2.25. [7] Disse nevnte feltene vil bli forklart nærmere senere i denne teoridelen.

Ved å introdusere

$$E_{\text{papir}} = \frac{U}{d_{\text{papir}}} - \frac{d_{\text{olje}}}{d_{\text{papir}}} E_{\text{olje}} \quad (2.26)$$

Økningen av overflate ladningen ved overgangen mellom de forskjellige lagene kan beregnes med Maxwells likning (likning 2.16). Ved overgangen mellom lagene endres denne likningen til:

$$\epsilon_{\text{olje}} E_{\text{olje}} - \epsilon_{\text{papir}} E_{\text{papir}} = \kappa \quad (2.27)$$

Noe som gir oss følgende likning:

$$\kappa = \frac{d_{\text{papir}}\epsilon_{\text{olje}} - d_{\text{olje}}\epsilon_{\text{papir}}}{d_{\text{papir}}\sigma_{\text{olje}} + d_{\text{olje}}\sigma_{\text{papir}}} U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \kappa_s \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (2.28)$$

Denne likningen representerer den gradvise økningen i overflateladning κ ved overgangen mellom lagene.

2.3.2.1 Tidskonstanten

Dette er en viktig parameter, og kan finnes fra likning 2.25. Verdien til tidskonstanten gir tiden det vil ta før polarisasjonsfenomenet dør ut, og det oppnås et rent DC felt. Det er også mulig å foreta visse forenklinger for å kunne estimere denne konstanten. For eksempel kan det antas at permittiviteten til de ulike materialene ikke varierer mye, noe gir oss forholdet[7]:

$$\epsilon_{\text{papir}} = \epsilon_{\text{olje}} = \epsilon \quad (2.29)$$

Ledningsevnen varierer på sin side betraktelig fra det ene dielektrikumet til det andre.

$$\sigma_{\text{olje}} > 100 \sigma_{\text{papir}} = \sigma \quad (2.30) \quad [7]$$

Dimensjonen på de ulike lagene kan man også, anta er omtrent like store hvis en ser på forholdet mellom buttgap og papirlag, se figur 2.16.

$$d_{\text{olje}} = d_{\text{papir}} \quad (2.31)$$

Dette gir ut følgende forhold:

$$\tau = \frac{d_{\text{papir}}\varepsilon + d_{\text{papir}}\varepsilon}{d_{\text{papir}}\sigma + \text{brøkd}el} \approx 2 \frac{\varepsilon}{\sigma} \approx 2\varepsilon\rho_s \quad (2.32)$$

Hvor ρ_s er den spesifikke resistansen av det mest ledende av de to materialene. Ved å sette inn:

$$\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r \quad (2.33)$$

Gir,

$$\tau = 2\varepsilon_0\varepsilon_r\rho_s = 2 * 8,85 \cdot 10^{-12} \varepsilon_r\rho_s \left[\frac{As}{Vm} \Omega m \right] \quad (2.34)$$

Ved å sette den relative permittiviteten lik 4,5 (impregnert kraftpapir) får man:

$$\tau = 7,5 \cdot 10^{-11} \rho_s \text{ sekunder} \quad (2.35)$$

Tidskonstanten for overgangen er som vist i likningen lineært proporsjonal med den spesifikke resistiviteten ρ_s til det mest ledende dielektrikumet.

Denne tilnærmingen stemmer enda bedre hvis det mest isolerende laget er tykkere, enn det andre laget.

$$d_{\text{papir}} > d_{\text{olje}} \quad (2.36)$$

Dette forholdet har man mellom den tynne oljefilmen og papirlagene, vist i figur 2.17. Denne tilnærmingen er derimot dårlig hvis forholdet er motsatt, for eksempel hvis papirlagene ikke overlapper slik at buttgapet (d_{olje}) blir dobbelt så tykt som det er vist i figur 2.16.

2.3.2.2 Overflateladningen:

Ladningen som dannes ved overgangen mellom lagene mot slutten av overgangsperioden er gitt av likning 2.37.

$$\kappa_s = \frac{\sigma_{\text{papir}}\varepsilon_{\text{olje}} - \sigma_{\text{olje}}\varepsilon_{\text{papir}}}{d_{\text{papir}}\sigma_{\text{olje}} + d_{\text{olje}}\sigma_{\text{papir}}} U \quad (2.37)$$

Hvis ledningsevnen til de to materialene er proporsjonal med permittiviteten,

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_p} = \frac{\varepsilon_{\text{olje}}}{\varepsilon_{\text{papir}}} \quad (2.38)$$

Vil likning 2.37 bli lik null og det vil ikke oppnås noen polarisasjon. Dette vil ikke skje i noe virkelig tilfelle, men κ_s kan aldri oppnå mer enn en bestemt verdi uansett, hvor stor forskjellen mellom materialene er. Dette kan vises ved å ta i bruk antagelsen likning 2.30 og 2.31. Ved å sette inn disse likningene i 2.37, gir[7]:

$$\kappa_s \approx -\frac{\sigma_{olje}\epsilon_{papir}}{d_{papir}\sigma_{olje}}U \approx -\frac{\epsilon_0\epsilon_{rpapir}}{d_{papir}}U \quad (2.39)$$

Ved å sette inn $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ As/Vm, U i kilovolt og d_{papir} i mm, gir den maksimalt oppnåelige overflateladningen:

$$\kappa_s \approx -\frac{10}{d_{papir}}\epsilon_{rpapir} \left[\mu \frac{C}{m^2} \right] \quad (2.40)$$

Dette viser at den maksimalt oppnåelige overflateladningen er uavhengig av ledningsevnen til materialene, og øker med permittiviteten til det mest isolerende materialet (ϵ_{rpapir}). [7]

2.4 Konduktivitet

Som vist tidligere i dette kapitlet er det elektriske feltet i kabel isolasjonen avhengig av de ledende egenskapene til isolasjonsmaterialet, og kabelens geometri. Selv om geometrien til kabelen er kjent, er de ledende egenskapene til et isolasjonsmateriale ukjent.

Elektrisk ledningsevne kan forekomme enten gjennom forflytning av elektroner eller ioner i materialet. Denne forflytningen kan beskrives som i likning 2.41.

$$\sigma = qn\mu \quad (2.41)$$

Hvor σ er ledningsevnen til materialet, q ladningen, n konsentrasjonen, mens μ er mobiliteten. Mobiliteten beskriver hvor lett ioner/elektroner vil bevege seg når dielektrikumet er påtrykt et elektrisk felt.

Det kan antas at konduktiviteten i en massekabel bestemmes av ion forflytning. [7]

Det samme gjelder PEX kabler, da det er veldig vanskelig å observere forflytning av elektroner. Den ledningsevnen som er mulig å måle kommer fra forflytning av ioner. Derfor er det veldig viktig å unngå dannelse av urenheter i isolasjonsmaterialet, under produksjon av kabelen, da disse kan øke konsentrasjonen av ioner [12].

Ledningsevnen til isolasjonsmaterialet gitt ionisk ledningsevne, kan beregnes ved å bruke likning 2.42.

$$\sigma(E, T) = A e^{\left(-\frac{\varphi q}{k_b T}\right)} \frac{\sinh(B|E|)}{|E|} \quad (2.42)[13]$$

A og B er konstanter, φ den termiske aktiveringsenergien [eV], q ladningen, T er temperaturen i kelvin, og E det elektriske feltet [V/m].

Ionisk ledningsevne er som nevnt den dominerende mekanismen, og det vil dermed bli gått dypere inn på hva det er som faktisk skjer i isolasjonsmaterialet.

2.4.1 Ionisk ledningsevne

I et medium bestående av n_1 partikler av en type, n_2 partikler av type 2, og n_i partikler av type i per volumenhet. Hver partikkel har en ladning, gitt av likning 2.43.

$$q_i = w_i e \quad (2.43)$$

Hvor w_i er et heltall (null, positiv eller negativ), og e er ladningen til et elektron.

Det totale antallet partikler per volumenhet er gitt av likning 2.44.

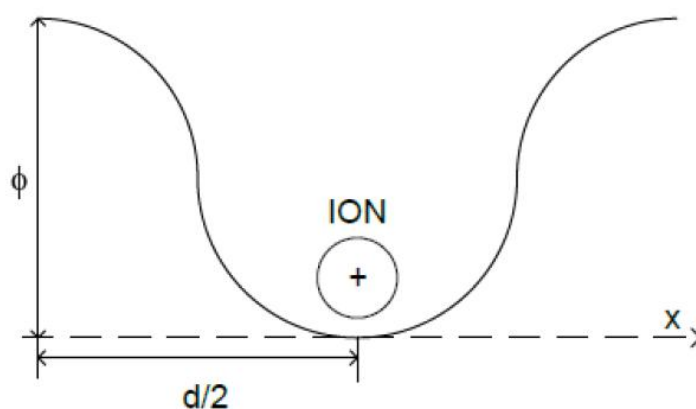
$$N_0 = \sum_i n_i \quad (2.44)$$

I dette mediet kan en ladet partikkel være fanget av en vertspartikkel, vanligvis et større molekyl. Fysisk dette vil si at partikkelen er fanget i en felle av potensialbarrierer, med høyde H . I et medium vil alle de fiendtlige partiklene forme et tredimensjonalt energipotensial landskap som partikkelen beveger seg i [14].

Ulike partikler kan bli fanget av ulike typer vertspartikler. Masseimpregnert papir viser mange av de samme karakteristiske trekkene som glass [7]. I amorfe materialer, som glass, vil det oppstå defekter i krystallstrukturen hvor et positivt eller negativt ion mangler. De samme amorfe områdene kan også finnes i polyetylen, se figur 2.6.

Disse defektene vil danne feller, av typen nevnt ovenfor, hvor ladningsbæreren kan bli fanget. Ladningsbærerne blir i fellen en viss tid, før de igjen deltar i ladningsprosessen.

Siden ulike partikler opplever ulike landskap, benevnes høyden til fellene med H_i . H_i er definert som den energien som trengs for å frigjøre den fangede ladningsbæreren [14]. Hvis et område i isolasjonsmaterialet har mange grunne, feller blir konduktiviteten høy, mens dypere feller tilsier en lavere konduktivitet.



Figur 2.19, Ion fanget i en felle av potensialbarrierer.

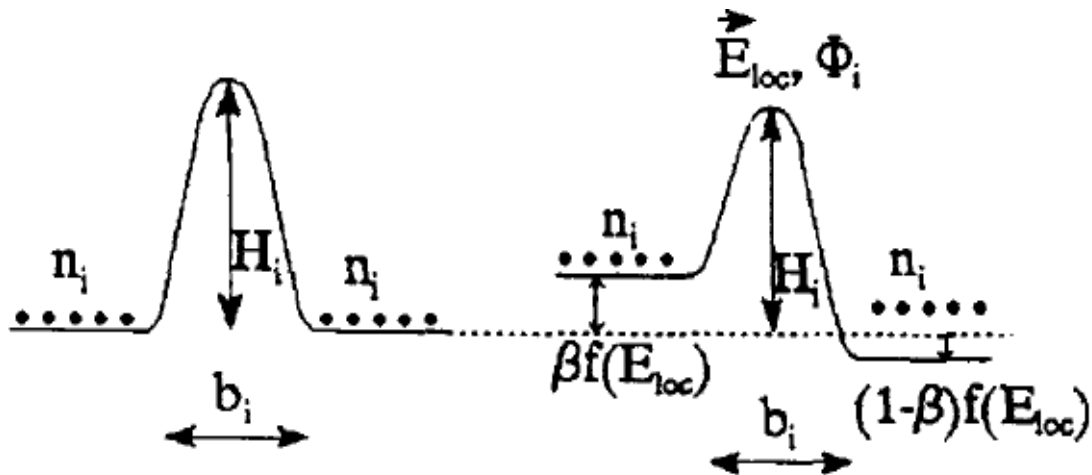
Tiden ladningsbærerne tilbringer i fellen øker med dybden på fellene [14]. Sannsynligheten for at ladningsbæreren av type i skal komme seg ut av fellen, er i tillegg til dybden også avhengig av temperatur og hvor ofte ladningsbæreren prøver å komme seg ut, w_i .

$$p_i = \frac{w_i}{2\pi} e^{\left(-\frac{H_i}{kT}\right)}, k = \text{Boltzmann konstanten} \quad (2.45)$$

Etter å ha kommet seg ut av fellen, vil partikkelen falle ned i en ny felle, da ingen partikler klare å hoppe over to feller på en gang. Denne antagelsen kan godkjennes siden:

$$p_i^2 \ll p_i \quad (2.46)$$

Hvis et materiale påtrykkes et elektrisk felt vil potensialbarrieren øke med en viss mengde i den ene retningen, og minke med det tilsvarende i motsatt retning. Dette forholdet er vist i figur 2.20 b.



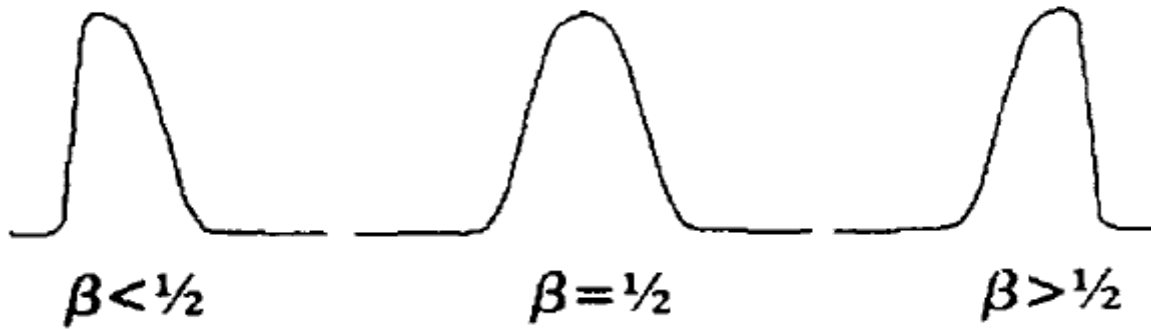
Figur 2.20 a) Felle som ikke er påvirket av et elektrisk felt. b) Felle som er påvirket av et elektrisk felt.

Sannsynligheten for at en partikkel skal unnsnippe en felle fra høyre mot venstre ($p^{1,2}$), når det ikke er påtrykt noe elektrisk felt, er like stor som at den skal unnsnippe fra venstre mot høyre ($p^{2,1}$). Dette vil si at netto partikkel fluks over fellen er null.

Når et elektrisk felt påtrykkes, vil sannsynligheten for at partikkelen, i , unnslipper i samme retning som feltet være gitt av likning 2.47 [14].

$$p_i^{1,2} = \frac{w_i}{2\pi} e^{\left(\frac{(1-\beta)q_i b_i E_{loc} - H_i}{kT}\right)} \quad (2.47)$$

E_{loc} beskriver det mikroskopiske feltet i området rundt fellen, som dannes som en følge av det makroskopiske feltet E , som er påtrykt materialet. B_i representerer avstanden mellom to feller, mens β er symmetrifaktoren [14]. Symmetrifaktoren beskriver formen til fellen, som vist i figur 2.21. Høy symmetri ($\beta = 1/2$) fører til lik sannsynlighet for å unnsnippe til høyre eller venstre (figur 2.20 a). Derimot ved høy grad av asymmetri ($\beta = 0$ eller 1) vil sannsynligheten mellom å krysse venstre til høyre, i forhold til høyre mot venstre være ulik (vist i figur 2.20 b).



Figur 2.21, Effekten symmetrifaktoren har på fellens form

Sannsynligheten for at en partikkel slipper ut av fellen mot feltets retning, $p_i^{2,1}$, er gitt av likning 2.48.

$$p_i^{2,1} = \frac{w_i}{2\pi} e^{\left(\frac{-\beta q_i b_i E_{loc} - H_i}{kT}\right)} \quad (2.48)$$

På grunn av dette blir sannsynligheten for at en positiv partikkel skal hoppe i retning av det elektriske feltet, større enn at den skal hoppe imot feltet. Det motsatte vil skje med negative partikler.

Netto partikkel fluks av type i over fellen, i samme retning som feltet er gitt av likning 2.49.

$$\Phi_i = n_i (p_i^{1,2} - p_i^{2,1}) = n_i \left(\frac{w_i}{2\pi} e^{\left(\frac{(1-\beta)q_i b_i E_{loc} - H_i}{kT}\right)} - \left(\frac{w_i}{2\pi} e^{\left(\frac{-\beta q_i b_i E_{loc} - H_i}{kT}\right)} \right) \right) \quad (2.49)$$

Hvis partikkelen ikke har ladning vil den ikke delta i ladningstransporten. Derimot hvis den har ladning, er påvirkningen gitt av likning 2.50.

$$j_i = q_i \Phi_i \text{ (strømtettheten)} \quad (2.50)$$

Konduktiviteten i området rundt fellen, som en følge av partikkel i er gitt av likning:

$$\sigma_{i,loc} = \frac{j_i}{E_{loc}} \quad (2.51)$$

Den totale konduktiviteten i materiale, finner man ved å slå sammen påvirkningen alle partikkeltypene i område rundt fellen har:

$$\sigma_{loc} = \sum_i \sigma_{i,loc} = \frac{1}{E_{loc}} \sum_i q_i n_i \frac{w_i}{2\pi} e^{-\left(\frac{H_i}{kT}\right)} \left(e^{\left(\frac{(1-\beta)q_i b_i E_{loc}}{kT}\right)} - e^{\left(\frac{-\beta q_i b_i E_{loc}}{kT}\right)} \right) \quad (2.52)$$

Siden vi bare er interessert i konduktiviteten til hele materialet kan man sette:

$$E_{loc} = E \quad (2.53)$$

Det er karakteristisk både for faste og flytende dielektrikum at mange forskjellige prosesser, kan være med på å bestemme ledningsevnen. I massekabler har er det to typer (olje og papir), og det kan ikke avgjøres hvordan de ulike prosessene i disse dielektrikaene påvirker ledningsevnen. Dermed gjøres følgende forenklinger:

$$\sum_i n_i = N_0 \quad (2.54)$$

$$\sum_i w_i = w_0 \quad (2.55)$$

$$\sum_i q_i = q \quad (2.56)$$

$$\sum_i H_i = H \quad (2.57)$$

Dette gir oss følgende forenklede formel:

$$\sigma = \frac{N_0 q w}{2\pi E} e^{-\left(\frac{H}{kT}\right)} \left(e^{\left(\frac{(1-\beta)qbE}{kT}\right)} - e^{-\left(\frac{\beta qbE}{kT}\right)} \right) \quad (2.58)$$

Ved å bruke det faktumet at:

$$\sinh(x) = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x}) \quad (2.59)$$

Ser man at likning 2.58 er lik likning 2.42, og forklarer konstantene A og B.

Ved å ta hensyn til de ulike symmetriske forholdene, kan det vises at σ blir,

For $\beta = 1/2$:

$$\sigma = \frac{N_0 q w_0}{\pi E} e^{-\left(\frac{H}{kT}\right)} \sinh\left(\frac{qbE}{2kT}\right) \quad (2.60)$$

$\beta = 1$:

$$\sigma = \frac{N_0 q w_0}{\pi E} e^{-\left(\frac{H}{kT}\right)} \left(1 - e^{-\left(\frac{qbE}{kT}\right)} \right) \quad (2.61)$$

$\beta = 0$:

$$\sigma = \frac{N_0 q w_0}{\pi E} e^{-\left(\frac{H}{kT}\right)} \left(e^{\left(\frac{qbE}{kT}\right)} - 1 \right) \quad (2.62)$$

Ved siden av at ladningene hopper fra felle til felle, når ladningen ledes langs molekyllkjeden, kan også partiklene unnslippe på en annen måte. Hvis fellen er så dyp at partikkelen ikke kan hoppe over ut av den, men avstanden mellom hullene er liten, kan ionet grave seg gjennom til neste felle[7].

I løpet av de siste årene har målinger gjort over hele verden, ført til at konduktiviteten til en massekabel kan beskrives med en empirisk formel[14]. Denne empiriske formelen vil i denne masteroppgaven også bli brukt for målinger gjort på PEX kabelen.

Denne formelen gir ledningsevnen til kabelen som en funksjon av temperatur og feltstyrke.

$$\sigma = \sigma_0 e^{(\alpha T + \beta E)} \quad (2.63)$$

σ symboliserer den elektriske ledningsevnen, mens σ_0 er ledningsevnen ved temperatur og elektrisk felt lik null.

De andre symbolene står for:

- α , den temperaturavhengige koeffisienten ($\sim 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ for masseimpregnerte kabler) [14]
- β , den feltavhengige koeffisienten ($\sim 0,03 \text{ mm/kV}$ for masseimpregnerte kabler) [14]
- T, temperaturen [$^\circ\text{C}$]
- E, elektrisk feltstyrke [kV/mm]

Hvis ionet graver seg gjennom til neste felle, kan ledningsevnen beskrives med formel 2.64:

$$\sigma(T) = A e^{\frac{-b}{T^n}} \quad (2.64)$$

Hvor A og b er konstanter, $n=1/4$ og T er temperaturen [$^\circ\text{C}$].

Hvis kabelen påtrykkes et lavt elektrisk felt, vil ledningsevnen være ohmsk og vil som i fase 3 (se kapittel 2.31) variere med temperaturen (se likning 2.64).

Den empiriske formelen (2.63) viser at den elektriske ledningsevnen til isolasjonen også varierer med det elektriske feltet, noe som kan vises ved å sette temperaturen konstant. Dette kan vises med formelen:

$$\sigma(E) = A e^{\beta E} \quad (2.65)$$

Ved å slå sammen formel 2.64 og 2.65, fås den empiriske formelen (2.63). Ut fra formlene i dette kapitlet kan det vises at ved å endre α , må man bare endre de teoretiske verdiene H og N for å oppnå samme resultat. Derimot hvis man endrer γ , må bare den teoretiske konstanten b endres. Dermed kan man konkludere med at feltavhengigheten bestemmes av avstanden mellom to feller, jo høyere avhengighet desto større er avstanden mellom fellene. Mens temperaturavhengigheten styres av dybden på fellene, jo høyere avhengighet desto høyere er fellene [14].

Konklusjonen blir at hvis temperaturen eller feltstyrken økes, vil høyden til fellene bli mindre. Dette fører til at det trengs mindre energi for å flytte en ladning, som igjen gir høyere konduktivitet.

I en oljeimpregnert kabel vil disse fenomenene skje både i oljen og papiret. Siden mengden ladbærere og mobiliteten deres er større i olje sammenliknet med papiret, vil konduktiviteten være høyere i oljen.

For å kunne sette opp formelen for ledningsevnen ut fra polarisasjonsstrømmene, som beregnes ut fra de eksperimentelle målingene, tilknyttet denne masteroppgaven, trenger man å vite den relative permittiviteten til kabelen.

Kabelen kan som nevnt tidligere representeres som en kondensator, ut fra denne antagelsen får man:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad \rightarrow \quad \frac{A}{d} = \frac{C}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2.66)$$

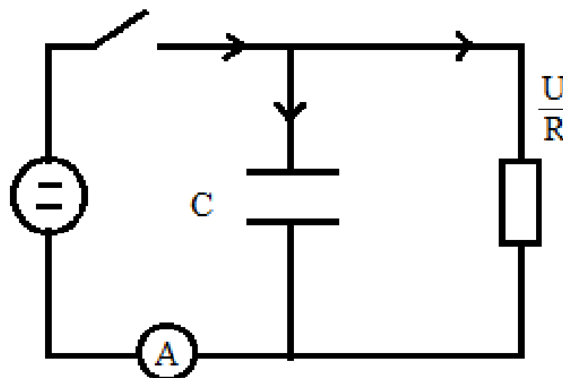
Der A er arealet til kondensatoren, mens d er tykkelsen til dielektrikumet.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{\sigma} \frac{A}{d} \quad (2.67)$$

Ved å sette formel 2.66 inn i 2.67, og anta konstant konduktivitet (uavhengig av T) fås:

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{C} \frac{I}{U} \quad (2.68)$$

Strømmen er i denne formelen forskjellen mellom I_{pol} og I_{depol} . Dette kan forklares ved å bruke superposisjon på kretsekvivalenten til kabelisolasjonen (figur 2.22)



Figur 2.22, Forenklet dielektrisk respons krets [4]

I denne figuren representerer R ledningsevnen, og C polarisasjonen. Ser bort fra resistansen gitt i figur 2.12, da denne som nevnt er temperatur avhengig.

Likningen som kan settes opp for denne kretsen kan ses i likning 2.69.

$$I = \frac{U}{R} + C \frac{dU}{dt} + U \frac{dC}{dt} \quad (2.69)$$

Ved å bruke superposisjonsprinsippet på denne likningen ved å sette $U=0$, og $U=U_0$. [3] Der U_0 er spenningen som påtrykkes en fullt oppladet jordet kabel. Dette gir:

$$I_{DC} = I_{pol} - I_{depol} \quad (2.70)$$

Fra måling av polarisasjonsstrømmen og depolarisasjonsstrømmen, er det altså mulig å estimere ledningsevnen til testobjektet. Ut fra likning 2.11, hvis testobjektet er ladet opp over en tilstrekkelig lang tid, kan man estimere [15]:

$$f(t + t_c) \cong 0 \quad (2.71)$$

Ut fra denne estimeringen får man at $f(t)$ er proporsjonal med depolarisasjonstrømmen:

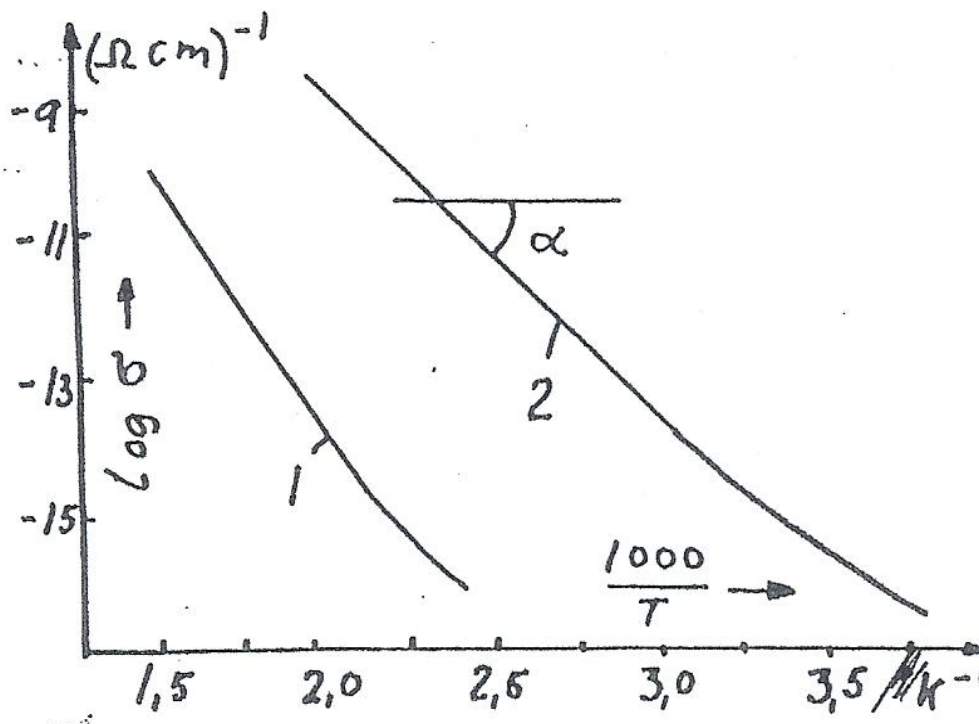
$$i_a(t) = -C_0 U_0 [f(t) + f(t + t_c)] \rightarrow f(t) \cong \frac{i_a(t)}{C_0 U_0} \quad (2.72)$$

Ved å sette likning 2.70 inn i likning 2.72, fås det at ledningsevnen kan beregnes som vist i likning 2.73[5].

$$\sigma \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{C U_0} (i_p(t) - i_a(t)) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{C U_0} I_{dc} \quad (2.73)$$

Der strømmen i dette tilfellet er den målte dielektriske responsen til testobjektet.

Hvis man i materialer med ionisk ledningsevne måler I_{dc} som funksjon av T ved lave feltstyrker, og $\log \sigma$ plottes som funksjon av $1/T [K^{-1}]$, skal man få rette linjer med en helning $-\frac{\varphi}{k}$. K er lik Boltzmanns konstant og er kjent, og dermed kan man bestemme φ ved hjelp av et slikt plott (Arrhenius plott, se figur 2.23) [16].



Figur 2.23 Arrhenius plott [16]

3. Instrumentering og målemetode

3.1 Prøveobjektet

3.1.1 450 kV Papir/masseisolert kabel

Prøveobjekt nummer 1 er en 3,9 meter lang del av en 450 kV HVDC kabel, som skal brukes til å måle tidsvarierende polarisasjon på tvers av kabelisolasjonen. For å kunne bruke kabelen som prøveobjekt ble bitumenimpregnert tau, armering og stålbånd fjernet. I tillegg ble 14 cm av blykappen og PE-kappen fjernet i hver ende av kabelen, slik at det ble lettere å komme til disse delene av kabelen. Dette ble også gjort for å gjøre plass til en guard til prøveobjektet. Hvordan dette blir gjort, og hvordan en guard fungerer blir forklart senere i dette kapittelet.

På dette prøveobjektet fungerer kobberlederen som spenningsleder, og blykappen som måleelektroden. Kobberlederen er i utgangspunktet bedre egnet som måleelektrode da denne er mer skjermet mot utvendig støy, sett i forhold til blykappen, siden målingene vil være beskyttet av kabelens isolasjon. Grunnen til at denne ikke brukt som måleelektrode i forsøkene, var at det viste seg at blykappen ikke tålte et påtrykk på 10 kV (overslag i kabelen).

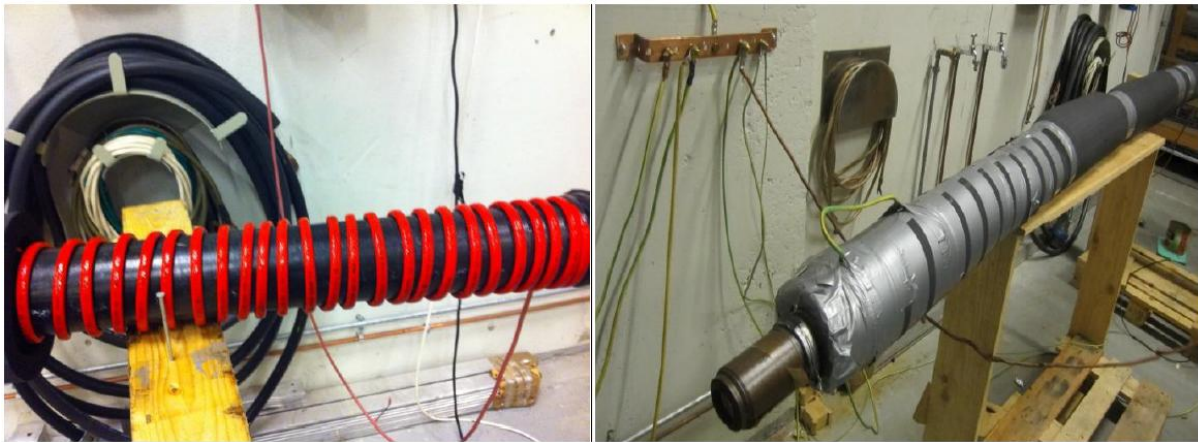
Delene ble koblet inn i målekretsen ved å slå en kobberspiker inn i kobberlederen, og en spiker inn i blykappen.

Dimensjonene og kapasiteten til kabelen var fra tidligere nøyaktig målt slik at de kunne brukes i beregninger av resultatene. Kapasiteten til kabelen ble målt med et Agilent U1701b, resultatet av disse målingene ses i tabell 3.1.

Enhet	Målt verdi
Kapasitans	1040 pF
Radius _{leder}	15 mm
Radius _{ytte}	41 mm
Tykkelse _{isolasjon}	26 mm
L_{kabel} (kun med elektrode)	390 cm
Permittivitet	3,48

Tabell 3.1, kabelens dimensjoner

3.1.1.1- Temperaturstyring



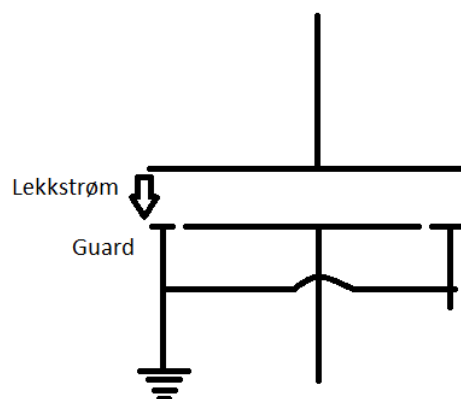
Figur 3.1 a) Prøveobjektet med varmekabel b) Prøveobjektet med skumgummiisolasjon [3]

For å kunne styre kabelens temperatur, ble kabelen kledd med en selvregulerende varmekabel, det vil si at temperaturen kunne styres ved hjelp av en termostat. Varmekabelen var 50 meter lang, og ble surret rundt kabelen som en spiral (se figur 3.1)[3]. For å beskytte målekretsen mot forstyrrelser fra varmekabelen ble det lagt på en skjerm mellom PE-kappen og varmekabelen. Skjermen var laget av aluminiumsfolie og aluminiumsteip, denne ble så jordet i den ene enden av kabelen (vist på figur 3.1 b). Utenpå varmekabelen ble det tredd en 5 cm tykk skumgummiisolasjon, vist i figur 3.1 b). Varmekabelen og isolasjonen dekker den delen av kabelen hvor PE-kappen og blykappen ikke er fjernet (3,72 m).

Selve varmekabelen hadde en kapasitet på 1 kW, og en maks temperatur på 65 grader celsius[3].

3.1.1.2 Guard

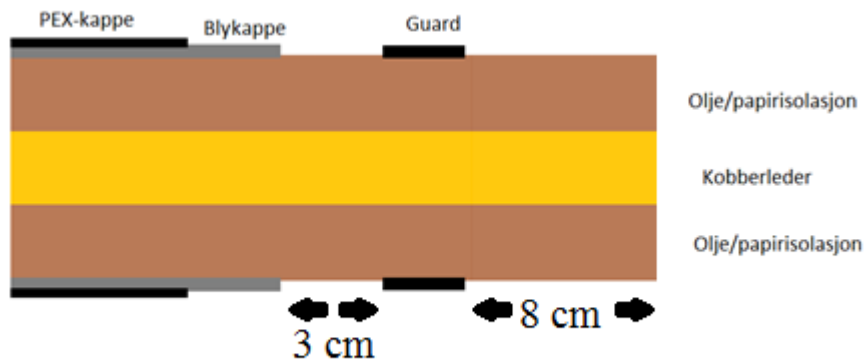
For å måle polarisasjonsstrømmen og depolarisasjonsstrømmen på en mest mulig nøyaktig måte, må lekkstrømmene isoleres bort. Dette gjøres ved å lage en guard.



Figur 3.2 Elektronisk skisse av guard

En guard bruker en lav impedans leder, som omringer og holder samme potensialet som høy impedansekreten. [17] Denne vil så fjerne uønskede strømmer og spenninger fra kretsen.

Guarden brukt i denne kretsen blir som vist i figur 3.2 koblet mot jord slik at den gir null potensial på hver side av måleobjektet. Dette gjøres for å lede lekkstrømmene i kabelendene til jord, og ikke gjennom elektrometret.



Figur 3.3 Skisse over plassering av guard

Guarden ble laget ved å kutte ut en 1 cm tykk ring av blykappen i hver ende, plasseringen til guarden er vist i figur 3.3. Avstanden ble valgt slik at kabelen tålte et spenningspåtrykk på 25 kV. Avstanden ble bestemt etter pd-måling av kabelen (se vedlegg A). For å forbedre feltforholdene ved kabelendene ble det også plassert en koronaring i den ikke spenningsatte enden, mens det i den spenningsatte enden ble lagt leire rundt kobberspikeren.



Figur 3.4 Leire og koronaring

3.1.2 12 kV PEX kabel

Prøveobjekt nummer 2 er en 33 meter lang del av en 12 kV HVDC PEX kabel, som også skal brukes til å måle tidsvarierende polarisasjon på tvers av kabelisolasjonen.

Kabelen var kveilet sammen slik at den var lettere å håndtere, se figur 2.4. Kapasiteten til kabelen ble målt med et "Escort ELC-131D Dual display LCR meter"(vedlegg I).

Dimensjonene til kabelen ses i tabell 3.2.

Enhet	Målt verdi
Kapasitans	7583 pF
Radius _{leder}	7 mm
Tykkelse _{isolasjon}	4 mm
L_{kabel} (kun med elektrode)	33 m
Permittivitet	2,3

Tabell 3.2

På dette prøveobjektet fungerer aluminiumslederen som spenningsleder, og kobberskjermen som måleelektroden. Dette ble gjort for å gjøre målekretsen mest mulig identisk med den brukt for måling av massekabelen.

3.1.2.1- Temperaturstyring



Figur 3.5a) Prøveobjektet med varmekabel b) Prøveobjektet med skumgummiisolasjon

For å kunne styre kabelens temperatur, ble kabelen kledd med en regulerende varmekabel. Varmekabelen som ble brukt var 35 meter lang, og ble surret rundt kabelen som en spiral (se figur 3.5 a). For å beskytte målekretsen mot forstyrrelser fra varmekabelen, ble det lagt på en skjerm mellom kabelen og varmekabelen. Denne skjermen var som for massekabel laget av aluminiumsfolie og aluminiumsteip (se figur 3.5 a). Utenpå varmekabelen var det tredd på en 5 cm tykk skumgummiisolasjon, vist i figur 3.5 b).

Selve varmekabelen hadde en kapasitet på 17 W/m, og en maks temperatur på 120 grader celsius.

Det ble også for dette prøveobjektet laget guard (se kapitel 3.1.1.2). Guarden ble plassert på endeavslutningene til kabelen, som er plassert 14 cm inn på kabelen (se figur 3.6).



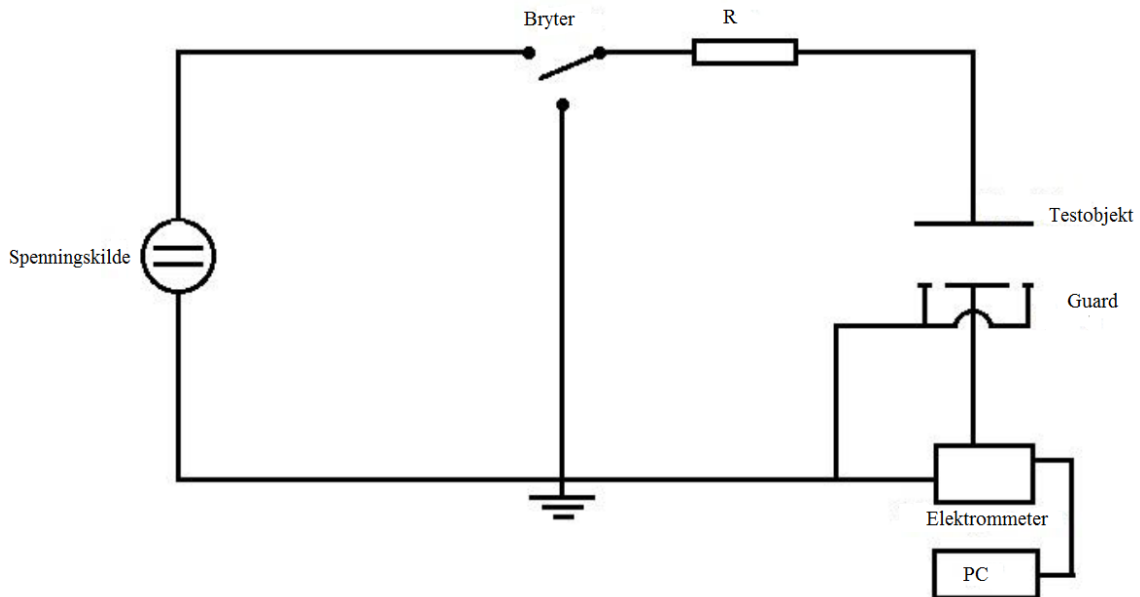
Figur 3.6, Guard plassering PEX.

For dette testobjektet ble det også plassert inn en koronaring, denne ble plassert på den spenningsatte enden (se figur 3.7).



Figur 3.7, Koronaring

3.2- Målekrets



Figur 3.8 Målekretsen brukt under prosjektet [3]

Målekretsen brukt under forsøkene er vist i figur 3.8. Kretsen består av en DC spenningskilde, en høyspenningsbryter, en motstand, et testobjekt med guard, et måleinstrument og en PC. Det vil være behov for å legge inn et vern for å beskytte elektrometret, dette legges inn mellom testobjektet og elektrometret. Det ble gjort flere forsøk på å finne et optimalt fungerende vern, det vil bli beskrevet mer detaljert senere i dette kapittelet.

DC Spenningskilden brukt under forsøkene er av typen Fug HCP 140(datablad i vedlegg F). Dette er en 35 kV spenningskilden med en stabilitet på $\pm 10^{-4} \% / 8 \text{ t}$. Det er viktig at spenningskilden brukt under forsøket er stabil, da momentane endringer i spenningen vil kunne ses på som påtrykte trinnspenninger. Slike endringer vil påvirke polarisasjonsstrømmen, og vil gi dårlige måleresultater. For å kunne koble høyspenningskabelen, som skulle gå mellom spenningskilden og bryteren, til spenningskilden måtte det lages en spesialtilpasset kobling. Hvordan dette ble gjort kan ses i vedlegg H.

Høyspenningsbryteren er en enkel trepunktsbryter som vist i figur 3.4. Bryteren kan veksle mellom jord og DC kilden. Maks spenning bryteren kan bryte, er 40 kV DC. Bryteren er drevet av en spole, som lades opp av en 230 V AC spenning. Denne spenningen fås ved å koble bryteren til en Variac stilt til 230 V. Bryteren løses ut med en 5 V DC spenning, og hvordan dette gjøres vil bli beskrevet senere i dette kapittelet.

Motstanden som er plassert i kretsen måtte dimensjoneres på en slik måte at den begrenset lade-/kortslutningsstrømmen inn i elektrometret. Maks strøm tillatt inn i elektrometret er på 1 mA[18]. Et annet kriterium for motstanden var at den også måtte tåle spenningen som ble påtrykt av spenningskilden. Formålet med prosjektet var å lage en krets som skulle kunne takle en påtrykt spenning på 35 kV DC, dermed ble motstanden valgt til denne kretsen

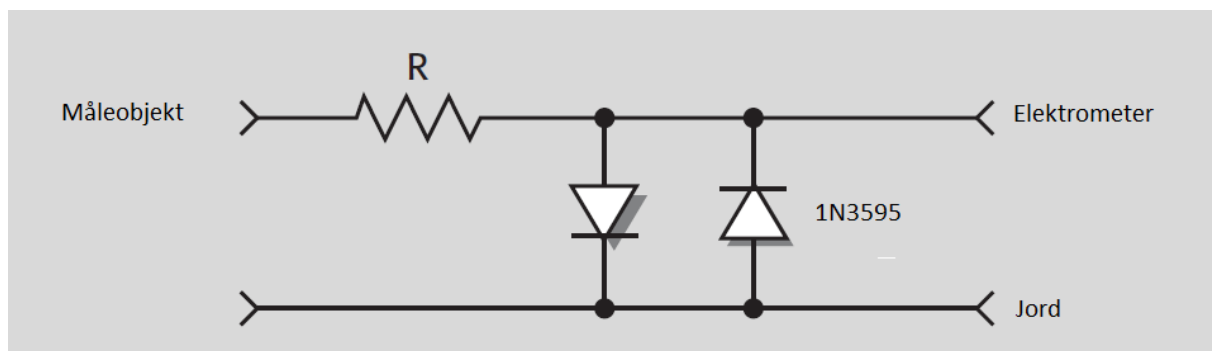
dimensjonert for å tåle 45 kV. Denne motstanden hadde en resistans på 100 M Ω , det gir en maks strøm på 0,35 mA (påtrykt 35 kV).

Det ene måleinstrumentet som ble brukt under forsøkene var et elektrometer, av typen Keithley 6517A. Dette elektrometret har måleområder fra 20 pA til 20 mA [18]. Det gjør at elektrometret er så følsomt, at det kan måle strømmer ned til 0,1 pA. Derfor blir elektrometret blir ekstremt følsomt ovenfor høye strømmer og spenninger inn i apparatet. Maks spenning tillatt inn i apparatet er 250 V DC. I det bryteren slår over vil det gå en transientspenning som er mye høyere enn spenningen ut fra kilden i kretsen. For å hindre at denne spenningen skal ødelegge elektrometret anbefaler Keithley at det plasseres inn en krets for å beskytte elektrometret [19].

Det andre måleinstrumentet var et picoampermeter, av typen Keithley 6485. Dette har måleområder fra 20 mA ned til 2 nA, og kan dermed måle strøm fra 20 fA til 21 mA [20]. Derfor er dette instrumentet også er følsomt, og Keithley anbefaler også å verne dette instrumentet.

3.2.1 Vern 1

Den kretsen Keithley anbefaler vil i denne rapporten bli benevnt som vern 1. Kretsen består av en motstand og to dioder av typen 1N3595 (datablad i vedlegg C), vist i figur 3.9.



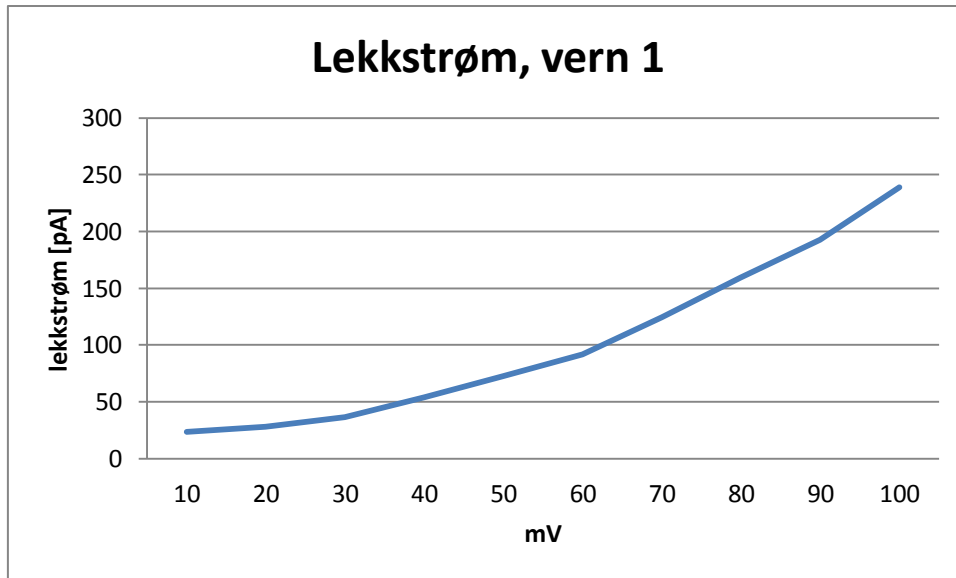
Figur 3.9 Skisse av vern 1 [19]

Motstanden i vernet må være stor nok til å begrense strømmen gjennom diodene, det vil sørge for at man unngår skade på diodene. Den må være stor nok til at den klarer å motstå den påtrykte spenningen. Et holdepunkt for dimensjoneringen av motstanden er at den skal klare å forårsake et spenningsfall på minst 1 V ved maks polarisasjonsstrøm. I dette tilfellet ble motstanden satt til 12 k Ω .

Diodene som brukes i vernet er koblet i parallell og i motsatt retning av hverandre, slik at de beskytter uansett hvilken polaritet signalet inn i vernet har. Diodene trenger en spenning på 0,6 V for å lede. Ved normalt signal er spenningen i størrelsesorden nV-pV, og diodene vil ikke lede. Hvis strømmen inn i vernet blir større enn 50 μ A eller 0,6 V, vil diodene lede signalet rett til jord. I følge Keithley er lekkstrømmen til diodene mindre enn 1 pA, selv med en spenning på 1 mV, slik at vernet ikke skal påvirke på 10 pA eller mer [19].

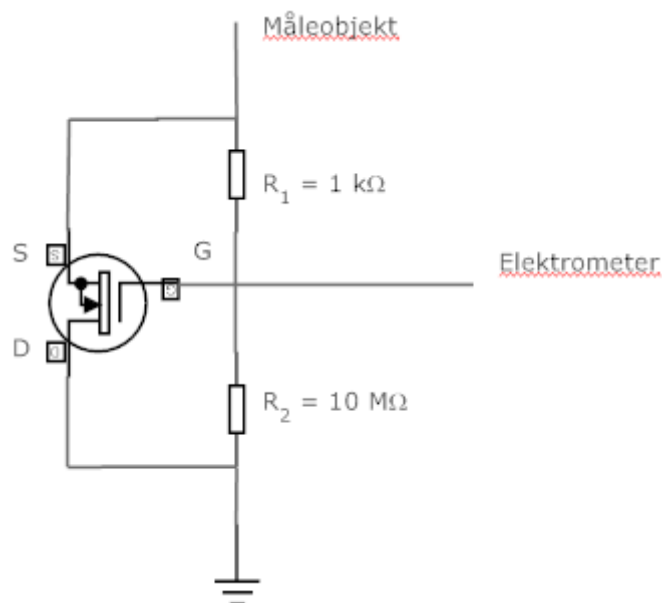
Diodene er også fotosensitive, derfor ble vernet plassert i en metallboks.

Dette vernet kunne ikke brukes under forsøkene, da det viste seg at det påvirket målingene. Tester viste at lekkstrømmen var større enn det Keithley sier at den vil være, og man ble dermed nødt til å se etter en annen løsning[19]. Vernet ble testet ved å påtrykke den en kjent spenning, for så å måle lekkstrømmen. Resultatet fra testen kan ses i figur 3.10.



Figur 3.10 Lekkstrøm vern 1.

3.2.2 Vern 2



Figur 3.11 Skisse av vern 3

Det neste vernet forsøkt plassert inn i målekretsen består av en MOSFET transistor (se datablad i vedlegg D) og to motstander, koblet som vist i figur 3.11. Formålet med å bruke en

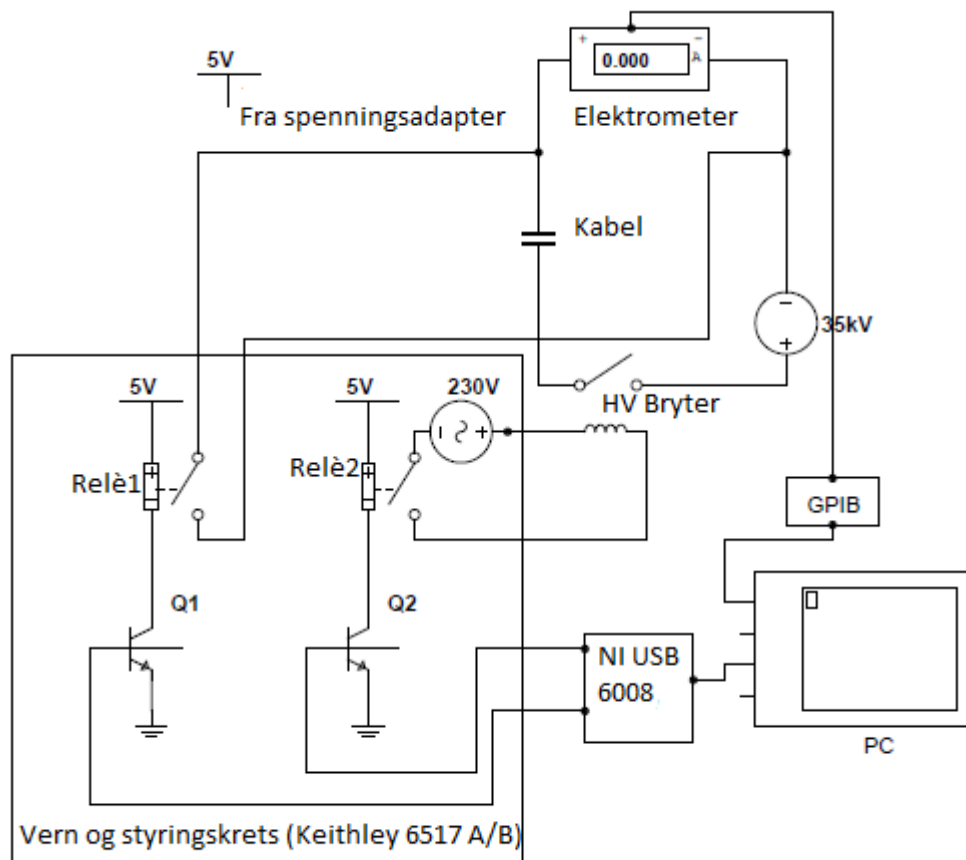
MOSFET transistor var at dette ville redusere lekkstrømmen, som var et stort problem i vern 1.

Funksjonen til motstand R_1 var å beskytte kretsen ved strømmåling, samme funksjon som motstanden i vern1.

Motstand R_2 skulle sørge for at det ble generert nok spenning i vernet til å tenne "Gate", den skulle også sørge for spenningsdeling, det ble gjort for å sette arbeidsbetingelsene for transistoren. Dermed var det mulig å bruke vernet for å måle spenning med et voltmeter. R_2 hadde også som formål å fjerne spenningen fra MOSFET transistoren, slik at spenningen ikke ble stående over "Gate". Dette sørget for at MOSFET transistoren ikke bare hadde en funksjon, men at den både kunne skrus av og på.

Etter å ha prøvd å gjennomføre forsøk med dette vernet koblet inn i kretsen mellom måleobjektet og elektrometret oppnådde man ikke de måleverdiene man hadde sett for seg. Grunnen til det viste seg å være at 10 M Ω motsanden kortsluttet inngangen til elektrometret. Dermed måtte også det forslaget forkastes.

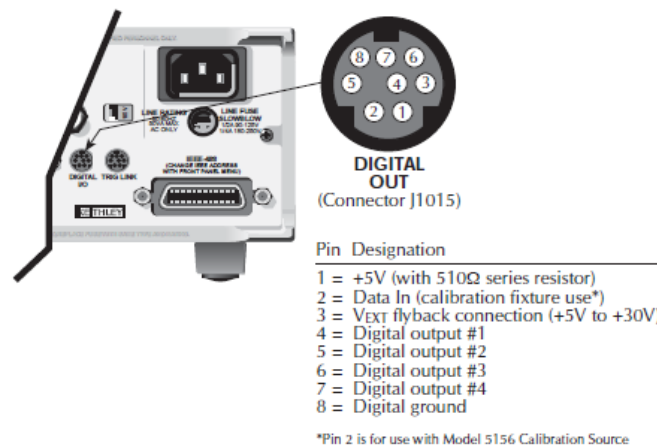
3.2.3 Vern 3



Figur 3.12 Skisse av vern 3.

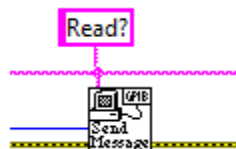
Den endelige løsningen ble å lage et vern bestående av to relé, to transistorer (se datablad i vedlegg E), og en datainnsamlingsenhet fra National Instruments (USB-6008).

Det ene releet ble koblet i parallell med elektrometret (vist i figur 3.12 som relè1). Relé 1 slås på før bryteroperasjoner gjennomføres, for å lede strømmen forbi elektrometret og til jord, for så å slås av når det skal gjennomføres målinger. Releet styres av et dataprogram som vil bli forklart senere i dette kapittelet. Dataprogrammet sender signal til det som i figur 3.12 benevnes som NI USB-6008 (se datablad i vedlegg G). Denne enheten gir ut et 5V signal for å styre en transistor, som igjen slår på releet.



Figur 3.13 Digital utgang på elektrometer Keithley 6517A

I utgangspunktet skulle bryteren i målekretsen styres ved å koble utløsermekanismen til den digitale utgangen på elektrometret (vist i figur 3.13), som vil kunne sende ut et 5V DC signal. Planen ble i midlertidig forkastet da det viste seg at det ikke lot seg gjøre, slik LabVIEW programmet var programmert. Figur 3.14 viser en VI (vil bli forklart nærmere senere i dette kapittelet) fra en tidligere utgave av det endelige programmet. Denne delen av programmet skal gi signal til elektrometret om at det nå skal sende målingene til PC-en. Kommandoene fungerte som den skulle, men i det elektrometret fikk beskjed om å sende måleresultatene til PC-en, sluttet den å sende signal til bryteren gjennom den digitale utgangen. Dette førte til at bryteren slo seg av tidligere enn planlagt, og førte til at polarisasjonsstrømmen ikke ble målt.



Figur 3.14, Avlesnings VI i LabVIEW

Dermed gikk man bort fra styring av kretsen ved å bruke elektrometret, og tok i bruk NI USB-6008. Denne enheten ble koblet til et relé (Relé 2 i figur 3.12), som vist i figur 3.12. LabVIEW programmet ble omprogrammert slik at det ga beskjed til NI USB-6008, som så sendte ut et 5V signal til releet som ved aktivering sørget for å slå på bryteren i kretsen.

3.3 Logger- og styringssystem

En viktig del av masteroppgaven, var å få laget en optimal målemetodikk. Den beste løsningen for vern ble funnet i fordypningsprosjektet, som ledet opp til masteroppgaven. Det som måtte gjøres for å utbedre målemetodikken videre var å lage dataprogram, som kunne brukes for begge måleinstrumentene i LabVIEW. Det viste seg at det ikke var mulig å lage et enkelt program, for bruk av begge instrumentene, da måleinstrumentene ikke bruker de samme VI-ene (se figur 3.15). Figur 3.12 viser den endelige målekretsen som ble brukt til å gjennomføre forsøk for denne masteroppgaven. For å kunne gjennomføre disse målingene elektronisk var man, som figuren viser, avhengig av at LabVIEW-programmet både kunne kommunisere med måleinstrumentet og NI USB-6008 enheten.

Kommunikasjonen mellom programmet og måleinstrumentet ble gjort gjennom en GPIB til USB enhet som overførte måleresultatene til PC-en. For at programmet skulle kommunisere med måleinstrumentet, var man avhengig av at de ulike interne programmene. De såkalte virtuelle instrumenter (VI), var en del av Keithley LabVIEWdriver pakken, for det måleinstrumentet som ble brukt. I dette tilfellet måtte dermed alle de interne programmene, som skulle kommunisere med måleinstrumentet, være en del av KE6517 eller 6485 LabVIEW LLB.



Figur 3.15 VI biblioteket til Keithley 6517 og 6485

Kommunikasjon mellom programmet og NI USB-6008 ble gjort gjennom en USB til USB kontakt, som overførte signal til enheten. Den sendte så ut de ulike signalene til styring av kretsen. I programmet ble kommunikasjonene styrt av egne virtuelle instrumenter, såkalte ”DAQ Assistant Express VI”.



Figur 3.16 Styrings VI for USB-6008

Hovedfunksjonen til de to programmene som ble laget var identiske, og i hvilken rekkefølge programmet kommuniserer de ulike operasjonene, er satt opp i tabell 3.3.

Tid [sekunder]	Funksjon
0 s	Programmet startes
0 s	"ZeroCheck" aktiveres
1 s	NI USB-6008 resettes, slik at den er klar til bruk
3 s	Relè1 slås på
5 s	Relè2 slås på og bryteren slår over til spenningskilden
7 s	Relè1 slås av
7 s	"ZeroCheck" deaktiveres
7 s	Logging av polarisasjonsstrømmen starter
7 s + "Switch ON time (s)"	Logging av polarisasjonsstrømmen avsluttes
7 s + "Switch ON time (s)"	"ZeroCheck" aktiveres
7 s + "Switch ON time (s)" + 2 s	Relè1 slås på
7 s + "Switch ON time (s)" + 4 s	Relè2 og Bryteren slås av
7 s + "Switch ON time (s)" + 6 s	Relè1 slås av
7 s + "Switch ON time (s)" + 6 s	"ZeroCheck" deaktiveres
7 s + "Switch ON time (s)" + 6 s	Logging av depolarisasjonsstrømmen stater
7 s + "Switch ON time (s)" + 6 s + "Switch OFF time (s)"	Logging av depolarisasjonsstrømmen avsluttes
7 s + "Switch ON time (s)" + 6 s + "Switch OFF time (s)"	"ZeroCheck" aktiveres
7 s + "Switch ON time (s)" + 6 s + "Switch OFF time (s)"	Programmet avsluttes

Tabell 3.3, LabVIEW programmet oppbygning

Tabell 3.3 viser de ulike funksjonene til måleinstrumentet, en av disse operasjonene er aktiveringen og deaktiveringen av "ZeroCheck". "ZeroCheck" er en beskyttelsesfunksjon. Den gjør at inngangen til måleinstrumentet kobles over en 10 MΩ motstand, istedenfor igjennom selve apparatet, der inngangsimpedansen er $> T\Omega$. På grunn av den høye inngangsimpedansen skal det lite til før måleinstrumentet overbelastes. I det bryteren slår over genereres det transientspenninger, det er viktig at instrumentet er best mulig beskyttet for disse, dermed er det viktig at "ZeroCheck" er aktivert når NI USB-6008 enheten gjør endringer i kretsens oppsett.

Målingene gjort av måleinstrumentet ble lest av programmet. Hvor ofte programmet leser av instrumentet bestemmes i programmet. Funksjonen for å kunne gjøre dette heter i programmene "Delay Time (s)", og sier hvor lenge programmet skal vente før den leser av neste måling. For forsøkene gjort med elektrometret var tiden satt til 10 sekunder, mens tiden var 1 sekund for picoampermetret.

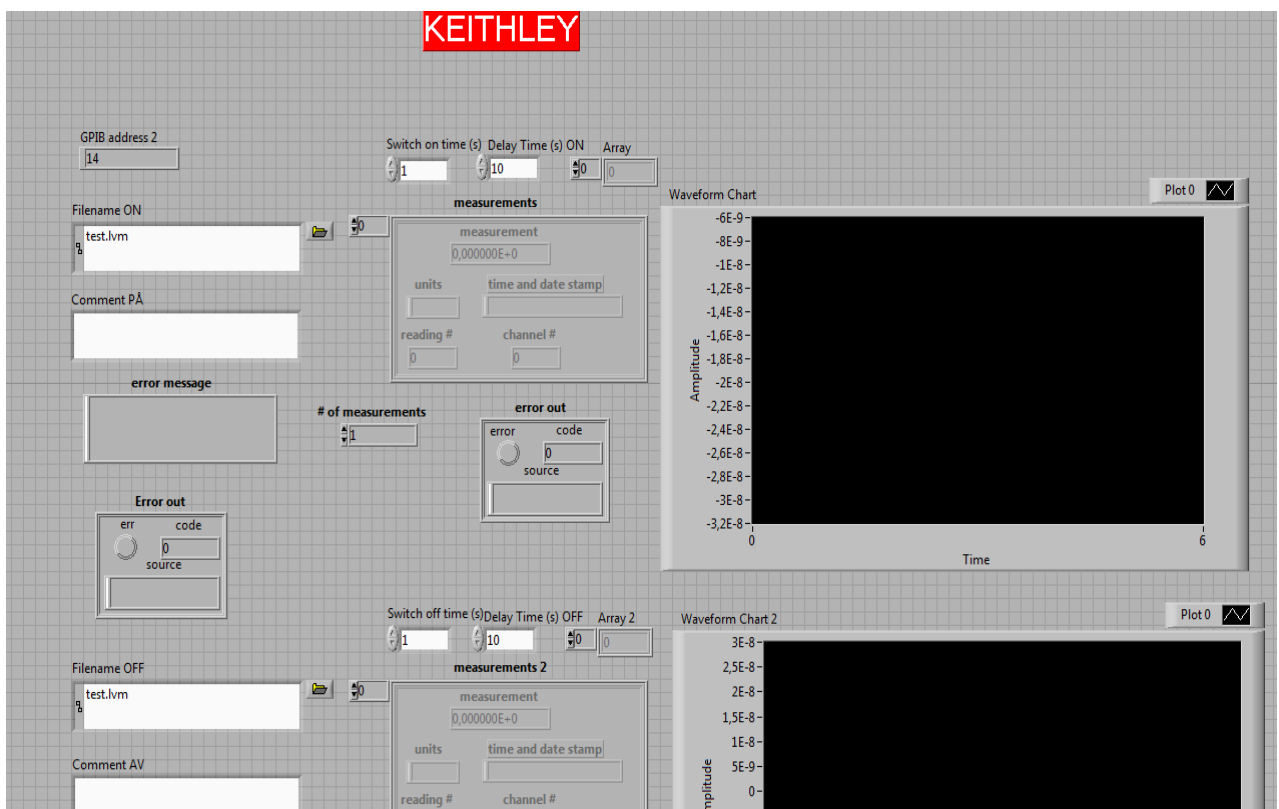
Programmene har også en funksjon for å styre hvor lenge programmet skal utføre målinger. For måling av polarisasjonsstrømmen, vil det si hvor lenge bryteren skal være koblet inn. Dette styres av funksjonen "Switch ON time (s)". Den samme funksjonen brukes også for å styre tiden man skal måle depolarisasjonsstrømmen. Funksjonen heter i dette tilfellet "Switch

OFF time (s)”. Når denne fastsatte tiden er gått avsluttes depolarisasjonsstrøms målingene ved at programmet setter på ”ZeroCheck”-funksjonen til instrumentet.

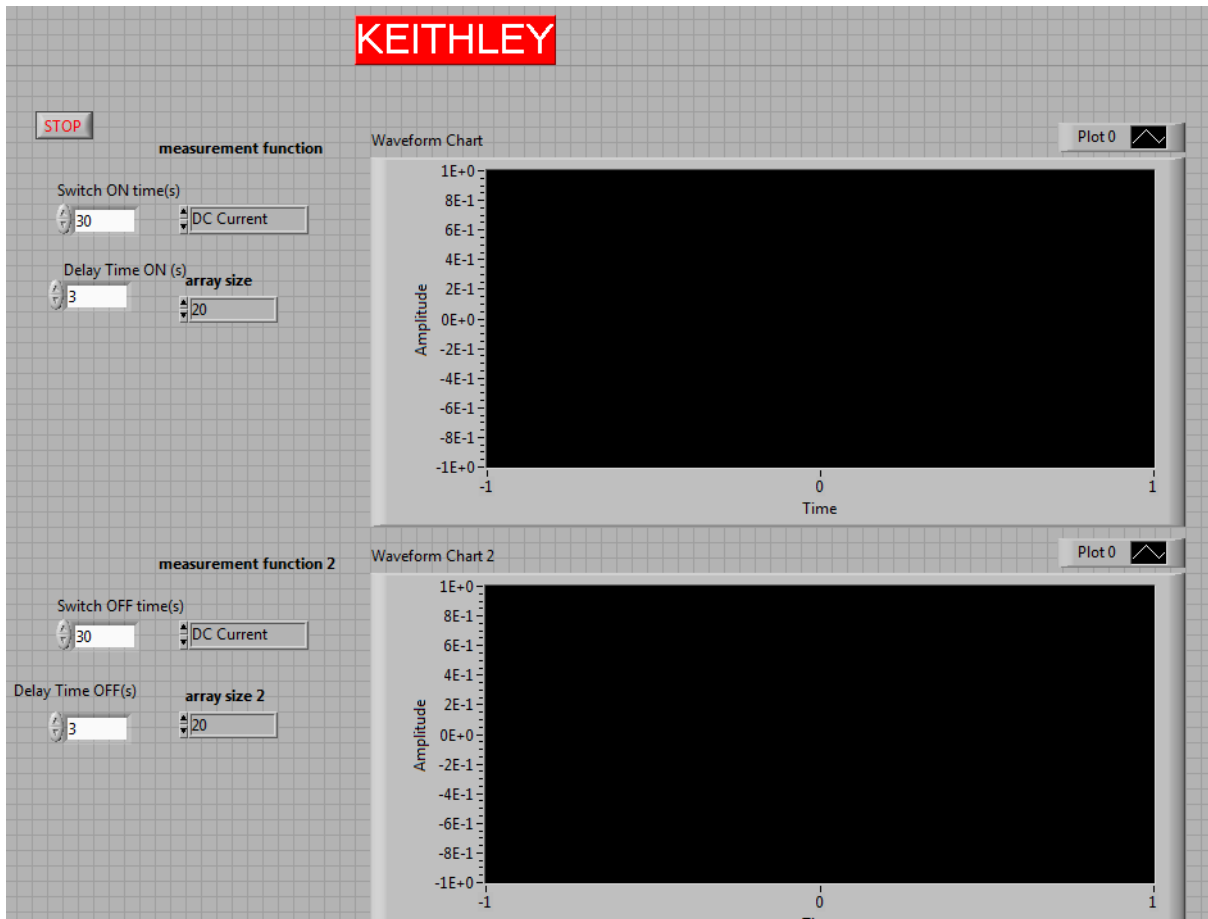
I den endelige versjonen av programmet til elektrometret, ble det lagt opp slik at programmet styrte hvilket måleområde det skulle måles i, gitt strømmen inn i elektrometret. Dette kan ses i flytdiagrammet til programmet i vedlegg J1. Dette ble gjort da det viste seg at elektrometret ikke målte likt i alle måleområdene, det var dermed ikke mulig å bruke funksjonen ”autorange”.

”Autorange” ble derimot brukt i programmet til picoamperemetret, da dette instrumentet målte likt i alle måleområder. Flytdiagrammet til dette programmet kan ses i vedlegg J2.

Hvordan selve programvindue ser ut kan man se i figur 3.17 og 3.18.



Figur 3.17 Programvindu LabVIEW for 6517A



Figur 3.18 Programvindu LabVIEW for 6485

3.4 Måleprosedyre

Temperaturen under forsøkene ble målt både med termometer plassert i rommet, og ved bruk av termoelement plassert i testobjektet. Termoelementet for massekabelen ble plassert mellom PE-kappen og blykappen, midt på kabelen, mens den for PEX kabelen ble plassert mellom kabelen i kveilen. Temperaturen målt av termoelementet ble registrert ved å bruke en Agilent 34972A koblet til en PC, som logget målingen med loggerprogrammet "BenchLink Agilent DataLogger 3".

Forsøkene gjort på massekabelen ble utført med en påsatt temperatur på:

- Romtemperatur (16°C)
- 30 °C
- 40 °C
- 50 °C
- 60 °C

Forsøkene gjort på PEX kabelen ble utført med en påsatt temperatur på:

- Romtemperatur (16°C)
- 40 °C
- 50 °C
- 60 °C
- 80 °C

Da målingene ble utført fra januar 2012 til mai 2012 var romtemperaturen i laboratoriet lav, og dette førte til at romtemperaturen ble målt til bare 16 grader celsius.

Forsøkene i denne masteroppgaven ble gjort ved først å varme opp kabelen til en bestemt temperatur, for så å gjøre målinger på denne temperaturen ved ulike spenningsnivåer. Spenningsnivåene som ble tatt i bruk var 5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV og 25 kV.

Grunnen til at det ikke ble gjennomført målinger ved høyere spenningsnivåer, skyldes partielle utladninger i kabelendene ved høyere spenning (se vedlegg A). Disse utladningene påvirker målingene, og er ikke ønskelige.

For alle forsøkene ble polarisasjonsstrømmen målt i 3 timer ("Switch ON time (s)" satt til 10800 s), mens depolarisasjonsstrømmen ble målt i 20 timer ("Switch OFF time (s)" satt til 72000 s). Vanlig praksis for denne type målinger er at tidsforholdet er 1:10 (pol:depol), for å sørge for at kabelen blir utladet.

"Delay Time (s)", hvor ofte programmet skulle lese av målinger ble satt til 10 sekunder for massekabelen. 10 sekunder ble valgt da dette var kort nok tid til å måle de innledende polarisasjonsfenomenene, samtidig som at det ikke ga unødvendig mange måleverdier. Denne tiden måtte reduseres til 1 sekund for forsøkene gjort på PEX kabelen da strømmen endret seg forttere enn det den gjorde for massekabelen.

Dataprogrammet som ble brukt for å måle polarisasjonsstrømmen til massekabelen ved romtemperatur og 30 °C, kunne ikke bytte måleområdet til elektrometret. Måleområdet måtte dermed settes til 200 nA, da ”autorange” ikke var mulig å bruke. Det fordi det viste seg at elektrometret ikke målte det samme i alle måleområdene. Det ble testet ved å koble elektrometret til en kjent strøm, oppnådd ved å bruke et batteri og en kjent motstand. Elektrometret var kalibrert av Keithley 13. september 2011.

200 nA ble valgt som måleområdet da polarisasjonsstrømmen kunne måles mest nøyaktig innenfor dette måleområdet, sett i forhold til alternativene.

Da elektrometret viste seg ikke å være nøyaktig nok i dette måleområdet, for de laveste strømmene, målt når kabelen utlades, ble det gjort manuelle målinger hvert 10 sekund. Disse målingene ble gjort etter 72000 sekunder for å finne nøyaktig strøm. Figur 3.19 viser hvor nøyaktig elektrometret kan måle i de ulike måleområdene.

AMPS

RANGE	5½-DIGIT RESOLUTION	ACCURACY (1 Year) ¹ 18°-28°C	TEMPERATURE COEFFICIENT 0°-18°C & 28°-50°C
		±(%rdg+counts)	±(%rdg+counts)/°C
20 pA	100 aA ²	1 + 30	0.1 + 5
200 pA	1 fA ²	1 + 5	0.1 + 1
2 nA	10 fA	0.2 + 30	0.1 + 2
20 nA	100 fA	0.2 + 5	0.03 + 1
200 nA	1 pA	0.2 + 5	0.03 + 1
2 µA	10 pA	0.1 + 10	0.005 + 2
20 µA	100 pA	0.1 + 5	0.005 + 1
200 µA	1 nA	0.1 + 5	0.005 + 1
2 mA	10 nA	0.1 + 10	0.008 + 2
20 mA	100 nA	0.1 + 5	0.008 + 1

¹ When properly zeroed, 5½-digit, 1 PLC (power line cycle), median filter on, digital filter = 10 readings.

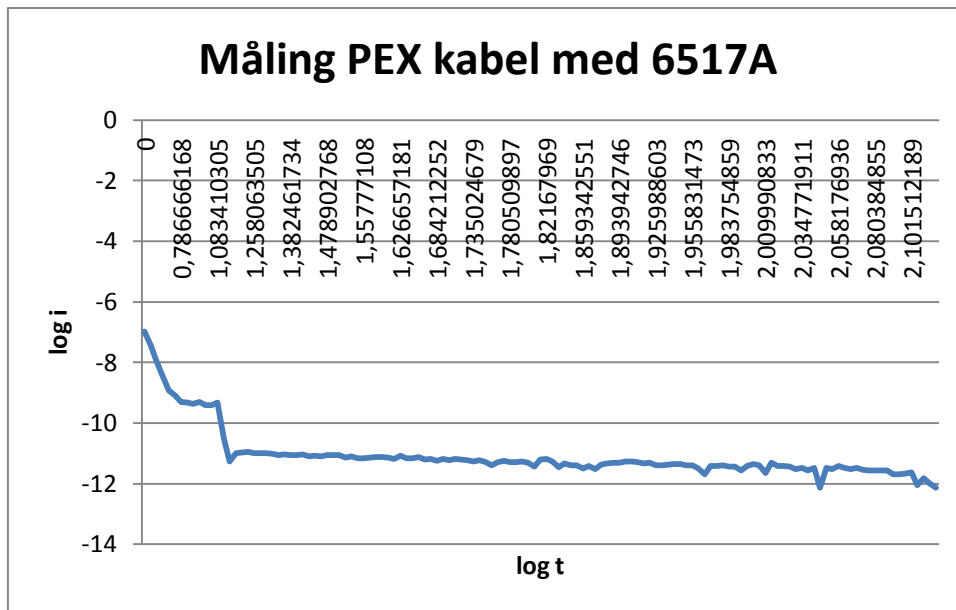
² aA=10-18A, fA=10-15A.

Figur 3.19 Nøyaktigheten til de ulike måleområdene (6517A) [18]

Fra 40 grader og oppover ble det brukt et utbedret dataprogram, som var programmert slik at den hoppet over de måleområdene som ikke målte det samme som de måleområdene man hadde tiltro til.

Dataprogrammet brukt til måling med picoampermetret var stilt inn på ”autorange”. Målinger gjort på dette instrumentet, viste at dette instrumentet ikke hadde det samme problemene som elektrometret. Picoampermetret var kalibrert av Keithley 24. august 2011.

Grunnen til at måleinstrumentet ble byttet for målingene gjort på PEX kabelen, var at det ved målinger gjort med elektrometret ble registrert et plutselig og uforklarlig fall i strømmen (se 3.20). Dermed ble det valgt å bytte måleinstrument, for å se om den samme feilen ble registrert. Det ble valgt å bytte til et picoamperemeter, da det ble tatt i bruk ble ikke det uønskede strømforløpet registrert.



Figur 3.20 Strømåling på PEX kabel med elektrometer

4- Resultater

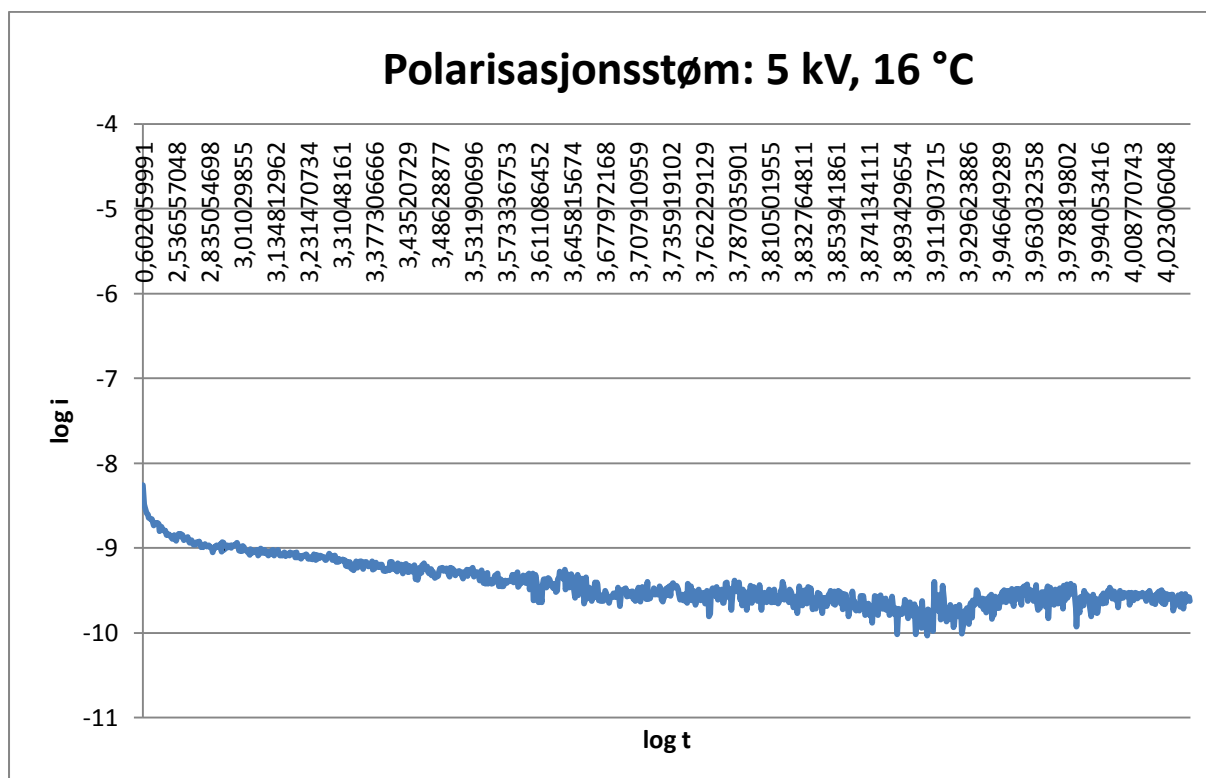
Det blitt gjennomført målinger ved ulike spenninger og temperaturer. Her vil noen resultatene fra disse målingene bli framstilt.

4.1 Måleresultater

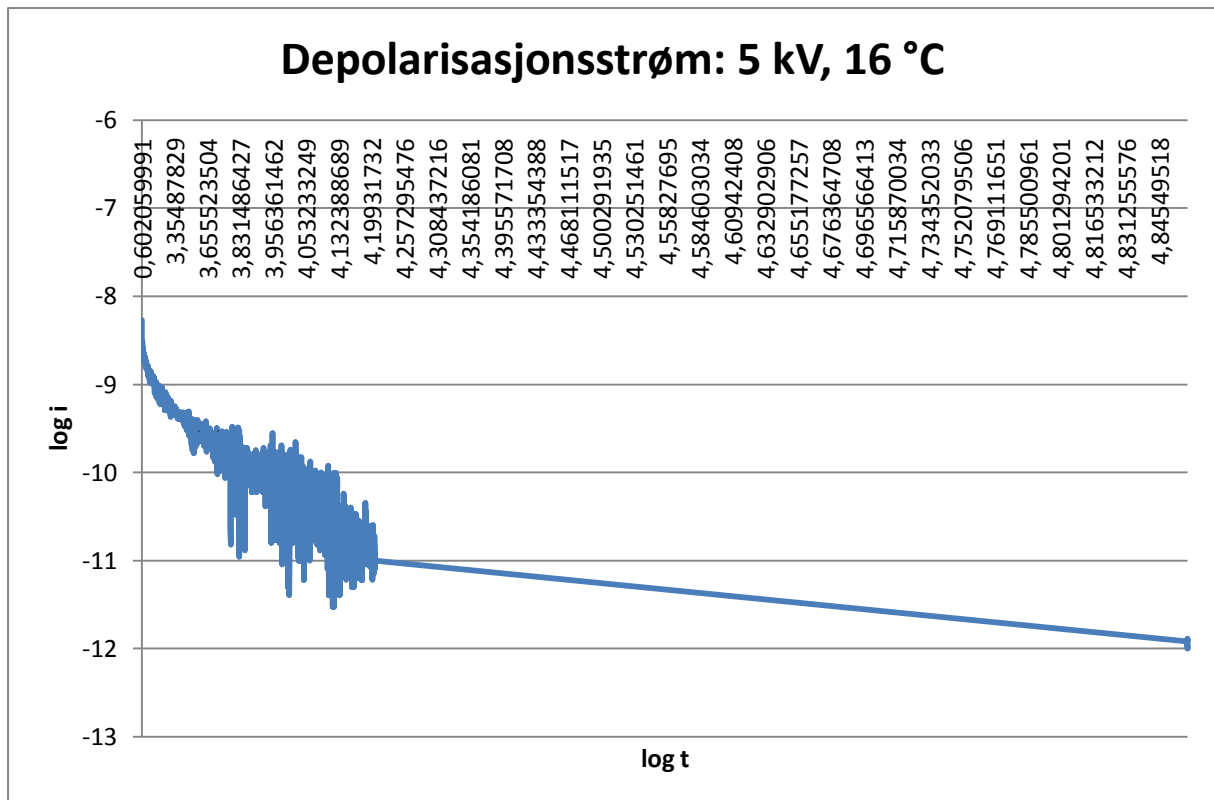
4.1.1 Massekabel

I dette kapitlet blir polarisasjonsstrømmen, depolarisasjonsstrømmen og I_{dc} for Massekabelen presentert. Siden det ble utført totalt 25 forsøk på massekabelen, vil ikke alle måleresultatene bli presentert i dette kapitlet. For flere måleresultater, se vedlegg B1.

5 kV, 16 °C:



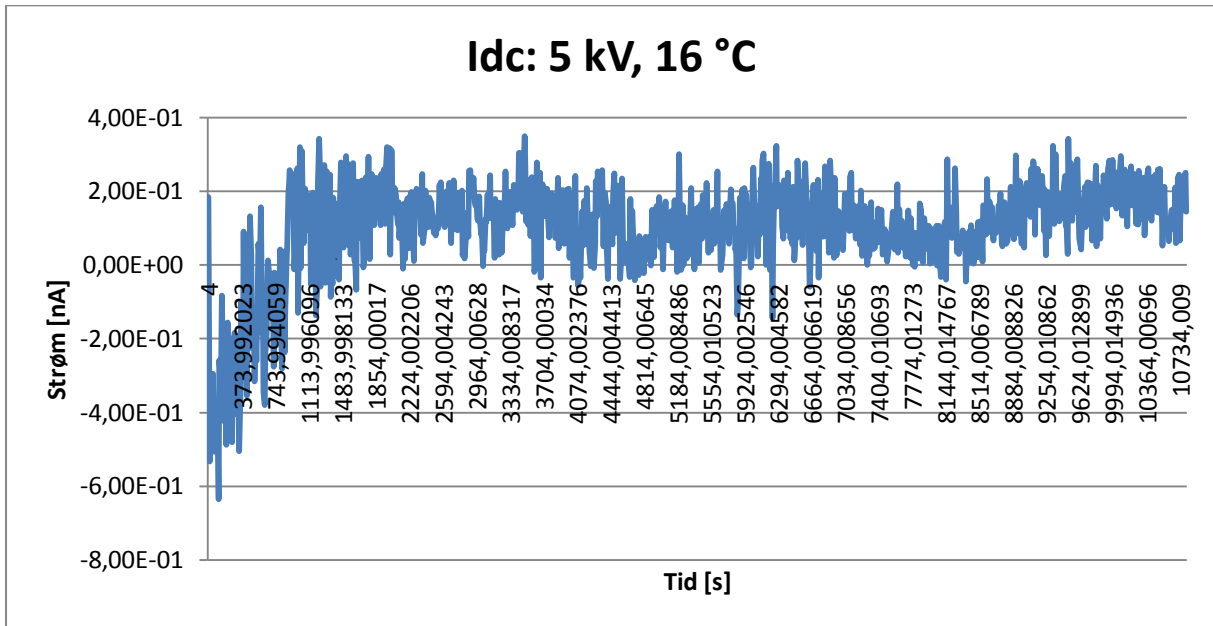
Figur 4.1 Polarisasjonsstrøm 5 kV, 16 °C plottet med logaritmiske strøm og tidsskala.



Figur 4.2 Depolarisasjonsstrøm 5 kV, 16 °C plottet med logaritmiske strøm og tidsskala.

Da disse målingene ble gjennomført med elektrometret permanent innstilt på måleområdet 200 nA, kan det tydelig ses at målingene blir mer og mer unøyaktige. Da strømmen kom ned mot nedre grense av måleområdet (se figur 3.19), kunne ikke målingene brukes. For å estimere strømmen etter dette ble det gjort manuelle målinger etter 72000 s, som beskrevet i kapittel 3.4.

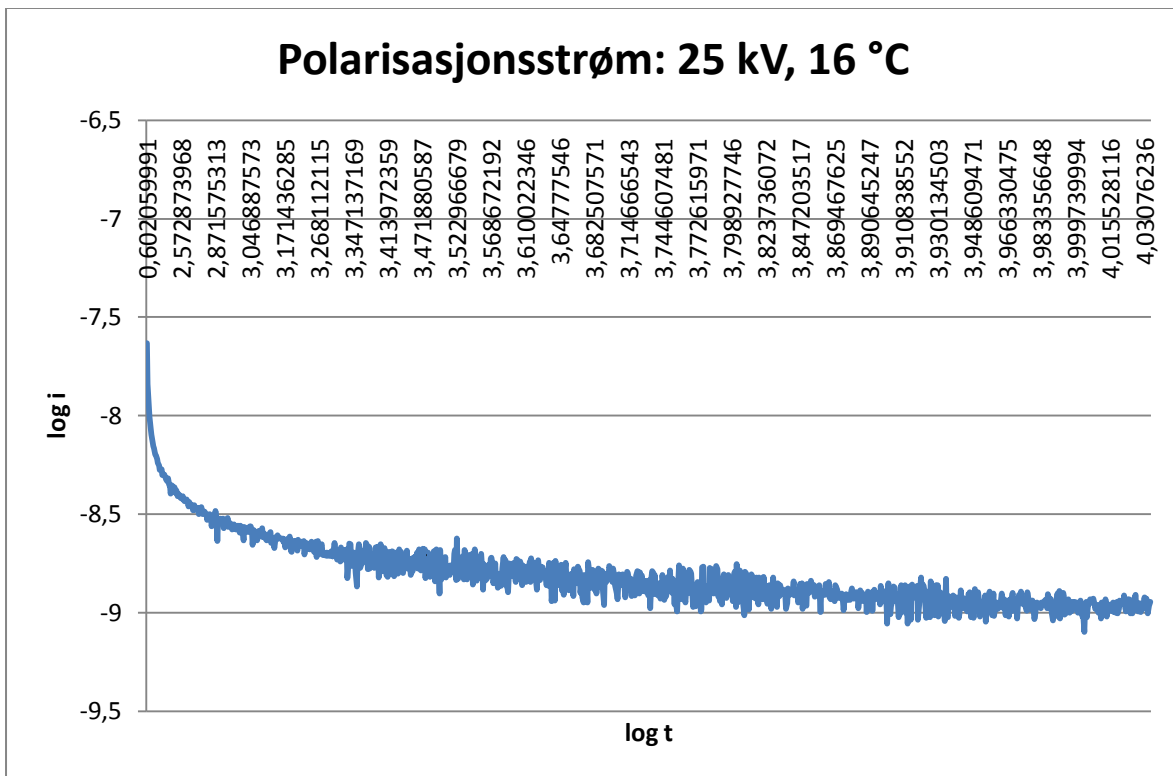
For å beregne ledningsevnen for dette forsøket ble DC-strømmen beregnet ved å bruke ligning 2.70:



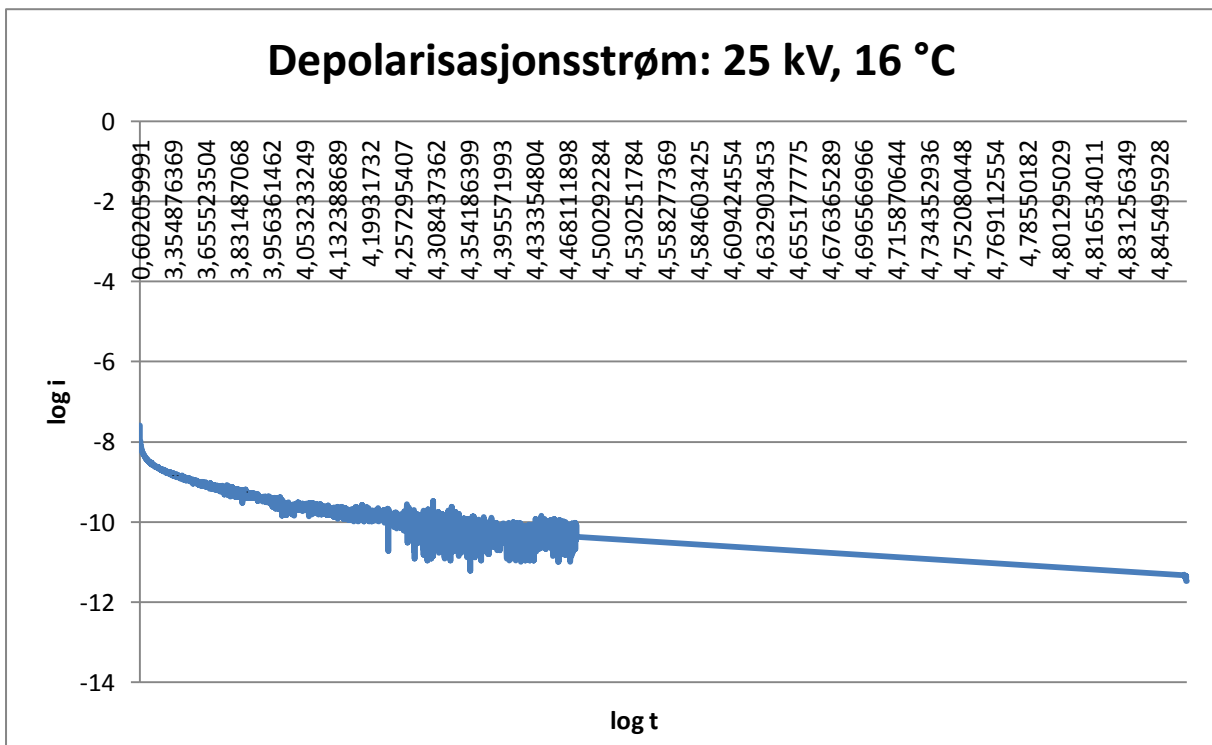
Figur 4.3 DC-strømmen 5 kV, 16 °C.

Ut fra figur 4.3 kan det ses at DC-strømmen er svært ustabil når kabelen er påtrykt et så lavt E-felt, sammen med lav temperatur. Det er også vært å merke seg at depolarisasjonsstrømmen er størst innledningsvis.

25 kV, 16 °C:

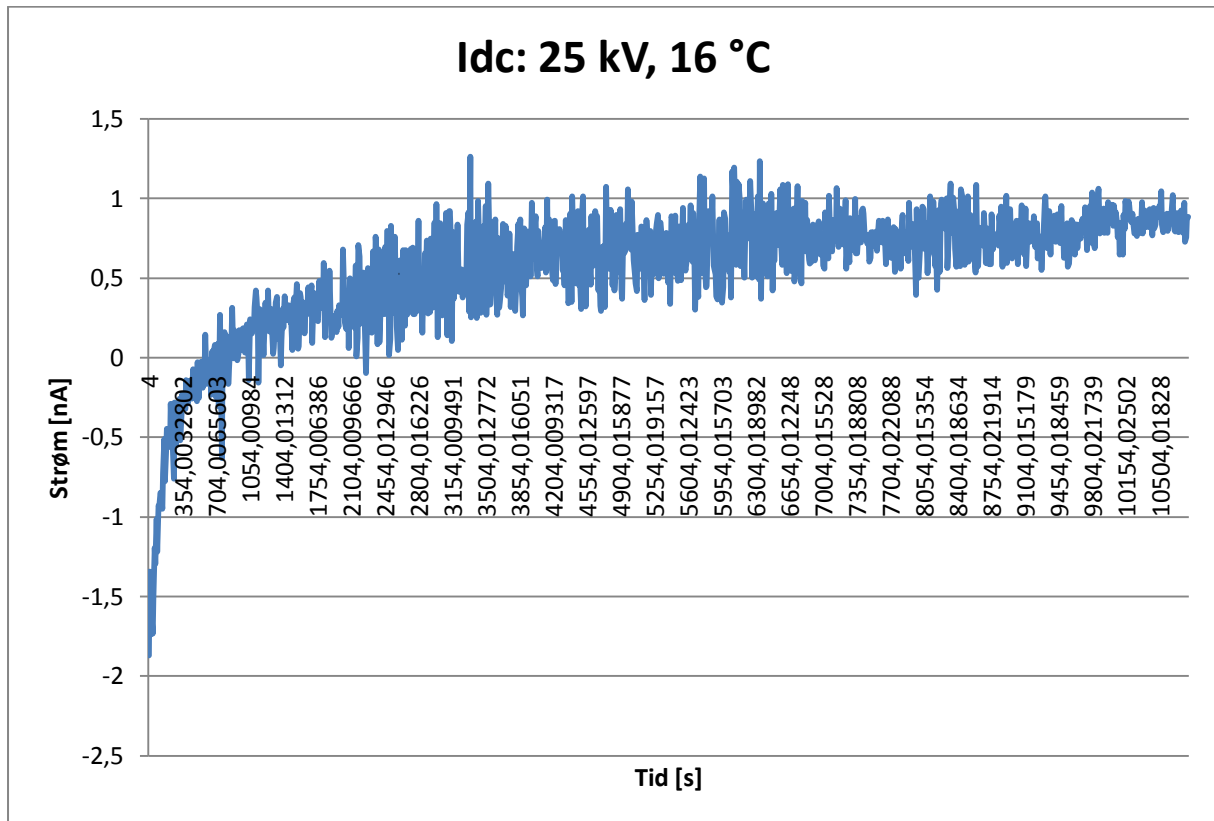


Figur 4.4 Polarisasjonsstrøm 25 kV, 16 °C plottet med logaritmiske strøm og tidsskala.



Figur 4.5 Depolarisasjonsstrøm 25 kV, 16 °C plottet med logaritmiske strøm og tidsskala.

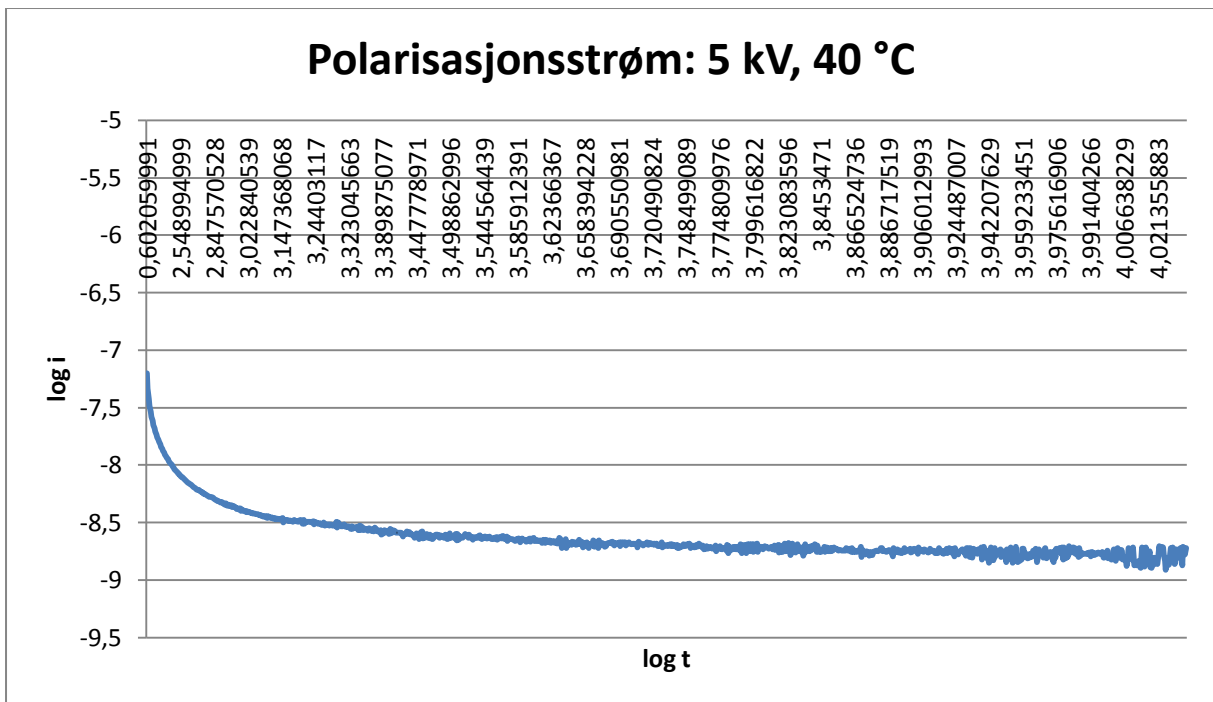
Figur 4.5 viser også at da strømmen kom ned mot 100 pA, var det ikke lengre mulig å stole på målingene elektrometret leste. Dermed ble det for dette forsøket gjennomført manuelle målinger.



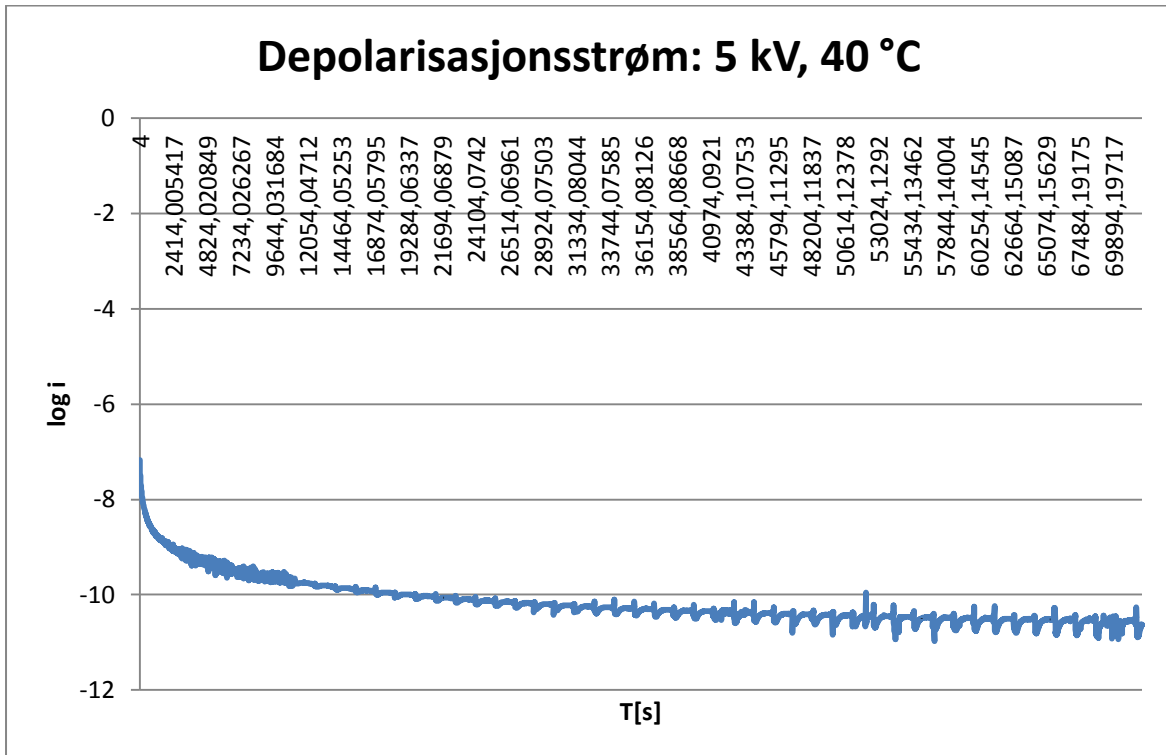
Figur 4.6 I_{dc} 25 kV, 16 °C

Ut fra figur 4.6 kan det ses at også i dette forsøket er depolarisasjonsstrømmen er størst innledningsvis. DC-strømmen ved å sammenligne med figur 4.3 blitt større ved å øke spenningen til kabelen.

5 kV, 40 °C:



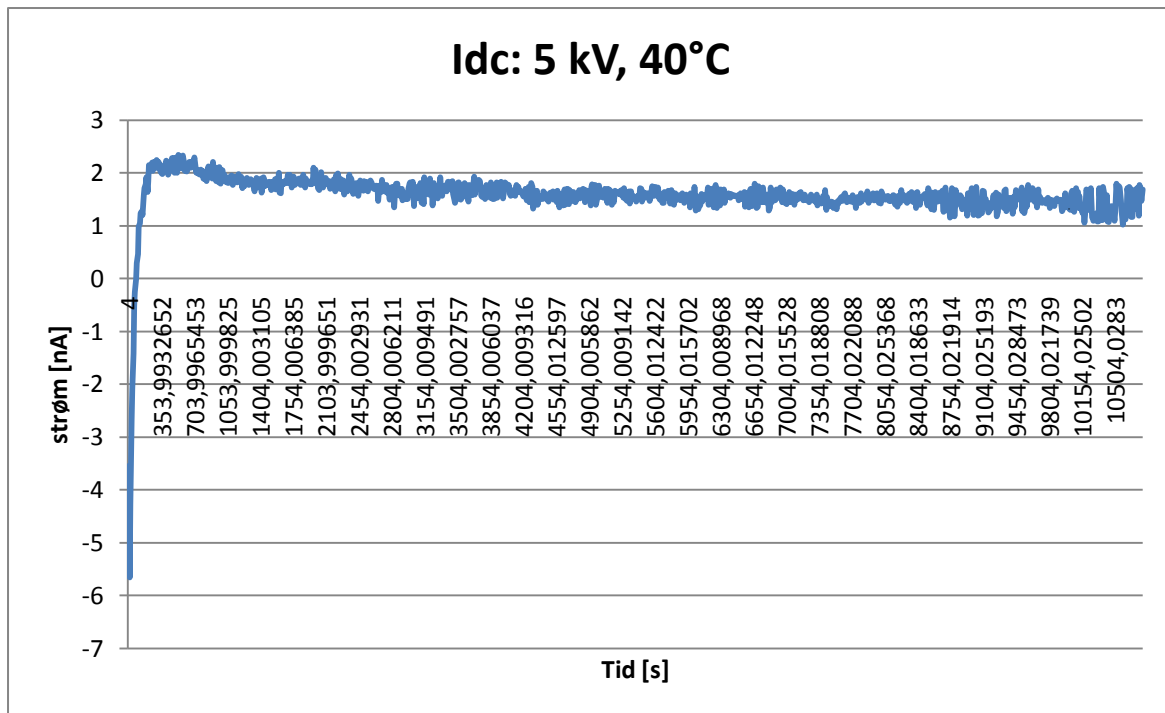
Figur 4.7 Polarisasjonsstrøm 5 kV, 40 °C plottet med logaritmiske strøm og tidsskala.



Figur 4.8 Depolarisasjonsstrøm 5 kV, 40 °C plottet med logaritmiske strømskala.

Før forsøket ble gjennomført, var den endelige utgavene av dataprogrammet ferdigstilt, slik at det var mulig å endre måleområde. Det var dermed ikke nødvendig å gjøre manuelle målinger.

Ved å studere figur 4.8 er det tydelig at strømmen ikke er helt stabil, og at man har plutselige fall i den målte strømmen. Grunnen til dette vil bli forklart i kapittel 5.3.



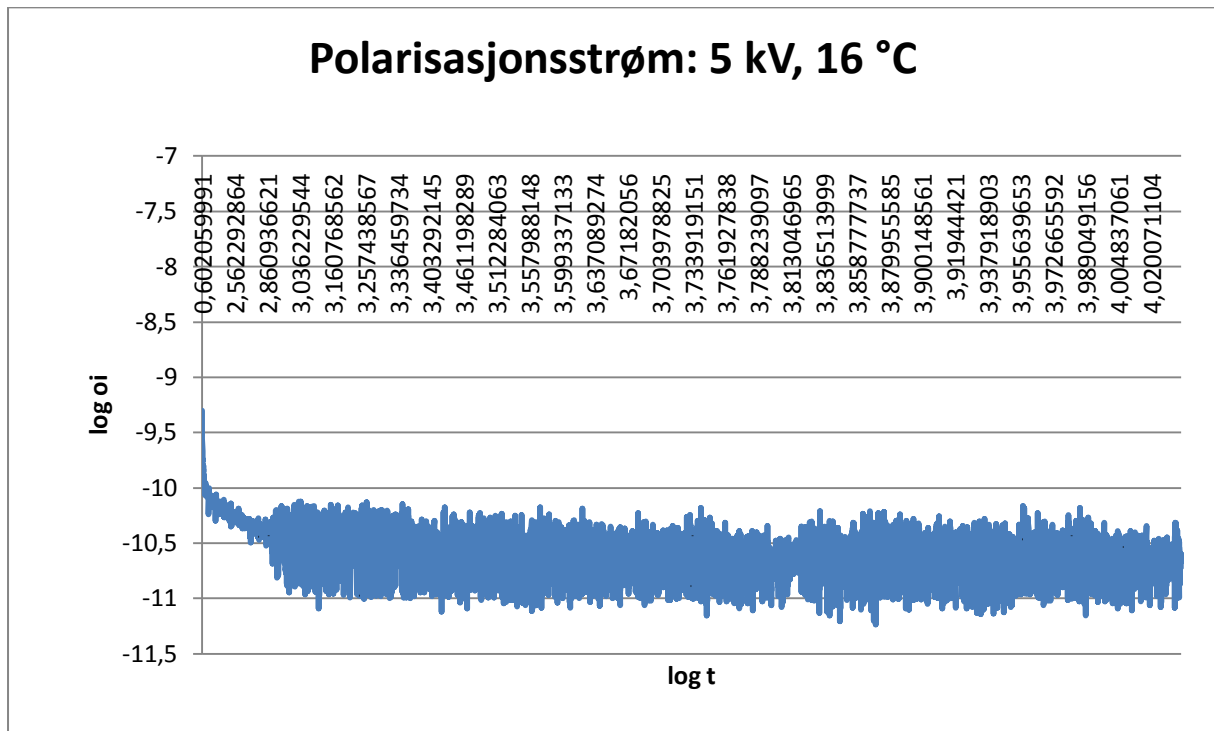
Figur 4.9 I_{dc} 5 kV, 40 °C.

Figur 4.9 viser den beregnede DC-strømmen for forsøket. Ved å sammenligne den med figur 4.3 og 4.6 kan man se at verdien på strømmen er større, i tillegg til at det tar kortere tid å oppnå en stabil DC-strøm. Grunnene til dette vil bli forklart nærmere i kapittel 4.2 og 4.3.

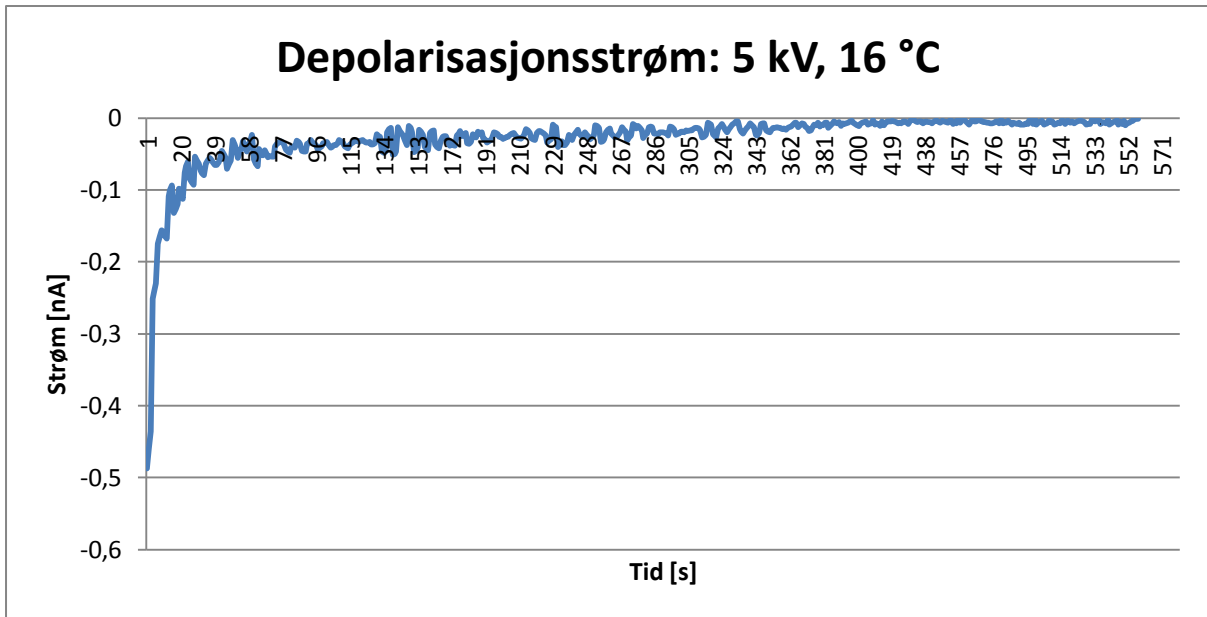
4.1.2 PEX kabel

I dette kapittelet blir polarisasjonsstrømmen, depolarisasjonsstrømmen og I_{dc} for PEX kabelen presentert. Siden det ble utført totalt 25 forsøk på massekabelen, vil ikke alle måleresultatene bli presentert i denne rapporten. For flere måleresultater, se vedlegg B2.

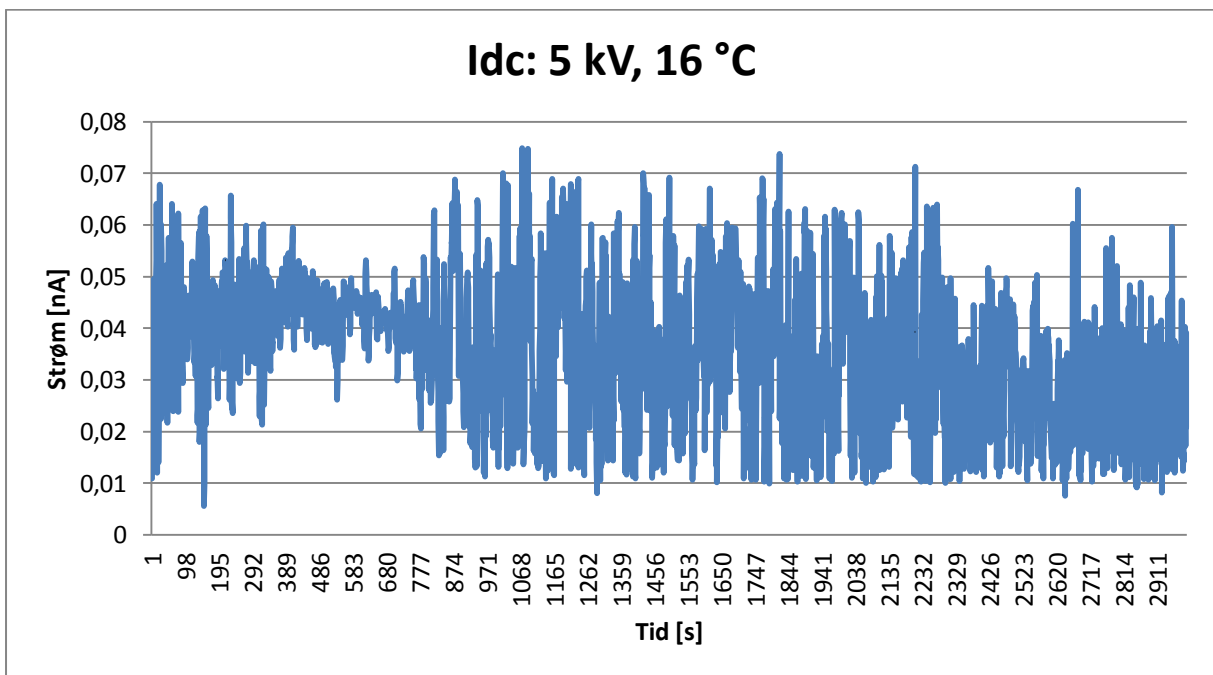
5 kV, 16 °C:



Figur 4.10 Polarisasjonsstrøm 5 kV, 16 °C plottet med logaritmiske strøm og tidsskala.



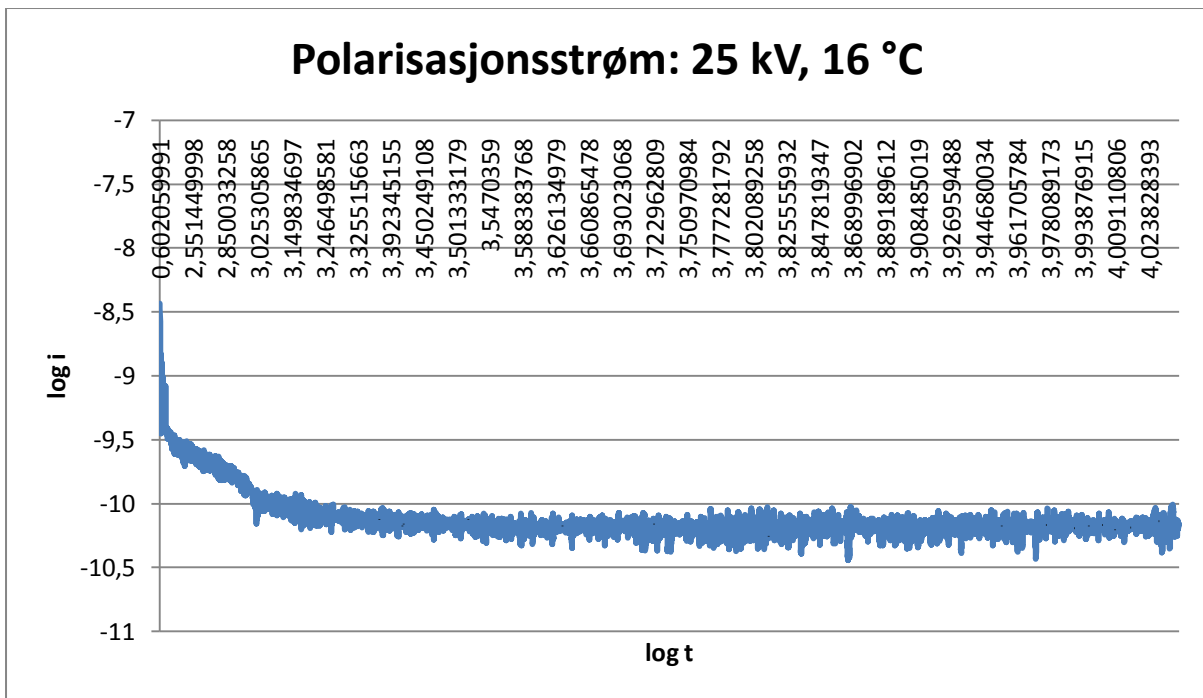
Figur 4.11 Depolarisasjonsstrøm 5 kV, 16 °C



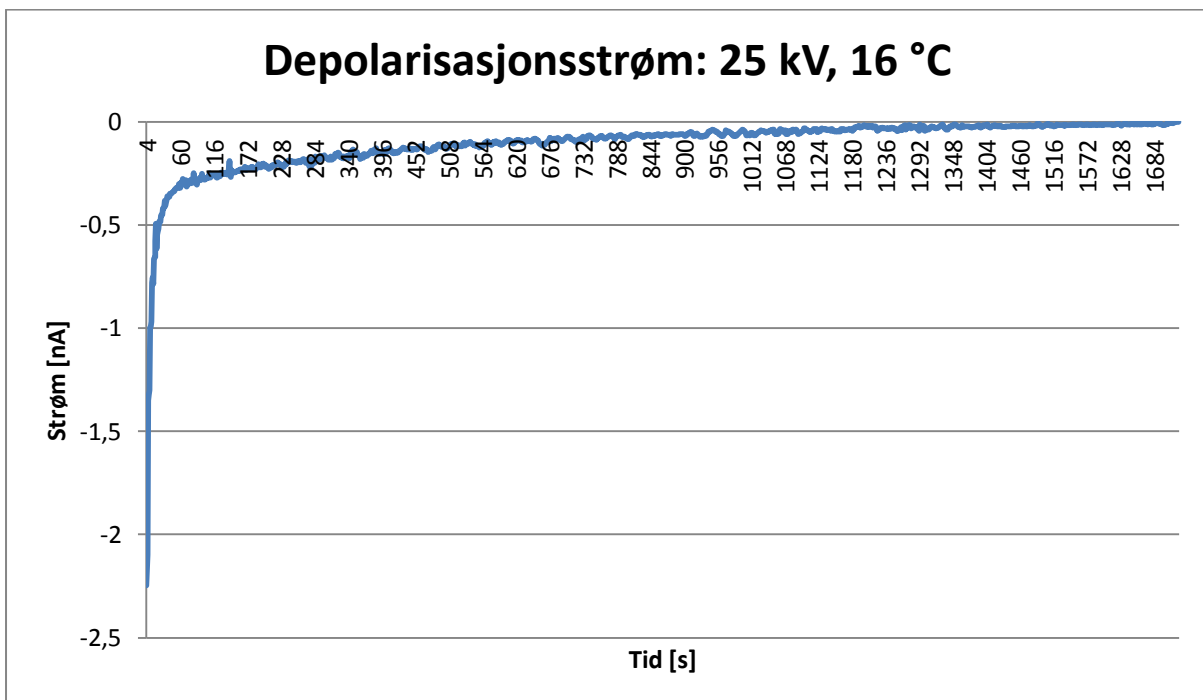
Figur 4.12 I_{dc} 5 kV, 16 °C

Figur 4.12 viser at den beregnede DC-strømmen også for dette isolasjonsmaterialet er veldig utstabil når kabelen er lite belastet.

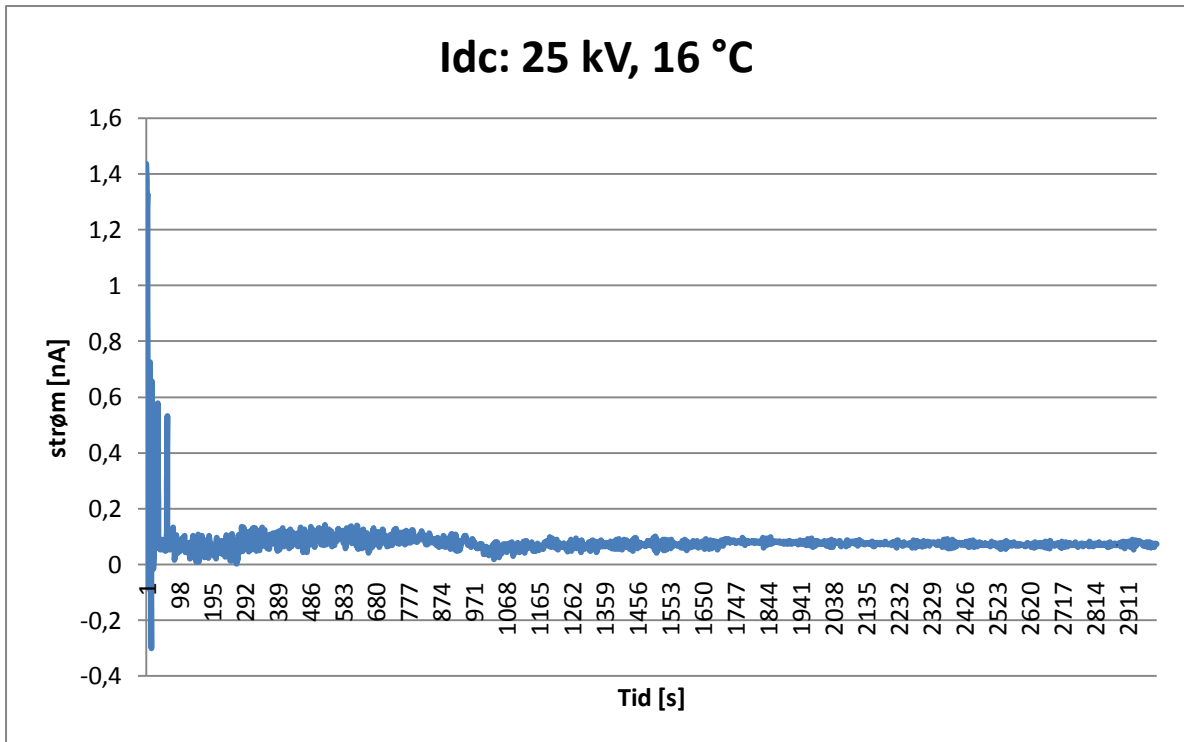
25 kV, 16 °C:



Figur 4.13 Polarisasjonsstrøm 25 kV, 16 °C plottet med logaritmiske strøm og tidsskala.

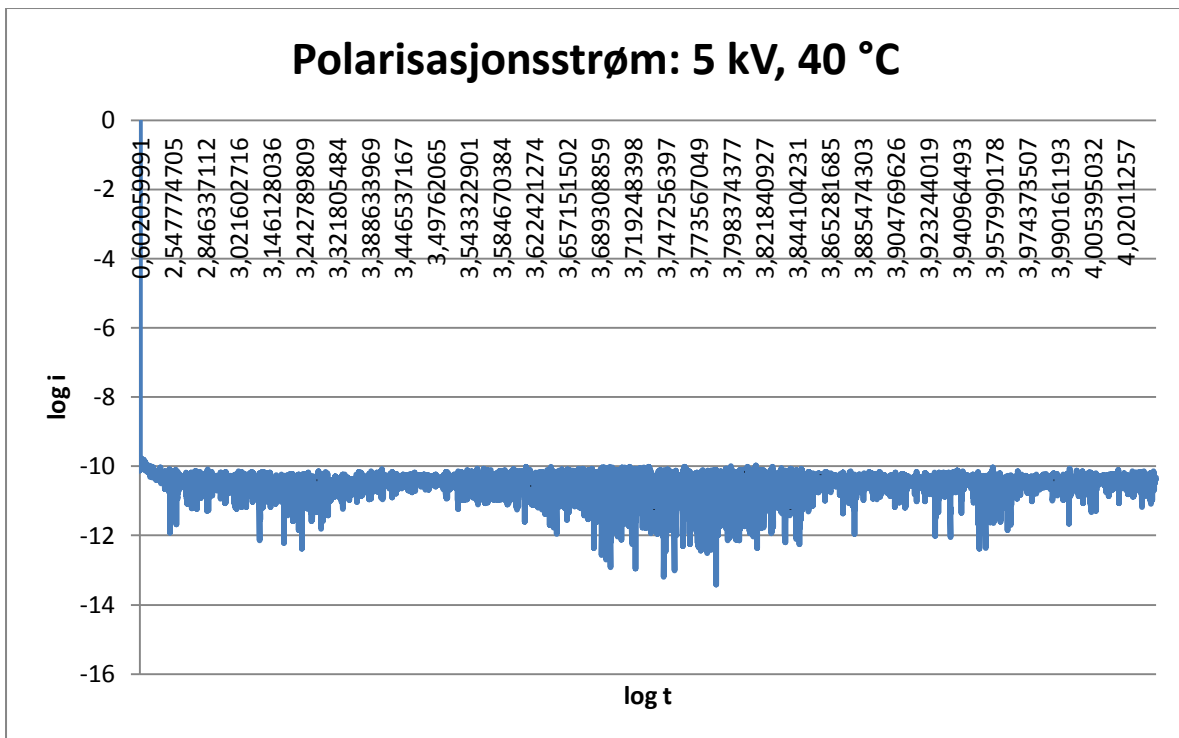


Figur 4.14 Depolarisasjonsstrøm 25 kV, 16 °C

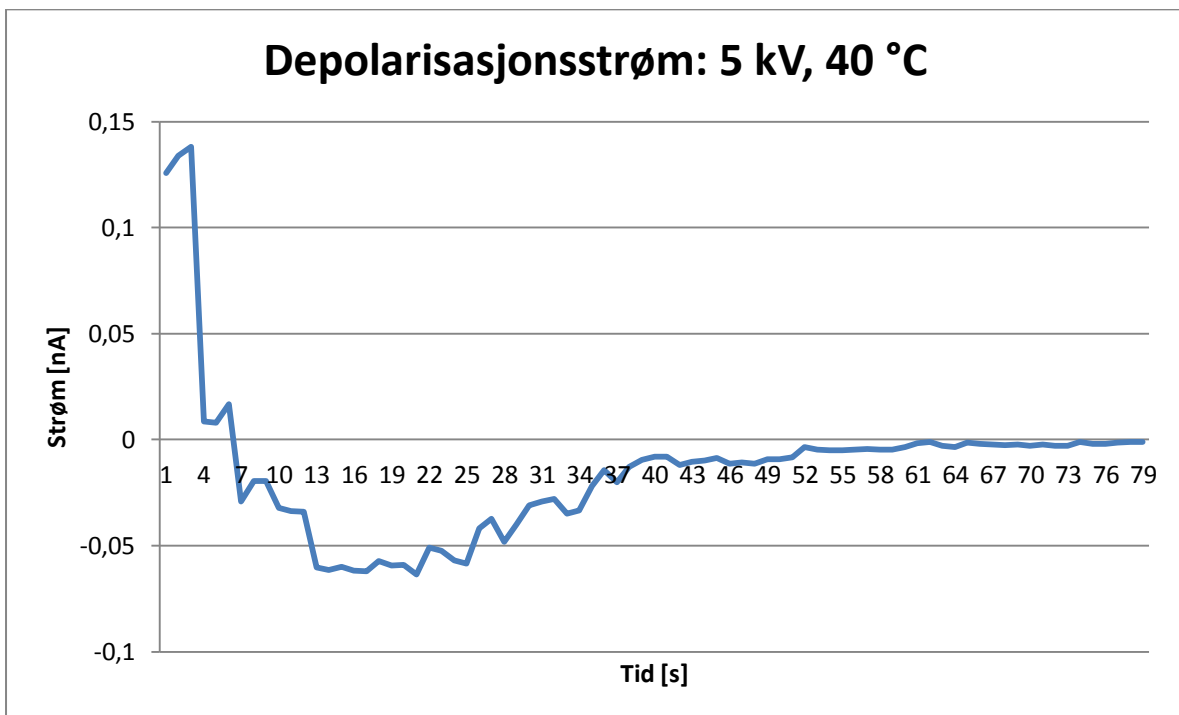


Figur 4.15 I_{dc} 25 kV, 16 °C

5 kV, 40 °C:

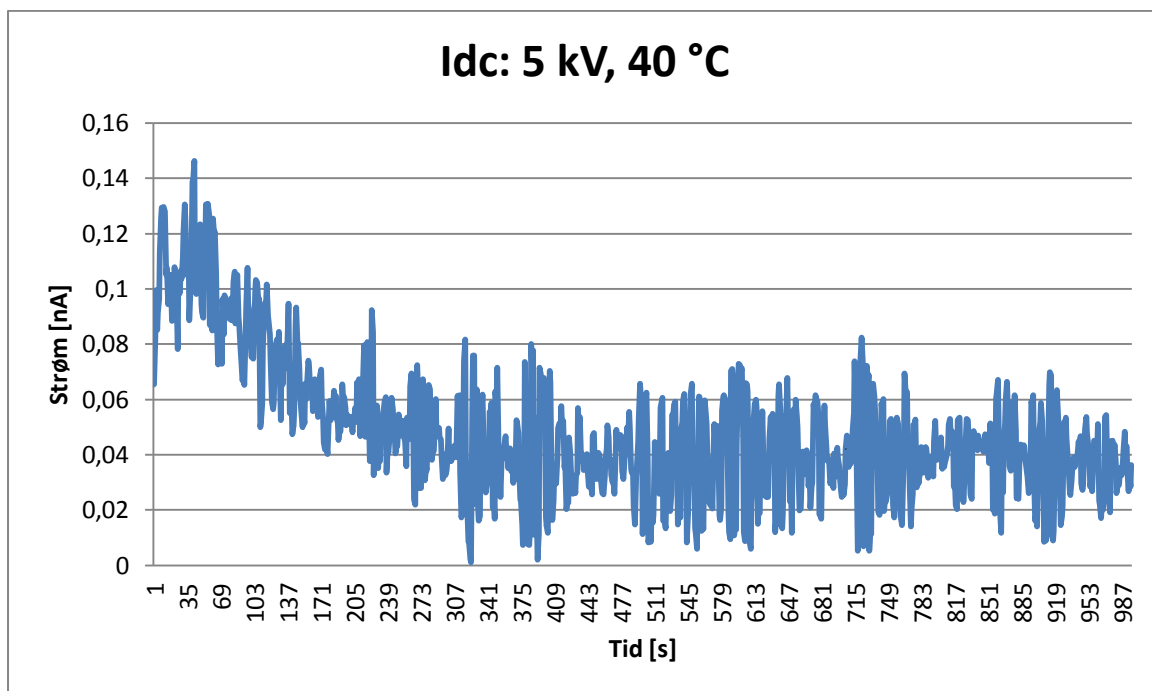


Figur 4.16 Polarisasjonsstrøm 5 kV, 40 °C plottet med logaritmiske strøm og tidsskala.



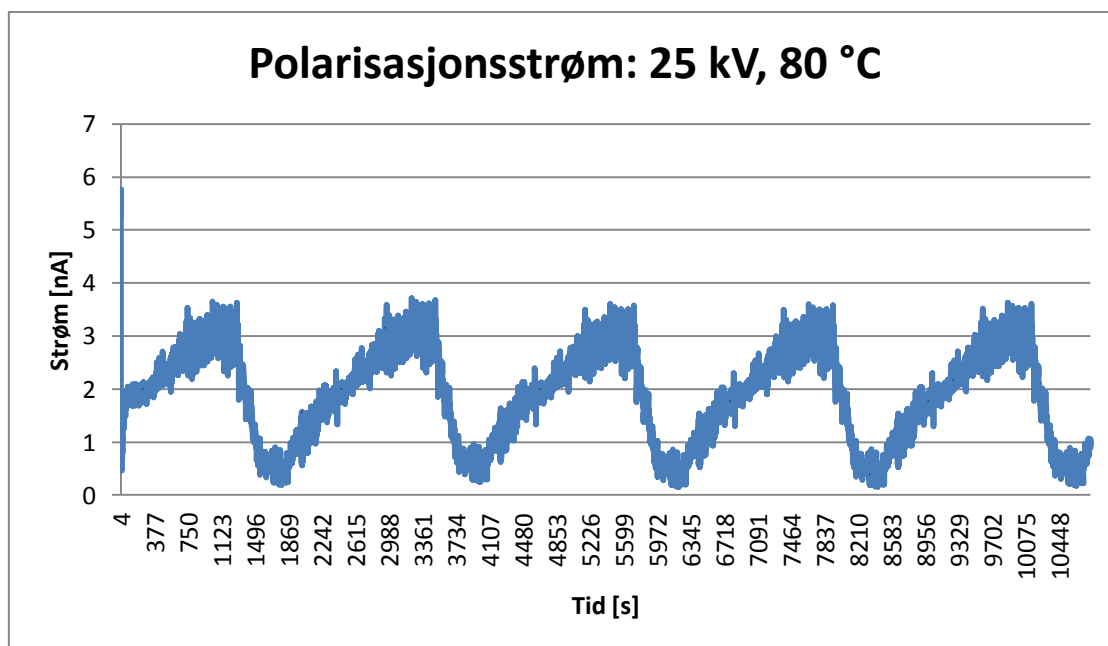
Figur 4.17 Depolarisasjonsstrøm 5 kV, 40 °C

I figur 4.16 og 4.17 kan det ses at målingene viser at strømmen har motsatt fortegn av det man skulle forvente. Dette fenomenet vil bli forklart nærmere i kapittel 5.2.



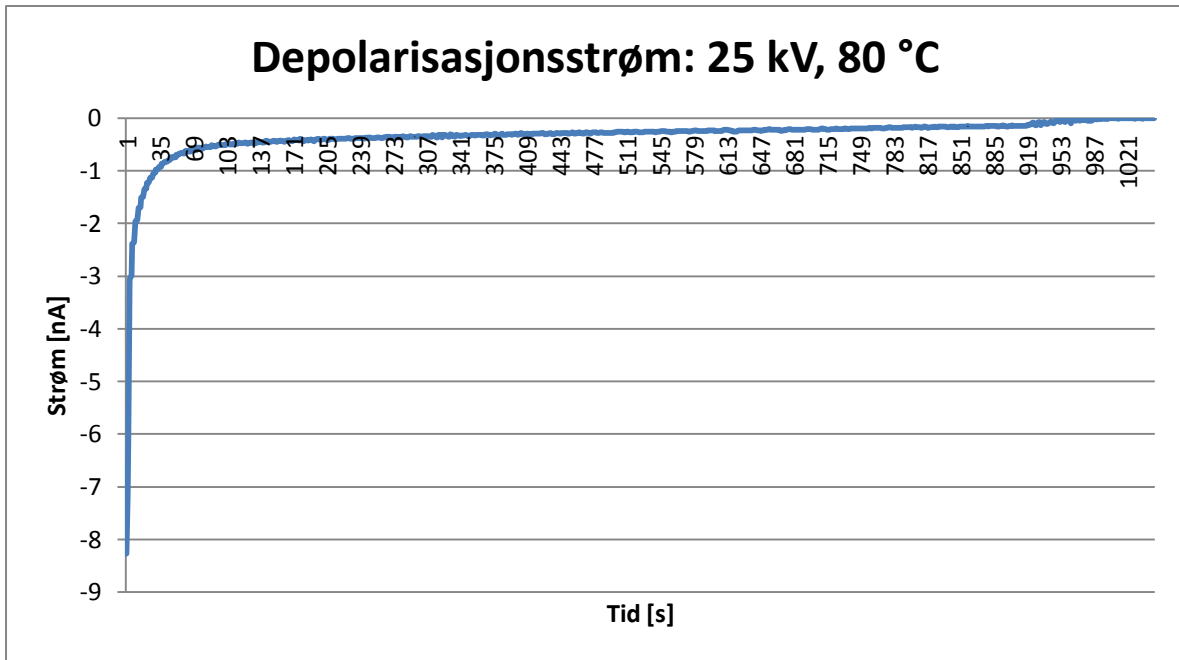
Figur 4.18 Polarisasjonsstrøm 5 kV, 40 °C

25 kV, 80 °C:

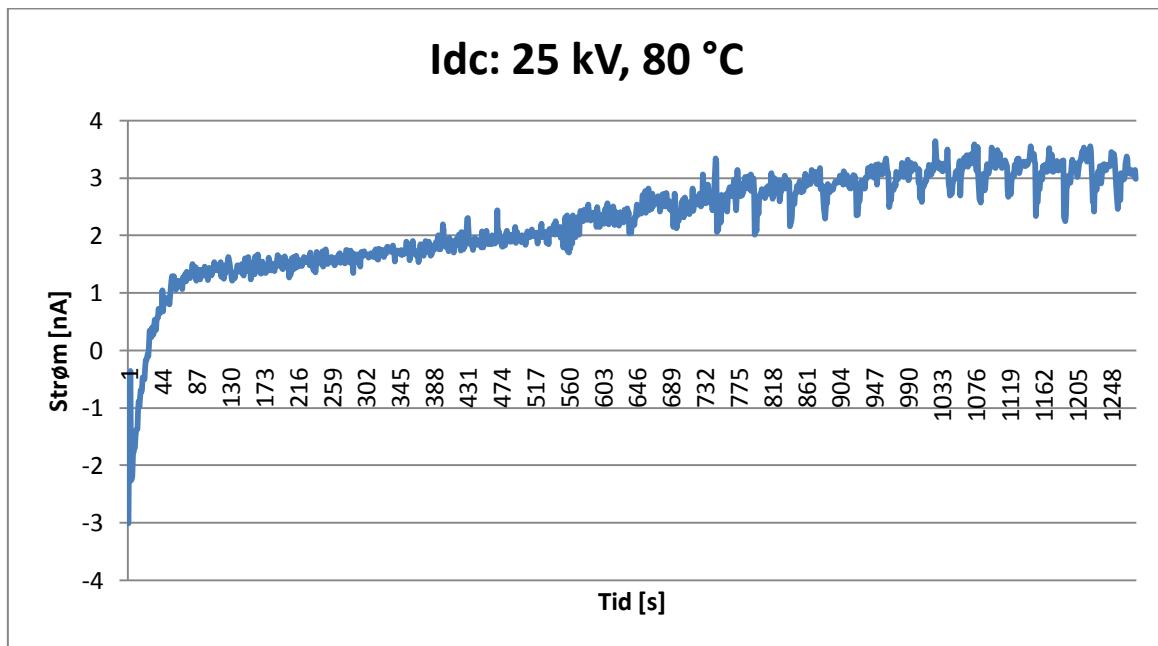


Figur 4.19 Polarisasjonsstrøm 25 kV, 80 °C plottet med logaritmiske strøm og tidsskala.

Figur 4.19 viser at denne målingen ikke ga en forventet kurve (går mot en bestemt verdi), og stedet danner polarisasjonsstrømmen et transient forløp. Grunnen til dette vil bli forklart i kapittel 5.3.



Figur 4.20 Depolarisasjonsstrøm 25 kV, 80 °C

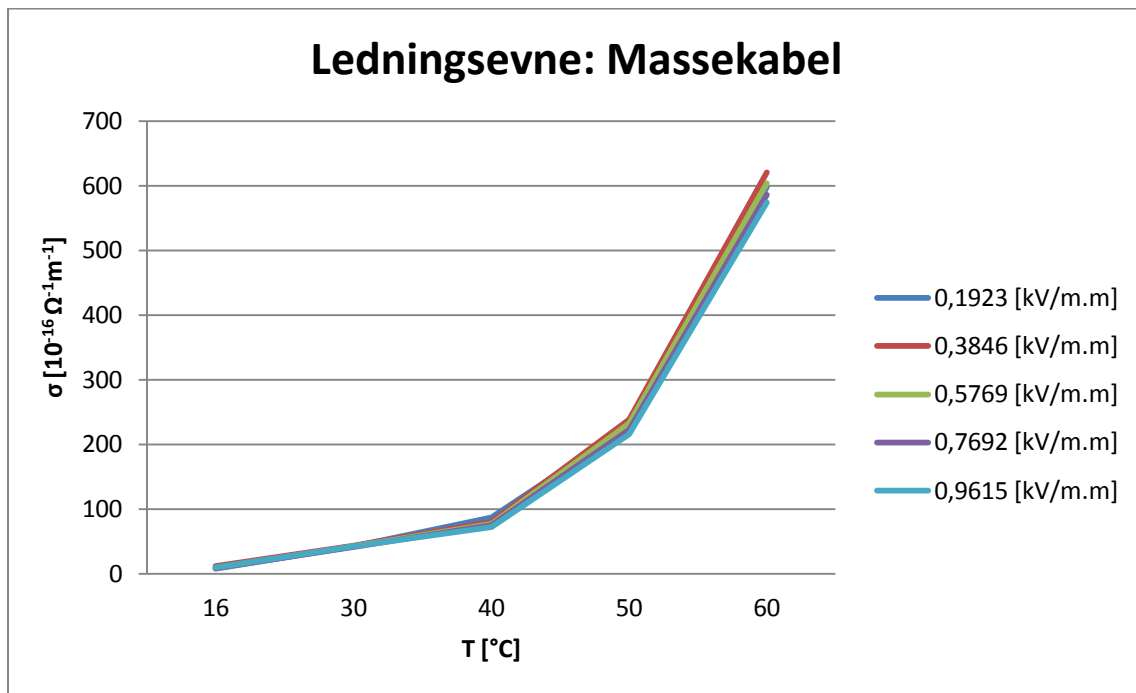


Figur 4.21 I_{dc} 25 kV, 80 °C

4.2 Konduktivitet

4.2.1 Massekabel

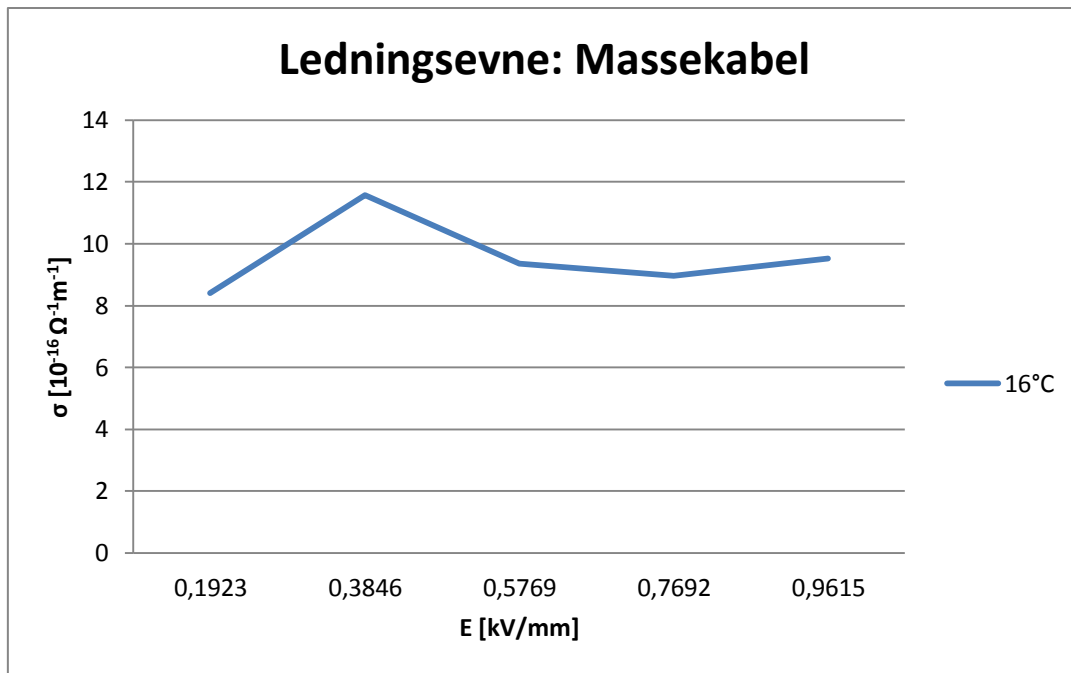
Ledningsevnen til kabelen ble beregnet ved å bruke likning 2.73. Permittiviteten som brukes finner man i tabell 3.1. I_{dc} ble beregnet ved å bruke likning 2.70, og denne strømmen kan blant annet ses i figur 4.6. For å kunne sette dette inn i likning 2.73, ble gjennomsnittet av målte verdiene brukt.



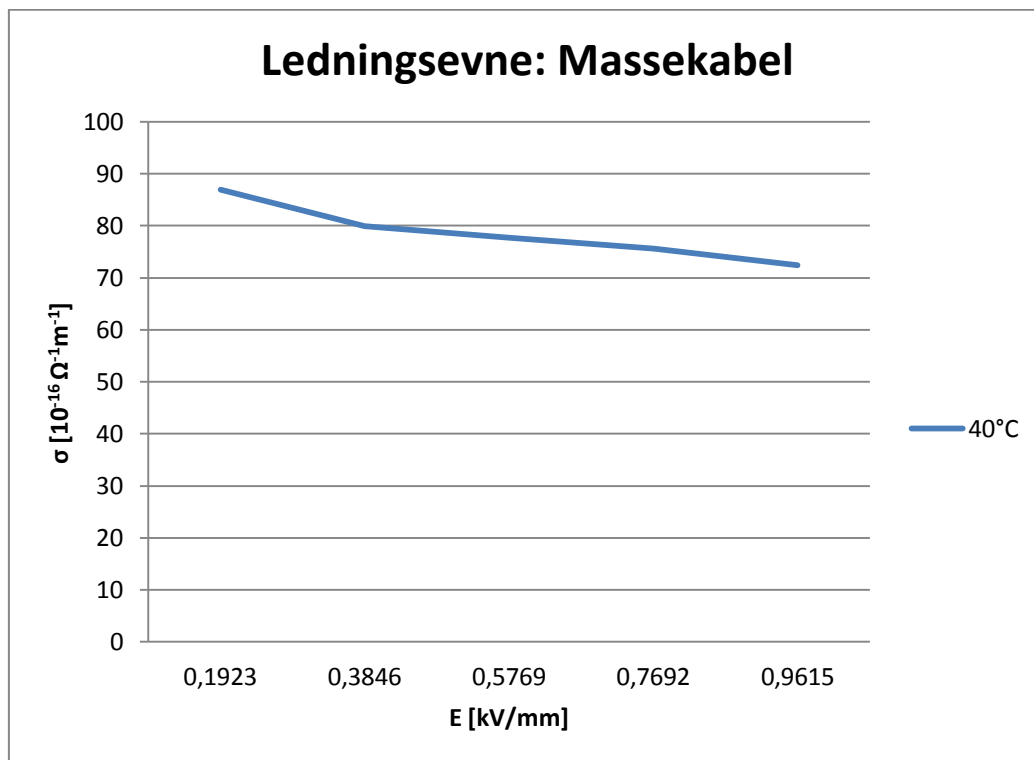
Figur 4.22 Ledningsevne som funksjon av temperatur.

E [kV/mm]	A [$\Omega^{-1}m^{-1}$]	α [$^{\circ}C^{-1}$]
0,1923	$3,9355 \cdot 10^{-16}$	0,4435
0,3846	$5 \cdot 10^{-16}$	0,4192
0,5769	$4,2 \cdot 10^{-16}$	0,4352
0,7692	$4,05 \cdot 10^{-16}$	0,4357
0,9615	$4,295 \cdot 10^{-16}$	0,4265

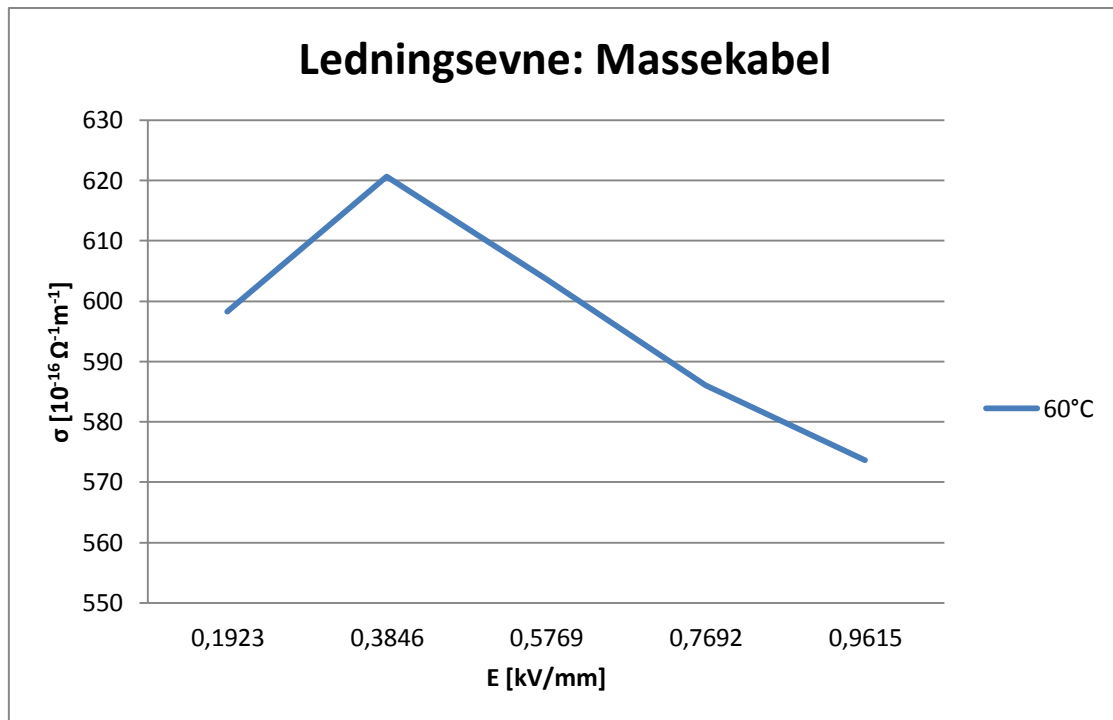
Tabell 4.1 Verdier ledningsevne, se likning 2.64



4.23 Ledningsevne som funksjon av påtrykt spenning, og konstant temperatur på 16 °C



4.24 Ledningsevne som funksjon av påtrykt spenning, og konstant temperatur på 40 °C

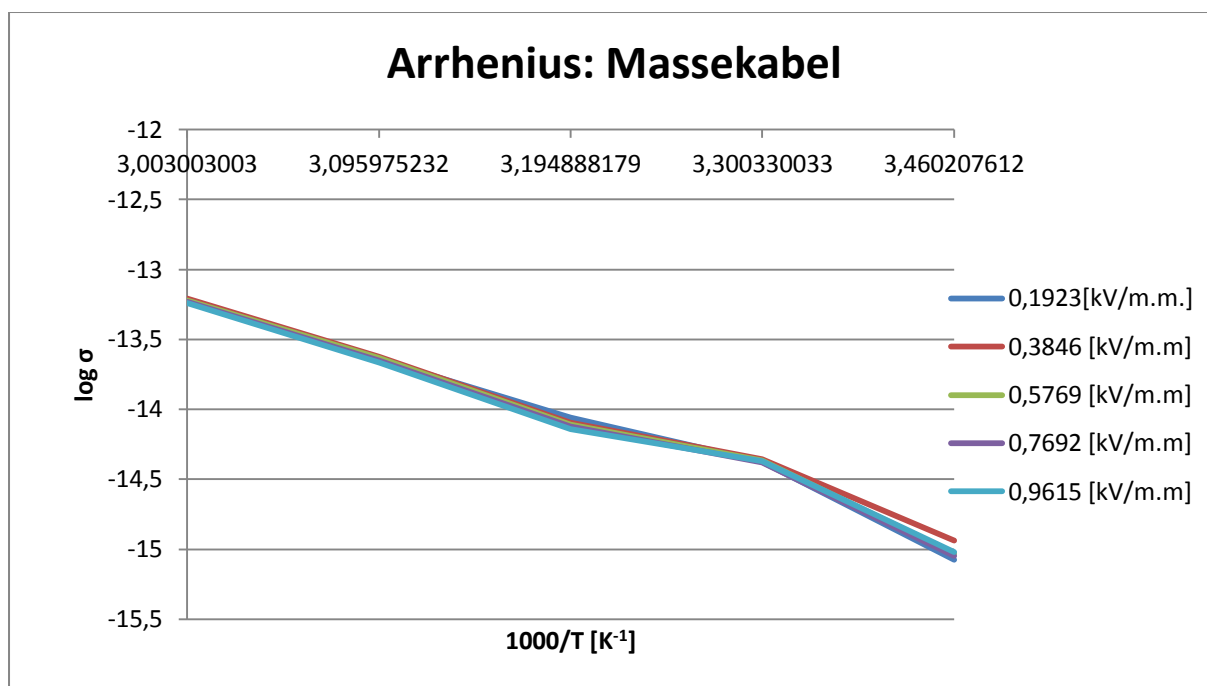


4.25 Ledningsevne som funksjon av påtrykt spenning, og konstant temperatur på 60 °C

Temp. [°C]	A [Ω ⁻¹ m ⁻¹]	β [mm/kV]
16	9,53*10 ⁻¹⁶	-0,0004
30	4,335*10 ⁻¹⁵	-0,0017
40	8,892*10 ⁻¹⁵	-0,0183
50	2,3988*10 ⁻¹⁴	-0,0078
60	6,223*10 ⁻¹⁴	-0,0061

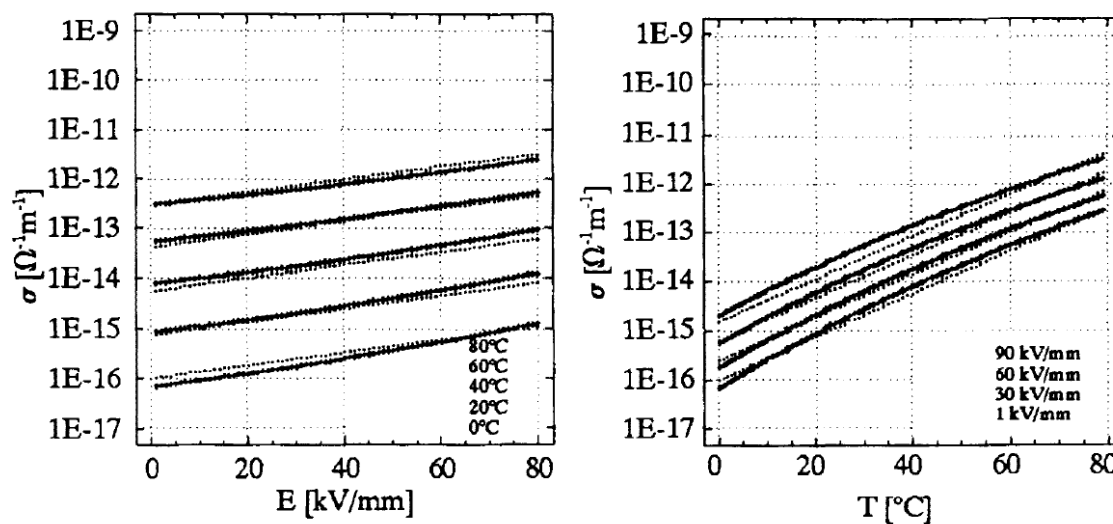
Tabell 4.2 Verdier ledningsevne, se likning 2.65

Ledningsevnen kan også beskrives i et Arrhenius plott (se figur 2.23):



Figur 4.26 Arrhenius plott

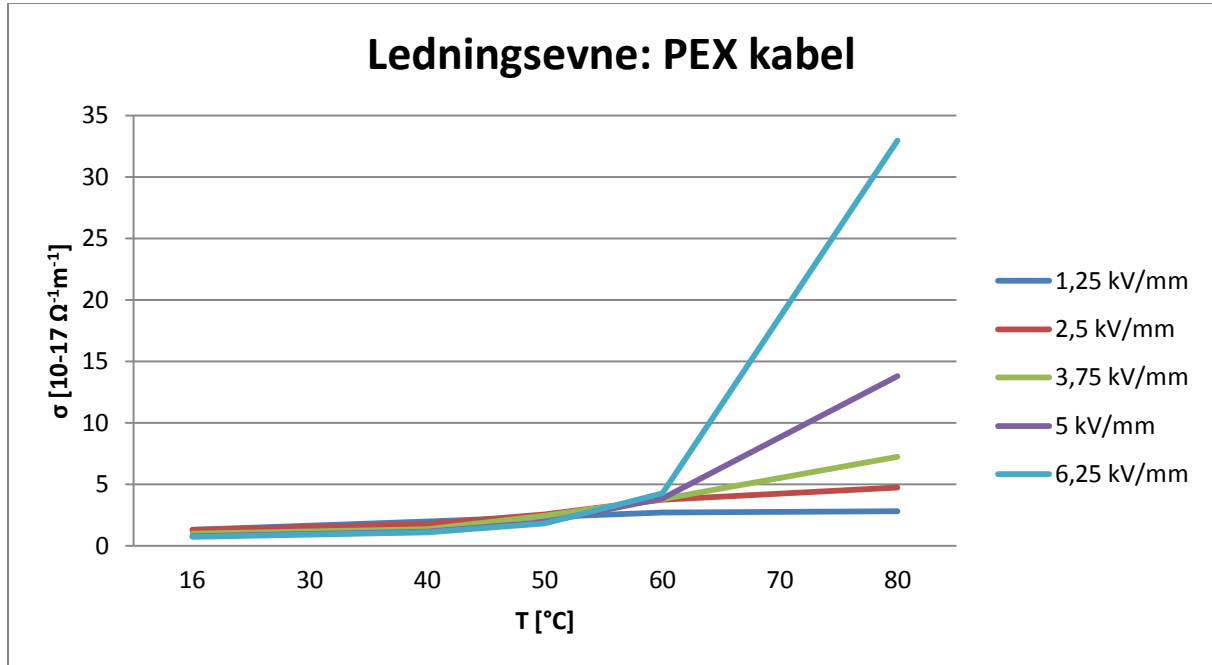
Ledningsevne beregningene kan også sammenlignes med forsøk utført av andre:



Figur 4.27 Ledningsevne bergninger hentet fra forsøk utført av M.J.P Jeroense og F.H. Kreuger [14]

4.2.2 PEX kabel

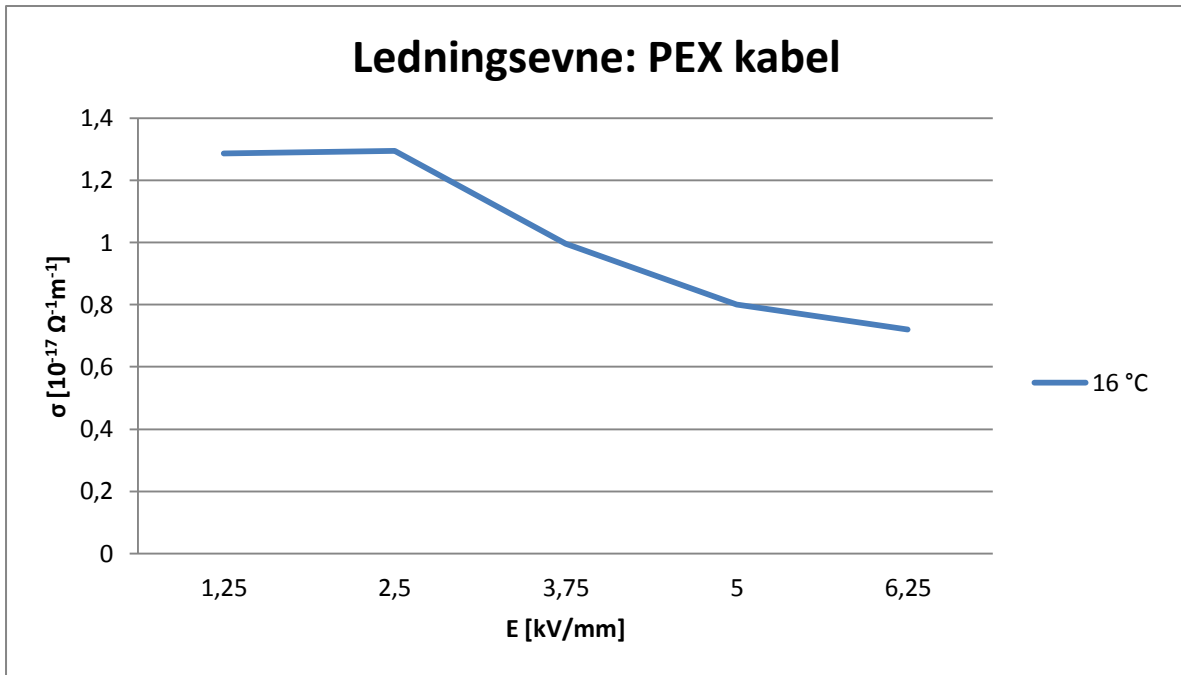
Ledningsevnen til denne kabelen ble beregnet ut fra den samme framgangsmåten, som ble brukt for massekabelen. Permittiviteten er hentet fra tabell 3.2



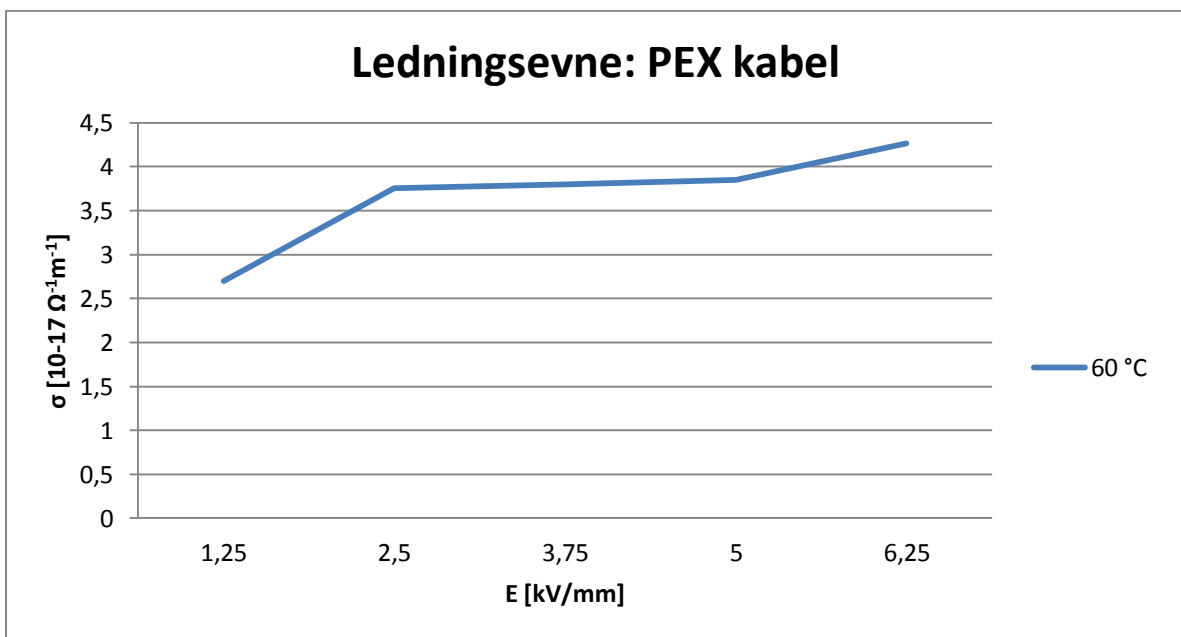
Figur 4.28 Ledningsevne som funksjon av temperatur.

E [kV/mm]	A[Ω ⁻¹ m ⁻¹]	α [°C ⁻¹]
1,25	1,26*10 ⁻¹⁷	0,0572
2,5	1*10 ⁻¹⁷	0,101
3,75	6,1*10 ⁻¹⁸	0,1516
5	3,53*10 ⁻¹⁸	0,2117
6,25	2,24*10 ⁻¹⁸	0,2781

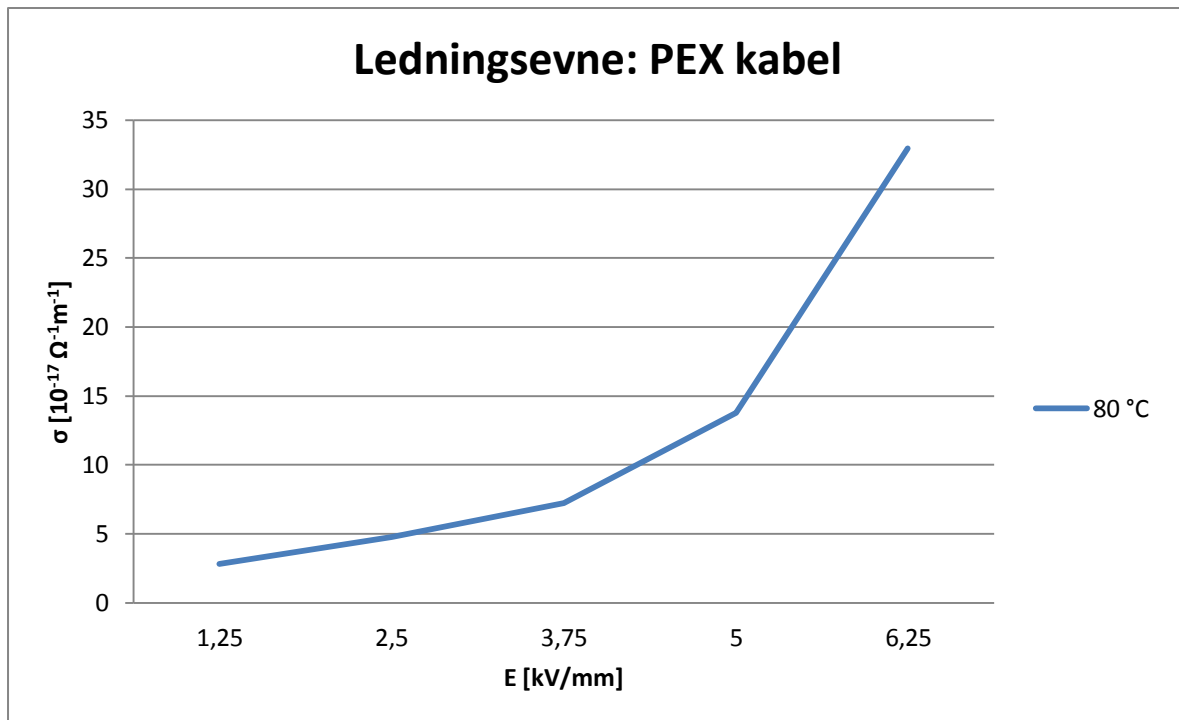
Tabell 4.3 Verdier ledningsevne, se likning 2.64



Figur 4.29 Ledningsevne som funksjon av påtrykt spenning, og konstant temperatur på 16 °C



Figur 4.30 Ledningsevne som funksjon av påtrykt spenning, og konstant temperatur på 60 °C

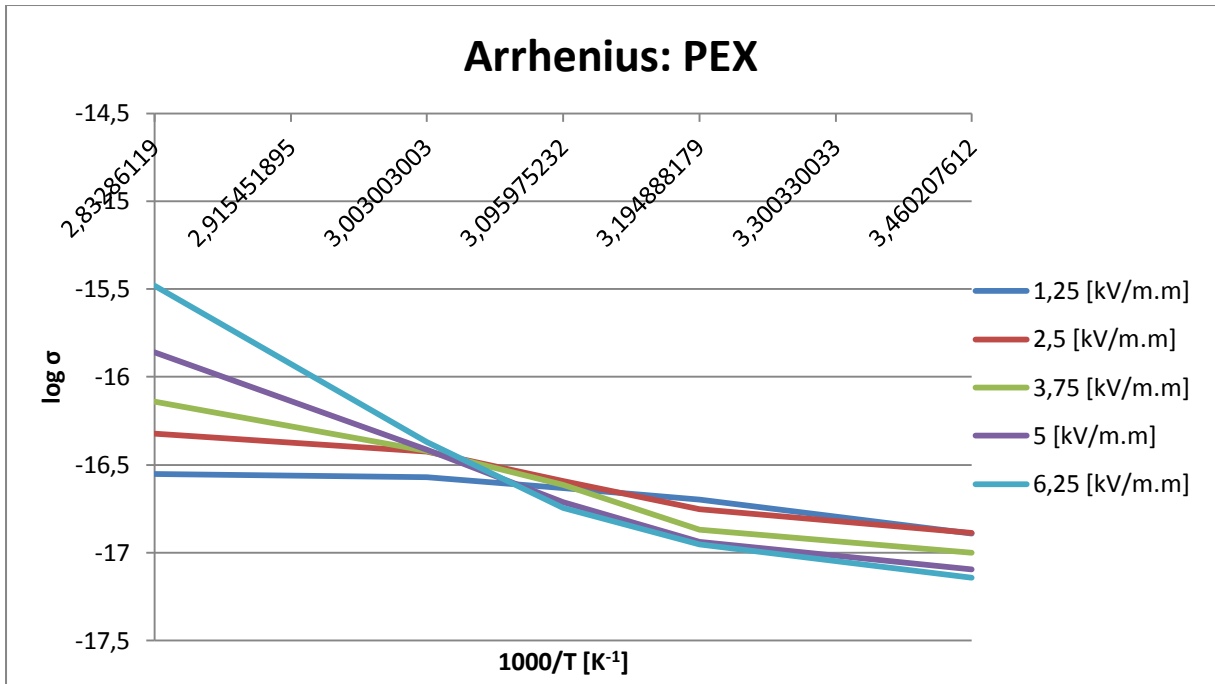


Figur 4.31 Ledningsevne som funksjon av påtrykt spenning, og konstant temperatur på 80 °C

Temp.[°C]	A[Ω ⁻¹ m ⁻¹]	β [mm/kV]
16	1,62*10 ⁻¹⁷	-0,0713
30	2,32*10 ⁻¹⁷	-0,0694
40	2,78*10 ⁻¹⁷	-0,0341
50	2,74*10 ⁻¹⁷	0,0408
60	1,4*10 ⁻¹⁷	0,2603

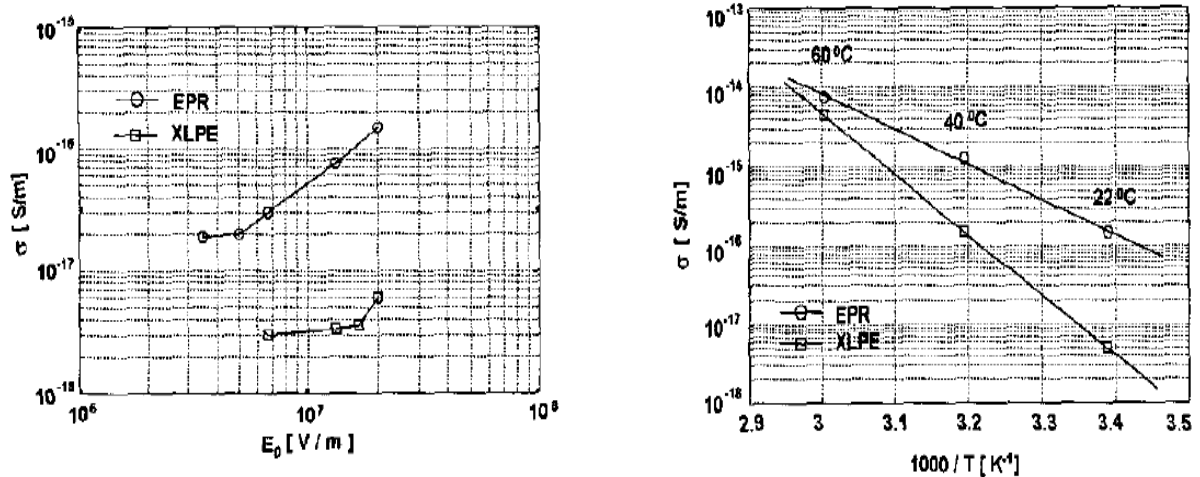
Tabell 4.4 Verdier ledningsevne, se likning 2.65

Ledningsevnen kan også beskrives i et Arrhenius plott (se figur 2.23):



Figur 4.32 Arrhenius plott

Ledningsevne beregnet av andre:



Figur 4.33 Ledningsevne for PEX beregnet R.Bodega og G.C Montanari [21]

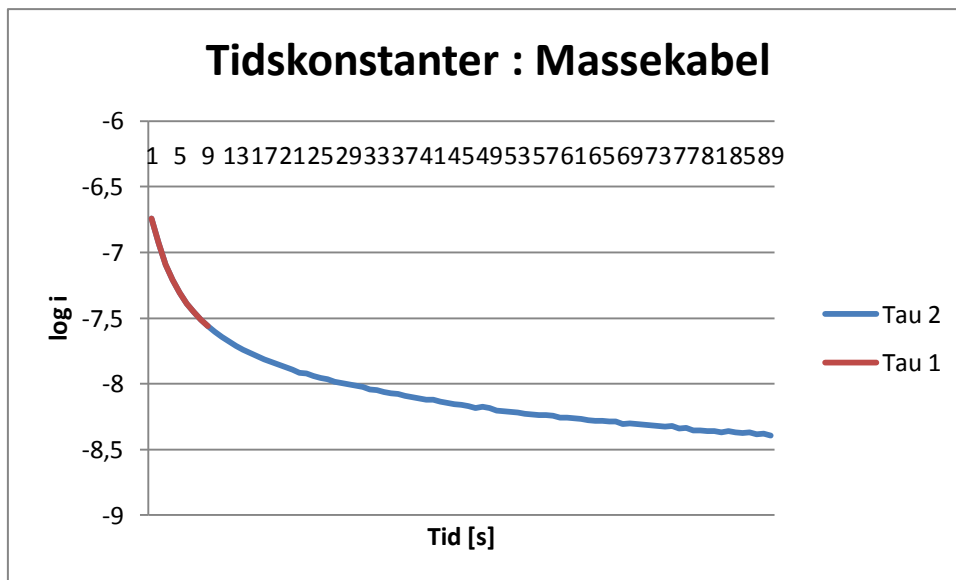
4.3 Tidskonstanter

4.3.1 Massekabel

Tidskonstanter er som beskrevet i teorien den tiden det tar for polarisasjonsfenomenene å dø ut, og man oppnår et rent DC felt. Hvordan polarisasjonsstrømmen oppfører seg er beskrevet i likning 2.12.

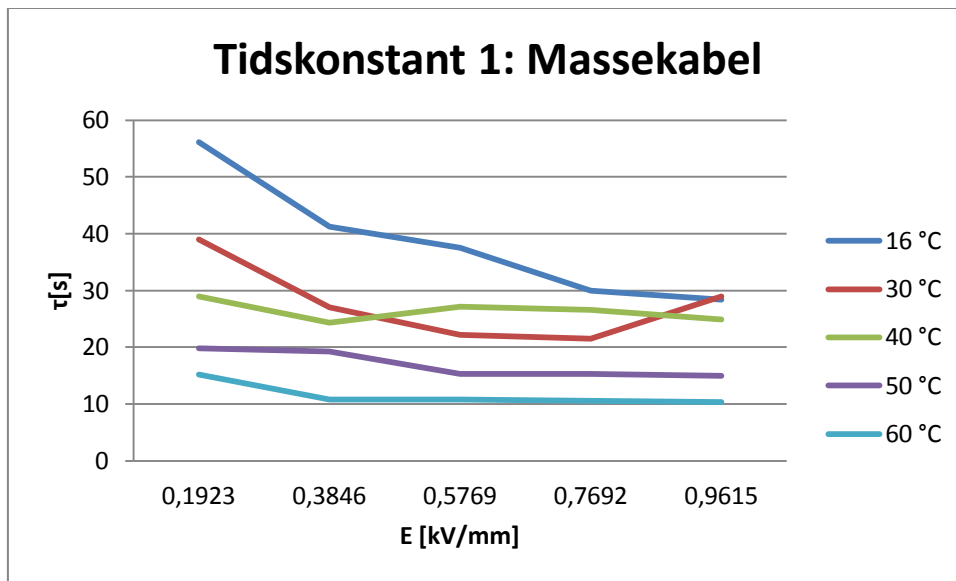
Tidskonstanten, τ , beregnes ved å plote depolarisasjonsstrømmen i et log i/t plott, og bruke likning 2.12. Et slikt plott kan ses i figur 4.8.

Nærmere undersøkelser av et slikt plott gjort for massekabelen, viser at det er to tidskonstanter. Dette kan forklares ved å studere figur 2.15, da oljen og papiret har ulike ledningsevner, noe som fører til at polarisasjonsfenomenene ikke oppfører seg likt.

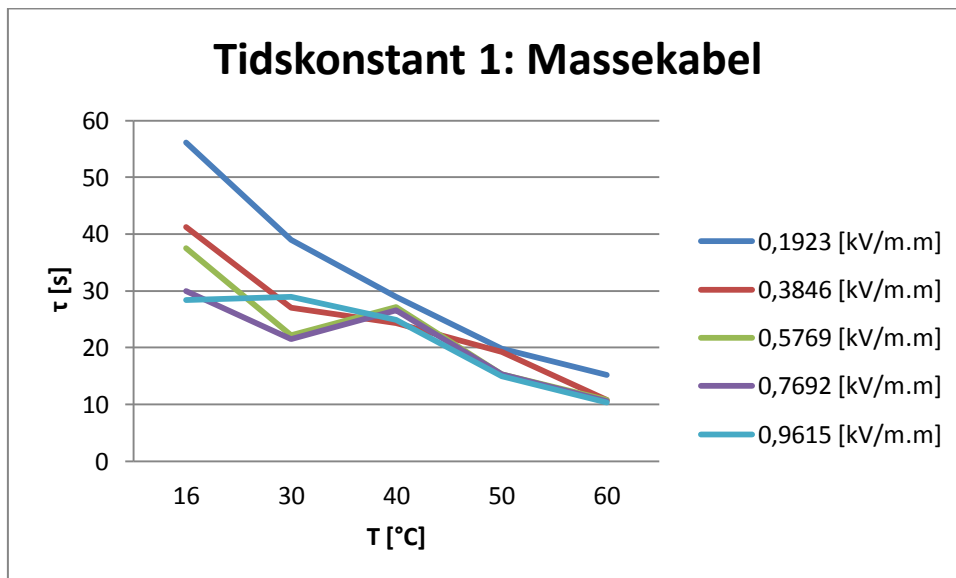


Figur 4.34 To tidskonstanter?

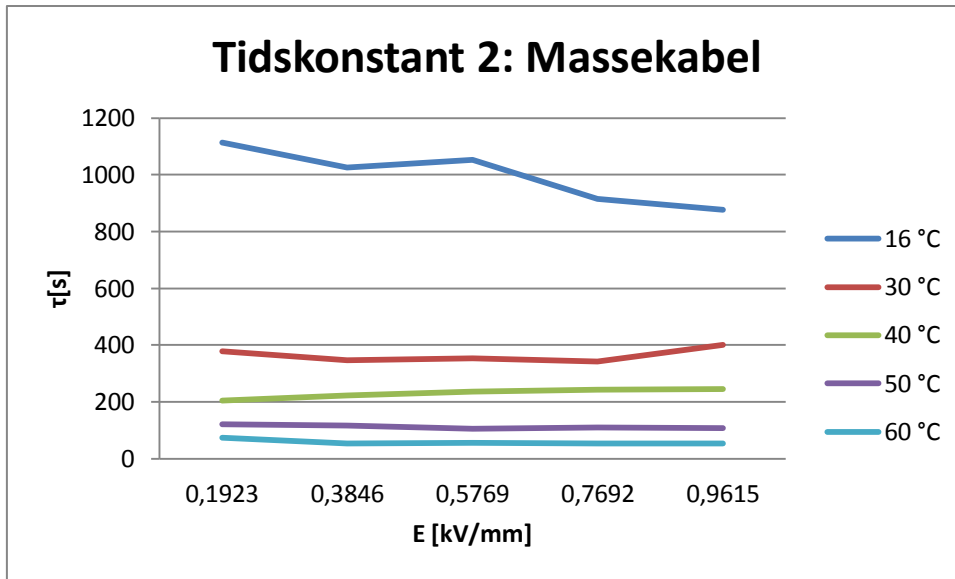
Ved å beregne tidskonstantene, får man:



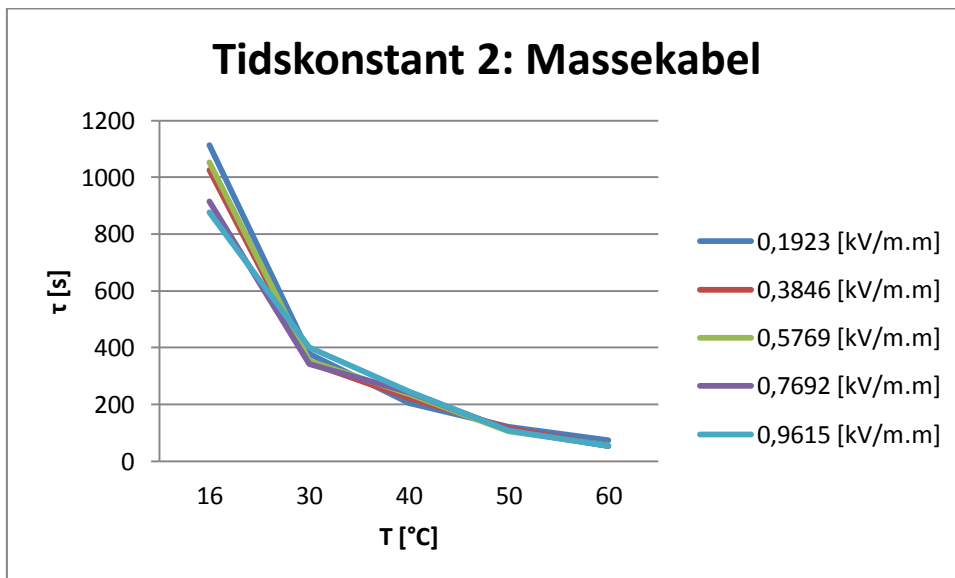
Figur 4.35 Tidskonstant 1, som funksjon av påtykt felt.



Figur 4.36 Tidskonstant 1, som funksjon av temperatur.



Figur 4.37 Tidskonstant 2, som funksjon av påtrykt felt.

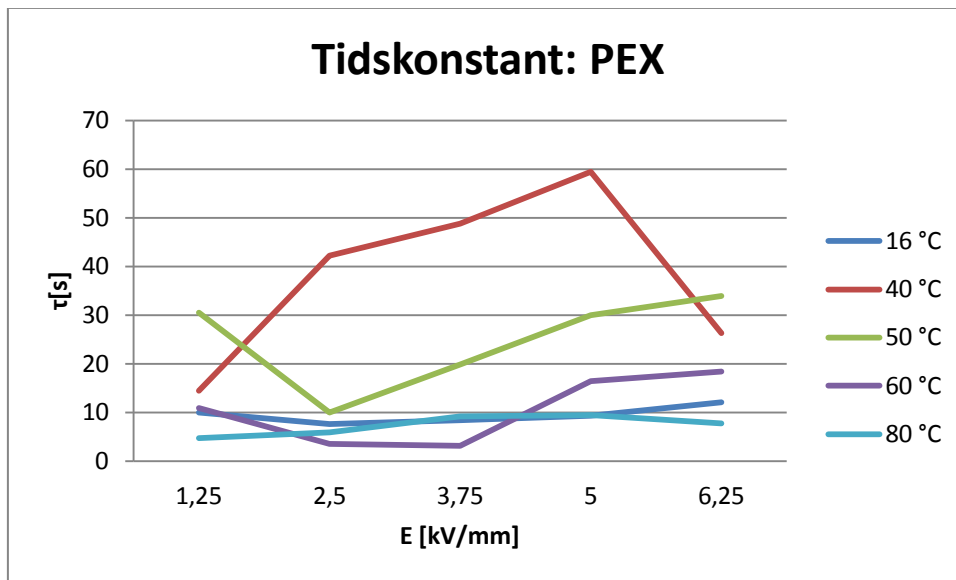


Figur 4.38 Tidskonstant 2, som funksjon av temperatur.

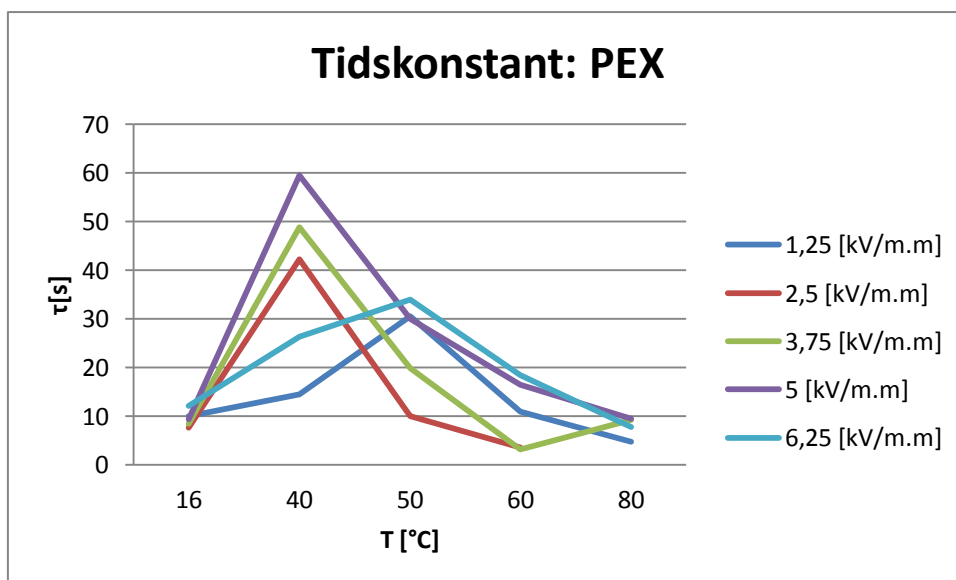
4.3.2 PEX kabel

Det brukes her samme fremgangsmåte som for massekabelen.

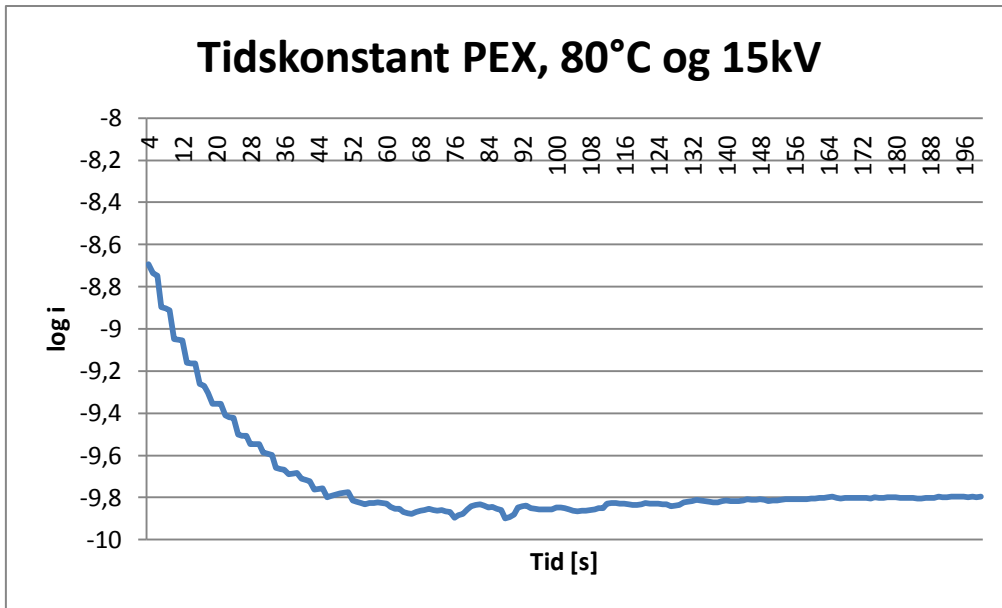
Da isolasjonsmaterialet for denne kabelen kun består av et dielektrikum finner man kun 1 tidskonstant når man studerer log i/t plottene (se figur 4.41 og 4.42):



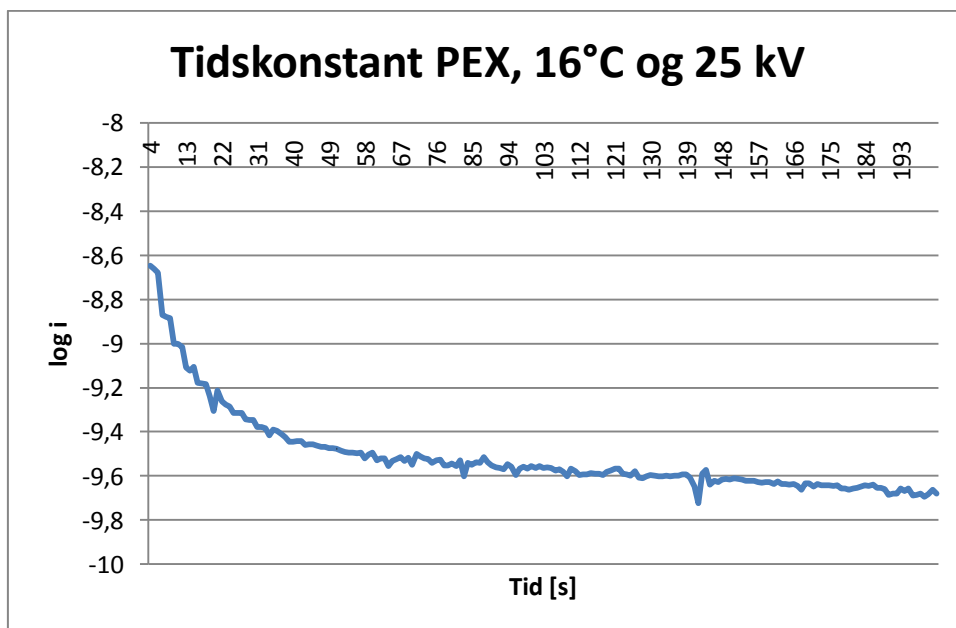
Figur 4.39 Tidskonstant PEX som funksjon av påtrykt felt.



Figur 4.40 Tidskonstant PEX, som funksjon av temperatur.



Figur 4.41 Tidskonstant PEX, vist med et log i/t plott



Figur 4.42 Tidskonstant PEX, vist med et log i/t plott

5 Diskusjon

5.1 Målemetodikk

For å kunne svare på hvordan polarisasjonsfenomenene og ledningsevnen til testobjektene ble påvirket av spenning og temperatur, var man nødt til sette opp en fungerende målemetodikk.

Den største utfordringen rundt dette var i å lage fungerende dataprogram, med både styring og logger muligheter. Det var allerede laget et dataprogram i forbindelse med fordypningsprosjektet, som ledet opp til denne masteroppgaven. Problemet med det programmet var at slå lenge måleinstrumentet (Keithley 6517A elektrometer) ikke målte det samme i alle måleområder, hadde man ikke muligheten til å bytte måleområde. Det viste seg (se figur 4.2) at dette ikke ga nøyaktige måleresultater når strømmen kom ned mot 100 pA. Det ble derfor laget en forbedret utgave av dataprogrammet (se vedlegg J1), som hadde muligheten til å hoppe over uønskede måleområder.

Etter å ha byttet testobjekt, viste det seg at elektrometret målte et fall i strømmen som det ikke var mulig å forklare, på noen annen måte enn at det var en feil med måleinstrumentet. Derfor ble elektrometret byttet ut mot et picoampermeter, av typen Keithley 6485.

Problemet med å bytte måleinstrument, var at disse ikke kunne bruke samme dataprogram. Det ble derfor laget et nytt dataprogram med de samme funksjonene som det til elektrometret (se vedlegg J2).

Begge dataprogrammene leser av målingene fra måleinstrumentene gjennom en GPIB forbindelse. For massekabelen ble denne satt til 10 sekunder. Forsøk viste at dette var det lengste måleintervallet som kunne velges, uten å miste for mye informasjon om de hurtige endringene i polarisasjonsstrømmene innledningsvis. For PEX kabelen ble denne tiden satt til 1 sekund, da strømmene endret seg fortere for dette testobjektet.

Det ble vurdert å legge inn en funksjon som beregnet gjennomsnittet av flere målinger. En slik gjennomsnittsfunksjon ville gi jevnere strømkurver, spesielt ved lave strømverdier der støy og sensitiviteten til måleinstrumentet fører til dårlige enkeltmålinger (se figur 3.19 og [20]). Da strømmene endret seg så fort innledningsvis, ville informasjon gå tapt og funksjonen ble derfor ikke lagt inn i programmene.

Det ble også laget et eget vern (se avsnitt 3.23) for å beskytte måleinstrumentene, da det viste seg at det Keithley anbefalte, ikke fungerte slik det skulle (se figur 3.10).

For å kunne bestemme hvor høy spenning kretsen kunne belastes med, ble det gjennomført pd-tester (se vedlegg A). Disse testene førte til at kretsen ikke ble belastet med mer enn 25 kV, da partielle utladninger vil påvirke målingene.

Temperaturen som ble påtrykket massekabelen var begrenset til 60 °C, siden varmekabelen ikke kunne gi ut mer enn 65 °C. Lekkasje av olje ut fra kabelen ville uansett begrenset temperaturen.

Temperaturen påtrykt PEX kabelen ble satt til maks 80 °C. Det som i første omgang begrenset hvor høy temperatur som kunne påtrykkes, var isolasjonsevnen til skumgummiisolasjonen. En annen begrensende faktor var støy fra temperaturreguleringen (se kapittel 5.3).

5.2 Polarisasjon og konduktivitet

I en massekabel er det, som beskrevet i teorien, grenseflatepolarisasjon som er den dominerende polarisasjonsmekanismen. Resultatene presentert i denne rapporten viser at polarisasjonsstrømmen til en massekabel dermed kan beskrives med følgende likning:

$$i(t) = K_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + K_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \frac{U}{R_0} \quad (5.1)$$

Hvor τ_1 er relaksjonstiden til oljen, mens τ_2 er relaksjonstiden til papiret. Det siste leddet beskriver DC-strømmen i isolasjonsmaterialet.

Relaksjonstidene er estimert ved å bruke likning 2.12. Relaksjonstiden er beskrevet nærmere i teorien (se likning 2.25). Figur 4.35-4.38 viser relaksjonstidene som funksjon av temperatur og spenning. Disse viser at τ_1 både er temperatur og spenningsavhengig, mens τ_2 varierer svært lite med spenningen. Ut fra dette kan det konkluderes med at polarisasjonsmekanismene i papiret ikke er styrt av det feltet.

For PEX er det, som beskrevet i teorien, dipol polarisasjon som er dominerende. Resultatene presentert i denne rapporten viser at polarisasjonsstrømmen til en massekabel dermed kan beskrives med følgende likning:

$$i(t) = K e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U}{R_0} \quad (5.2)$$

Hvor τ er relaksjonstiden til PEX, mens $\frac{U}{R_0}$ er DC-strømmen i materialet.

Relaksjonstiden er estimert på samme måte som for massekabelen, og kan ses i figur 4.39 og 4.40. Ved å studere disse figurene kan det ses at relaksjonstiden ved 40 °C er veldig stor sett i forhold til de andre temperaturene. En av årsakene til dette er det transiente forløpet, som ble målt innledningsvis, for polarisasjonsstrømmene ved blant annet denne temperaturen (se vedlegg K). Dette forløpet skyldes lokale feltforhold som er styrt av lokale romladninger. Dette forløpet forekommer kun over en kort tid innledningsvis, se vedlegg K.

Svært varierende utladningstid for PEX kabelen gjorde det også vanskelig å estimere relaksjonstiden like nøyaktig, som for massekabelen (se figur 4.14, 4.17 og 4.20). På grunn av disse svært varierende resultatene er det ikke mulig konkluderes med, ut fra forsøkene gjort, at relaksjonstiden til PEX kan estimeres på samme måte som for massekabler.

Det som kan ses ut fra figur 4.39 og 4.40 er at de estimerte relaksjonstidene er lavere enn for massekabelen (PEX τ ned mot 10,388 s, Massekabel τ ned mot 3,103 s). Dette kommer veldig tydelig fram ved å studere relaksjonstidene for 1,25 kV/mm og 6,25 kV/mm (disse er de mest nøyaktige målingene). Relaksjonstidene beregnet for PEX varierer også svært lite med det elektriske feltet. Ved å studere figur 4.40 kan det ses en viss temperatur variasjon.

Ledningsevnen til isolasjonsmaterialene kan teoretisk beskrives med likning 2.42. Dette er en estimering av likning 2.63, og viser at ledningsevnen teoretisk vil øke eksponentielt med økende temperatur og elektrisk felt.

For massekabelen viser resultatene at denne antagelsen stemmer for temperaturen (se figur 4.22). Forsøk utført av Jeroensen og Kreuger ([14]) viser derimot et lineært forhold mellom ledningsevne og temperatur. Verdiene deres ligger også noe høyere (10^{-16} (0 °C) til 10^{-13} (60 °C)), sett i forhold til resultatene presentert i denne rapporten (10^{-16} (16 °C) til 10^{-14} (60 °C)).

Ledningsevnen som funksjon av det elektriske feltet, viser seg derimot å reduseres med økende felt (se figur 4.24 og 4.25). Dette stemmer ikke overens verken med teorien presentert tidligere i denne rapporten, eller med målingene gjort av Jeroensen og Kreuger (se figur 4.27). Jeroensen og Kreuger får en lineært økende ledningsevne ved å øke det elektriske feltet. Det elektriske feltet i forsøkene fra denne rapporten, er på sin side veldig lave (80 ganger lavere) i forhold til feltpåtrykket brukt av Jeroensen og Kreuger. Dermed kan det heller ikke forventes å finne feltavhengighet ved så lave påtrykte felt. Siden ledningsevnen ikke er avhengig av det elektriske feltet kan det konkluderes med at polarisasjonsstrømmene er ohmske.

Ledningsevnen til PEX kabelen estimeres også på samme måte som for massekabelen. Forsøkene gjort på dette testobjektet viser at ledningsevnen øker kraftig med temperaturen fra 60 °C og oppover. Mens det nærmest er et lineært forhold mellom ledningsevnen og temperaturen opp mot 60 °C (se figur 4.28). Dette fører igjen til Arrhenius plottet (figur 4.32) får en knekk og flater ut, noe som ikke stemmer med teorien (se figur 2.23). Resultater funnet av Bodega og Montaneri ([21]) tilsier at det skal være et eksponentielt forhold mellom ledningsevnen og temperaturen, og får dermed et teoretisk korrekt Arrhenius plott (se figur 4.33).

Ledningsevnen som funksjon av det elektriske feltet viser seg også for PEX og reduseres med økende feltpåtrykk, på samme måte som for massekabelen (ohmske polarisasjonsstrømmer). Forskjellen mellom testobjektene er i midlertidig at, da dette stemte for alle målte temperaturer for massekabelen, gjorde det ikke det for PEX kabelen. I det temperaturen blir stor nok (i dette tilfellet 60 °C og oppover), blir ledningsevnekurvene mer og mer eksponentielle (se figur 4.30 og 4.31). Det elektriske feltet påtrykt i denne masteroppgaven er lavere enn den brukt av Bodega og Montanari ([21]), og det fører igjen til et ulikt forhold mellom temperatur og ledningsevne. Bodega og Montanari får et eksponentielt forhold allerede ved en temperatur på 22 °C (se figur 4.33), noe som tilsier at ledningsevnen vil variere mer ved høyere felt, enn det brukt i arbeidet med denne masteroppgaven.

I forsøkene utført i forbindelse med masteroppgaven, er temperaturen høyest ytterst i isolasjonen. Da varmekablene er plassert på utsiden av selve kabelen. For en HVDC kabel i

drift, vil strøm føre til ohmske tap i lederen. Disse tapene fører til varmeutvikling. Dette fører til at temperaturen vil være høyest innerst, og en vil få en temperaturgradient utover i isolasjonen. Det motsatte er tilfellet for forsøkene presentert i denne rapporten. Resultatene presentert i kapittel 4, viser at økende temperatur gir økende ledningsevne for begge testobjektene. Dette vil ved normal drift føre til at isolasjonen nærmest lederen vil ha en høyere konduktivitet, enn det tilfellet er ved skjermen. Denne variasjonen i ledningsevne vil igjen som forklart i teorien gi en ujevn feltfordeling i isolasjonen. Dette vil være svært uheldig for kabelen da denne ujevnheten skyldes dannelsen av romladninger i isolasjonen (se teorien). Dette er spesielt uheldig for PEX kabelen ved temperatur over 60 °C, da ledningsevnen er svært avhengig av temperaturen (se figur 4.28).

5.3 Feilkilder

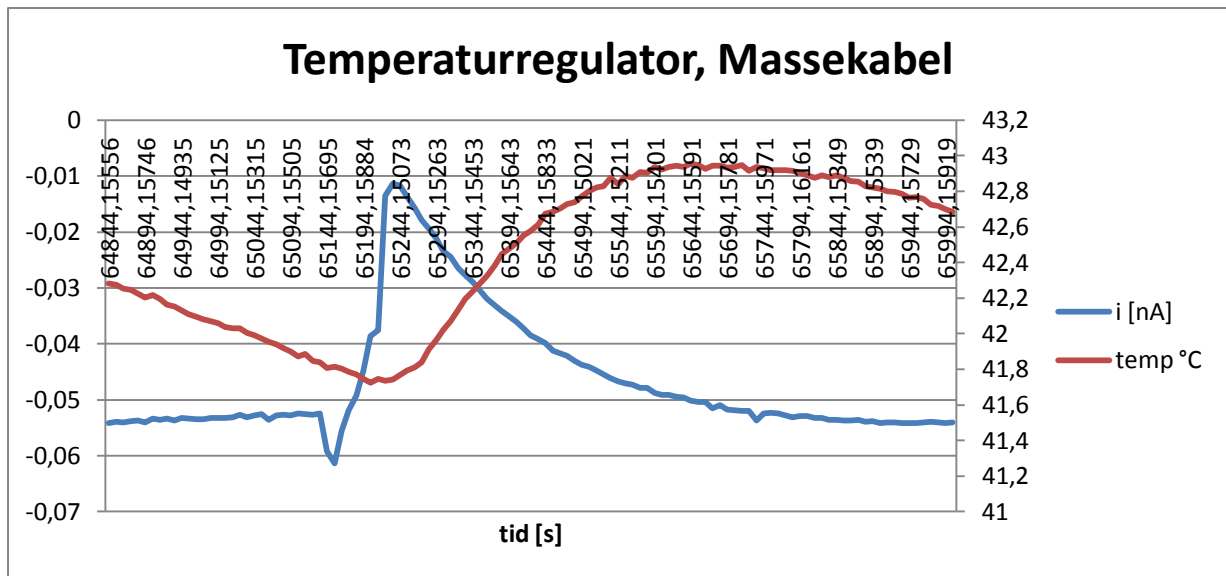
Den største feilkilden slik måleoppsettet er lagt opp, er nok måleinstrumentene. Man er veldig avhengig av å ha et godt kalibrert instrument, for å kunne få ut fornuftige måleverdier. Begge instrumentene var kalibrert høsten 2011, men det viste seg allikevel at elektrometret ikke målte det samme i alle måleområder.

Stabiliteten til spenningskilden vil også ha noe å si for polarisasjonsstrømmene som måles. Med en ustabil spenningskilde vil man få momentane endringer i det påtrykte E-feltet, noe som igjen vil gi forstyrrelser på polarisasjonsforløpet. En kan tydelig se ut fra forløpet at den ideelle kilden, som kabelen utgjør under depolarisasjonsmålinger, gir mer stabile måleverdier. Da denne kun er påvirket av eksterne feilkilder.

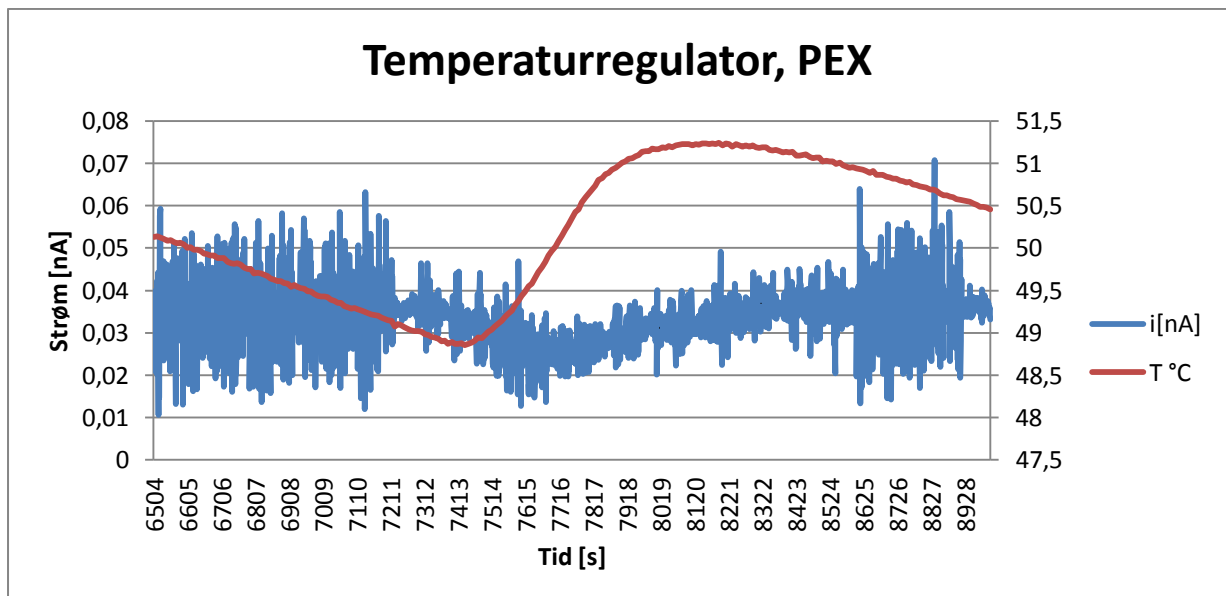
Bryteren styres av en AC kilde, noe som igjen fører til at den i enkelte tilfeller blir stående å slå. Dette kan gi samme feil, som en ustabil spenningskilde ville påført målingene. I tillegg til dette har man også magnetisk støy fra spolen, som styrer bryteren.

Dataprogrammene brukt for å styre kretsen, og å logge resultatene kan også være en feilkilde. Da kommunikasjonen mellom datamaskinen og måleinstrumentet ikke alltid har vist seg å være like pålitelig. I tillegg kommer styringen av bryter og relè, da det ved målinger på PE kabelen viste seg at man fikk transiente forløp innledningsvis (se vedlegg K).

Den feilkilden som er lettest å observere er varmekablene, da reguleringen av temperaturen til disse påvirker målingen. Temperaturreguleringen fører til plutselig transiente endringer i strømmen, noe som er veldig lett å se i figur 4.19. To eksempler på hvordan temperaturreguleringen påvirker målingene kan ses i figur 5.1 og 5.2.



5.1 Støy fra temperaturregulering.



5.2 Støy fra temperaturregulering.

5.4 Videre arbeid

Denne masteroppgaven vil også kunne brukes som innledning til et videre arbeid rundt de temaene som blitt nevnt i denne rapporten.

En mulighet til videre arbeid ligger i å utbedre målekretsen, brukt i denne masteroppgaven, slik at testobjektet kan påtrykkes en høyere spenning/temperatur.

Det vil også være mulig å bruke denne masteoppgaven til å se nærmere på hvordan det elektriske feltet oppfører seg i de ulike isolasjonsmaterialene.

En tredje mulighet til videre arbeid vil være å bruke en AC kilde i stedet for en DC kilde, for å studere disse temaene.

6 Konklusjon

Formålet med masteroppgaven har vært å studere polarisasjonsfenomener og elektrisk ledningsevne til isolasjonsmaterialer brukt i HVDC kabler. Arbeidet har gjort det mulig å trekke følgende konklusjoner:

- Målekretsen tåler et spennings på 25 kV, og en temperatur på henholdsvis 60 °C (massekabel) og 80 °C (PEX kabel).
- Vernet Keithley anbefaler til bruk for sine måleinstrumenter, påvirke måleresultatene.
- Dominerende polarisasjonsmekanisme i massekabler er grenseflatepolarisasjon. Relaksjonstids beregninger viser at polarisasjonen tar lengre tid i papiret (53,345-1114,1 s) enn i oljen (10,388-56,163 s), og at denne tiden er avhengig av både temperatur og spenning.
- Dominerende polarisasjonsmekanisme i PEX kabler er dipol polarisasjon, pga polarisasjon mellom to grenseflater. Relaksjonstiden er mindre enn for massekabler (59,406-3,103 s).
- Trenger flere undersøkelser før det kan konkluderes med at det er mulig å estimere relaksjonstiden til PEX, på samme måte som for massekabler.
- Ledningsevnen er større i massekabler ($8 \cdot 10^{-16} - 6,2 \cdot 10^{-14} \Omega^{-1}m^{-1}$), sett i forhold til PEX kabler ($7,2 \cdot 10^{-18} - 3,2 \cdot 10^{-16} \Omega^{-1}m^{-1}$).
- Ledningsevnen i begge testobjektene er avhengig av temperaturen.
- Ledningsevnen til massekabelen er lite avhengig av det elektriske feltet, påtrykt under forsøkene gjort for denne rapporten, noe som vil si at polarisasjonsstrømmene er ohmske.
- Ledningsevnen til PEX kabelen er lite avhengig av det elektriske feltet ved de laveste temperaturene (ohmske polarisasjonsstrømmer). Kabelen er derimot svært avhengig av feltet ved de høyeste temperaturene.

7 Litteraturliste

- [1] Europa kommisjonen, ec.europa.eu/clima/politics/package/index_en.htm, besøkt 01.02.12
- [2] Thomas Worzyk, "Submarine power cables", ABB Karlskrona, 2009.
- [3] Esten Øyen Fremmegaard, Masteroppgave, "Polarisasjon og Elektrisk ledningsevne i HVDC massekabler som funksjon av spenning og temperatur", juni 2011.
- [4] Erling Ildstad, "TET 4195 High Voltage Equipment, Cable Technology", 2009.
- [5] N.A.M Jamail, M.A.M Piah, "Comparative study on conduction using polarization and depolarization current (PDC) Test for HV insulation", IEEE, 2011.
- [6] Erling Ildstad. "TET 4160 High Voltage Insulating Materials", NTNU 2010.
- [7] F.H. Kreuger, "Industrial High DC Voltage", Delft: Delft University, 1995.
- [8] Mohammed Mirzaie, Ahmed Gholami, Hamid Reza Tayebi. "Insulation Condition Assesment of Power Transformers Using Accelerated Aging Tests", TUBITAK 2009.
- [9] M.J.P. Jeroense, P.H.F Morshuis. "Electrical Fields in HVDC Paper-Insulated Cables", Delft: Delft University, 1998.
- [10] P. Morshuis, M. Jeroense. "Space Charge in HVDC Cable Insulation", Delft 1997.
- [11] Oswald I. Gilbertson. "Electrical Cables for Power and Signal Transmission", Wiley 2000.
- [12] A.R. Blythe. "Electrical Properties of Polymers", Cambridge Solid State Science Series, 1979.
- [13] S. Boggs, D.H. Damon, J. Hjerrild, et al. "Effect of Insulation Properties on the Field Gradient of Solid Dielectric DC Cables, IEEE 2001.
- [14] M.J.P. Jeroense, F.H. Kreuger, "Electrical Conduction in HVDC Mass-impregnated Paper Cable", Delft: Delft University, 1995.
- [15] T.K. Saha, P. Purkait, "An Attempt to Correlate Time & Frequency Domain Polarisation Measurements for the Insulation Diagnosis of Power Transformers", IEEE 1995.
- [16] E. Ildstad. "DIE1911 Elektrisk ledningsevne, dielektriske tap og gjennomslag i fast og flytende høyspenningsisolasjon, NTNU 2008.
- [17] www.keithley.com, FAQ
- [18] User Manual Keithley 6517A
- [19] Keithley, "Low Level Measurements Handbook, 6th Edition".
- [20] User Manual Keithley 6548

[21] R. Bodega, G.C. Montanari, P.H.F. Morshuis. "Conduction Current measurements on XLPE and EPR insulation", 2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.

8 Vedlegg

Vedlegg A:

- Resultater fra pd testing av målekretsen

Vedlegg B1:

- Resultater Massekabel.

Vedlegg B2:

- Resultater PEX kabel.

Vedlegg C:

- Datablad for diodene brukt i vern 1.

Vedlegg D:

- Datablad for MOSFET transistor brukt i vern 2

Vedlegg E:

- Datablad for Transistor brukt i vern 3

Vedlegg F:

- Datablad Fug Spenningskilde

Vedlegg G:

- Datablad for NI USB-6008

Vedlegg H:

- Montering av kabel fra kilde til bryter

Vedlegg I:

- Datablad for Escort ELC-131D Dual display LCR meter

Vedlegg J1:

- Flytdiagram, LabVIEW programmet til Keithley 6517A

Vedlegg J2:

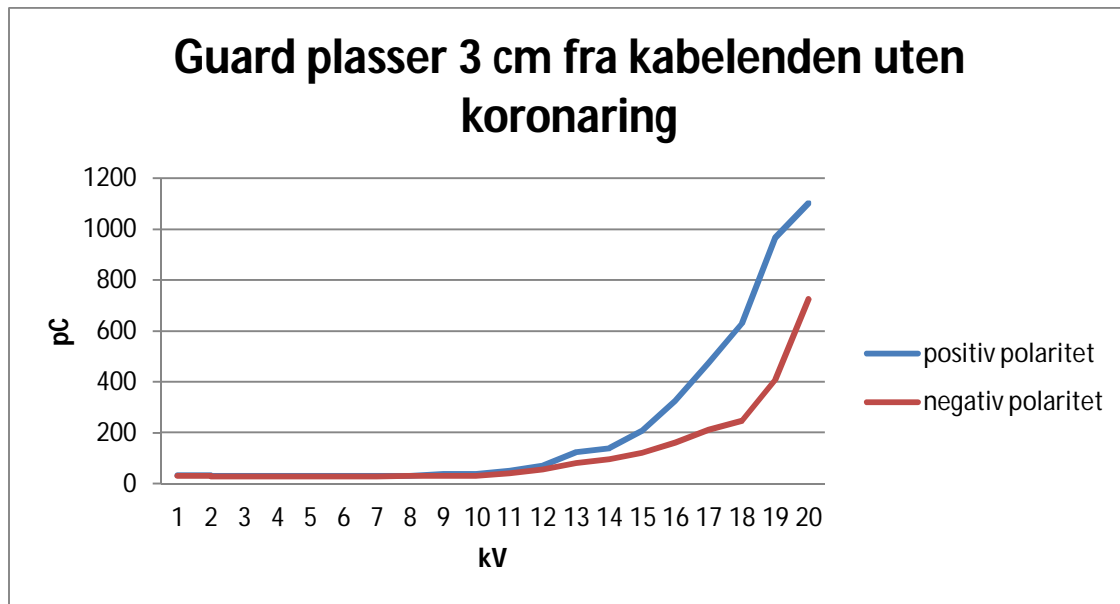
- Flytdiagram, LabVIEW programmet til Keithley 6485

Vedlegg K:

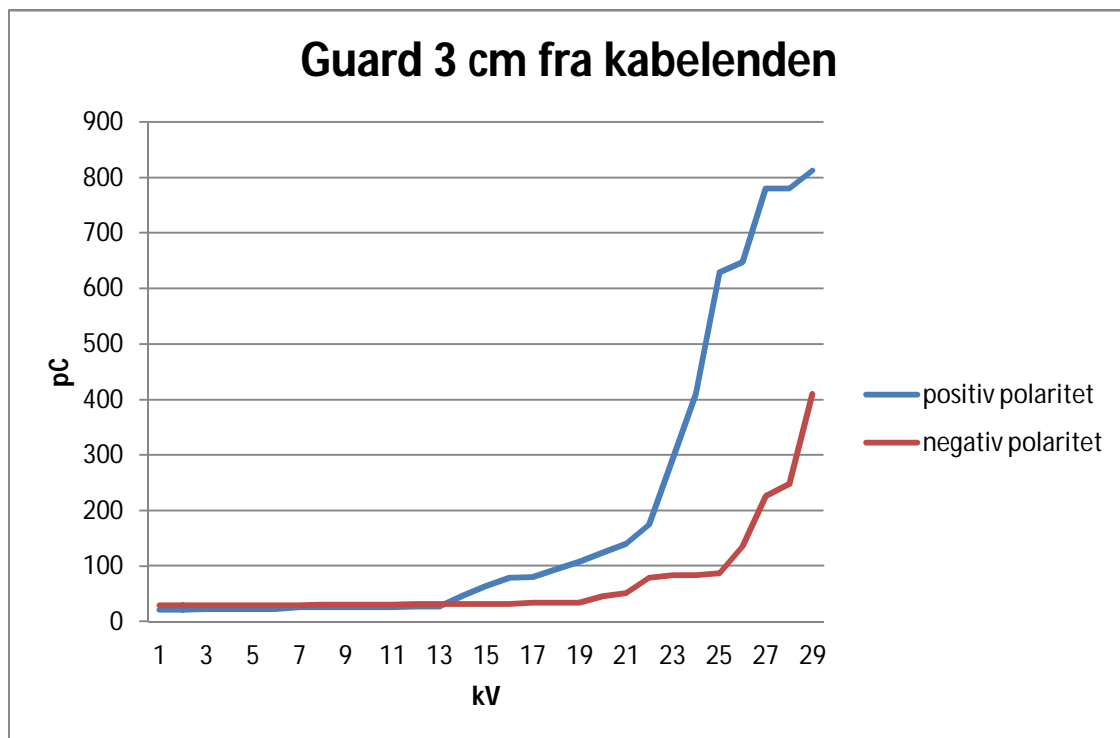
- Transient strømforløp PEX kabel.

Vedlegg A: Pd test av målekrets

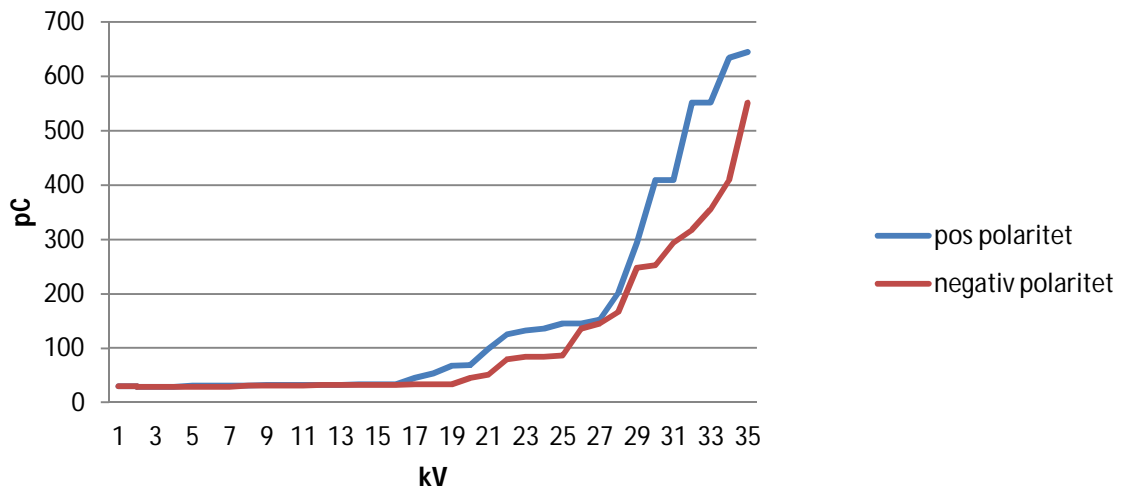
Uten koronaring:



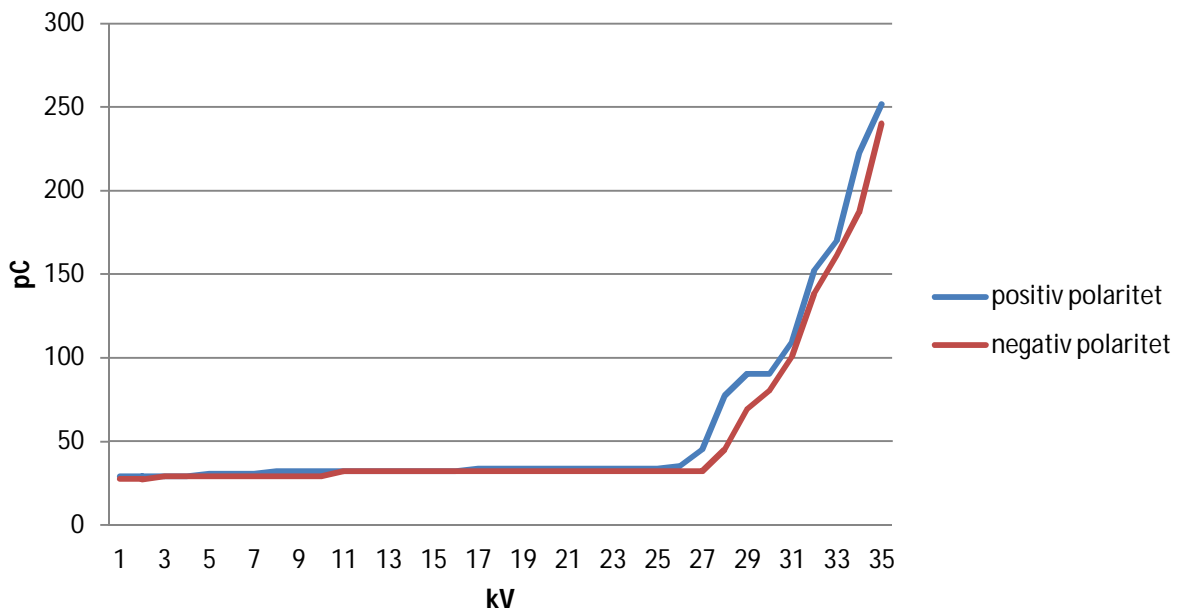
Med koronaring:



Guard 6 cm fra kabelenden

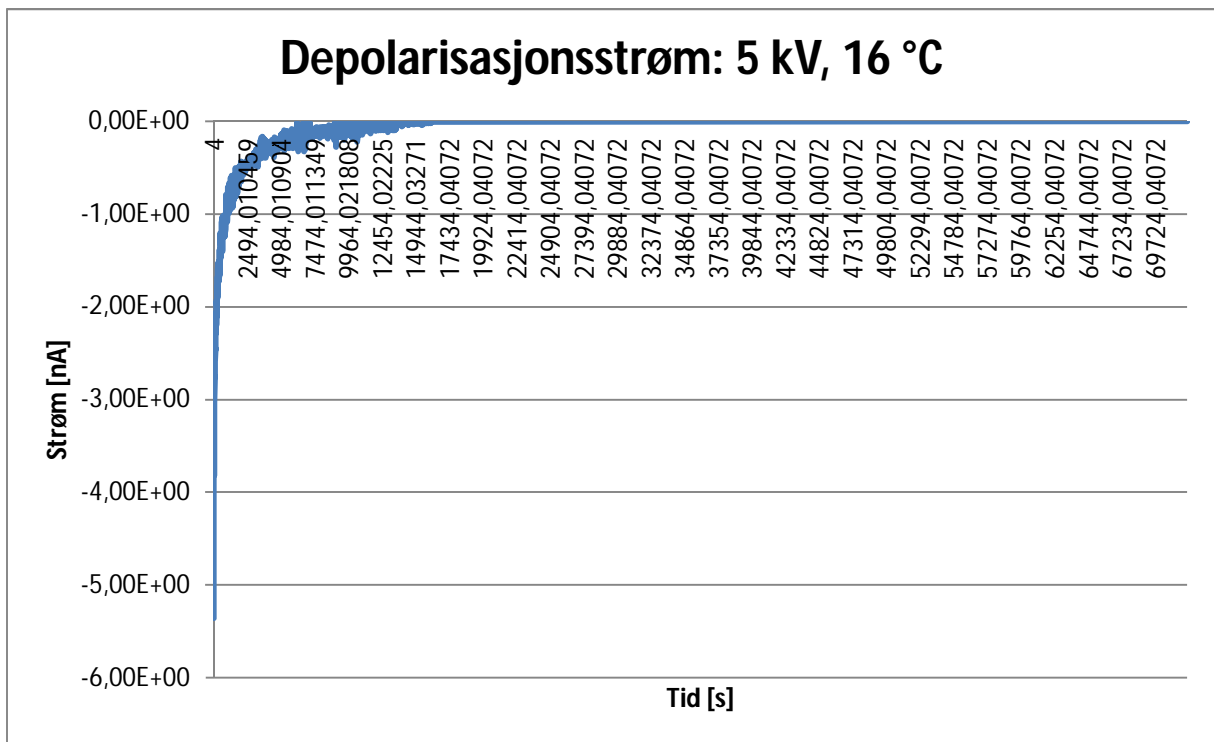
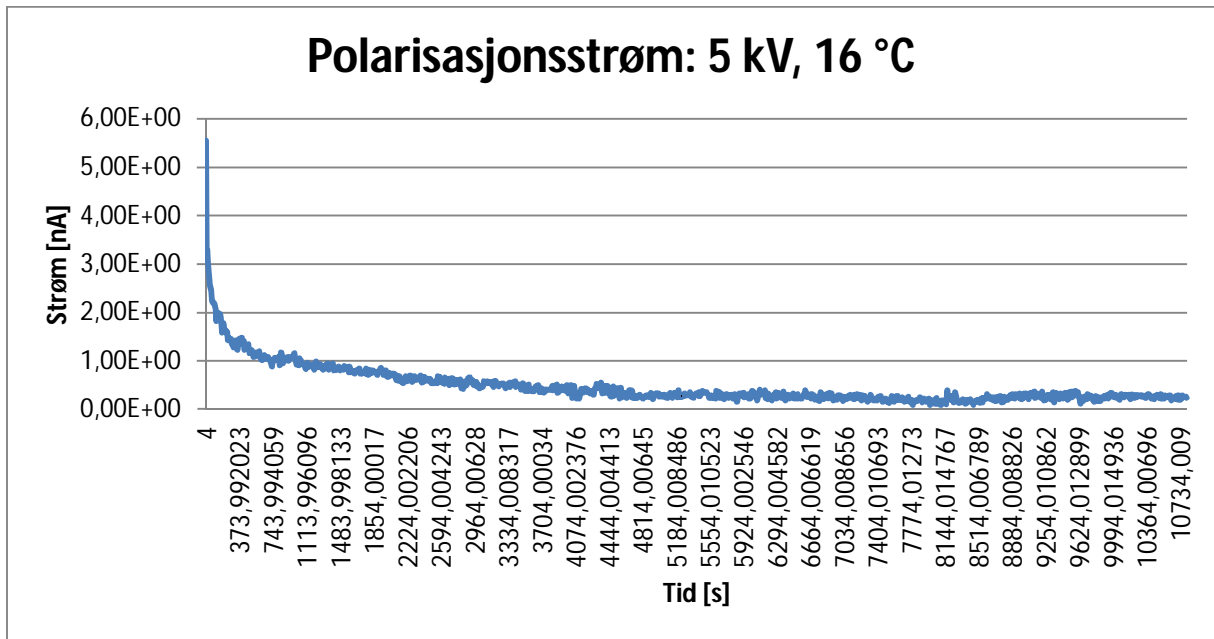


Guard 8 cm fra kabelenden

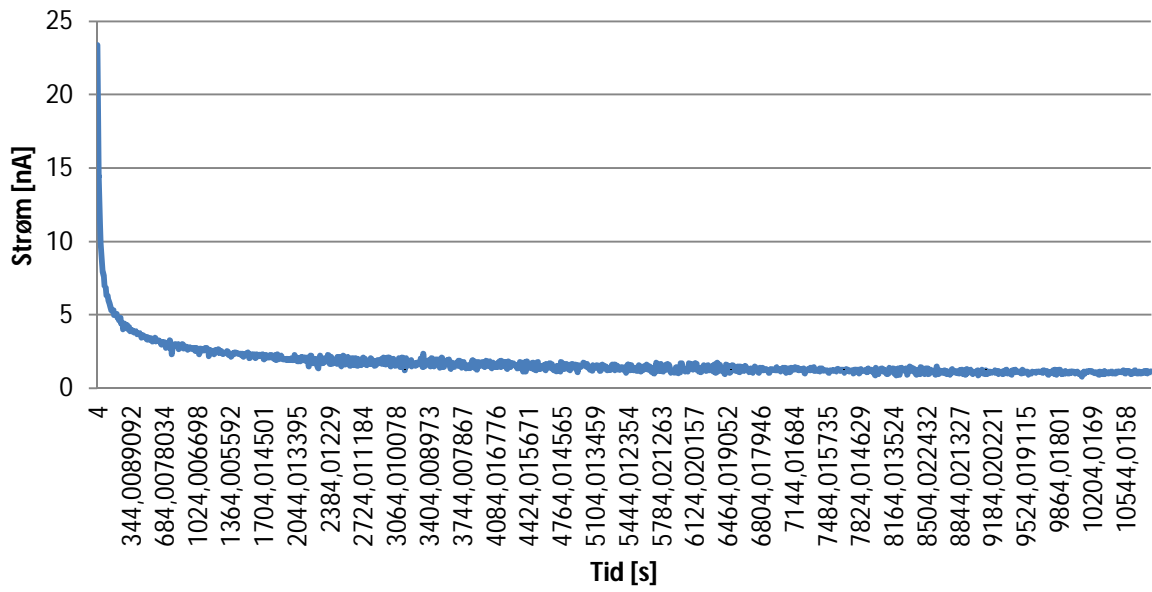


Vedlegg B1: Resultater Massekabel

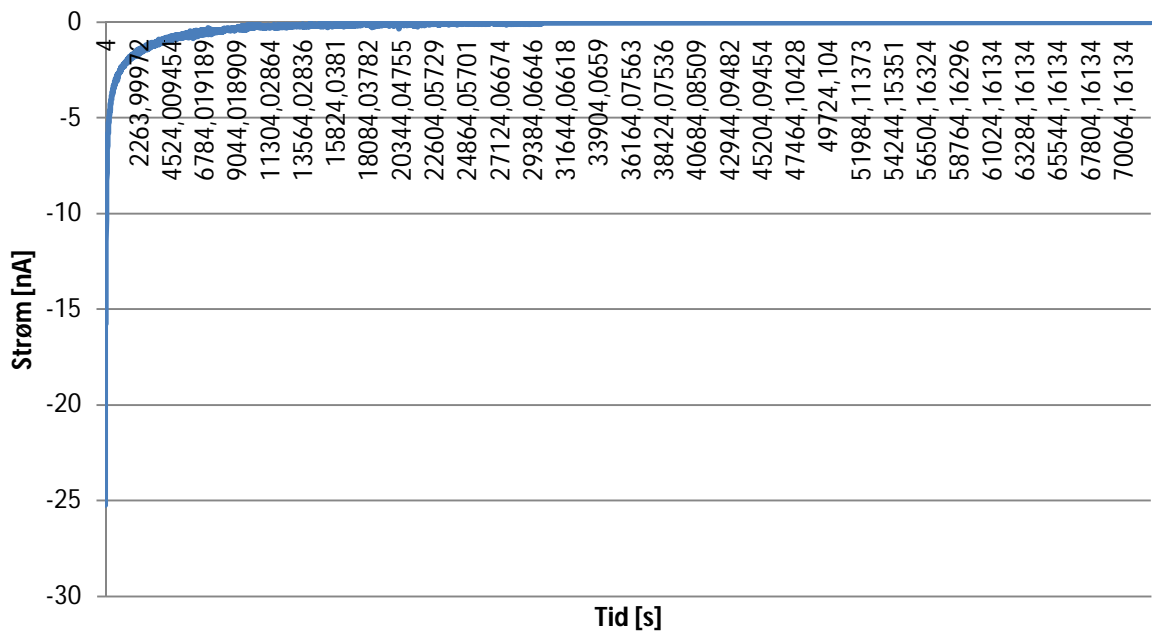
Måleresultater:



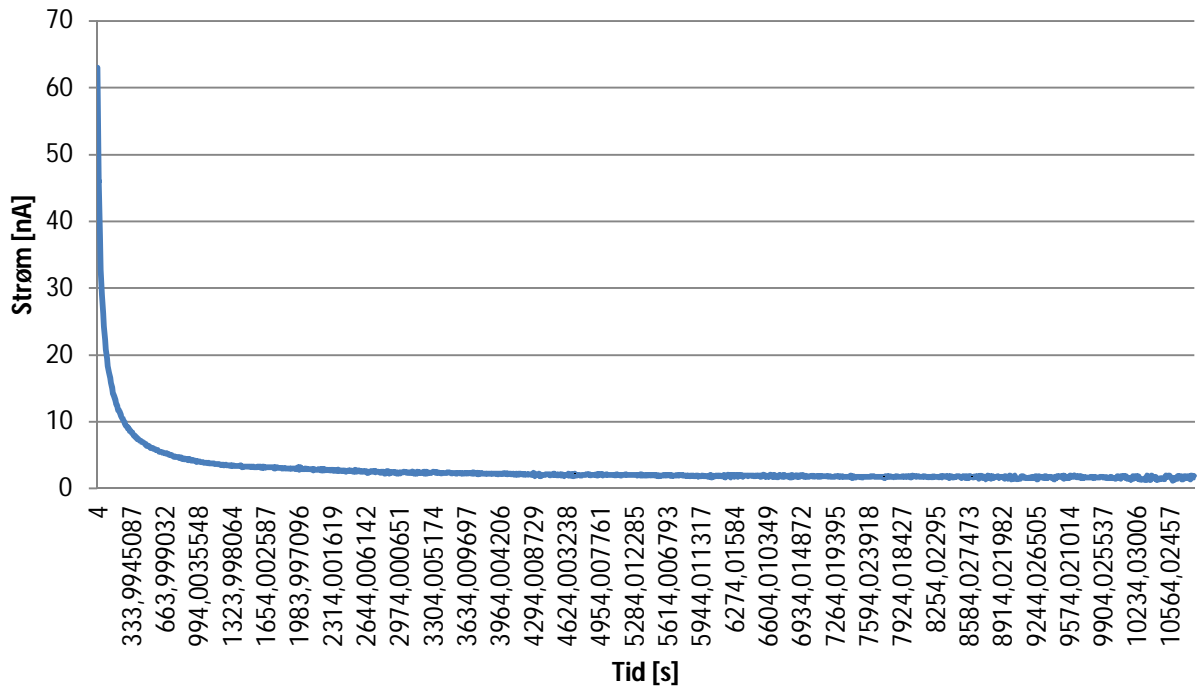
Polarisasjonsstrøm: 25 kV, 16 °C



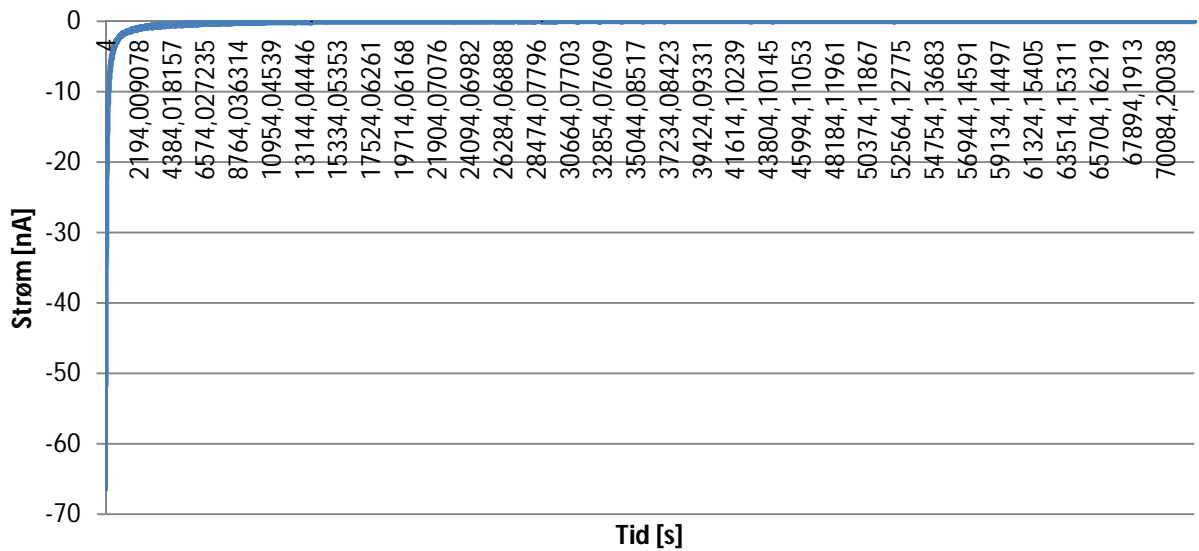
Depolarisasjonsstrøm: 25 kV, 16 °C



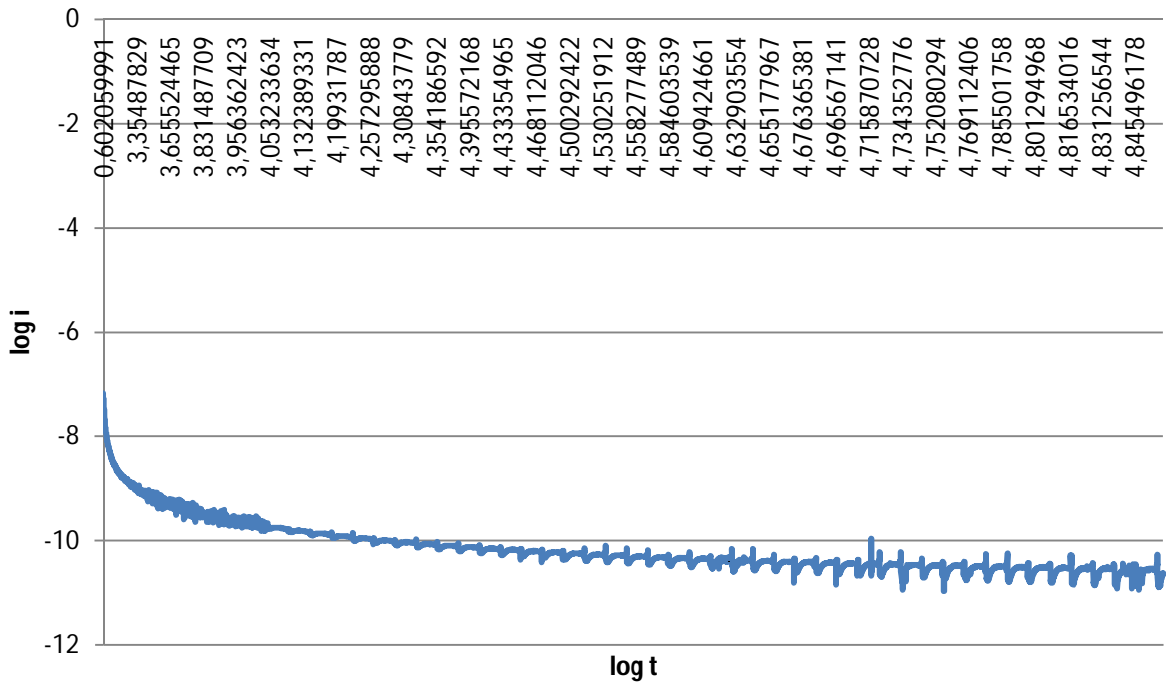
Polarisasjonsstrøm: 5 kV, 40 °C



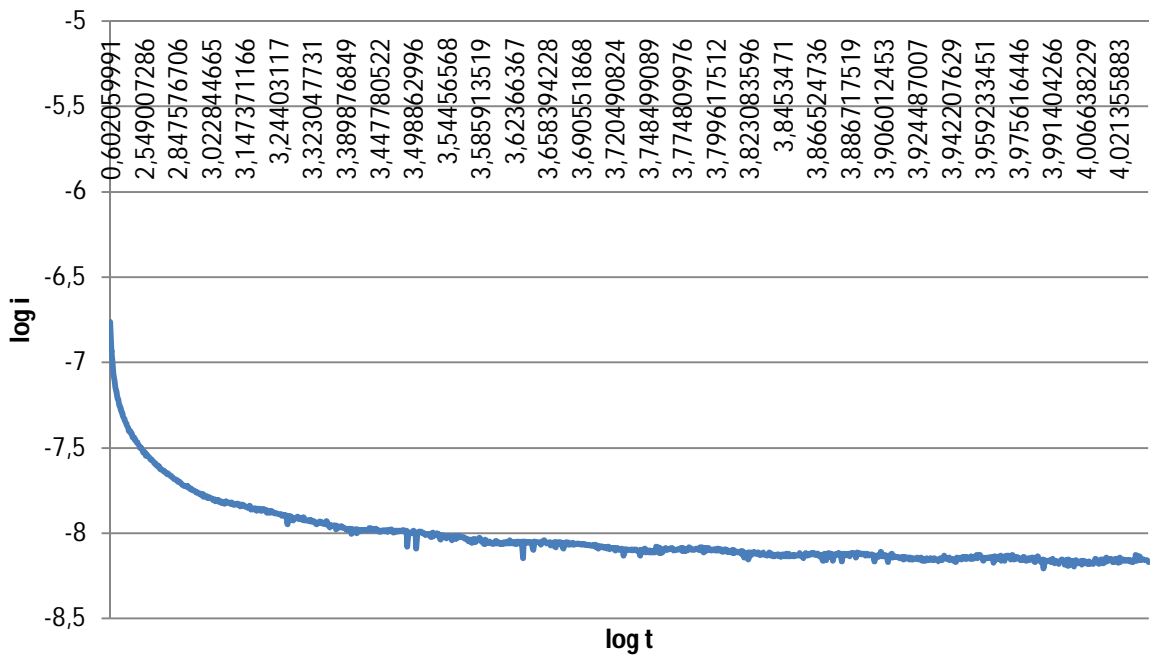
Depolarisasjonsstrøm: 5 kV, 40 °C



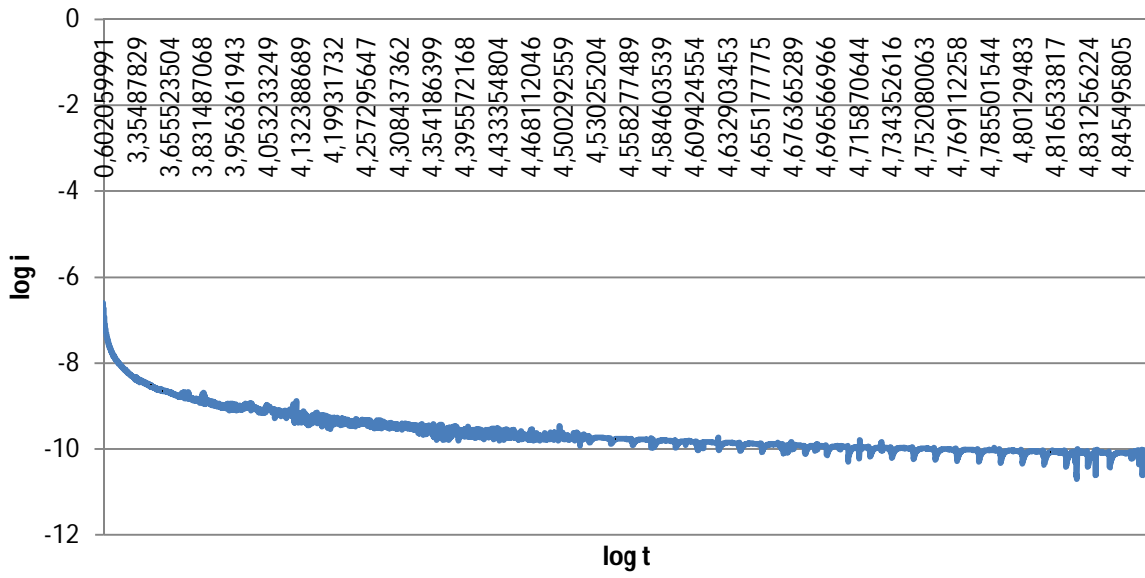
Depolarisasjonsstrøm: 5 kV, 40 °C



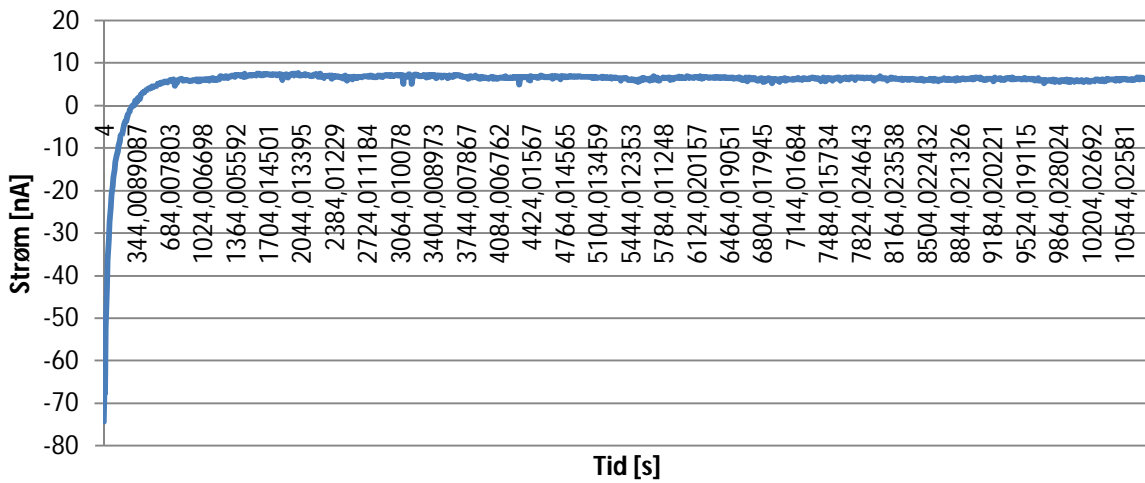
Polarisasjonsstrøm: 25 kV, 40 °C



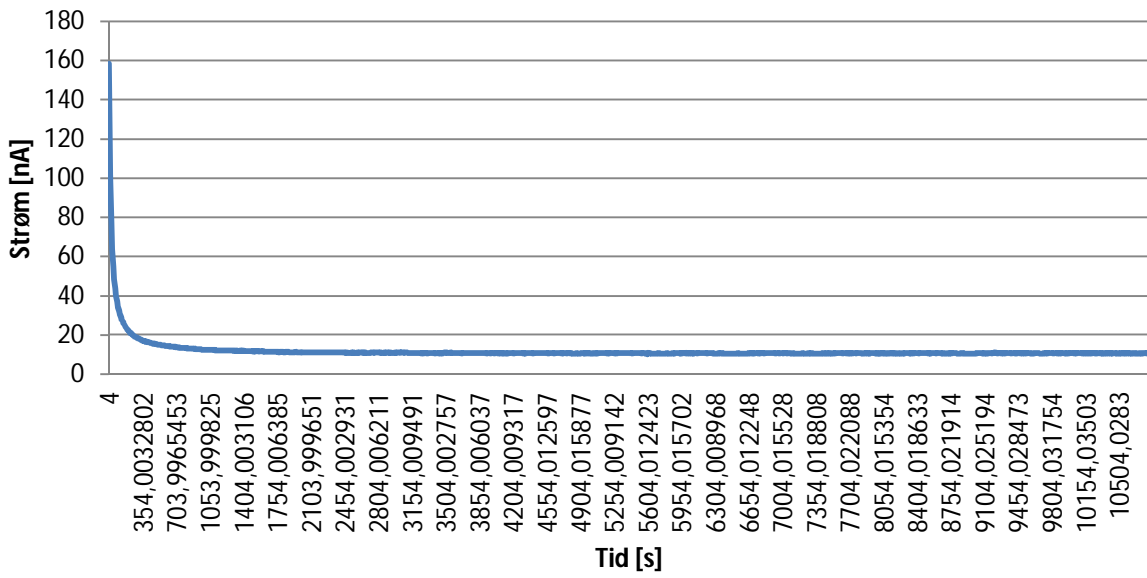
Depolarisasjonsstrøm: 25 kV, 40 grader



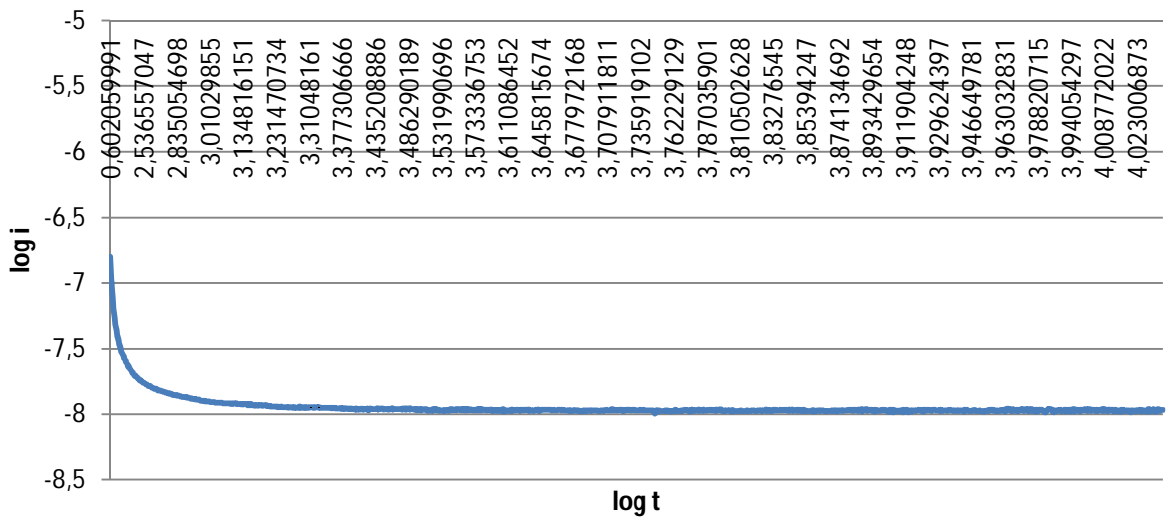
Idc: 25 kV, 40 °C



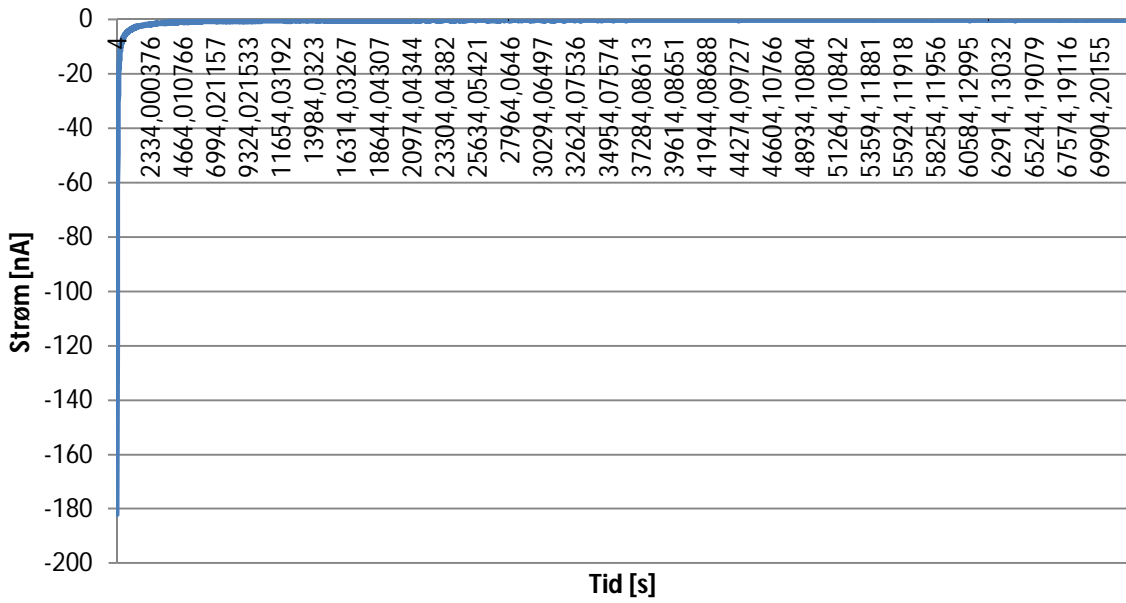
Polarisasjonsstrøm: 5 kV, 60 °C



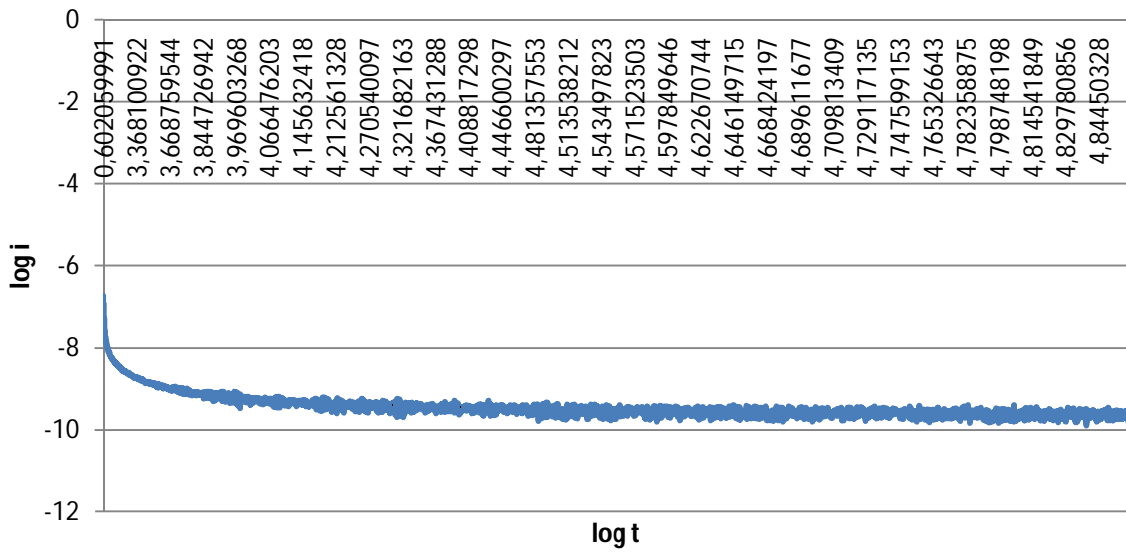
Polarisasjonsstrøm : 5 kV, 60 °C



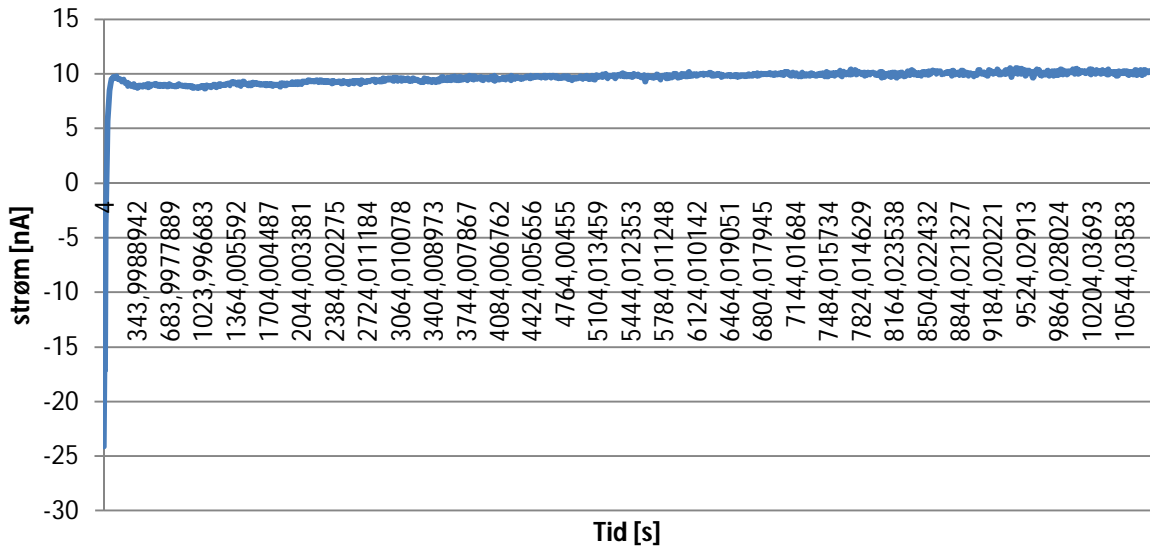
Depolarisasjonsstrøm: 5 kV, 60 °C



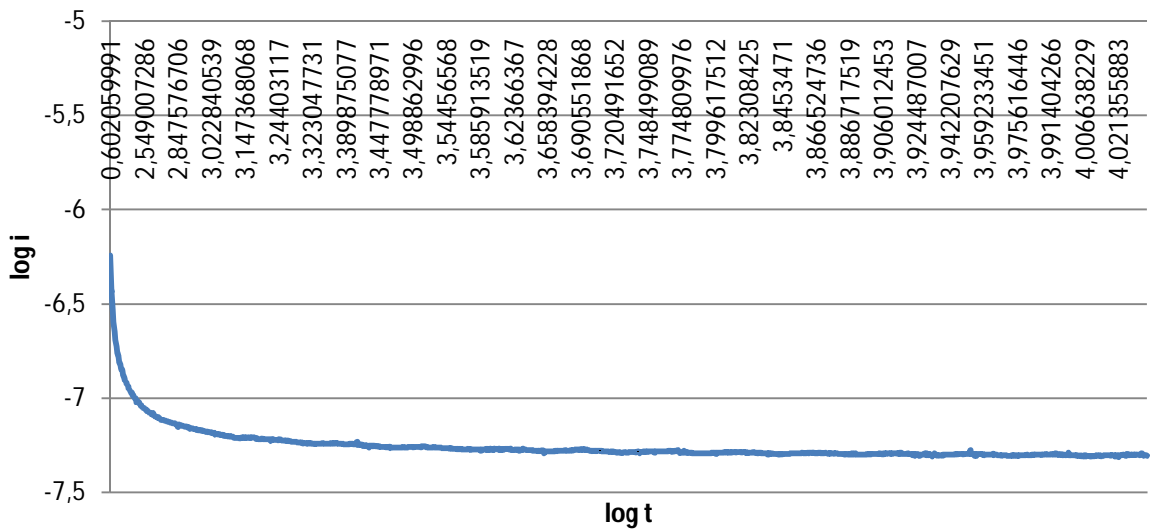
Depolarisasjonsstrøm: 5 kV, 60 °C



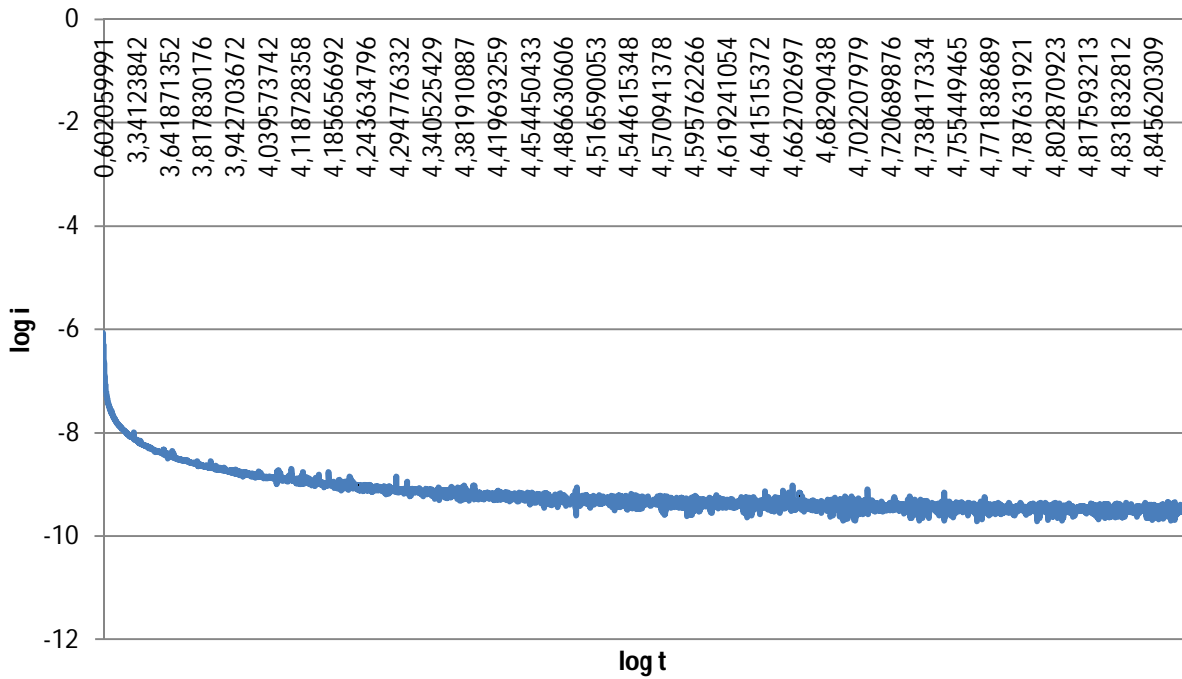
Idc: 5 kV, 60 °C



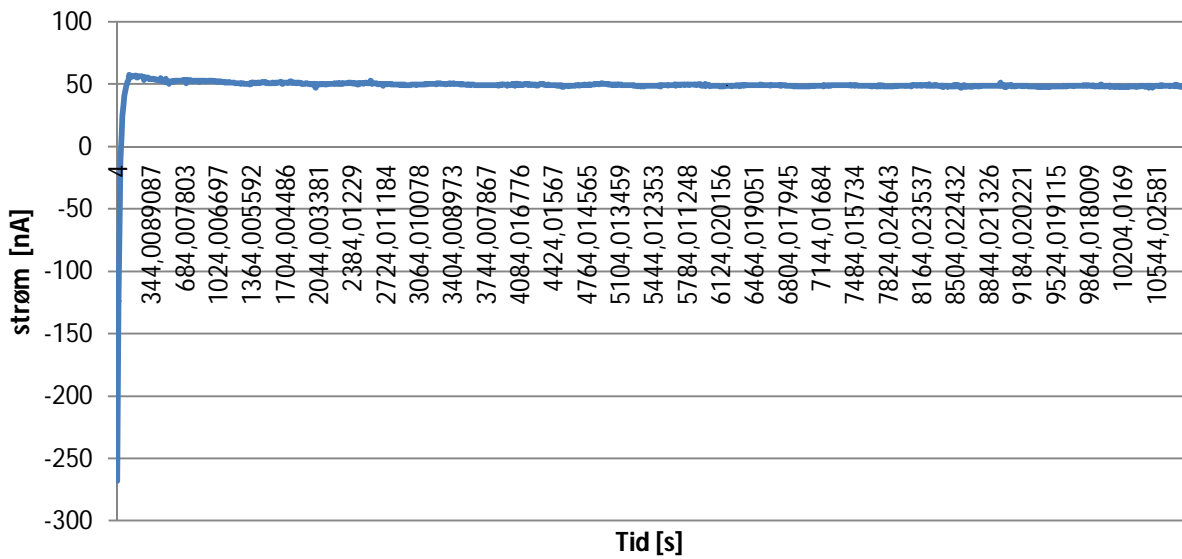
Polarisasjonsstrøm: 25 kV, 60 °C



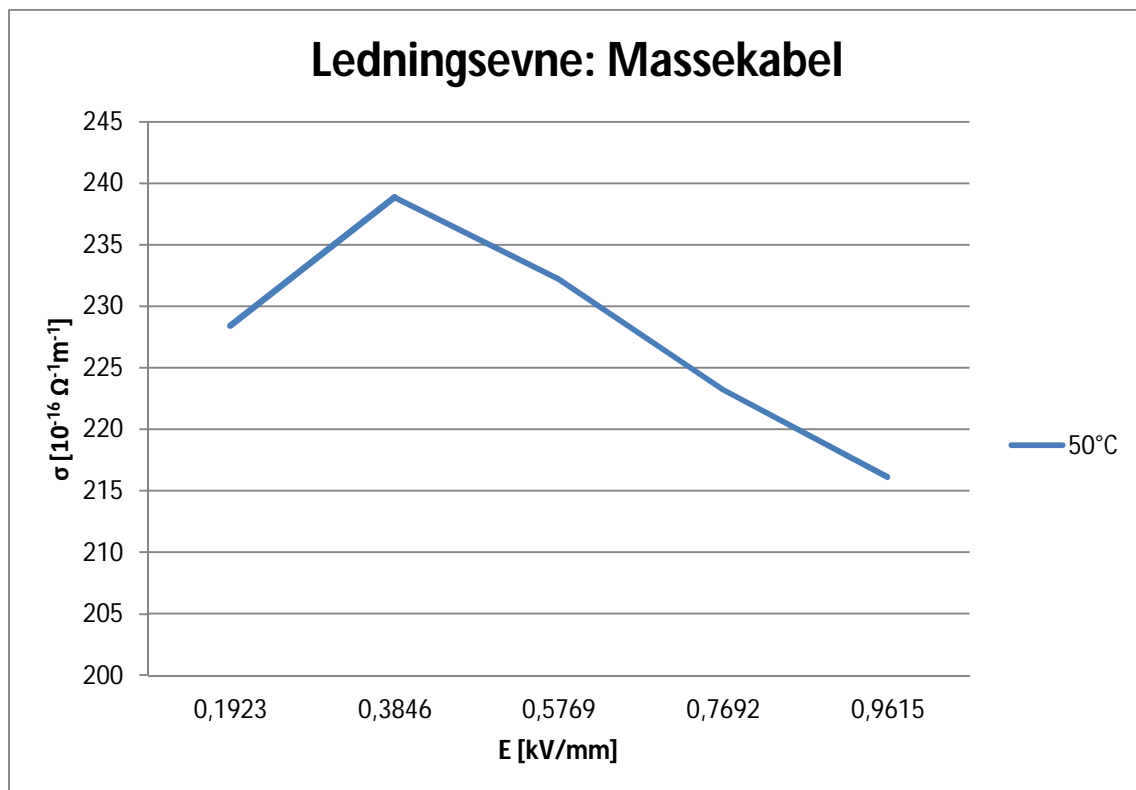
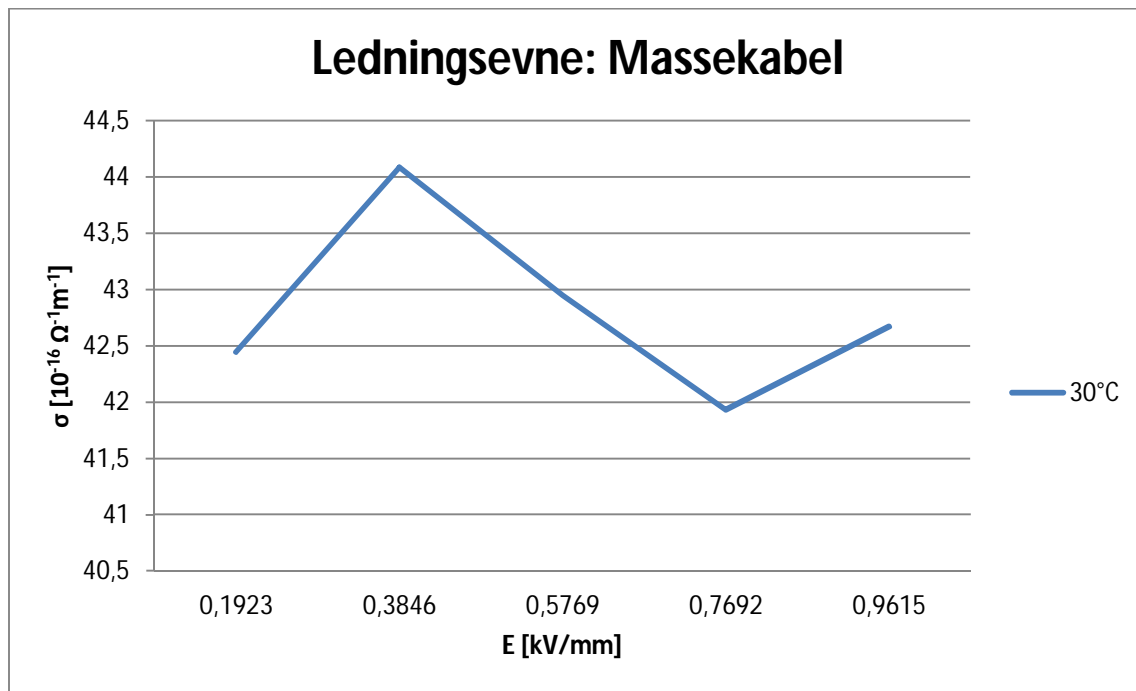
Depolarisasjonsstrøm: 25 kV, 60 °C



Idc: 25 kV, 60 °C

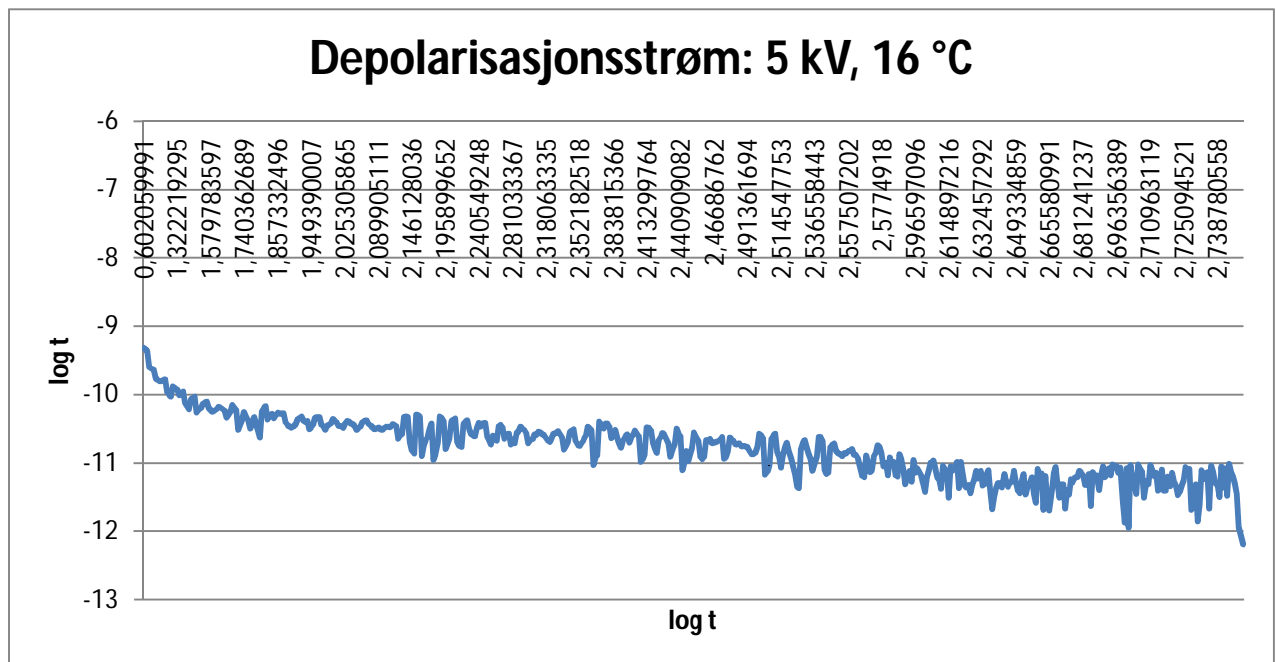
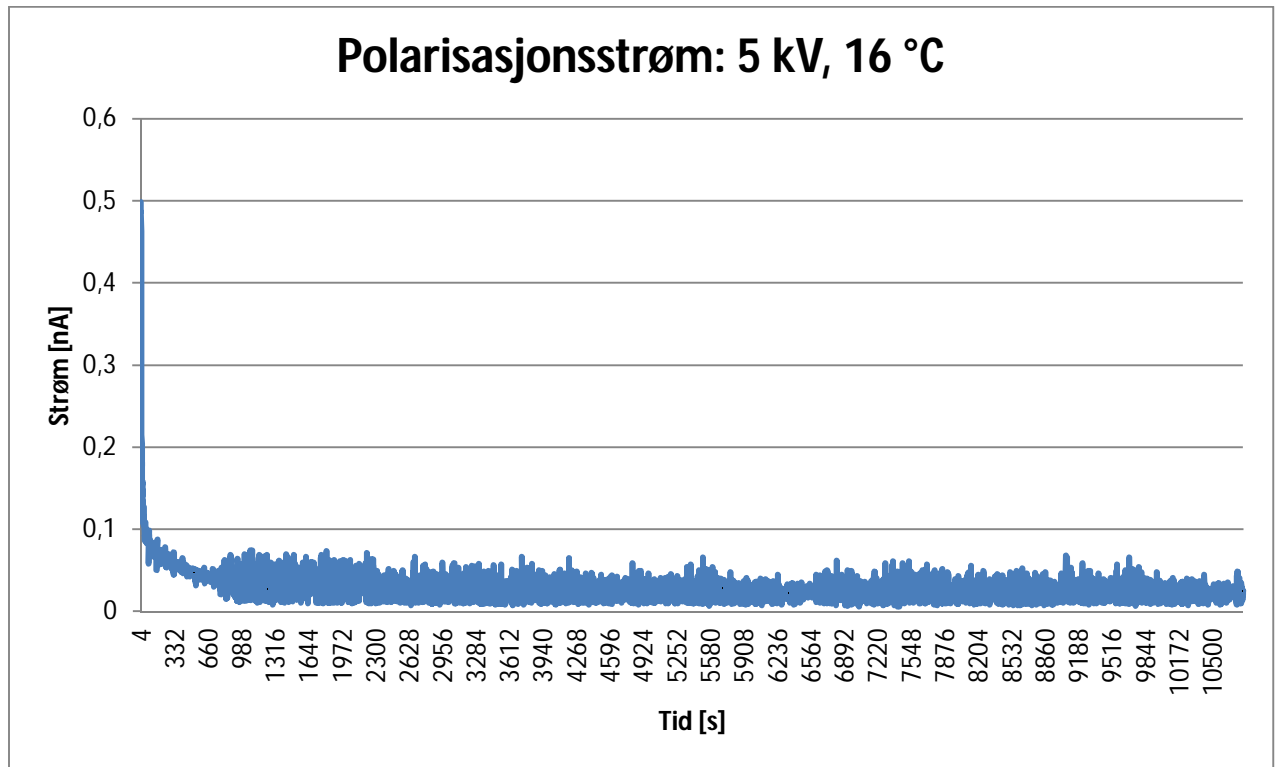


Ledningsevne:

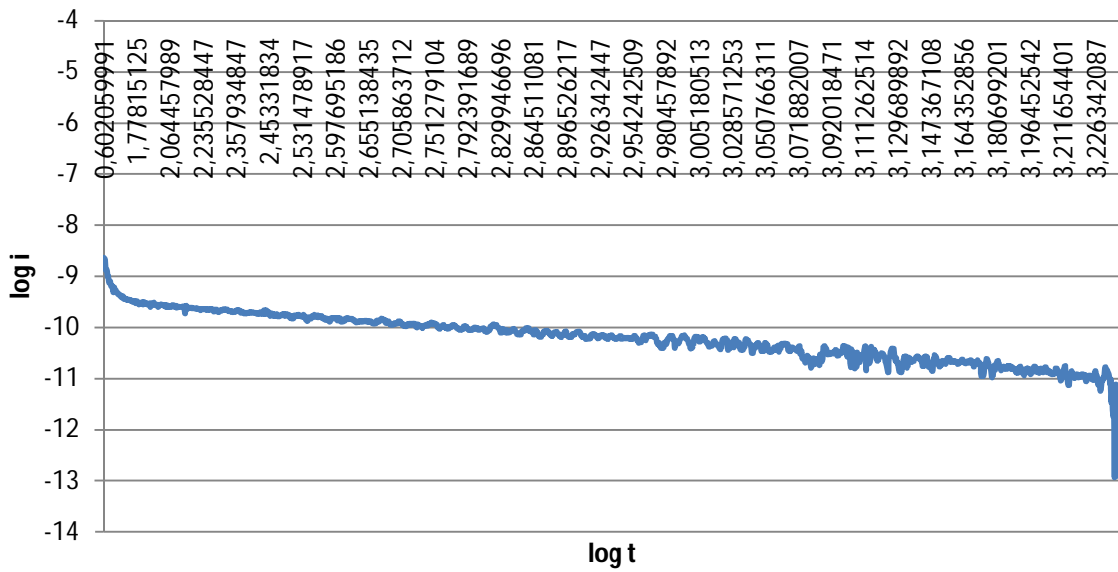


Vedlegg B2: Resultater PEX kabel

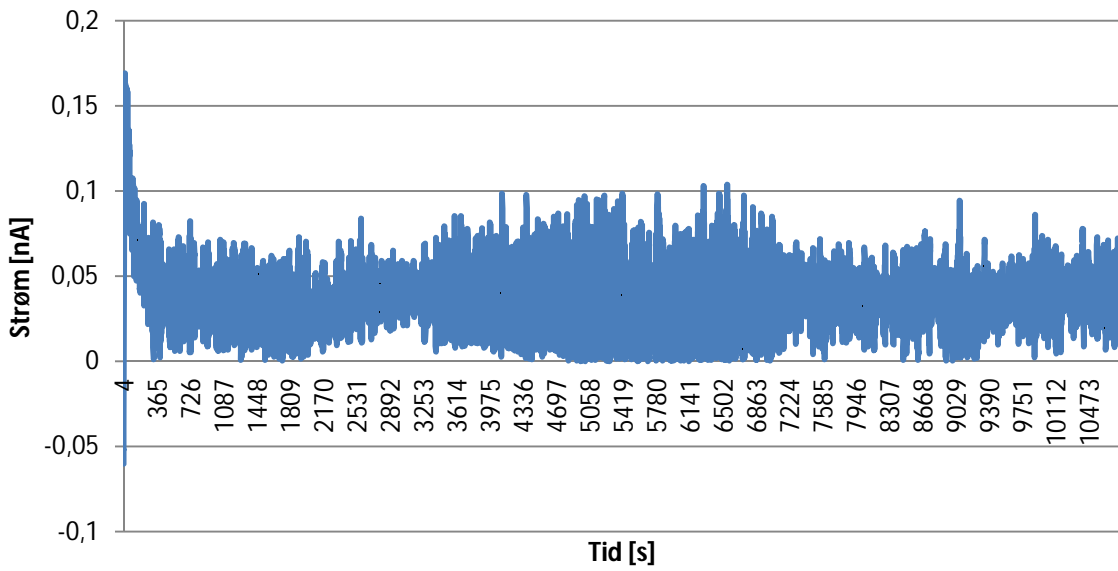
Måleresultater:



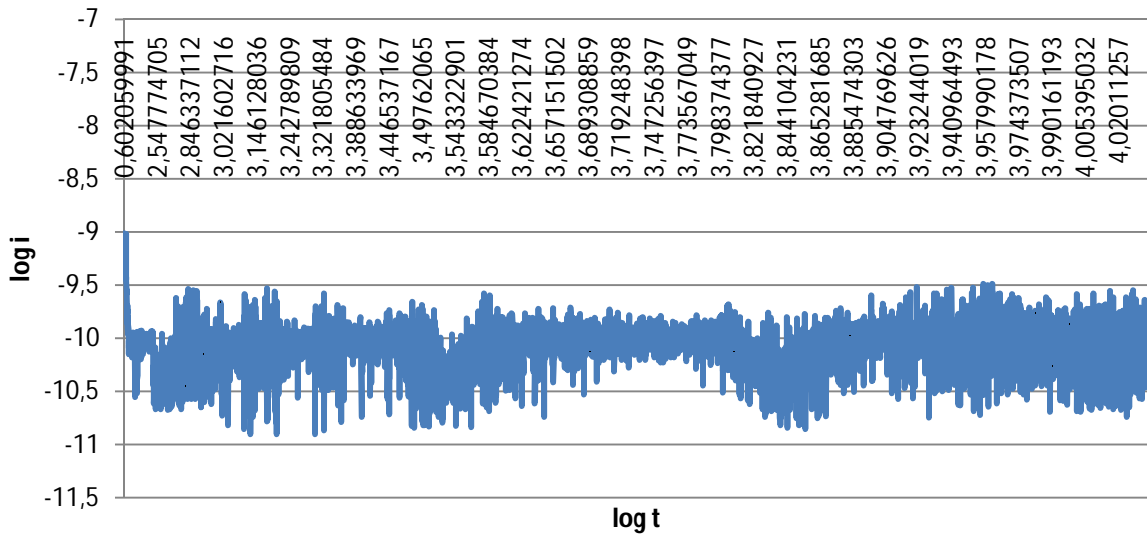
Depolarisasjonsstrøm: 25 kV, 16°C



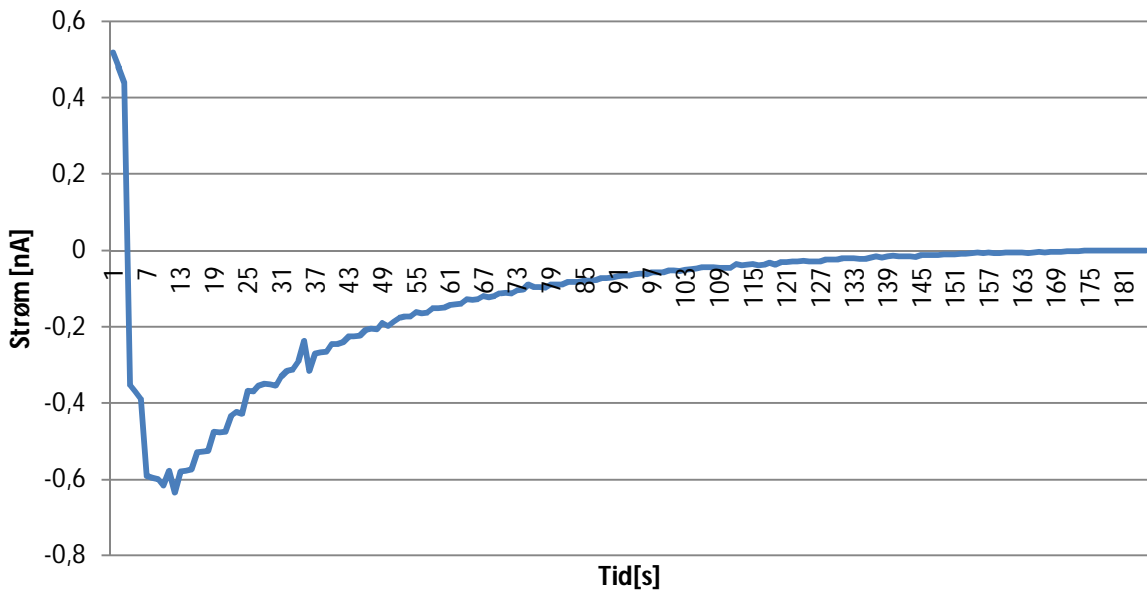
Polarisasjonsstrøm: 5 kV, 40 °C



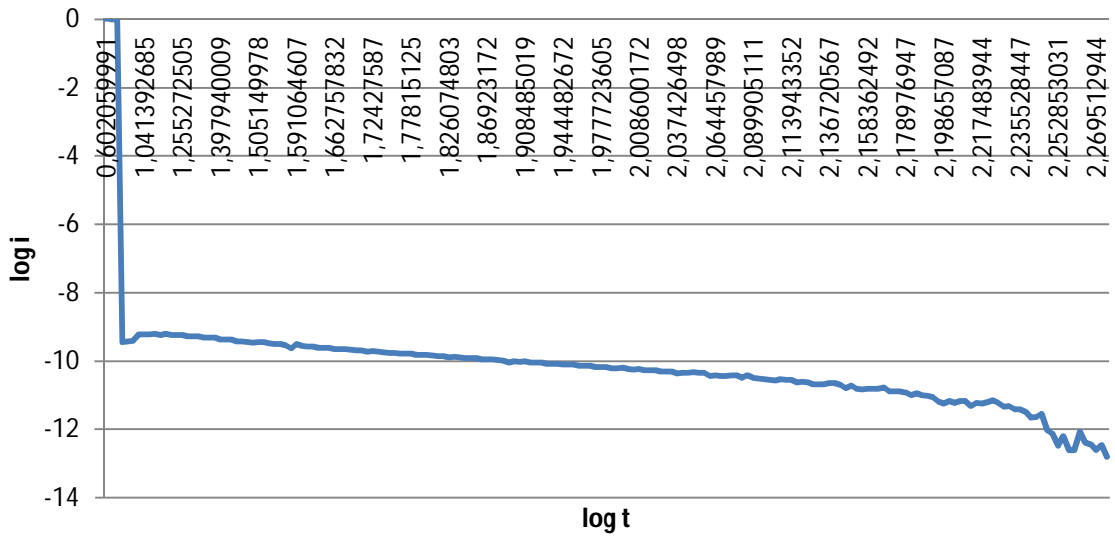
Polarisasjonsstrøm: 25 kV, 40°C



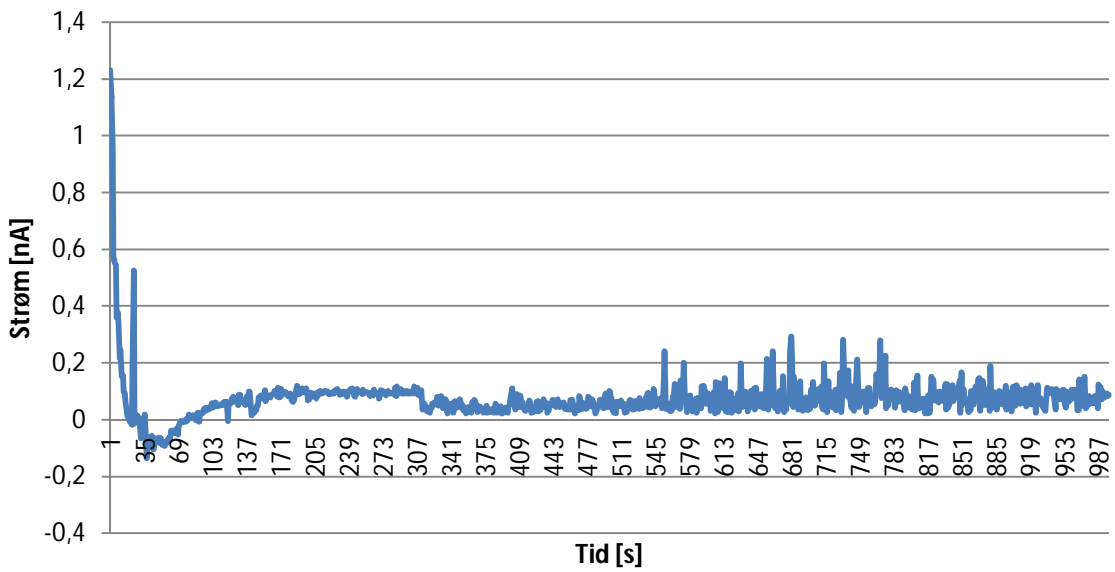
Depolarisasjonsstrøm: 25 kV, 40°C



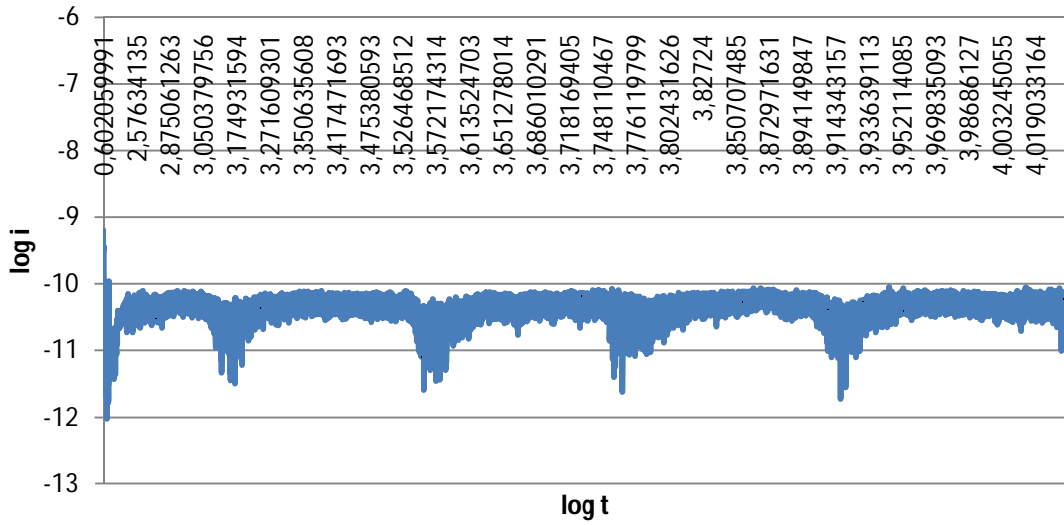
Depolarisasjonsstrøm: 25 kV, 40°C



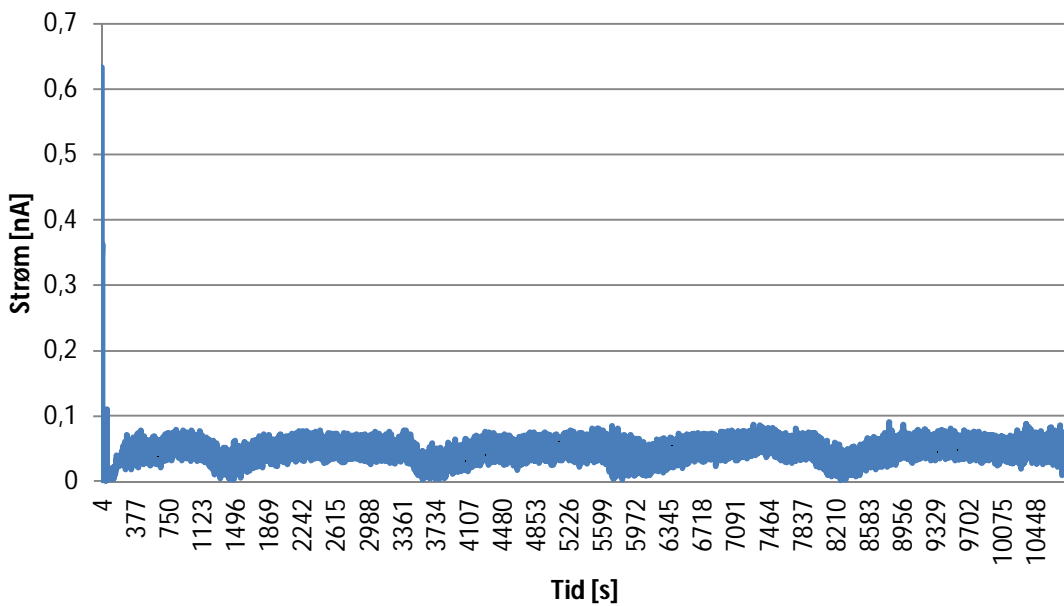
Idc: 25 kV, 40°C



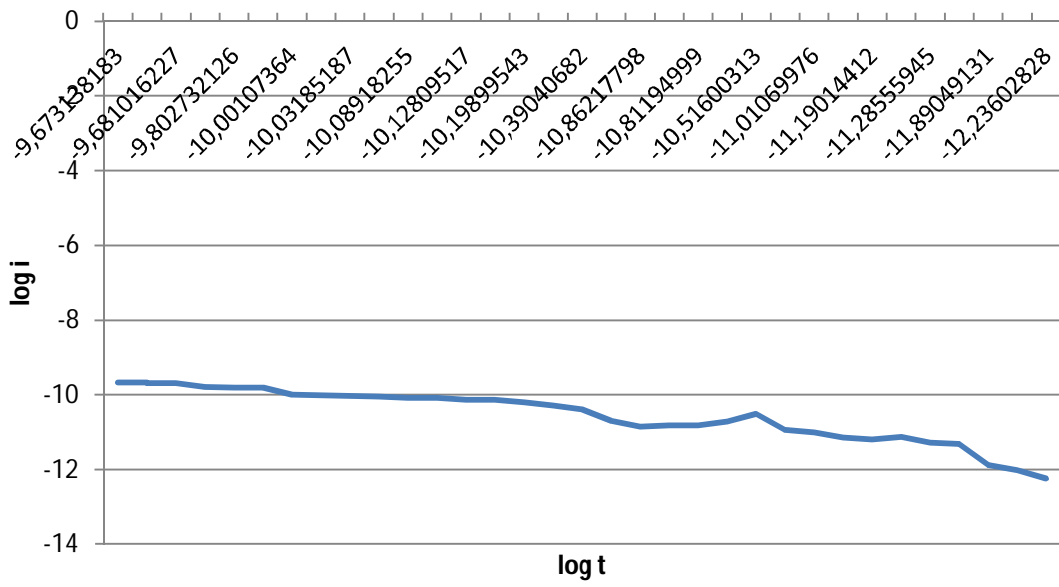
Polarisasjonsstrøm: 5 kV, 60 °C



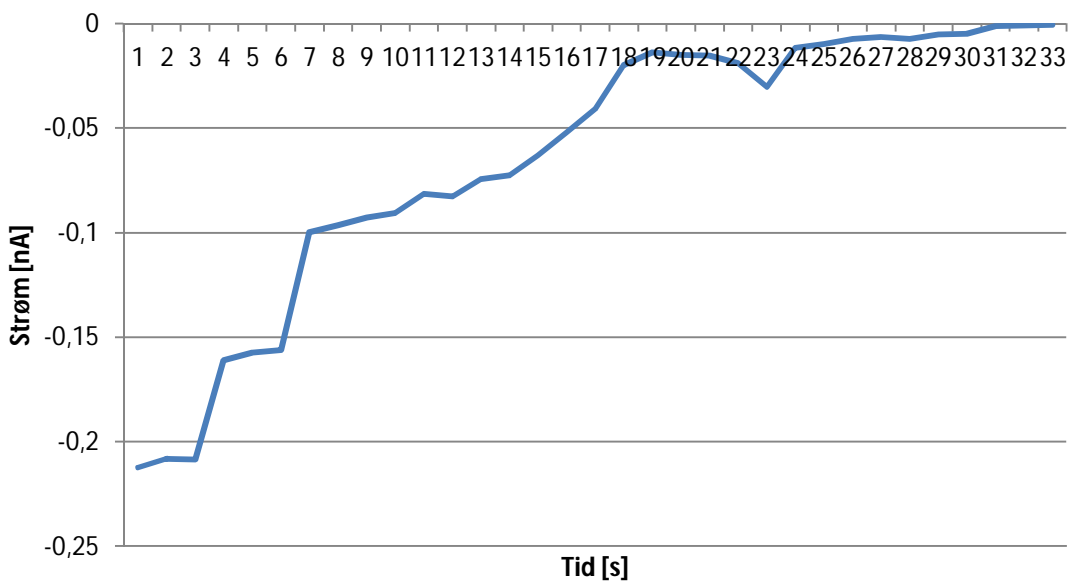
Polarisasjonsstrøm: 5 kV, 60 °C



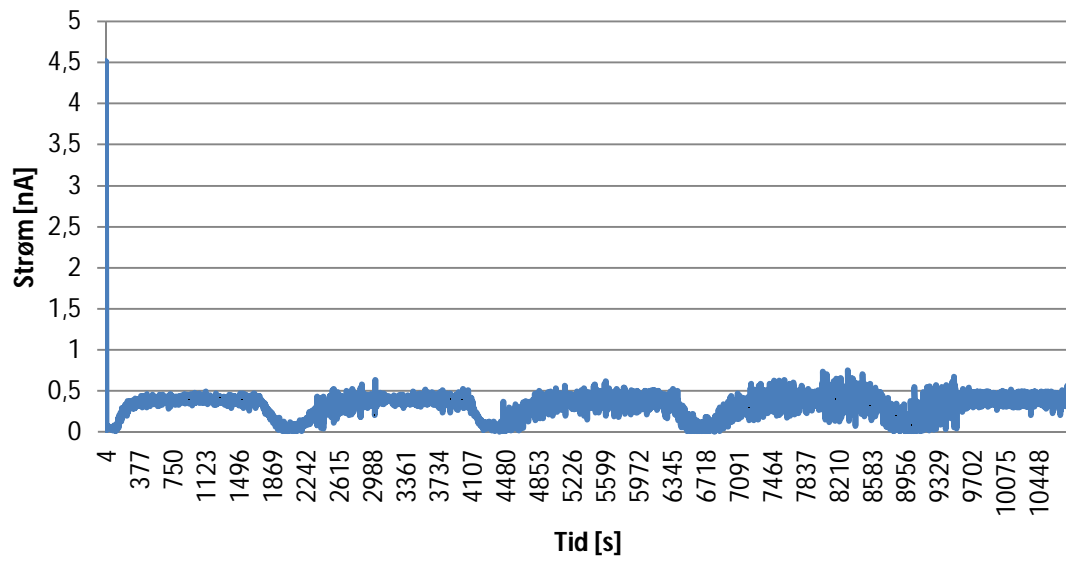
Depolarisasjonsstrøm: 5 kV, 40 °C



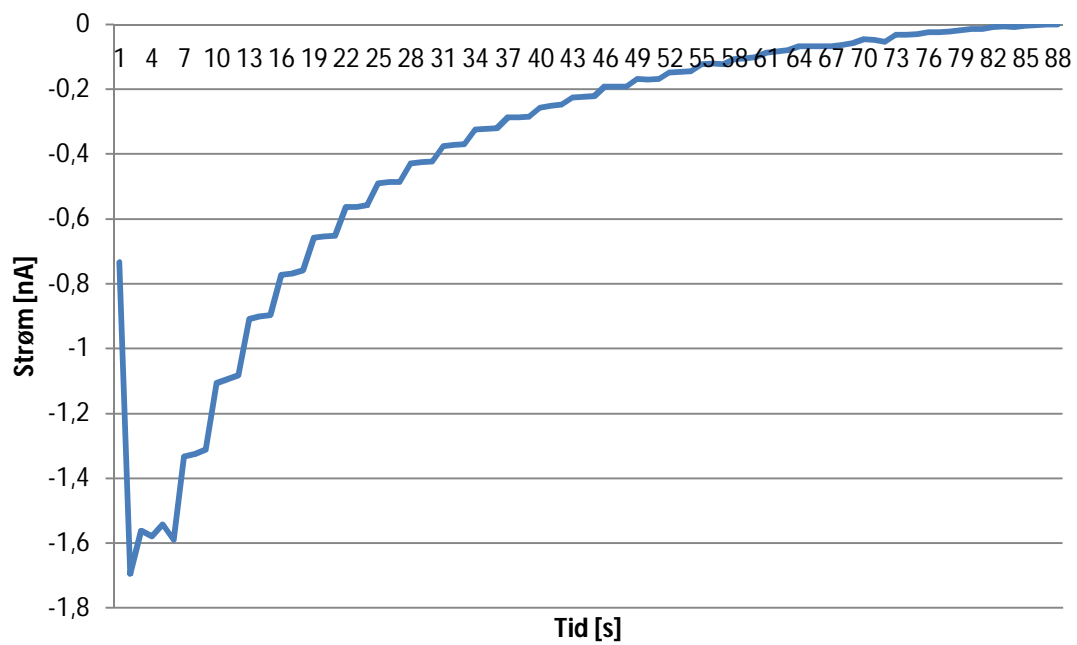
Depolarisasjonsstrøm: 5 kV, 60 °C



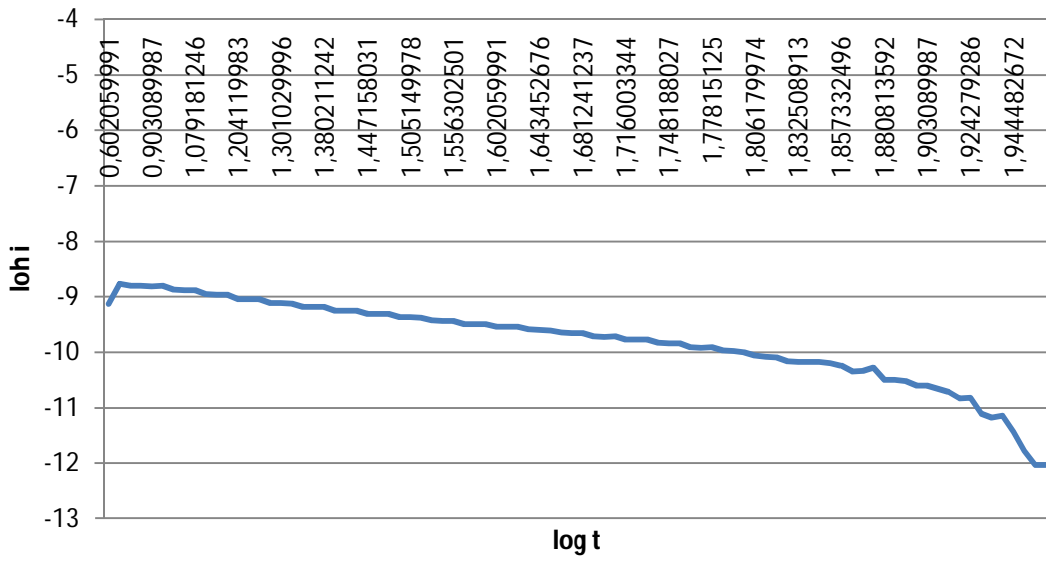
Polarisasjonsstrøm: 25 kV, 60 °C



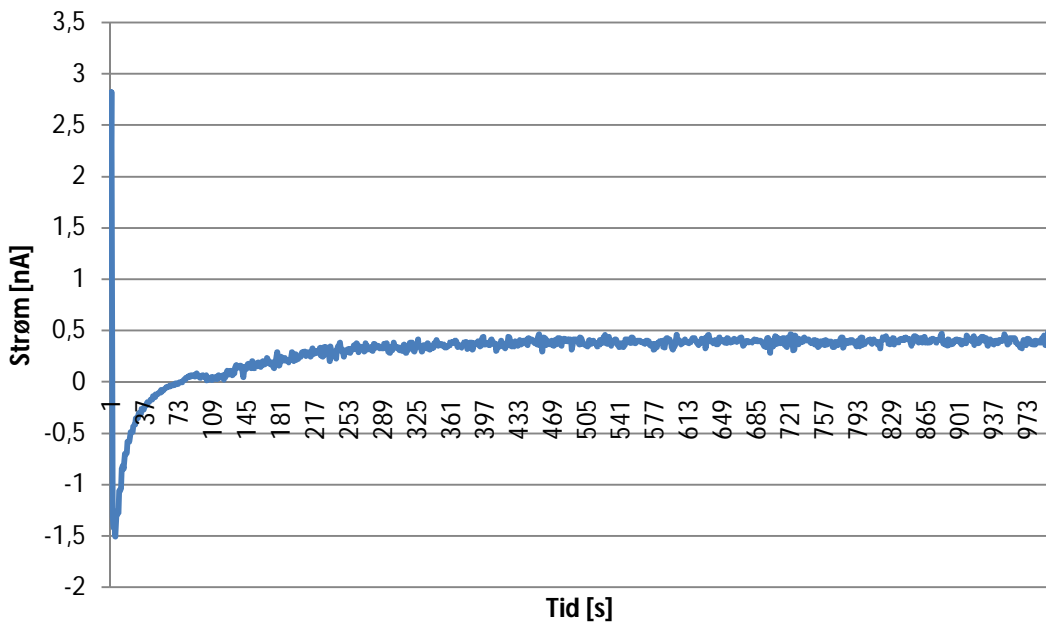
Depolarisasjonsstrøm: 25 kV, 60 °C



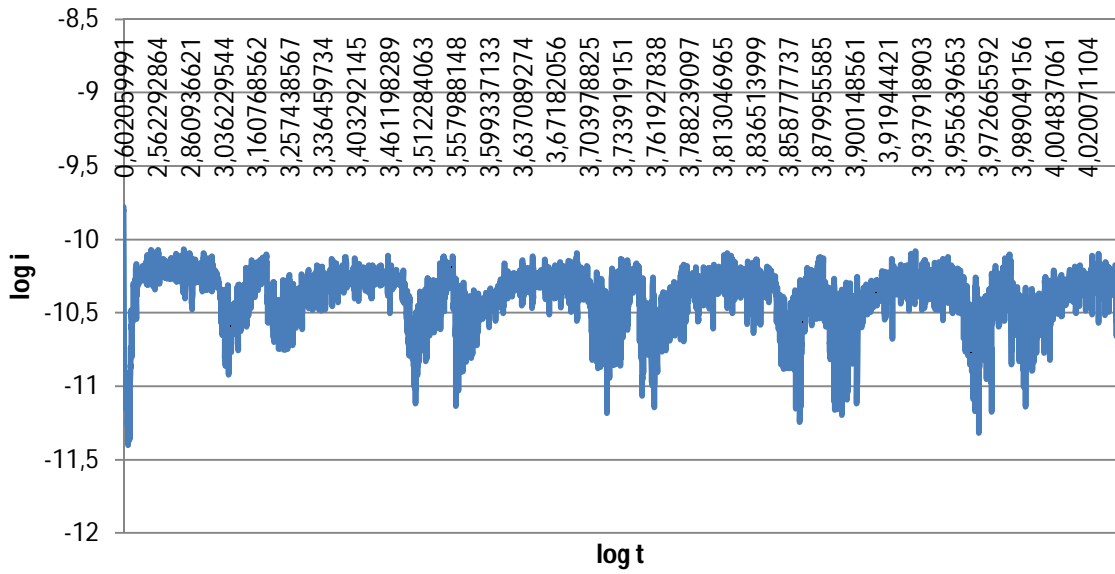
Polarisasjonsstrøm: 25 kV, 60 °C



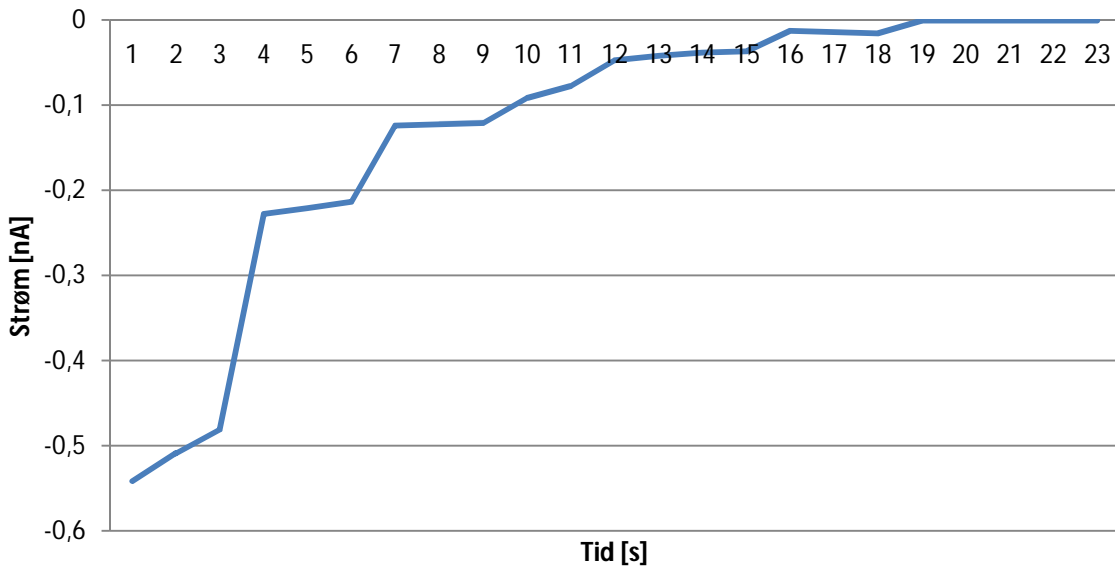
Idc: 25 kV, 60 °C



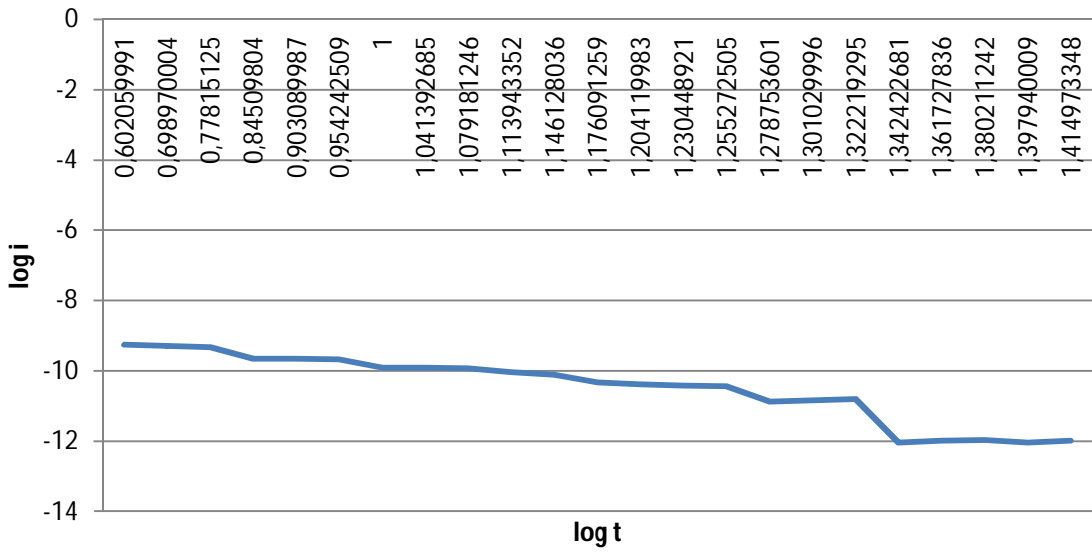
Polarisasjonsstrøm: 5 kV, 80 °C



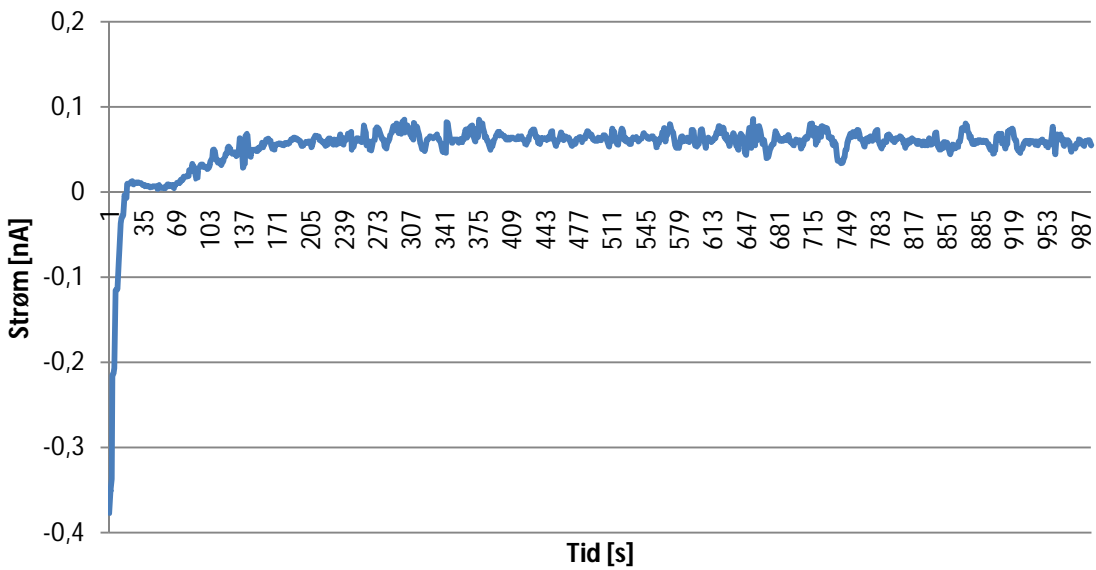
Depolarisasjonsstrøm: 5 kV, 80 °C



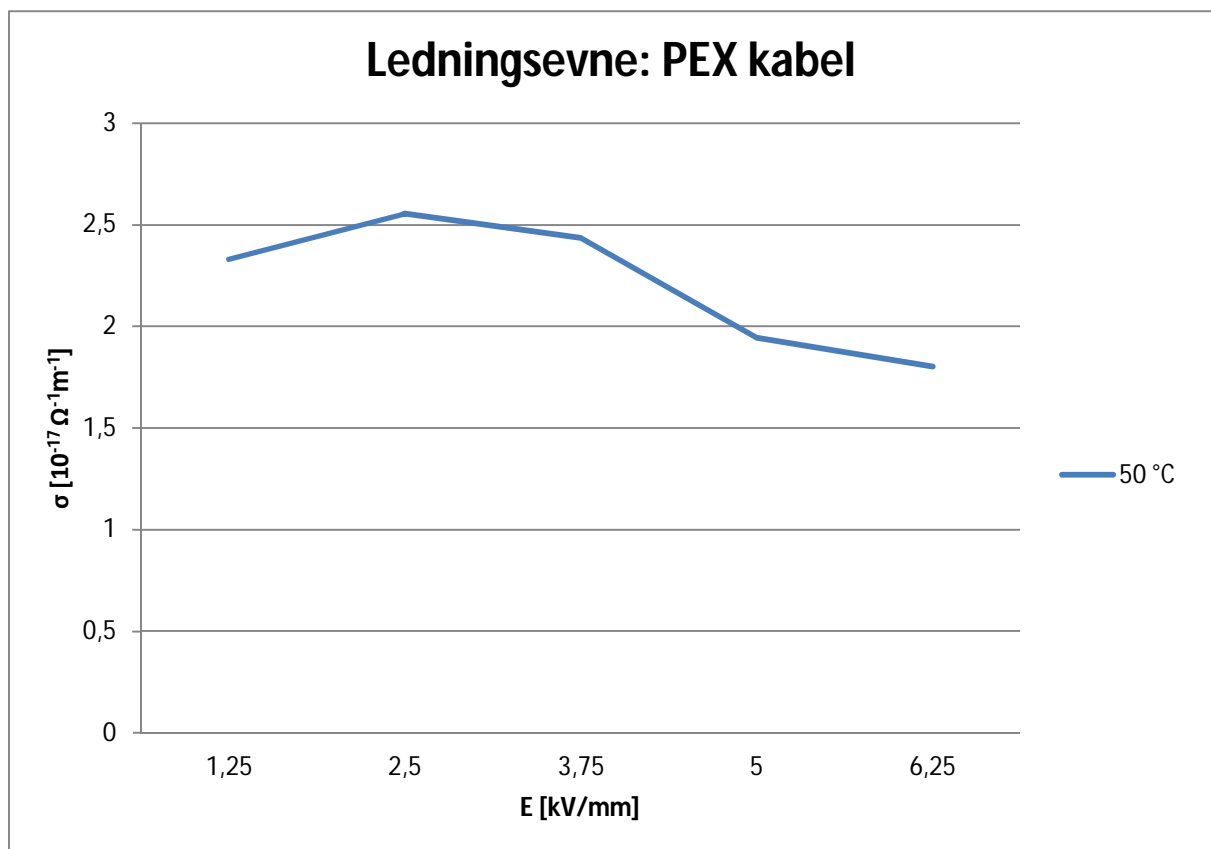
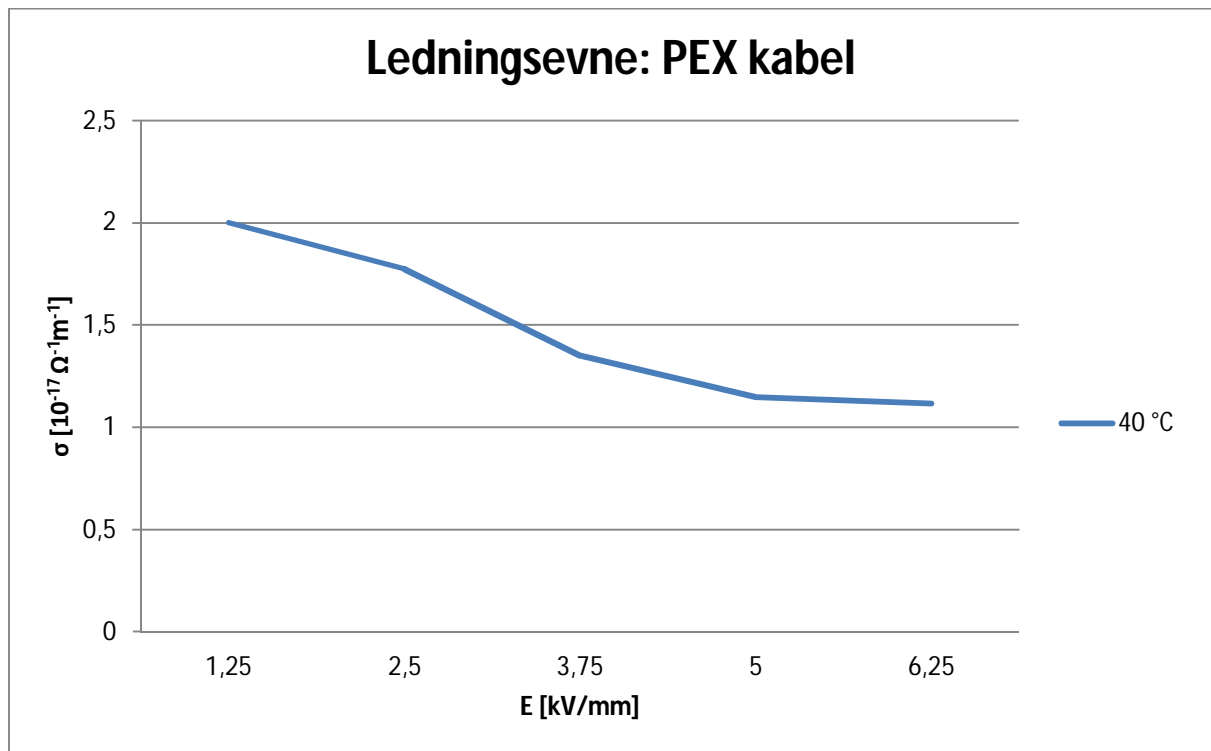
Depolarisasjonsstrøm: 5 kV, 80 °C



Idc: 5 kV, 80 °C



Ledningsevne:



Vedlegg C: Datablad for Diodene brukt i vern 1

<p>CentralTM Semiconductor Corp.</p> <p>145 Adams Ave., Hauppauge, NY 11788 USA Phone (831) 435-1110 FAX (831) 435-1824</p> <p>Manufacturers of World Class Discrete Semiconductors www.centralsemi.com</p>	<p>1N3595</p> <p>SILICON LOW LEAKAGE DIODE</p> <p>JEDEC DO-36 CASE</p>
--	---

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 _r	600	mA
Peak Forward Surge Current (1.0μs 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

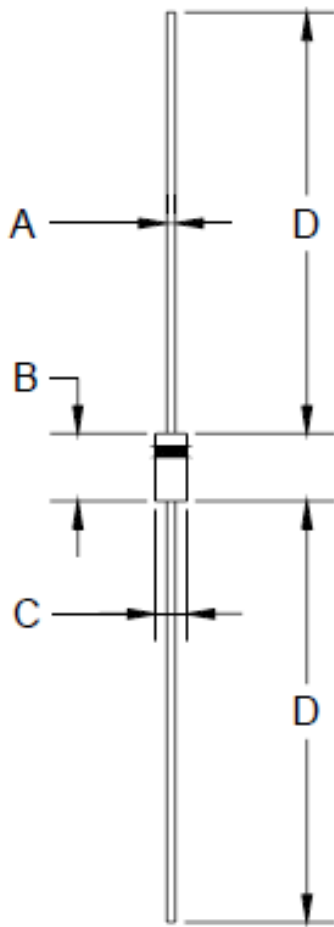
ELECTRICAL CHARACTERISTICS: (T_A=25°C unless otherwise noted)

<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

(SEE REVERSE SIDE)

R1

JEDEC DO-35 CASE - MECHANICAL 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	-

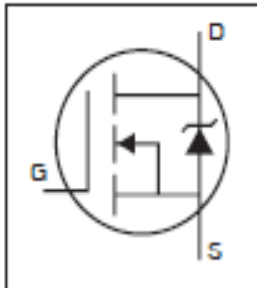
DO-35 (REV: R0)

R1

Vedlegg D: Datablad for MOSFET transistor brukt i vern 2

IRF540NPbF

HEXFET® Power MOSFET



$$V_{DS} = 100V$$

$$R_{DS(on)} = 44m\Omega$$

$$I_D = 33A$$

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Lead-Free

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	33	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	23	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	110	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	130	W
	Linear Derating Factor	0.87	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ②	16	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ②	13	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	7.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1N-m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.15	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

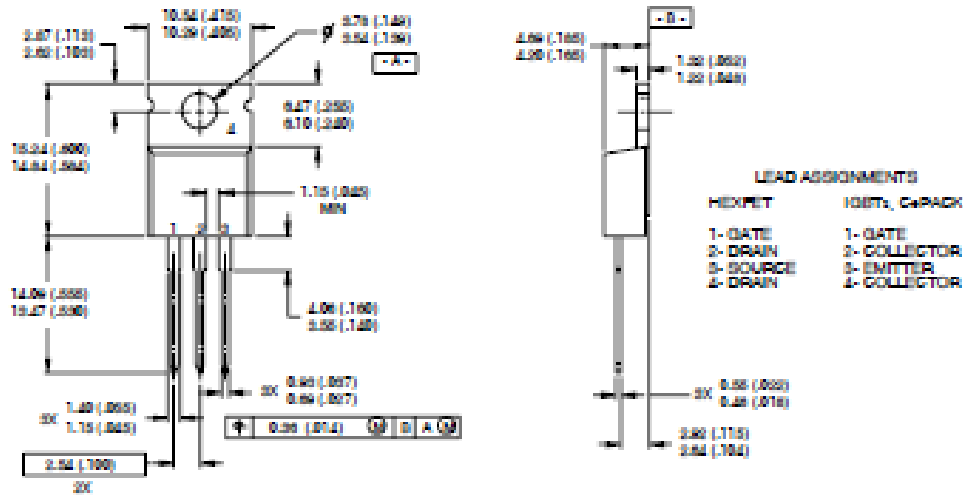
Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.

TO-220AB Package Outline

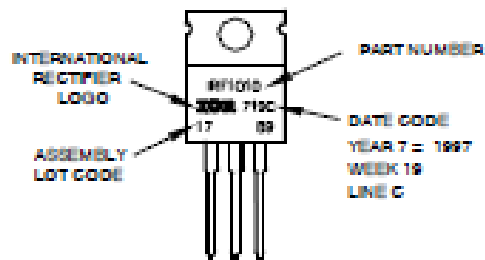
Dimensions are shown in millimeters (inches)



- NOTES:
- 1 DIMENSIONING & TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 - 2 CONTROLLING DIMENSION - INCH
 - 3 OUTLINE CONFORMS TO JEDEC OUTLINE TO-220AB.
 - 4 HEATSINK & LEAD MEASUREMENTS DO NOT INCLUDE BURRS.

TO-220AB Part Marking Information

EXAMPLE: THIS IS AN IRF1010
 LOT CODE 1759
 ASSEMBLED ON WW 19, 1997
 IN THE ASSEMBLY LINE 'C'
 Note: "P" in assembly line position indicates "Lead-Free"



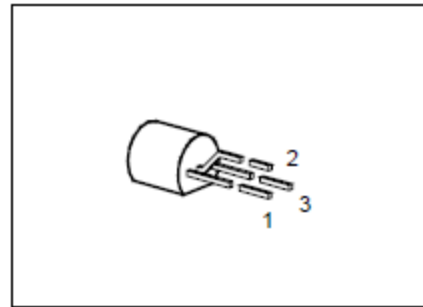
Vedlegg E: Datablad Transistor brukt i vern 3

NPN Silicon AF Transistors

BC 337

BC 338

- High current gain
- High collector current
- Low collector-emitter saturation voltage
- Complementary types: BC 327, BC 328 (PNP)



Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Values		Unit
		BC 337	BC 338	
Collector-emitter voltage	V_{CE0}	45	25	V
Collector-base voltage	V_{CB0}	50	30	
Emitter-base voltage	V_{EB0}	5		
Collector current	I_C	800		mA
Peak collector current	I_{CM}	1		A
Base current	I_B	100		mA
Peak base current	I_{BM}	200		
Total power dissipation, $T_C = 66\text{ }^\circ\text{C}$	P_{tot}	625		mW
Junction temperature	T_j	150		$^\circ\text{C}$
Storage temperature range	T_{stg}	- 65 ... + 150		

Thermal Resistance

Junction - ambient	$R_{th JA}$	≤ 200	K/W
Junction - case ¹⁾	$R_{th JC}$	≤ 135	

Electrical Characteristics

at $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified.

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
DC characteristics					
Collector-emitter breakdown voltage $I_C = 10\text{ mA}$	$V_{(BR)CEO}$				V
BC 337		45	–	–	
BC 338		25	–	–	
Collector-base breakdown voltage $I_C = 100\text{ }\mu\text{A}$	$V_{(BR)CBO}$				
BC 337		50	–	–	
BC 338		30	–	–	
Emitter-base breakdown voltage $I_E = 10\text{ }\mu\text{A}$	$V_{(BR)EBO}$	5	–	–	
Collector cutoff current $V_{CB} = 25\text{ V}$	I_{CBO}	–	–	100	nA
BC 338		–	–	100	nA
$V_{CB} = 45\text{ V}$		–	–	10	μA
BC 337		–	–	10	μA
$V_{CB} = 25\text{ V}, T_A = 150\text{ }^\circ\text{C}$		–	–	10	μA
BC 338		–	–	10	μA
$V_{CB} = 45\text{ V}, T_A = 150\text{ }^\circ\text{C}$		–	–	10	μA
BC 337		–	–	10	μA
Emitter cutoff current $V_{EB} = 4\text{ V}$	I_{EBO}	–	–	100	nA
DC current gain ¹⁾ $I_C = 100\text{ mA}; V_{CE} = 1\text{ V}$	h_{FE}				–
BC 337/16; BC 338/16		100	160	250	
BC 337/25; BC 338/25		160	250	400	
BC 337/40; BC 338/40		250	350	630	
$I_C = 300\text{ mA}; V_{CE} = 1\text{ V}$					
BC 337/16; BC 338/16		60	–	–	
BC 337/25; BC 338/25		100	–	–	
BC 337/40; BC 338/40		170	–	–	
Collector-emitter saturation voltage ¹⁾ $I_C = 500\text{ mA}; I_B = 50\text{ mA}$	V_{CEsat}	–	–	0.7	V
Base-emitter saturation voltage $I_C = 500\text{ mA}; I_B = 50\text{ mA}$	V_{BEsat}	–	–	2	

Vedlegg F: Datablad for Spenningskilde

Series HCP
Operating Instructions

FUG Elektronik GmbH, Florisstr. 2, D-43024 Rosenheim



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 arrester. 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	±1x10 ⁻³ from nominal value,
Setting Resolution	With potentiometer on the front panel 1x10 ⁻⁴ from nominal value
Residual Ripple	<1x10 ⁻⁴ pp, typ. 5x10 ⁻⁴ pp from nominal value
Deviation	<±1x10 ⁻⁵ from nominal value, for ±10% mains voltage variation <1x10 ⁻⁵ from nominal value, for 0 to 100% load variation <±1x10 ⁻⁴ from nominal value, over 8 hours <±1.5x10 ⁻⁴ /K from nominal value at temperature variation
Regulating Time	
voltage control	<1ms for load variations from 10% to 100% or 100% to 10%
current control	<10ms 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 < 50V max. 1 minute
Programming speed at nominal load	<100ms...500ms 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 G: Datablad for NI USB-6008

Low-Cost, Bus-Powered Multifunction DAQ for USB

12- or 14-Bit, Up to 48 kS/s, 8 Analog Inputs



- 8 analog inputs at 12 or 14 bits, up to 48 kS/s
- 2 analog outputs at 12 bits, software-timed
- 12 TTL/CMOS digital I/O lines
- One 32-bit, 5 MHz counter
- Digital triggering
- Bus-powered
- 1-year warranty

Overview

With recent bandwidth improvements and new innovations from National Instruments, USB has evolved into a core bus of choice for measurement applications. The NI USB-6008 and USB-6009 are low-cost data acquisition (DAQ) devices with easy screw connectivity and a small form factor. With plug-and-play USB connectivity, these devices are simple enough for quick measurements but versatile enough for more complex measurement applications.

Detailed Specifications

The following specifications are typical at 25 °C, unless otherwise noted.

Analog Input	
Converter type	Successive approximation
Analog inputs	8 single-ended, 4 differential, software selectable
Input resolution	
NI USB-6008	12 bits differential, 11 bits single-ended
NI USB-6009	14 bits differential, 13 bits single-ended
Max sampling rate (aggregate) ¹	
NI USB-6008	10 kS/s
NI USB-6009	48 kS/s
AI FIFO	512 bytes
Timing resolution	41.67 ns (24 MHz timebase)
Timing accuracy	100 ppm of actual sample rate
Input range	
Single-ended	±10 V
Differential	±20 V ² , ±10 V, ±5 V, ±4 V, ±2.5 V, ±2 V, ±1.25 V, ±1 V
Working voltage	±10 V
Input impedance	144 kΩ
Overvoltage protection	±35
Trigger source	Software or external digital trigger
System noise ³	
Single-ended	
±10 V range	5 mVrms
Differential	
±20 V range	5 mVrms
±1 V range	0.5 mVrms

Vedlegg H: Montering av kabel fra kilde til bryter

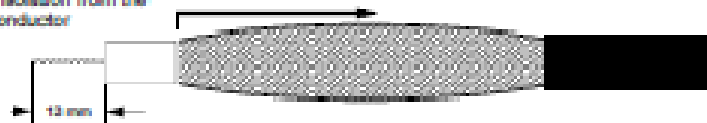


Mounting Instruction Plug F3430 + Cable RG11

- 1) Remove the cable sheath



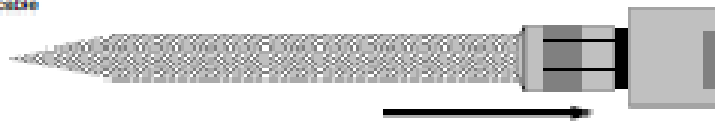
- 2) Push back the braided shield and strip the isolation from the center conductor



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



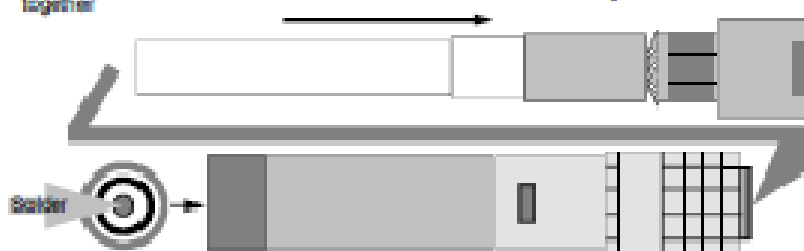
- 4) Put the rear screen and the collet on the cable



- 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

8C 01/2008

FuG Elektronik GmbH - Florianstr. 2 - 83024 Rosenheim
GERMANY
www.fug-elektronik.de

Vedlegg I: Datablad for Escort ELC-131D Dual display LCR meter



LCR meters ELC-133A/132A/131D/3133A

Features

■ ELC-100A/102A

Dual display, 20,000/1,000 counts
0.7% Basic Accuracy
Auto/Manual Ranging
Measurement Parameters: L.C.R.D. θ Q (θ : ELC-133A only)
Test Frequency: 100Hz/120Hz/1K/10KHz selectable (ELC-133A)
120Hz/1KHz selectable (ELC-132A)
Parallel/Serial test mode
Relative mode
Self calibration
Static recording (Max/Min/Avg)
Tolerance mode (1%, 5%, 10%, 20%) p0%, ELC-133A only)
External DC power operation
Auto power off
Low battery indicator
Overmolded case, integrated holster
Optical RS-232 interface
Backlit (ELC-133A only)
Measurement Ranges: L: 2mH to 1,000H; C: 2,000pF to 10mF
R: 20 Ω to 10M Ω ; G: .000 to 999 Auto D: .000 to 999 Auto; θ : \pm 90°

■ ELC-101D

10,000 Counts for LCR Display, 1,000 Counts for D/Q Display
Measurement Parameters: L.C.R.D & Q
0.7% Basic Accuracy for Capacitance and Inductance Measurement
Auto/Manual Ranging
Inductance 1mH to 10000H, Capacitance 1000pF to 10mF;
Resistance 10 Ω to 10M Ω , G: .000 to 999 Auto; D: .000 to 999 Auto
Test Frequency 1kHz / 120Hz Selectable
External DC Power Operation
Parallel and Series Mode
Relative Mode, Self Calibration
Static Recording (Max/Min/Avg)
Unique Tolerance Mode (1%, 5%, 10%)
Auto Protective Mode Check
Auto Power Off

■ ELC-0100A(Bench LCR)

Dual display, 20,000/1,000 counts
Measurement Parameters: L C R D θ & Q
Auto/Manual Ranging
0.3% Basic Accuracy
Test Frequency: 100Hz/120Hz/1K/10KHz
Parallel/Serial test mode
Data Logging (max, min, avg)
Tolerance mode (1%, 5%, 10%, 20%)
Optical RS-232 interface
Data Processing Software for Windows(optional)
TW-01 SMD Tweezers(Optional)

Ordering Information

ELC-132A/132A/131D Standard Accessories:

Manual,
Test Leads (TL-23)
Alkaline 9V Battery

Optional Accessories:

EA-08 AC 220V, 12V/50mA Adaptor
EA-112 AC 120V, 12V/50mA Adaptor
EH-80G Gray Protective Holster
EC-170 Soft Carrying Case
EC-230 Square Soft Carrying Case(ELC-131D)
CA-09 Communication Package (Disk + RS-232 Cable)(ELC-133A/132A)
TW-01 SMD Tweezers (ELC-133A/132A)

ELC-3133A Standard Accessories:

Manual (CD-ROM)
30A-28002-1/2 Test alligator clips
with BNC (Pair)
AC power cord

Optional Accessories:

CA-09 RS232 package for optical cable
and software in a CD-ROM
TW-02 SMD Tweezers (ELC-3133A)



ELC-3133A



ELC-133A/132A



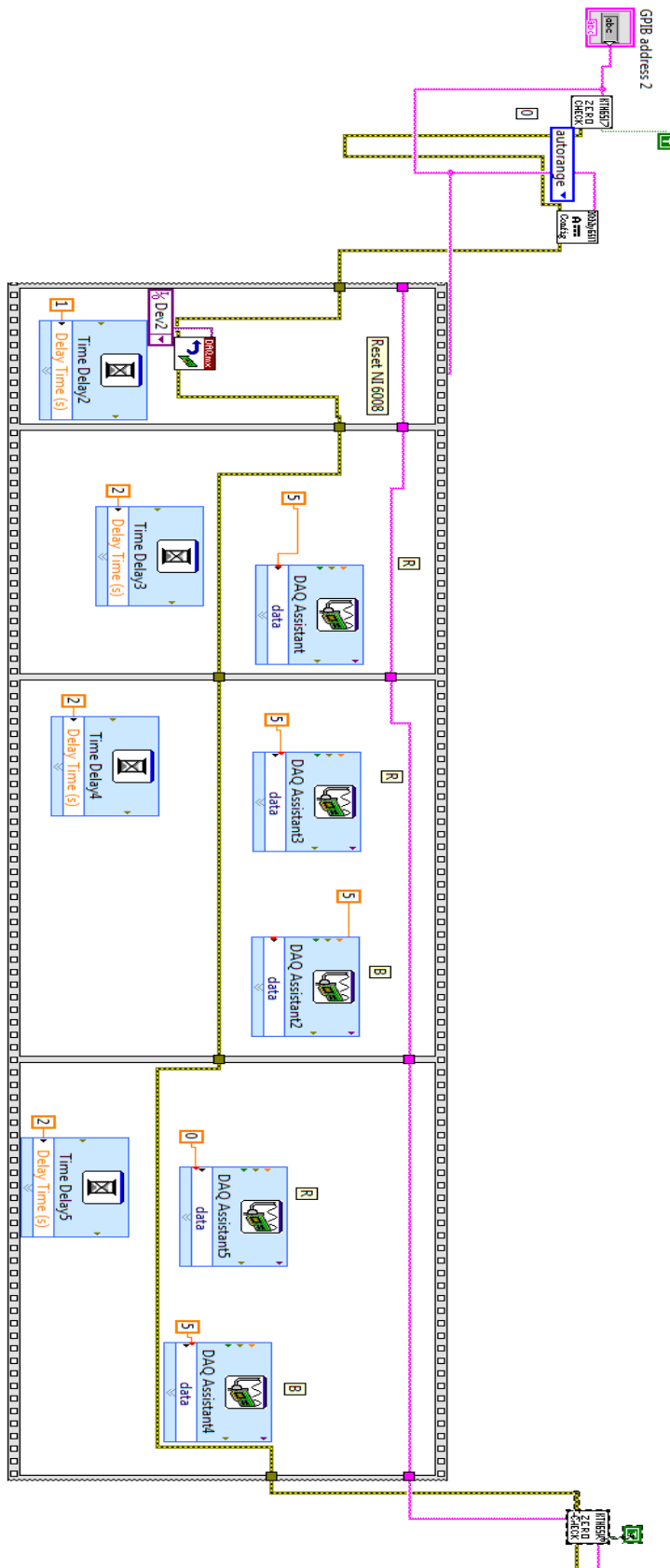
ELC-131D

Specifications	ELC-3133A	ELC-133A	ELC-132A	ELC-131D
Measuring Mode	Auto & Manual Ranging	Auto & Manual Ranging	Auto & Manual Ranging	Auto & Manual Ranging
Test Frequency	100/120/1K/10KHz	100/120/1K/10KHz	120/10KHz	120/10KHz
Resistance				
Range	20 Ω ~10M Ω	20 Ω ~10M Ω	20 Ω ~10M Ω	10 Ω , 100 Ω , 1k Ω , 10k Ω , 100k Ω , 1M Ω , 10M Ω
Accuracy	100/120/10k: \pm (0.2%rdg + 3dgt), DF<0.5 100Hz: \pm (0.5%rdg + 5dgt), DF<0.5 0.001 Ω ~0.001M Ω	100/120/10k: \pm (0.2%rdg + 3dgt), DF<0.5 100Hz: \pm (0.5%rdg + 5dgt), DF<0.5 0.001 Ω ~0.001M Ω	120/10k: \pm (0.5%rdg + 3dgt), DF<0.5	120/10k: \pm (0.5%rdg + 3dgt), DF<0.5 100 Ω , 10k, 100k Ω , 10M Ω
Capacitance				
Range	200pF~10mF	200pF~10mF	200pF~10mF	10mF, 100 μ F, 10 μ F, 10nF, 100nF, 100pF
Accuracy	100/120/10k: \pm (0.4%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (0.4%rdg + 100/G + 5dgt), DF<0.5 100Hz: \pm (0.8%rdg + 5dgt), DF<0.5 DF: \pm (1.0%rdg + 100/G + 5dgt), DF<0.5 0.01 μ F~0.01mF	100/120/10k: \pm (0.7%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (0.7%rdg + 100/G + 5dgt), DF<0.5 100Hz: \pm (1.5%rdg + 5dgt), DF<0.5 DF: \pm (1.5%rdg + 100/G + 5dgt), DF<0.5 0.01 μ F~0.01mF	120/10k: \pm (0.7%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (0.7%rdg + 100/G + 5dgt), DF<0.5	120Hz: \pm (0.7%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (0.7%rdg + 100/G + 5dgt), DF<0.5 10k: \pm (0.7%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (0.7%rdg + 100/G + 5dgt), DF<0.5 0.01mF~0.1 μ F
Inductance				
Range	200 μ H~1000H	200 μ H~1000H	200 μ H~1000H	10000H, 1000H, 100H, 10H, 100mH, 10mH, 1 μ H
Accuracy	100/120/10k: \pm (0.3%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (0.8%rdg + 100/L + 5dgt), DF<0.5 100k: \pm (0.4%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (1.5%rdg + 100/L + 10dgt), DF<0.5	100/120/10k: \pm (0.7%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (1.2%rdg + 100/L + 5dgt), DF<0.5 100k: \pm (1.5%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (2%rdg + 100/L + 10dgt), DF<0.5	120/10k: \pm (0.7%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (1.2%rdg + 100/L + 5dgt), DF<0.5	120Hz: \pm (0.7%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (1.2%rdg + 100/L + 5dgt), DF<0.5 10k: \pm (0.7%rdg + 3dgt), DF<0.5 DF: \pm (1.2%rdg + 100/L + 5dgt), DF<0.5
Resolution	0.1 μ F~0.1H	0.1 μ F~0.1H	0.1 μ F~0.1H	1H~0.1 μ F
Dissipation Factor	.000~999 Auto	.000~999 Auto	.000~999 Auto	.000~999 Auto
Quality Factor	.000~999 Auto	.000~999 Auto	.000~999 Auto	.000~999 Auto
θ Measurement	\pm 90°	\pm 90°	\pm 90°	\pm 90°
Tolerance mode	1%, 5%, 10%, 20%	1%, 5%, 10%, 20%	1%, 5%, 10%	1%, 5%, 10%
RS-232 interface	standard	standard	standard	standard
Dimensions (L x H x W)	211 x 26h x 71mm	182 x 85 x 40mm	182 x 85 x 40mm	192 x 90 x 37 mm
Weight	1.6kg	0.3kg	0.3kg	0.3kg

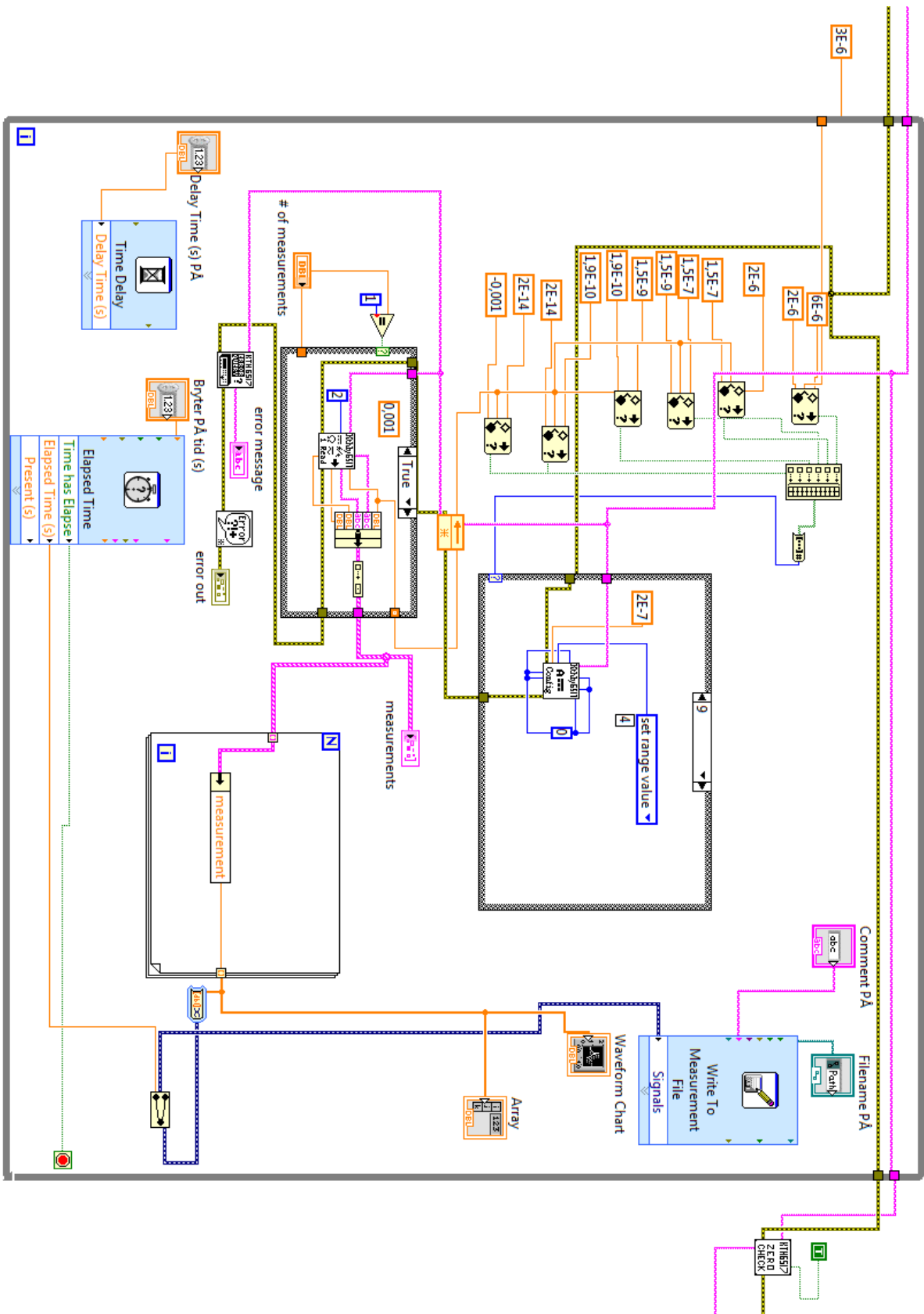
All specifications are subject to be changed by ESCORT without notice.

Vedlegg J1: Flyttdiagram, LabVIEW programmet for 6517A

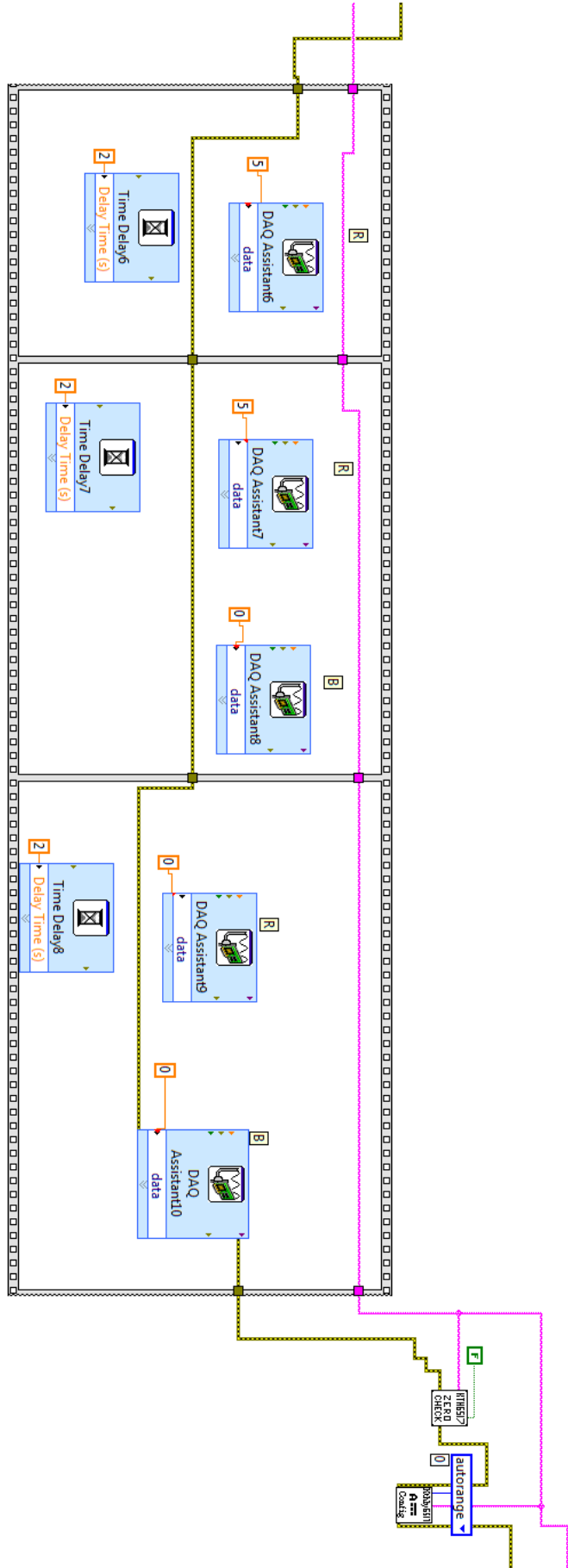
Styring av kretsen før måling av polarisasjonsstrøm

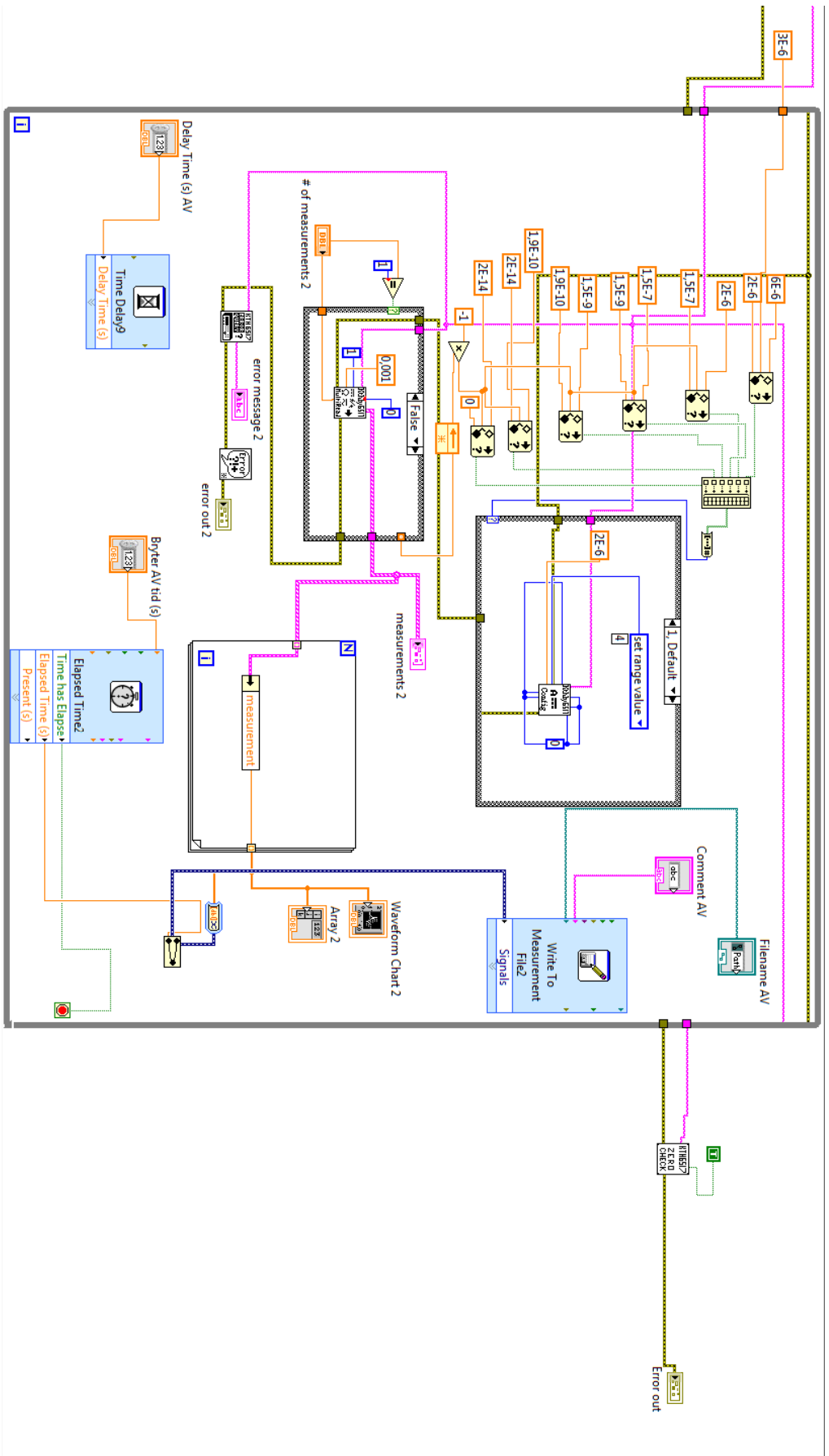


Måling av polarisasjonsstrømmen.



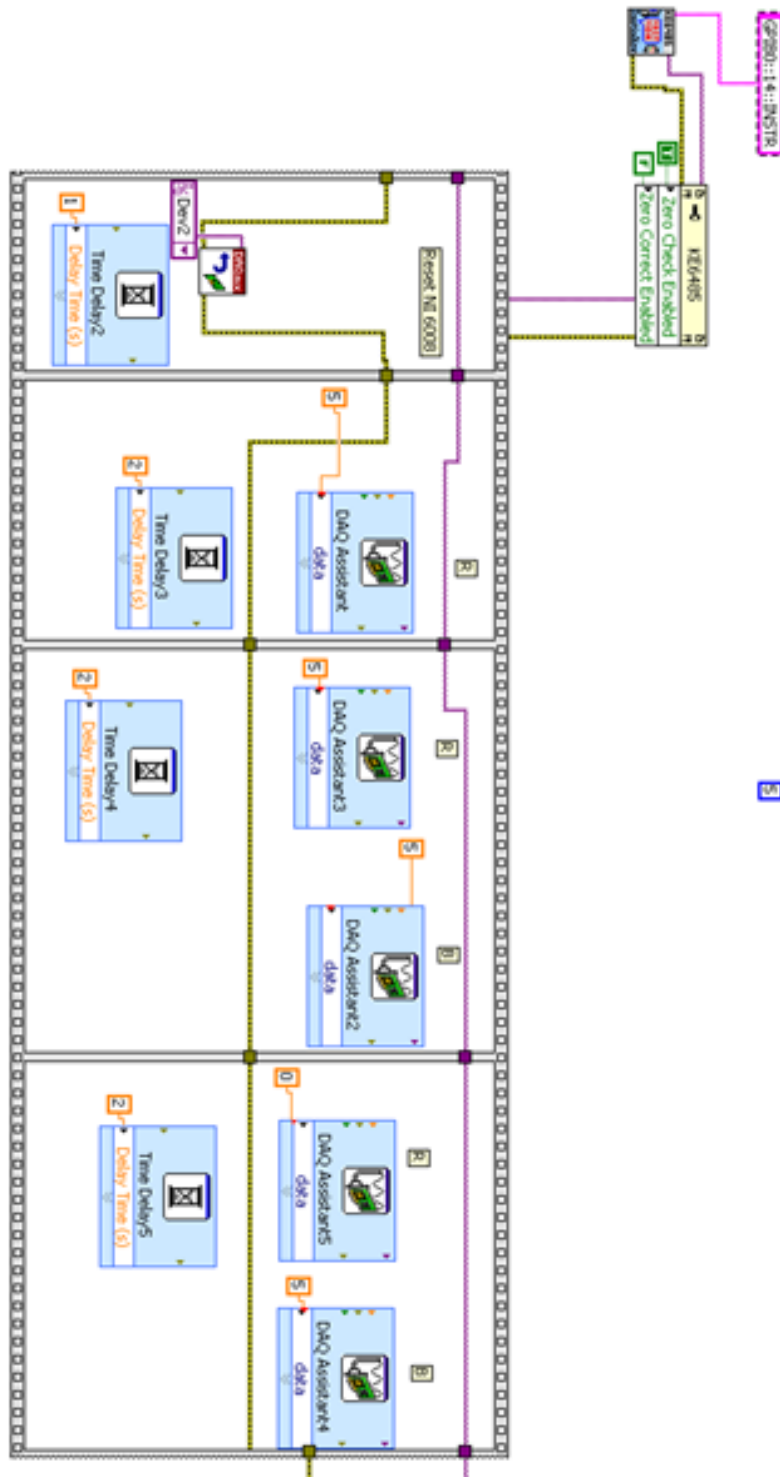
Styring for å gå over fra polarisasjonsstrømmåling til depolarisasjonsstrømmåling.



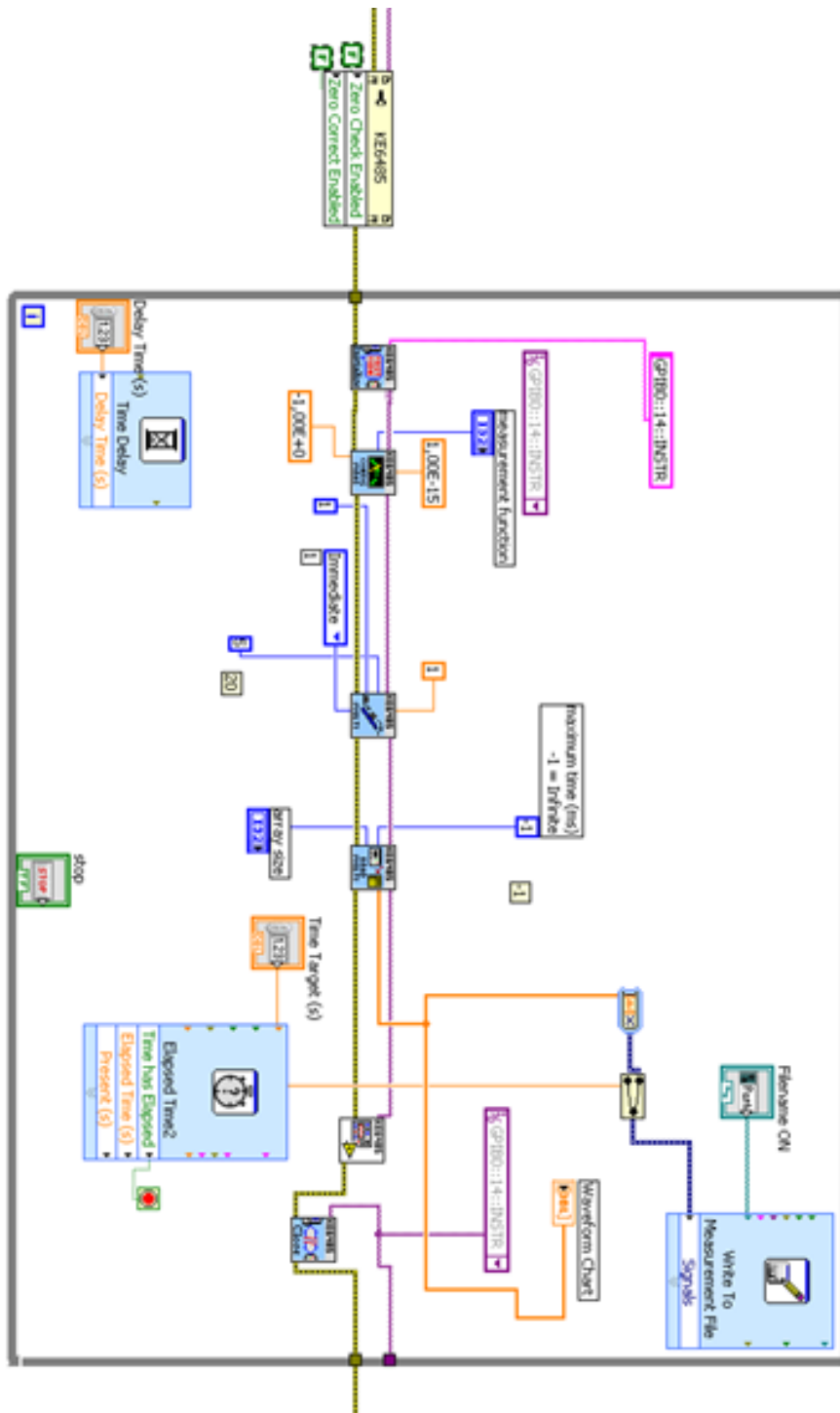


Vedlegg J2: Flytdiagram, LabVIEW programmet til 6485

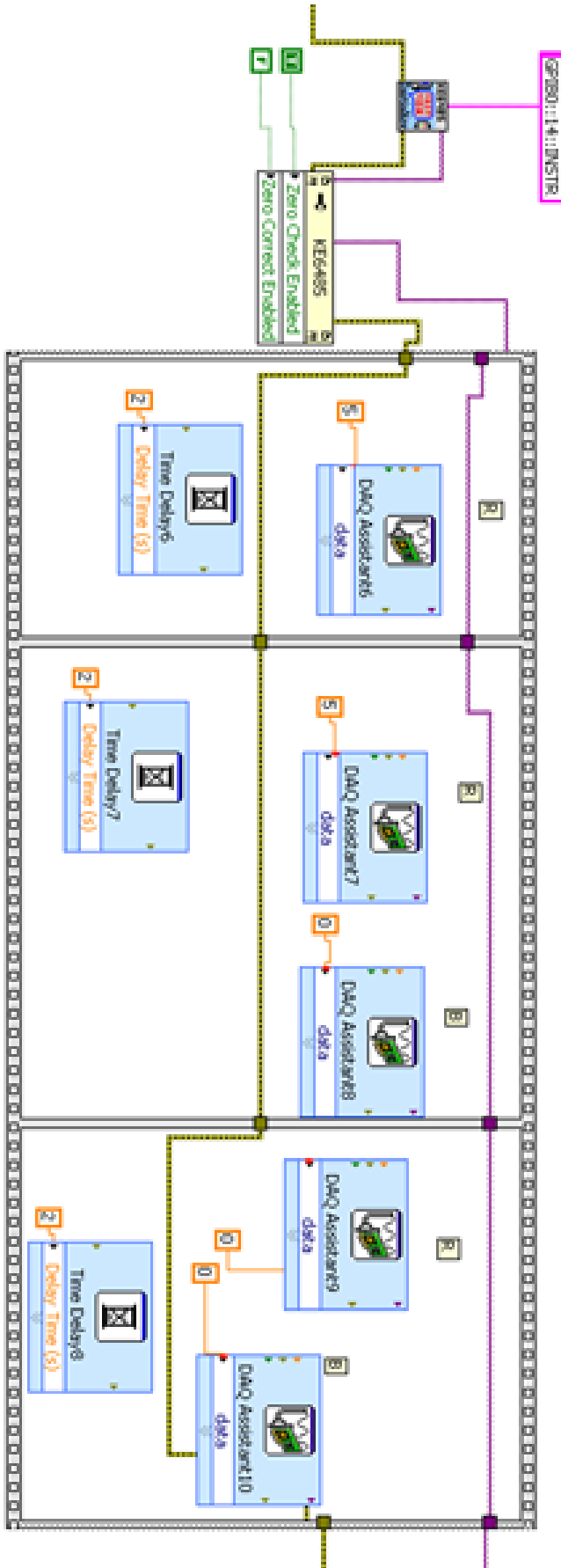
Styring av kretsen før måling av polarisasjonsstrøm



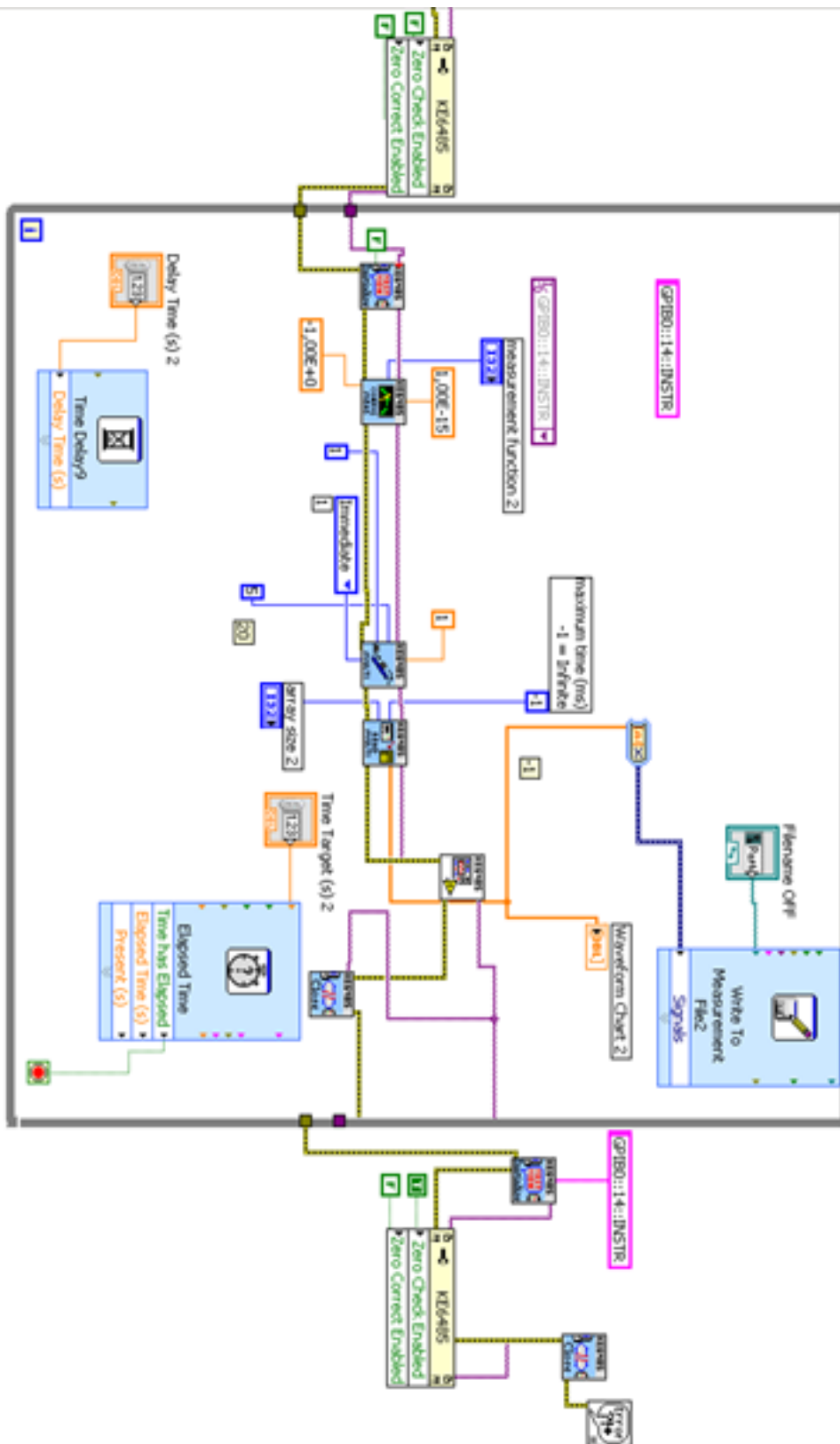
Måling av polarisasjonsstrømmen.



Styring for å gå over fra polarisasjonsstrømmmåling til depolarisasjonsstrømmmåling.

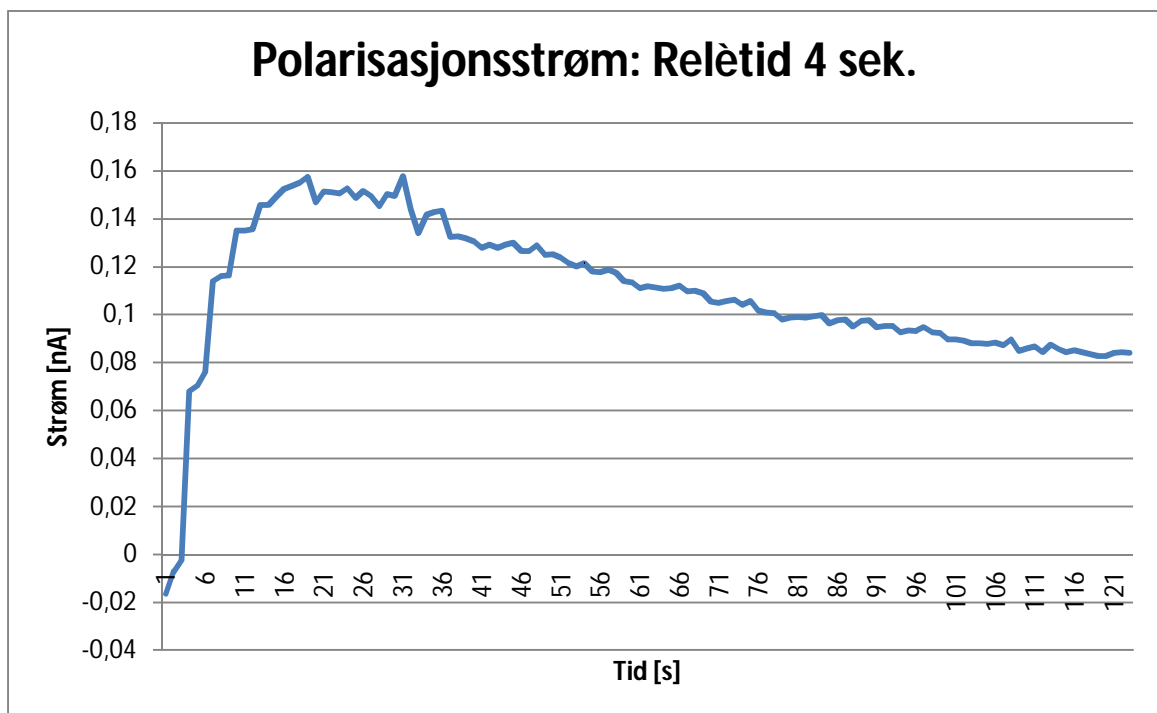
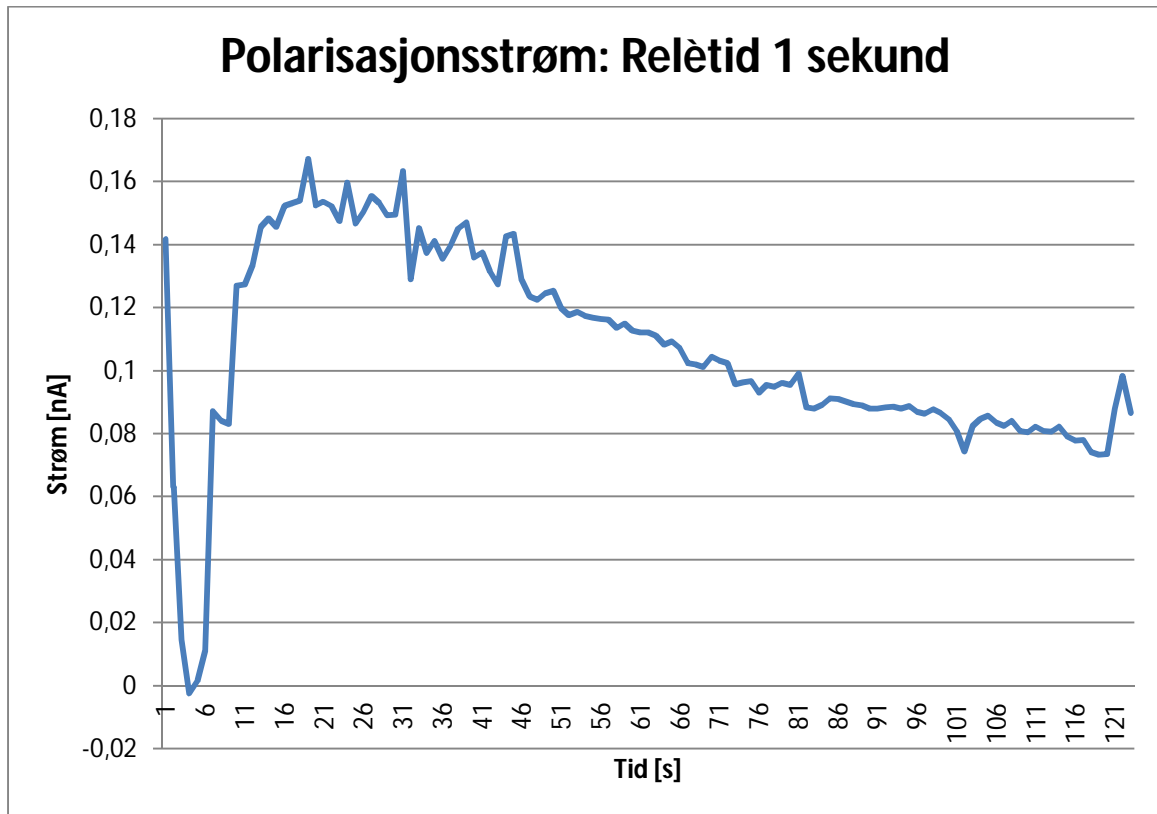


Måling av depolarisasjonsstrømmen, og avslutning av programmet.



Vedlegg K: Transient strømforløp PEX kabel.

Endring av tiden før relè 2 slår ut:



Polarisasjonsstrøm: Relètid 7 sek.

