



# Hipotronics D149-DI -läpilyöntilaitteen käyttöönotto

Marjo Mäki

OPINNÄYTETYÖ  
Huhtikuu 2024

Laboratoriotekniikan tutkinto-ohjelma

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Laboratoriotekniikan tutkinto-ohjelma

MÄKI, MARJO:  
Hipotronics D149-DI -läpilyöntilaitteen käyttöönotto

Opinnäytetyö 36 sivua, joista liitteitä 8 sivua  
Huhtikuu 2024

---

Opinnäytetyön toiminnallinen osuus toteutettiin Tervakoski Oy:n sähkölaboratoriossa, jossa Hipotronics D149-DI -läpilyöntilaitte otettiin käyttöön Ferranti-merkisen läpilyöntilaitteen tilalle pääasiassa kyllästettyjen eristepaperien ja -laminaattien läpilyöntilujuuksien mittaukseen. Ferranti haluttiin korvata uudella luotettavammalla ja turvallisemmalla laitteella. Hipotronicsin tuloksia verrattiin vanhojen läpilyöntilaitteiden tuloksiin. Toistettavuutta testattiin muovikalvolla, jonka läpilyönnin hajonnan tiedetään olevan pienempi kuin papereilla tai laminaateilla. Työn tavoitteena oli arvioida uuden läpilyöntilaitteen, Hipotronicsin, suorituskykyä verrattuna vanhoihin läpilyöntilaitteisiin. Raportin tarkoituksena oli selvittää, täyttääkö uusi laite odotukset ja tarpeet eristysmateriaalien testauksessa.

Läpilyönti tapahtuu, kun sähköjännite ylittää eristeen sietokyvyn, aiheuttaen purkauksen ja jännitteen putoamisen lähes noltaan. Tähän prosessiin vaikuttavat monet tekijät, kuten esipurkausvirta, sähköstaattiset voimat rajapinnoilla ja sähkökemialliset reaktiot. Eristysöljyssä sähkökenttä ohjaa elektrodeja, mahdollisesti aiheuttaen mikroskooppisten kuplien muodostumisen, mikä vaikuttaa läpilyöntilujuuteen. Lämpötilan noustessa nesteen viskositeetti laskee ja paineen kasvessa läpilyöntilujuus paranee. Kiinteiden eristeiden läpilyönnin tutkimisesta haastavaa teki se, että on vaikeaa erottaa polarisaation vaikutus todellisesta varauksenkuljettajien liikkumisesta.

Mitattavat eristemateriaalit olivat sähköeristepaperi ja -laminaatti. Puhtaan selluloosapaperin matala sähkönjohtavuus ja kemiallinen inerttiys tekevät siitä hyvän vaihtoehdon sähköneristykseen. Paperin verkkomainen rakenne ja kyky absorboida kosteutta voivat kuitenkin heikentää sen eristyskykyä. Optimaalisen eristystehon saavuttamiseksi on tärkeää poistaa näytteestä happi ja kosteus vakuu-miuunissa. Tämän jälkeen paperi impregnoidaan muuntajaöljyllä, jolla varmistetaan, ettei happi tai kosteus pääse vaikuttamaan tulokseen.

Työllä pyrittiin vertailemaan vanhoja laitteita uuteen sekä ottamaan uusi laite käyttöön. Työssä tehtiin kattavasti eri mittauksia, joiden tekemiseen ilman opinnäytetyötä olisi mennyt huomattavasti pidempi aika. Samalla saatiin arvokasta palautetta laitteen valmistajalle laitteen toiminnasta käytännön ympäristössä.

---

Asiasanat: läpilyönti, läpilyöntilujuus, eristemateriaali

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Laboratory Engineering

MÄKI MARJO:

Implementation of the Hipotronics D149-DI Breakdown Device

Bachelor's thesis 36 pages, appendices 8 pages  
April 2024

---

The aim of the work was to compare old devices with the new one and to put the new device into use. The work involved comprehensive measurements, which would have taken considerably longer without the thesis. At the same time, valuable feedback on the device's performance in a practical environment was provided to the manufacturer.

The operational part of this thesis was conducted at Tervakoski Oy's electrical laboratory, where the Hipotronics D149-DI breakdown tester was introduced to replace the Ferranti breakdown device, mainly for testing the breakdown strengths of impregnated insulation papers and laminates. The Ferranti device was desired to be replaced with a new, more reliable and safer device. The results obtained from the Hipotronics device were compared to those of the old breakdown devices. Repeatability was tested using a plastic film, which exhibits a more uniform breakdown compared to papers or laminates. The aim of the study was to evaluate the performance of the new breakdown tester, Hipotronics, compared to the old devices. The purpose of the report was to determine whether the new device meets the expectations and needs in insulation material testing.

Breakdown occurs when the electric voltage exceeds the insulation's withstand capability, causing a discharge and the voltage dropping to nearly zero. Many factors influence this process, such as partial discharge current, electrostatic forces at interfaces, and electrochemical reactions. In insulating oil, the electric field guides the electrodes, potentially causing the formation of microscopic bubbles, which affects the breakdown strength. As temperature rises, the viscosity of the fluid decreases, and with increasing pressure, the breakdown strength improves. Studying the breakdown of solid insulators is challenging because it's difficult to distinguish the effect of polarization from the actual movement of charge carriers.

The insulation materials measured were electrical insulation paper and laminate. The low electrical conductivity and chemical inertness of pure cellulose paper make it a good choice for electrical insulation. However, its network-like structure and ability to absorb moisture can weaken its insulation properties. To achieve optimal insulation performance, it is important to remove oxygen and moisture from the sample in a vacuum oven. Subsequently, the paper is impregnated with transformer oil to ensure that neither oxygen nor moisture can affect the result.

---

Key words: breakdown, breakdown strength, insulating material

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	TEORIA .....	7
	2.1 Lämpilyöntilaite .....	7
	2.2 AC ja DC .....	7
	2.3 Lämpilyönti .....	8
	2.3.1 Impregnointi .....	9
	2.4 Sähköeristepaperi ja -laminaatti .....	9
	2.5 Eristysöljy .....	10
3	TYÖN SUORITUS .....	12
	3.1 Näytteiden käsittely .....	12
	3.2 Näytteiden mittaus Ferrantilla, Ainuolla ja Chromalla .....	12
	3.3 Näytteiden mittaus Hipotronicsilla .....	15
	3.4 Turvallisuuden huomiointi .....	16
4	TULOKSET .....	18
	4.1 Toistettavuus .....	18
	4.2 Hipotronicsin, Ferrantin, Ainuon ja Chroman tulokset .....	20
	4.3 Huomiodut turvallisuusseikat .....	21
5	POHDINTA .....	24
	5.1 Toistettavuus .....	24
	5.2 Hipotronics näytteiden mittaamiseen .....	24
	5.3 Turvallisuus .....	25
	LÄHTEET .....	27
	LIITTEET .....	29

## 1 JOHDANTO

Tervakoski Oy on yritys, joka on erikoistunut erikoispapereiden valmistukseen jo yli kahden vuosisadan ajan, vuodesta 1818 lähtien. Yrityksen maine ohuiden, kestävien ja räätälöityjen erikoispaperiratkaisujen kehittäjänä, valmistajana ja markkinoijana on vankka. Yhtiöllä on laaja joukko asiantuntijoita, jotka työskentelevät asiakkaille räätälöityjen tuotteiden valmistuksen parissa. Tervakosken tehdas on tunnettu korkeasta laadustaan ja sitoutumisestaan tarjoamaan asiakkailleen parhaita mahdollisia ratkaisuja (Delfortgroup. n.d.). Sähköeristepapereita Tervakoski alkoi tuottamaan vuonna 1921, jolloin ne menivät kondensaattoreihin. Vuosien mittaan tuotevalikoima on kasvanut ja laajentunut kattamaan myös kaapelipaperit, muuntajapaperit, laminoidut paperit sekä kreppipaperit (Tala. 2018).

Tervakoski Oy on kuulunut Itävaltalaiseen Delfort Group -konserniin jo vuodesta 1999 asti. Delfort Group konsernilla on työntekijöitä 3200 ja se tuottaa yli 1500 erilaista erikoispaperia, esimerkiksi ohuita papereita lääke- ja kosmetiikkaliitteisiin, uskonnolliseen kirjallisuuteen ja katalogeihin sekä papereita sähköisiin sovelluksiin (Delfortgroup. n.d.).

Työn tavoitteena oli saada Hipotronics D149-DI läpilyöntilaitte käyttöön otettua, jotta saataisiin uusi luotettavampi sekä turvallisempi laite vanhan laitteen tilalle. Hipotronics D149-DI läpilyöntilaitte on suunniteltu suorittamaan korkeajännitteisiä testejä vaihto- ja tasajännitteellä kansainvälisten standardien mukaisesti. Työssä tutkittiin uudella laitteella saatuja tuloksia ja vertailtiin niitä vanhojen laitteiden tuloksiin. Toistettavuutta arvioitiin muovikalvolla tehdyistä mittauksista saatujen tulosten keskihajonnan avulla.

Pääasiallinen motiivi laitteen hankintaan oli turvallisuuden tason nostaminen mittauksissa. Uusi laite on varustettu CE-merkinnällä, mikä takaa sen noudattavan nykyisiä eurooppalaisia turvallisuusstandardeja. Käyttöönoton yhteydessä varmistettiin, että laitetta käytetään turvallisesti valmistajan antamien ohjeiden mukaisesti. Vaikka Ferrantin turvallisuustasoa on päivitetty sen käyttöiän aikana, uuden laitteen käyttöönotto merkitsee merkittävää parannusta turvallisuudessa, erityisesti turvalaitteiden luotettavuuden osalta.

Teoreettinen tausta sisältää tietoa sähköeristysmateriaaleista, kuten sähköeristepaperista, -laminaateista ja eristysöljystä. Lisäksi käsitellään läpilyönti-ilmiötä ja sen taustalla vaikuttavia tekijöitä. Työn suorituksessa esitellään koejärjestelyjä, joissa tutkittiin eri näytteiden läpilyöntilujuutta vanhoilla ja uusilla laitteilla. Tulokset-osiossa tarkastellaan käyttöön otettavan laitteen toistettavuutta mittauksissa sekä vertaillaan vanhojen laitteiden sekä uuden laitteen tuloksia toisiinsa.

Opinnäytetyössä mitattiin läpilyöntiä tercon- ja tertrans-eristepapereista sekä eristelaminaatista. Tercon-paperia käytetään kondensaattoreissa, esimerkiksi alumiinielektrolyyttikondensaattoreissa. Tertrans-paperia käytetään erilaisissa sovelluksissa pääosin muuntajien ja muuntajakomponenttien eristeenä. Tertrans-paperit jaetaan eri luokkiin puhtauden perusteella. Eristeen epäpuhtaudet saattavat vaikuttaa eristeen läpilyöntilujuuteen, sillä ne saattavat aiheuttaa johtavuutta. (Aro ym. 2015, 128)

## 2 TEORIA

### 2.1 Lämpilyöntilaite

Lämpilyönnin teoriaosuudessa käydään läpi joitakin lämpilyöntilaitteen osia ja niiden tarkoituksia.

Lämpilyöntilaitteen ydin on muuntaja. Muuntajat ovat sähkökomponentteja, jotka toimivat vain vaihtojännitteellä, sillä niiden toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Tietoa muuntajan kunnosta sekä käytettävyydestä voidaan saada analysoimalla muuntajan öljyä. Muuntajissa esiintyvät erilaiset viat tuottavat tiettyjä kaasuja, jotka voivat olla merkki muuntajan kunnosta ja toimintavarmuudesta. Näiden kaasujen analysointi ja niiden suhteiden tarkastelu voivat tarjota tärkeää tietoa muuntajan tilasta (Eurolaite. 2017).

Suurjännitemuuntaja on laite, joka käyttää sähkömagneettista induktiota muuntaakseen matalajännitteen suurjännitteeksi. Kun ensisijainen käämitys kulkee AC:n läpi, muuntaja muodostaa magneettikentän. Eristys laitteessa on erittäin tärkeää ja sen parantaminen on avainasemassa suurjännitemuuntajien valmistuksessa (Shaanxi Fullstar Electronics Co. 2019).

Laitteessa on testauskammio, joka määräytyy suoritettavan testin mukaan. Testauskammio estää tahattoman kosketuksen sähköjännitteisten osien kanssa. Välyksien tulee olla tarpeeksi suuret, ettei kenttä elektrodien ja näytteen alueella vääristy ja jotta näytteiden asettaminen ja vaihtaminen olisi mahdollisimman helppoa (ASTM D149. 2009).

Elektrodien pinnat on pidettävä sileinä, eikä niissä saa olla näkyviä ulkoisia epätasaisuuksia. Elektrodien reunoilla on määrätty muoto ja sileys, joiden tulisi säilyä samoina jokaisessa mittauksessa. Pinnan sileys on tärkeää, jotta elektrodien pinnat ovat tiivistä kosketuksessa testikappaleeseen koko alueelta (ASTM D149. 2009).

### 2.2 AC ja DC

Virtalähde on laite, joka muuntaa sähkövirran erilaisiin tarvittaviin jännitteisiin ja virta-arvoihin. Se voi olla joko ulkoinen tai sisäinen laitteeseen integroitu. Virtalähteet voivat olla joko säädeltyjä, joissa tulojännitteen muutokset eivät vaikuta lähtöön, tai säätelemättömiä, joissa lähdön jännite riippuu tulon muutoksista. Ne muuntavat sähköä verkkovirrasta tai muista lähteistä ja toimittavat sen sitten kuormaan. Virtalähteet voivat tuottaa joko tasavirtaa (DC), joka virtaa yhteen suuntaan, tai vaihtovirtaa (AC), joka vaihtaa suuntaansa säännöllisesti (MPS. 2022).

AC tarkoittaa vaihtovirtaa (alternating current) ja DC tasavirtaa (direct current). Tasavirta ja vaihtovirta eroavat toisistaan sähkövirran suunnan perusteella. Tasavirrassa virtaus on jatkuvaa yhteen suuntaan, jolloin se luo graafisesti suoran viivan. Vaihtovirta muodostaa graafille aaltomaista kuviota sen vaihtuvuuden vuoksi, sillä se liikkuu vuoroin positiivisesti vuoroin negatiivisesti. (Earley. 2013)

Tänään suurin osa sähköstämme tuotetaan vaihtovirralla, mutta tietokoneet, LED-valot, aurinkopaneelit ja sähköautot käyttävät kaikki tasavirtaa. Nykyään on kehitetty menetelmiä suoran virran muuntamiseksi sekä korkeammille että matalammille jännitteille. Koska tasavirta on vakaa, yritykset ovat kehittäneet tapoja käyttää korkeajännitteistä tasavirtaa (HVDC) sähkön siirtämiseen pitkiä etäisyyksiä aiempaa pienemmillä energiahäviöillä (Energy.gov. 2014).

### **2.3 Lämpilyönti**

Lämpilyönti tapahtuu, kun eristys pettää liian suuren sähköjännitteen takia, jolloin purkaus ylittää testattavan eristeen täysin ja laskee elektrodien välisen jännitteen käytännössä nolnaan. (Hauschild, Lemke. 2014, 8) Eristeen lämpilyöntiprosessiin vaikuttavat lukuisat tekijät, jotka eivät rajoitu pelkästään jänniterasituksen vaikutukseen vapaaseen elektronikaasuun. Näitä tekijöitä ovat muun muassa esipurkausvirran ja dielektristen häviöiden aiheuttama lämmön nousu, sähköstaattiset voimat rajapinnoilla sekä eristeessä, sähkökemialliset reaktiot ja mahdolliset vesipuut ja eroosioilmiöt (Aro ym. 2015, 128)

Suhteellisen puhtaassa ja homogeenisessä nesteessä, kuten eristysöljyssä, sähkökenttä kohdistaa elektrodihin voiman. Elektrodit irtoavat katodeilta ja voiman



vaikutuksesta ne liikkuvat sähkökentän suuntaisesti. Jos elektrodit saavat tarpeeksi energiaa sähkökentältä nesteeseen saattaa syntyä mikroskooppisen pieniä kuplia molekyylien sysäysionisaation kautta. Myös lämpötila ja paine vaikuttavat nesteen läpilyöntilujuuteen. Korkeampi lämpötila alentaa nesteen viskositeettia, jolloin elektrodit liikkuvat nopeammin ja läpilyönti tapahtuu helpommin. Paineen kasvaessa läpilyöntilujuus paranee, sillä suuressa paineessa kuplien muodostuminen on vaikeampaa. Kiinteän eristeen läpilyönnin tutkimista vaikeuttaa, että mittauksissa on mahdotonta erottaa mikä osa virrasta johtuu polarisaatiosta ja mikä on todellista varauksenkuljettajien liikkumista. (Aro ym. 2015, 119–120)

### **2.3.1 Impregnointi**

Eristerakenteissa käytetään usein kiinteän eristeen ja eristysnesteen yhdistelmää, sillä näin saadaan aikaan eriste, jolla on parempi sähkölujuus kuin kummallakaan materiaalilla erikseen. Ohut paperi tarjoaa helposti käsiteltävän ja muotoiltavan materiaalin eristysrakenteisiin. Sen joustavuus mahdollistaa soveltamisen monimutkaisiin rakenteisiin. Toisaalta nestemäinen eriste täyttää eristystilan tehokkaasti ja pystyy mukautumaan esimerkiksi lämpölaajenemisen aiheuttamiin muodonmuutoksiin. Neste täyttää paperin huokokset, parantaen eristystehokkuutta. Impregnoitua paperia käytetään esimerkiksi kaapeleissa eristeenä. (Aro ym. 2003, 119–120&150)

### **2.4 Sähköeristepaperi ja -laminaatti**

Puhtaimmassa muodossaan selluloosapaperi omaa matalan sähkönjohtavuuden sekä on kemiallisesti inertti. Tämä tekee siitä erinomaisen vaihtoehdon monenlaisiin sähköneristystarpeisiin. Selluloosapaperi verkkomaisen rakenteensa sekä ja kuitumaisen luonteensa takia sisältää merkittävän määrän ilmaa ja kykenee absorboimaan kosteutta. Tämä ominaisuus heikentää selluloosapaperin eristyskykyä, sillä ilmalla on pienempi permittiivisyys kuin paperilla. Optimaalisen eristystehon saavuttamiseksi on välttämätöntä poistaa sekä ilma että kosteus materiaalista ja korvata ne erittäin eristävällä aineella eli impregnoimalla. (Whitehead. 1935, 1)

Permittiivisyydellä ( $\epsilon$ ) tarkoitetaan aineen fysikaalista ominaisuutta, joka kuvaa materiaalin vuorovaikutusta sähkökentän kanssa. Se kuvastaa materiaalin kykyä vastustaa sähkökenttää ja miten sähkökenttä leviää materiaalissa. Suhteellista permittiivisyyttä ( $\epsilon_r$ ) käytetään laajemmin, sillä se kuvaa suhteen eristeen ja tyhjiön permittiivisyyksien välillä. (Aro ym. 2015. 20–22)

## 2.5 Eristysöljy

Eristysöljyjä voidaan käyttää esimerkiksi erilaisissa muuntajissa, kaapeleissa, kondensaattoreissa ja suurjännitekytkimissä. Koneistossa öljy sammuttaa sähköpiirin avauksessa muodostuneen kaaren koskettimien välistä (The Shell petroleum company limited. 1949, 2) Hyvien eristysominaisuuksien lisäksi eristysöljyltä vaaditaan alhainen viskositeetti, jotta se toimii tehokkaasti jäähdytystehtävissä ja kykenee täyttämään kaikki kiinteän eristeen huokokset ja raot. Impregnointiprosessissa käytetyt nesteet saattavat imeytyä myös jonkun verran kiinteän materiaalin sisään, mikä parantaa eristysominaisuuksia. Nesteillä, jotka kykenevät hyvin kostuttamaan, on yleensä myös alhainen permittiivisyys. (Aro ym. 2003, 113&120)

Eristävän öljyn laadulla voi olla huomattava vaikutus testituloksiin. Öljyn pitoisuus ja hajoamiskerroin voivat vaikuttaa tuloksiin. Läpilyöntilujuutta mitattaessa öljy tarvitsee vaihtaa säännöllisin väliajoin tai tarvitsee käyttää suodattimia, jotta öljyn vaikutus tuloksiin voidaan minimoida (ASTM D149. 2009).

Muuntajaöljy on puhdistettua, mineraalityyppistä öljyä, joka on valmistettu luonnollisista seoksista. Se toimii eristeenä ja on olennainen komponentti monissa sähkölaitteissa, kuten muuntajissa, virrankatkaisijoissa ja tehomuuntajissa. Muuntajaöljy on välttämätön myös moniöljykatkaisijoissa ja sähkökaapeleissa. Laajalti hyödynnetty eristeaine on mineraaliöljypohjainen muuntajaöljy, joka tarjoaa erinomaiset sähköiset ja fysikaaliset lämpöominaisuudet. Muuntajaöljyn dielektrinen lujuus vaihtelee yleisesti välillä 200–250 kV/cm, mikä on 4–7 kertaa suurempi kuin ilman dielektrinen lujuus. Tämä mahdollistaa muuntajan pienemmän koon, kun öljyä käytetään eristeenä ilman sijaan (Huazheng. 2019).

Shell Diala S4 ZX-I on muuntajaöljy, jota käytetään sähköeristyksissä, sillä se vastaa nykyaikaisten voimamuuntajien tarpeisiin. Tämä muuntajaöljy tarjoaa pitkän käyttöiän ja on valmistettu rikittömistä perusöljyistä, jonka takia se ei luonnostaan syövytä kuparia. Tämä tekee siitä erinomaisen vaihtoehdon raskaaseen käyttöön. Lisäksi se on kuivattu ja käsitelty siten, että sillä on alhainen vesipitoisuus sekä se säilyttää korkean läpilyöntijännitteen. Shell Diala S4 ZX-I ei todennäköisesti aiheuta merkittäviä terveys- tai turvallisuusriskejä, kun sitä käytetään oikein suositelluissa sovelluksissa sekä noudatetaan henkilökohtaisen hygienian standardeja (Shell. 2021).

### 3 TYÖN SUORITUS

Mittauksia tehtiin paperi- sekä laminaattinäytteillä, joiden läpilyöntilujuus mitattiin ensin vanhoilla laitteilla, Ferrantilla, Ainuolla sekä Chromalla ja sitten uudella laitteella, Hipotronicsilla. Kesken mittausten yksi vanhoista laitteista, Ferrantin variac-osa rikkoutui, joten kyllästettyjen papereiden ja laminaattien mittaaminen jäi Ferrantilla kesken. Vanhan mittarin korjaaminen käyttökuntoon luotettavasti ei ollut enää järkevää, koska uusi laite oli jo hankittu, joten käyttöönottoa jatkettiin vertaamalla uusia mittauksia samalla näytteellä aikaisemmin tehtyihin mittauksiin. Hipotronicsin mittausten toistettavuutta mitattiin muovikalvon avulla sekä AC:llä, että DC:llä. Työssä käytetty uusi laite, Hipotronics D149-DI läpilyöntilaitte, on suunniteltu suorittamaan korkeajännitteisiä läpilyöntitestejä vaihto- ja tasajännitteellä eri kansainvälisten standardien vaatimusten mukaisten testien mukaisesti.

#### 3.1 Näytteiden käsittely

IEC 60554:n mukaisesti impregnoitavista paperi- sekä laminaattinäytteistä leikattiin sapluunalla 12 cm x 12 cm arkkeja. Arkkit merkittiin 1–10 järjestykseen. Arkkit puristettiin pakkaan vinottain metallilevyjen väliin ja niitä kuivattiin tyhjöuunissa 105 asteessa noin 20 tuntia. Samaan aikaan tyhjöpumpattiin 18–19 tuntia pataa, jossa on dodekyylibentseeniä eli samaa eristeöljyä, jossa arkkit ovat läpilyötäessä. Seuraavana päivänä pata lämmitettiin noin tunti ennen kyllästystä. Pakka siirrettiin tyhjiöpataan ja arkkeja tyhjöpumpattiin 3–4 tuntia. Pata jätettiin huoneenlämpötilaan 16 tunniksi ennen läpilyöntitestausta.

Näytteistä, jotka mitattiin kuivana, leikattiin pitkiä liuskoja, joista saatiin mitattua 20 mittausta yhdestä. IEC 60554:n mukaisesti liuskoja kuivattiin kaksi tuntia 105 asteessa ennen mittaamista, jotta paperissa oleva kosteus ei vaikuttaisi läpilyöntilujuuteen. Yhdestä näytteestä mitattiin 20 kpl läpilyöntejä. Kuivana mitattaville näytteille oli kaksi vanhaa laitetta.

#### 3.2 Näytteiden mittaus Ferrantilla, Ainuolla ja Chromalla

Impregnoituista eli kyllästetyistä näytteistä mitataan ensin Ferrantilla (KUVA 1) AC-läpilyöntilujuus. Arkkit aseteltiin vuorotellen alaelektrodin päälle testausastiaan, jossa on eristeöljyä. Yläelektrodi, jonka halkaisija on 25 mm nostetaan alaelektrodin päälle siten, että mitattavana oleva arkki jää elektrodien väliin. Jännitteen nousu käynnistetään ja läpilyönnin tapahduttua laite tallentaa ylimmän havaitun huippujännitteen mittariin, jolloin laite pysäytetään ja katsotaan tulos mittarista. Jännite nousee 200 V/s vauhtia. Tulokset merkitään 0,1 kV tarkkuudella. Kyllästetyn paperin ja laminaatin läpilyönnit suoritetaan samalla tavalla.



KUVA 1. Ferranti läpilyöntilaitte (Kuva: Marjo Mäki)

Ferrantilla saadut tulokset piti vielä korjata, sillä Ferranti näyttää vaihtojännitteen huippuarvoa ja läpilyöntiin tarvitaan laitteen tehollisarvo. Tehollisarvo laskettiin jakamalla tulos kahden neliöjuurella. Korjattuun tulokseen laskettiin tehollisarvo sekä kerrottiin se Ferrantin korjauskertoimella kaavan 1 mukaisesti,

$$\text{korjattu tulos} = x \div \sqrt{2} \cdot 1,04 \quad (1)$$

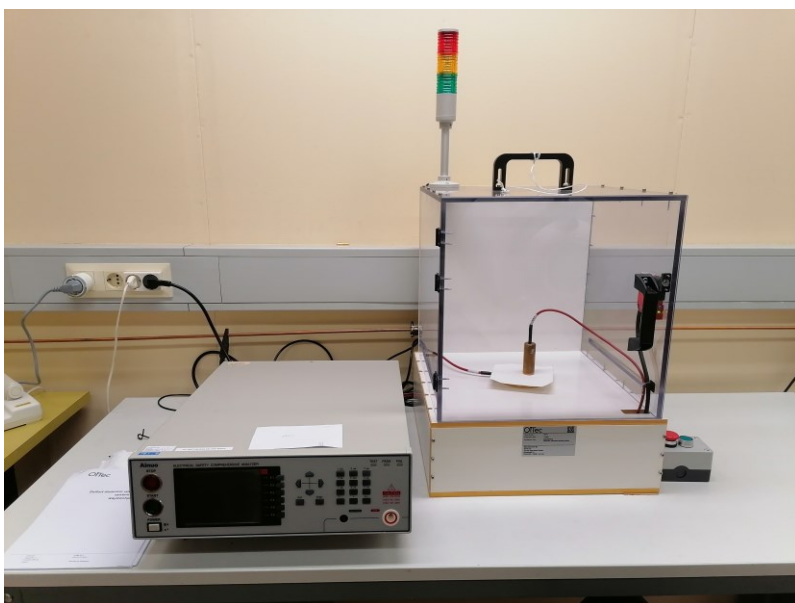
missä

$x$  laitteelta saatu yksittäinen tulos ja

1,04 on laitteen korjauskerroin, joka mitataan laitteesta säännöllisin väliajoin.

Kuivien näytteiden läpilyöntilujuus mitattiin joko Ainuolla (KUVA 2) tai Chromalla (KUVA 3). Ainuolla mitattiin paksummat näytteet ja Chromalla ohuemmat näytteet, sillä Ainuolla ei pysty mittaamaan liian matalia läpilyöntilujuuksia. Tämä

johtuu perinteisen mittalaitetekniikan rajoituksista. Ainuon menetelmä perustuu perinteiseen variac-kytkentään, kun taas Chromassa jännitettä säädetään elektronisesti. Variac-kytkennöissä yleinen käytäntö on, että pienin mahdollinen mitausjännite on 10 % ja suurin mahdollinen 90 % maksimista. Chroma lupaa tarkkuuden olevan  $\pm$  (2% luetusta arvosta + 0.5% mittausalueesta) välillä 0,05-5 kVAC ja 0,05-6 kVDC. Tässä luetulla arvolla viitataan mitattuun jännitearvoon, kun taas mittausalueella tarkoitetaan käytettävän mittarin kattamaa jännitealuetta (Chroma. n.d.).



KUVA 2. Ainuo AC/DC läpilyöntilaitte ja laitteeseen kytketty OiTec-yhtiön rakentama turvakaappi (Kuva: Marjo Mäki)

Sekä Ainuolla että Chromalla kuivattu näyteliuskan pääty asetettiin ylä- ja alaelektrodin väliin ja siitä mitattiin läpilyönti. Liuskaa siirrettiin siten, että seuraavan läpilyönnin kohta oli tarpeeksi kaukana edellisestä läpilyönnistä. Läpilyönti haurastuttaa paperia myös läpilyöntikohdan ympäriltä, joten liian läheltä edellisistä läpilyöntiä ei saanut mitata seuraavaa. Tätä jatkettiin, kunnes liuskasta oli mitattu 20 läpilyöntiä.



KUVA 3. Chroma läpilyöntilaitte (Kuva: Marjo Mäki)

### 3.3 Näytteiden mittaus Hipotronicsilla

Uudella laitteella eli Hipotronics D149-DI läpilyöntilaitteella (KUVA 4) mitattiin sekä kuivia että kyllästettyjä näytteitä. Kyllästetyt sekä kuivat näytteet valmistettiin samalla tavalla sekä uudelle laitteelle että vanhoille laitteille. Hipotronicsilla mitattiin samat mittaukset samoista näytteistä kuin, mitä Ferrantilla, Ainuolla ja Chromalla mitattiin. Sillä mitattiin myös samasta paperista yksin- ja kaksinkertaisia näytteitä, jotta saatiin tietää miten kerrostaminen vaikuttaa mittaustuloksiin.

Hipotronicsilla jännite nousee 200 kV/s vauhtia ja pysähtyy, kun läpilyönti tapahtuu. ASTM D149 standardin mukaan läpilyönti tulisi todentaa joko silmin nähtävällä reiällä läpilyödyssä materiaalissa tai uusintatestillä. Tämän vuoksi näyte tarkastettiin läpilyönnin jälkeen. Jos reikää ei näkynyt, otettiin uusi läpilyöntinäytteestä.



KUVA 4. Hipotronics 700/800-DI-läpilyöntilaitte (Kuva: Marjo Mäki)

Toistettavuutta mitattiin suurjännitekondensaattoreihin tarkoitetulla polypropeenikalvolla sekä AC:llä, että DC:llä. Samasta kalvosta mitattiin molemmilla 20 läpilyöntiä ja saaduista tuloksista (liite 8.) vertailtiin keskihajontaa ja verrattiin tuloksia myös eristepapereista ja -laminaateista saatujen tulosten (liite 1–7) keskihajontoihin. PP kalvosta läpilyönnit kuuluisivat mitata kyllästettyinä, mutta siihen ei ollut saatavilla tarvittavaa eristeöljyä, joten se jouduttiin mittaamaan kuivana.

### 3.4 Turvallisuuden huomiointi

Ensin tutustuttiin laitteen valmistajan laatimiin käyttöohjeisiin ja niiden turvallisuusosioon. Ohjeiden perustella laadittiin käytännön työohjeet ja niiden turvallisuutta koskeva osio. Turvallisuuskohdat käytiin läpi ennen työn aloittamista ja niitä tarkkailtiin työtä suorittaessa sekä paranneltiin tarvittaessa. Turvallisuutta edistäviin asioihin kiinnitettiin huomiota myös vanhalla laitteella, Ferrantilla, ja näitä vertailtiin uuden kanssa.

Huolehdittiin, että kaikki, jotka käyttävät läpilyöntilaitteita ovat suorittaneet sähkötyöturvallisuuskortin sekä saaneet hyvän perehdytyksen laitteiden käyttöön ja



seuraavat käyttöohjeita aina tehdessään töitä laitteilla. Työntekijöillä, joka käyttivät Hipotronicsia piti olla työpaita tai -takki, jossa on pitkät hihat, suojalasit, turvakengät ja pitkät hiukset tuli pitää kiinni.

Uuden laitteen käyttöönottoon kuuluu valmistajan laatimaan riskikartoituksen tutustuminen. Tämän lisäksi varmistettiin, että laitteessa on CE-merkintä ja tarvittavat dokumentit eli vaatimustenmukaisuustodistus ja käyttö- sekä huolto-ohjeet oli saatu. Huomiota kiinnitettiin erityisesti jännitelähteiden ja virtaa johtavien osien maadoittamiseen sekä häiriötilanteisiin ja niiden korjaamiseen.

## 4 TULOKSET

### 4.1 Toistettavuus

Toistettavuus liittyy tarkkuuteen, kun määrittämiä tehdään samankaltaisissa olosuhteissa lyhyen ajan sisällä. Tämä edellyttää, että käytetään samoja tekijöitä, laitteita, reagensseja ja muita parametreja. Mittaustulosten toistuvuus tarkoittaa sitä, kuinka hyvin peräkkäiset mittaukset antavat samansuuruisia tuloksia samassa mittausympäristössä. Toistuvuusolosuhteet ovat ne olosuhteet, joissa saadaan samasta testattavasta kohteesta toisistaan riippumattomia testituloksia saman mittauksen suorittajan, saman menetelmän ja saman laitteiston avulla samassa laboratorioissa lyhyen ajan kuluessa (Mikes. 2005).

Keskihajonta on tilastollinen mittari, joka ilmaisee arvojen hajontaa niiden keskiarvosta. Se antaa käsityksen siitä, kuinka paljon arvot vaihtelevat keskimäärin toisistaan. Jos kaikki arvot ovat samat, keskihajonta on nolla, mikä viittaa siihen, että arvot ovat tiiviisti keskittyneet keskiarvon ympärille (Opinnot.net. n.d.).

Keskihajonnan laskemisessa hyödynnetään arvojen etäisyyksiä keskiarvosta. Näiden etäisyyksien toiset potenssit lasketaan yhteen ja jaetaan arvojen lukumäärällä. Tuloksesta otetaan sitten neliöjuuri, mikä tuottaa keskihajonnan arvon. Keskihajonnan yksikkö on sama kuin arvojen yksikkö, mikä helpottaa sen vertailua eri aineistojen välillä. Keskihajonta  $\sigma$  lasketaan siis kaavalla (Kaava 2),

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

missä

$x_i$  tarkoittaa yksittäistä arvoa,

$\bar{x}$  tarkoittaa keskiarvoa ja

$n$  tarkoittaa arvojen lukumäärää. (Opinnot.net. n.d.)

Toistettavuutta mitattiin RER PP kalvolla sekä AC:llä, että DC:llä. Taulukkoon 1 on listattu kaikki näytteet, joista mitattiin Hipotronicsilla AC-mittauksella läpilyönnit, olivatko ne kuivia vai kyllästettyjä, niiden materiaali, paksuus sekä kaavan 2 avulla laskettu keskihajonta.

Taulukko 1. Hipotronicsin AC-mittaukset

<b>Näyte</b>	<b>Kuiva</b>	<b>Kyllästetty</b>	<b>Materiaali</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Keskihajonta (kV)</b>
3439611002-	x		tertrans-paperi	144,8	0,0382
3433603003-	x		tertrans-paperi	151,8	0,0695
3439548002-	x		tertrans-paperi	44,4	0,0211
3439681001-	x		tertrans-paperi	44,7	0,0186
3439681001-	x		tertrans-paperi	44,7	0,0168
3417145084-1M-		x	eristelaminaatti	95,6	0,9164
3417141040-1M-		x	eristelaminaatti	121,6	0,9761
3417143002-1M-		x	eristelaminaatti	171,3	0,7361
3433362001-1M-		x	eristelaminaatti	230,1	1,8973
3436397001-1M-		x	eristelaminaatti	220,6	1,6635
3439579002-		x	tercon-paperi	81,3	1,2214
3449723002-		x	tercon-paperi	205	1,0351
3439579002-		x	2xtercon-paperi	162,6	0,5029
3449723002-		x	2xtercon-paperi	410	2,0747
<b>RER PP kalvo</b>	x		RER PP kalvo	12,6	0,0843

Kuten taulukosta 1 näkee, kalvon keskihajonta AC:llä mitattuna on pienempi kuin kaikkien kyllästettyjen näytteiden hajonnat. Kuivina mitattujen näytteiden keskihajonnat ovat hieman pienempiä kuin kalvon keskihajonta.

Taulukkoon 2 on listattu kaikki näytteet, joista on mitattu Hipotronicsilla DC-mittauksella läpilyönnit, olivatko ne kuivia vai kyllästettyjä, niiden materiaali, paksuus sekä kaavan 2 avulla laskettu keskihajonta.

Taulukko 2. Hipotronicsin DC-mittaukset

<b>Näyte</b>	<b>Kuiva</b>	<b>Kyllästetty</b>	<b>Materiaali</b>	<b>Paksuus (µm)</b>	<b>Keskihajonta (kV)</b>
<b>3449043010-</b>	x		tercon-paperi	36,5	0,3432
<b>3449043002-</b>	x		tercon-paperi	37,4	0,3385
<b>3449041006-</b>	x		tercon-paperi	35,4	0,2953
<b>3448450002-</b>	x		tercon-paperi	31,8	0,1738
<b>3446840016-</b>	x		tercon-paperi	27,5	0,2739
<b>3304687-40</b>		x	tercon-paperi	121,1	2,7056
<b>3433362001-1M-</b>		x	eristelaminaatti	230,1	6,6638
<b>3439579002-</b>		x	tercon-paperi	81,3	1,3177
<b>3439579002-</b>		x	2xtercon-paperi	162,6	2,6632
<b>3449723002-</b>		x	tercon-paperi	205	4,9009
<b>3449723002-</b>		x	2xtercon-paperi	410	5,2684
<b>RER PP Kalvo</b>	x		RER PP Kalvo	12,7	0,3099

Kuten taulukosta 2 näkee, Hipotronicsin DC-mittauksissa PP kalvon keskihajonta on huomattavasti pienempi kuin kyllästettyjen näytteiden keskihajonnat ja lähes pienin kaikista saaduista keskihajonnoista.

AC:llä kalvon tulokset olivat heikompia, sillä kalvo on hyvin ohutta, joten se kestää huonommin AC:n aiheuttamaa räsitusta. Kalvosta kuuluisi mitata läpilyöntilujuus impregnoituna, mutta koska oikeanlaista eristysöljyä ei ollut saatavilla, jouduttiin kalvosta mittaamaan läpilyöntilujuudet kuivana. Tämä heikensi tuloksia, sillä kuiva kalvo ei kestä yhtä hyvin sähkövirran aiheuttamaa räsitusta.

#### 4.2 Hipotronicsin, Ferrantin, Aiuon ja Chroman tulokset

Taulukkoon 3 kerättiin kaikki tulokset, jotka on mitattu samalla näytteellä sekä Hipotronicsilla että jollakin vanhoista laitteista. Taulukkoon laskettiin tulosten keskiarvo (KA) sekä keskihajonta (KH) Hipotronicsilta sekä vanhoilta laitteilta saaduista tuloksista. Kaikki saadut tulokset nähdään mittauspöytäkirjoista (liite 1–7). Liitteistä näkyy myös, mikä vanha laite millekin näytteelle on ollut käytössä.

Taulukko 3. Vertailutulokset Hipotronicsin sekä vanhojen laitteiden välillä

		<i>Hipotronics</i>		<i>Vanha laite</i>	
<i>Näyte</i>	<i>Materiaali</i>	<i>KA (kV)</i>	<i>KH (kV)</i>	<i>KA (kV)</i>	<i>KH (kV)</i>
<b>3439611002-</b>	Tercon-paperi	1,018	0,0382	1,036	0,0297
<b>3433603003-</b>	Tercon-paperi	1,106	0,0695	1,147	0,0524
<b>3439548002-</b>	Tercon-paperi	0,566	0,0211	0,5	0,0261
<b>3439681001-</b>	Tercon-paperi	0,565	0,0186	0,526	0,0169
<b>3449043010-</b>	Tercon-paperi	2,62	0,3432	2,654	0,2673
<b>3449043002-</b>	Tercon-paperi	3,132	0,3385	3,090	0,2533
<b>3449041006-</b>	Tercon-paperi	3,153	0,2953	2,99	0,3055
<b>3448450002-</b>	Tercon-paperi	2,56	0,1738	2,423	0,1974
<b>3446840016-</b>	Tercon-paperi	2,428	0,2739	2,371	0,2592
<b>3417145084-1M-</b>	Eristelaminaatti	12,66	0,9164	10,481	0,5659
<b>3417141040-1M-</b>	Eristelaminaatti	15,14	0,9761	11,76	0,7645
<b>3417143002-1M-</b>	Eristelaminaatti	19,492	0,7361	14,44	0,3499

Kuten taulukossa olevista tuloksista näkee papereilla Hipotronicsilla saatujen tulosten keskiarvo ja keskihajonta ei eroa juurikaan vanhojen tulosten keskiarvoista ja keskihajonnoista. Tämä on selitettävissä paperin ja laminaatin luonnollisella paksuuden ja tiheyden vaihtelulla. Hipotronicsin tulokset heittivät sekä ylös että alaspäin vanhojen laitteiden tuloksista, joten Hipotronicsilla saadut tulokset olivat luotettavia, jos vertaillaan vain vanhoihin tuloksiin.

Laminaateista mitatut läpilyöntilujuudet uudella laitteella, Hipotronicsilla, vaikuttavat olevan suuremmat verrattuna vanhoihin laitteisiin (Ferranti, Ainuo, Chroma). Tämä voi viitata siihen, että Hipotronicsilla saadaan korkeammat läpilyöntilujuudet tai että uusi laite antaa mittauksiin optimoidun suorituskyvyn.

### 4.3 Huomioidut turvallisuusseikat

Hipotronicsissa turvallisuus on huomioitu huolellisesti. Laitteessa on ovet, joiden ollessa auki, jännite ei voi nousta. Laitteen näytössä on myös painike, josta saa jännitteen nousun pysäytettyä tarvittaessa. Virtalähde on sijoitettu kammion alle siten, että siihen on tahattomasti mahdoton osua työskennellessä. Laitteen näy-

tössä on painike, josta jännitteen nousu saadaan tarvittaessa pysäytettyä. Laitteella on myös erillinen virtakytkin, josta saadaan laitteelle tuleva virta kokonaan katkaistua.

Jos käytettiin AC:ta DC maadoitettiin, jotta siihen ei voi vahingossakaan jäädä tai tulla jännitettä (KUVA 5). Samalla tavalla maadoitettiin myös AC, jos käytössä oli DC.



KUVA 5. DC maadoitettuna (Kuva: Marjo Mäki)

Maadoituskeppiä (KUVA 6) käytettiin aina mittausten välissä, sitä käytettiin mahdollisten pienten varausten poistamiseen. Kepillä kosketettiin joka mittauksen jälkeen näytealtaan alla olevaa metallirengasta, jota pitkin virta kulki elektrodihin.



KUVA 6. Maadoituskeppi (Kuva: Marjo Mäki)

Toisin kuin vanhalla laitteella, Ferrantilla, Hipotronics pysäyttää jännitteen nousun automaattisesti läpilyönnin tapahduttua. Ferrantilla jännitteen nousu täytyi pysäyttää painamalla nappia heti, kun läpilyönti tapahtui. Ferrantissa ei myöskään ollut maadoituskeppiä, millä olisi saanut elektrodit maadoitettua.

## 5 POHDINTA

### 5.1 Toistettavuus

Joutuimme käyttämään kalvoa, joka on jo useamman vuoden seissyt pimeässä varastossa, sillä uudempaa ei ollut nyt saatavilla. Kalvoa ei saatu myöskään kyllästettyä oikean eristeöljyn puuttumisen vuoksi. Varastossa kuitenkin on käyty silloin tällöin ja näinä aikoina siellä on pidetty valoja päällä. Valo haurastuttaa muovia. Vaikka ensimmäiset kerrokset rullasta poistettiin, on mahdollista, että valon puolella ollut kalvo on päässyt haurastumaan enemmän kuin varjon puolella ollut osa rullasta.

Toistettavuutta pitäisi testata uudestaan uudella kalvolla, joka olisi kyllästetty, jos halutaan saada luotettavampia tuloksia toistettavuudesta. Tällöin valon aiheuttama haurastuminen ei vaikuttaisi tuloksiin ja kyllästettynä kalvo olisi läpilyöntilujuudeltaan vielä tasaisempaa. Näin tiedettäisiin varmemmin, että Hipotronics on luotettava ja voidaan jatkossa luottaa sen antamiin tuloksiin.

### 5.2 Hipotronics näytteiden mittaamiseen

Uudella laitteella (Hipotronics) mitatut keskihajonnat olivat lähes samoja sekä AC- että DC-mittauksissa verrattuna vanhoihin laitteisiin (Ainuo, Chroma, Ferranti). Keskihajontojen samankaltaisuus kertoo, että Hipotronics soveltuu korvaamaan aiemmin käytössä olleita laitteita. Tämä tekee uudesta laitteesta luotettavan ja mahdollistaa tarkat ja johdonmukaiset mittaukset.

Eristelaminaateissa Hipotronicsin hajonta on isompi kuin vanhalla laitteella, Ferrantilla, saadut hajonnat. Ferrantilla saatu tulos on kuitenkin enemmän arvio, koska tulos piti katsoa mittarilta eikä se sen takia ollut täysin luotettava. Ferrantin mittarin resoluutio on huomattavasti pienempi kuin Hipotronicsin. Pöytäkirjassa Ferrantin tulokset ovat sadan voltin tarkkuudella ja Hipotronicsin kymmenen voltin tarkkuudella, joten jos sataa voltia isompaa hajontaa ei ole, ei tuloksia voi verrata toisiinsa. Kyllästetyissä näytteissä tulokset ovat isommat, joten hajontakin kasvaa. Ferranti oli hyvä korvata Hipotronicsilla monista muistakin syistä kuin mittaustuloksien epävarmuuden takia. Ferrantin tulokset jouduttiin manuaalisesti



korjaamaan vaihtojännitteen huippuarvosta tehollisarvoksi. Hipotronics teki tämän automaattisesti, joten se säästää työntekijän aikaa. Hipotronics oli myös ajallisesti onnistunut investointi, sillä kyllästettyjen näytteiden mittaamiseen käytetyn laitteen, Ferrantin, variac-osa rikkoutui kesken työn suorituksen. Sähkölaboratorion näytteiden läpilyönnin mittausta ei kuitenkaan jouduttu keskeyttämään, sillä uudella laitteella pystyi aloittamaan niiden mittaamisen.

Koska Ferranti rikkoutui ennen kuin kaikki halutut näytteet oli saatu mitattua, kyllästettyjen näytteiden mittausten vertailu jäi hieman vajaaksi. Vertailua voisi jatkaa esimerkiksi lähettämällä näytteitä laboratorioon, josta löytyisi vastaavanlainen luotettavaksi todettu laite ja vertailemalla sieltä saatuja tuloksia Hipotronicsilla saatuihin tuloksiin. Tämä olisi vaikeaa, sillä läpilyöntilaitteet ovat todella harvinaisia, joten näytteitä jouduttaisiin luultavasti lähettämään pitkälle.

### **5.3 Turvallisuus**

Laite saatiin käyttöön otettua ja turvallisuusasiat katsottiin läpi ja testattiin. Pääasiassa turvallisuuteen liittyvät välineet ja menetelmät toimivat hyvin. Hipotronicsin näyttö teki muutaman kerran niin, että se jäättyi eikä siitä voinut painaa jännitteen nousua päälle. Tämän takia mietittiin, onko mahdollista, että näyttö jähmettyisi, kun jännite nousee eikä pystyisi painamaan tarvittaessa painiketta, joka pysäyttää jännitteen nousun. Tästä raportoitiin valmistajalle ja valmistaja toimitti uuden ohjelmiston laitteeseen. Tilanne parani, mutta hienosäätö jatkuu vielä takuuajan puitteissa. Laitteella on myös erillinen virtakytkin, josta pystyisi tarvittaessa katkaisemaan laitteelle tulevan virran kokonaan sekä keskellä näyttöä on myös turvakatkaisija tällaisia tilanteita varten.

Sähkölaboratoriossa työskentelee pääasiassa yksi henkilö ja hän on koulutukseltaan laborantti. Sähkötyöturvallisuuskortti on ainoa sähkökoulutus laitteita käytävällä henkilöllä. Laajempi tietous sähköstä, käytettävistä laitteista sekä turvallisuudesta voisi olla tarpeellinen laboranteille, jotka työskentelevät näiden laitteiden parissa. Sähkötöitä ja erityisesti suurjännitemittauksia suositeltaisiin tekemään vähintään kahdestaan. Sähkölaboratoriossa onkin sääntö, että uudet mit-

taukset tehdään aina kahdestaan ja uuden laitteen käyttöönoton yhteydessä toimitaan niin pitkään kahdestaan, että laitteen toiminta ja ominaisuudet ovat tulleet tutuksi.

Hyviä huomioitavia asioita löytyi paljon ja mittauksia tehdessä koettiin, että esimerkiksi sähköiskua olisi tahtomattaan mahdoton saada, jos noudattaa laitteelle tehtyjä ohjeita. Jatkossa laitteelle tulisi suorittaa säännöllisiä riskien arviointeja, pitää ensiapuvälineet asianmukaisina sekä pitää huoli, että jokainen laitetta tulevaisuudessa käyttävä on saanut tarpeeksi hyvän perehdytyksen laitteeseen ja koulutuksen sähkötyöstä. Näin pidetään huoli, että laite ja sen ympäristö pysyvät turvallisena laitteella työskentelevälle ja muilla tilassa oleville. Tervakoskella henkilöriskien arviointi suoritetaan sähkölaboratorion riskienarviointikierröksillä vuosittain.

## LÄHTEET

- Aro M., Elovaara A., Karttunen M., Nousiainen K. & Palva V. 2003. Suurjännite-tekniikka. 2 uud. painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. Viitattu 16.3.2024
- Aro M., Elovaara A., Karttunen M., Nousiainen K. & Palva V. 2015. Suurjännite-tekniikka. 4 uud. painos. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press. Viitattu 23.5.2024
- ASTM D149. 2009. Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies. Vaatii käyttöoikeuden. Viitattu 14.3.2024.
- Awati, R. 2022. Techtarget. permittivity (electric permittivity). Viitattu 23.1.2024. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/permittivity-electric-permittivity>
- Chroma. n.d. Electrical Safety Analyzer. Viitattu 15.4.2024. <https://www.chromausa.com/product/electrical-safety-analyzer-19032/>
- Delfortgroup. n.d. Viitattu 13.4.2024 <https://delfortgroup.com/fi/location/terva-koski-oy/>
- Earley Elizabeth. 2013. MIT school of engineering. What's the difference between AC and DC? Viitattu 24.1.2024. <https://engineering.mit.edu/engage/ask-an-engineer/whats-the-difference-between-ac-and-dc/>
- Energy.gov. 18.11.2014. The War of the Currents: AC vs. DC Power. Viitattu 15.4.2024. <https://www.energy.gov/articles/war-currents-ac-vs-dc-power>
- Eurolaite. 2017. Muuntajien öljyanalyysi. Viitattu 13.4.2024. [https://www.eurolaite.fi/wp-content/uploads/2021/01/Muuntajien\\_o%CC%88ljyanalyysi\\_2017.pdf](https://www.eurolaite.fi/wp-content/uploads/2021/01/Muuntajien_o%CC%88ljyanalyysi_2017.pdf)
- Hauschild W. & Lemke E. 2014. High-Voltage Test and Measuring Techniques. Springer: Verlag Berlin Heidenberg. E-book. Vaatii tunnistautumisen. Viitattu 1.2.2024
- Huazheng. 20.11.2019. Muuntajaöljyn käyttö ja siihen liittyvät instrumentit. Viitattu 14.4.2024. <https://fi.electric-test.com/info/transformer-oil-use-and-related-instruments-40933416.html>
- MIKES. 2005. Kemian metrologian opas. Metrologian neuvottelukunta, Kemian ja mikrobiologian jaosto, Kemian työryhmä. Viitattu 25.2.2024 <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/2005-J6.pdf>
- MPS. 1.7.2022. Understanding AC/DC power supplies. Viitattu 14.3.2024 <https://www.monolithicpower.com/en/ac-dc-power-supply-basics>
- Opinnot.net. n.d. Keskihajonnat. Viitattu 27.2.2024 [https://opinnot.net/kokonaisuudet/index.php?id\\_kokon=209](https://opinnot.net/kokonaisuudet/index.php?id_kokon=209)

Shaanxi Fullstar Electronics Co. 23.4.2019. Korkean jännitteen muuntajan periaate ja käyttö. Viitattu 15.4.2024. <https://fi.x-fullstar.com/info/application-of-high-voltage-transformer-34530134.html>

Shell. 2.12.2021. Shell Diala S4 ZX-I. Viitattu 15.4.2024 <https://www.shell-live-docs.com/data/published/en-IN/ba57b9db-0ba4-4639-aabe-314b6f3496dc.pdf>

Tala Henrik. Tervakosken paperitehtaan historia 1818–2018. 05/2018. Tervakoski: Tervakoski Oy. Viitattu 14.4.2024.

The Shell petroleum company limited. 1949. Insulating oils for transformers and switchgear. London. Viitattu 24.1.2024

## LIITTEET

## Liite 1. mittauspöytäkirja Chroma-laitteella tertranspaperista AC:lla

\* pöytäkirja  
ja jatkotulokset  
nautuu

202  
Chroma  
AC-LÄPILYÖNTITESTI  
tertrans

TOY

KREPPIPAPERIN

Pvm	1.2.	1.2.	1.2.	1.2.	1.2.				
Menetelmä	VEG K25 44,8	VEG K25 151,8	VEG K25 44,4	VEG K25 44,7	ASTM E50 44,7				
Paksuus µm									
Valm nro.	3439611 002-	3439603 003-	3439648 002-	3439681 001-	3439681 001-				
Rulla nro.									
HP No/rkV	1 1,05	1,12	0,49	0,52	0,54				
	2 1,07	1,15	0,50	0,54	0,47				
	3 1,06	1,06	0,45	0,54	0,57				
	4 1,05	1,19	0,50	0,51	0,55				
	5 1,00	1,20	0,50	0,56	0,54				
	6 0,47	1,12	0,47	0,51	0,52				
	7 1,06	1,09	0,52	0,51	0,44				
	8 1,02	1,12	0,52	0,51	0,54				
	9 1,03	1,24	0,55	0,54	0,56				
	10 1,05	1,18	0,50	0,52	0,57				
x kv									
MV/m									
Kommentit:									
esim. "työväli"									

\*\* Nro. 1-3 => mitattu 1. rullasta, Nro. 4-7 => mitattu 2. rullasta ja Nro. 8-10 => mitattu 3. rullasta



## Liite 3. Mittauspöytäkirja Ferranti-laitteella laminaatista AC:lla

Pvm	2.2.	2.2.	2.2.						
Menetelmä									
Paksuus jsm	45,6	42,6	44,3						
Valm nro.	3417145	3417144	3417148						
Fulla nro.	084-14-	040-14-	000-14-						
HP Nro/IV	1 * 12,5	16,2	20,7						
	2 14,9	15,4	19,8						
	3 14,5	16,7	20,5						
	4 14,5	16,2	20,1						
	5 * 11,4	16,4	20,1						
	6 15,0	15,9	19,4						
	7 15,1	16,5	19,8						
	8 14,5	16,7	19,8						
	9 14,5	17,2	19,9						
	10 * 10,1	16,5	20,0						
x kv									
MV/m									
Kommentit:	Tyypin lausua 14								
esim. "tyyppi"									

\*\* Nro. 1-3 => mitattu 1. rullasta, Nro. 4-7 => mitattu 2. rullasta ja Nro. 8-10 => mitattu 3. rullasta

KREPPI PAPERIN

Ferranti

202

AC-LÄPILYÖNTTESTI  
Astma 3 kv

## Liite 4. Mittauspöytäkirja Hipotronics-laitteella laminaatista AC:lla

Pvm	2.2.	2.2.	2.2.	7.2.	7.2.	7.2.	7.2.		
Meneleinä									
Paksuus pvm	85,6	121,6	171,3	95,6	121,6	171,3			
Valm nro.	3417145 084-111	3417141 040-111-	3417143 005-111-	3417145 084-111-	3417144 010-111-	3417143 002-111-			
Fulla nro.									
HP NooKV	1 * 9,18	1570	1944	1387	14102	1702			
	2 13,31	1424	2039	12,05	14,01	20,00			
	3 18,38	1972	19,60	18,34	16,45	19,36			
	4 12,44	15,34	13,47	10,93	16,00	19,40			
	5 12,26	15,87	20,28	12,95	12,92	19,63			
	6 13,98	15,72	18,78	12,75	15,64	19,48			
	7 12,87	15,35	18,99	12,43	14,97	18,62			
	8 13,73	15,68	19,73	11,52	14,70	20,38			
	9 13,75	16,47	20,77	11,42	16,45	19,94			
	10 * 9,09	15,29	19,67	11,03	14,26	19,54			
x kv									
MV/m									
Kommentti:	1,1 x 1,2 x 1,14 x 5								
esim. "työvä"*									

\*\* Nro. 1-3 => mitattu 1. rullasta, Nro. 4-7 => mitattu 2. rullasta ja Nro. 8-10 => mitattu 3. rullasta

KREPPI PAPERIN

Hipotronics

2024 50mm

AC-LÄPILYÖNTITESTI  
-Ammos 3 kv



## Liite 5. Mittauspöytäkirja Hipotronics-laitteella terconpaperista DC:lla

TOY

HIPOTRONICS

KAAPELIPAPERI

DC-LÄPILYÖNTITESTI (Ainuo)

sensitiivisyys 50%

Pvm	30.1.	30.1.	30.1.	30.1.	30.1.		
Valm nro	3449043	3449043	3449041	3448450	3446840		
Rulla nro	010-	002-	006-	002-	016-		
Paks $\mu\text{m}$	36,5	37,4	35,4	31,8	27,5		
Nro/kV 1	2,31	2,89	2,99	2,48	1,95		
2	2,57	2,95	3,57	2,47	2,94		
3	2,66	2,56	3,35	2,17	2,35		
4	2,52	2,60	3,40	2,40	1,74		
5	2,91	2,54	3,17	2,61	2,73		
6	2,96	3,28	3,31	2,39	2,59		
7	2,20	3,63	3,20	2,73	2,51		
8	2,83	3,64	3,48	2,67	2,40		
9	2,94	3,46	2,98	2,90	2,72		
10	2,95	3,22	3,00	2,40	2,73		
11	1,91	3,05	2,81	2,83	2,52		
12	2,58	3,69	3,11	2,49	2,45		
13	3,04	2,97	3,50	2,65	2,66		
14	1,76	2,97	3,42	2,60	2,29		
15	2,43	3,49	3,34	2,66	2,40		
16	2,81	2,99	3,03	2,83	2,45		
17	2,67	3,07	3,31	2,48	2,08		
18	2,69	3,13	2,51	2,44	2,33		
19	2,82	3,40	2,48	2,50	2,40		
20	2,85	2,10	3,09	2,50	2,31		
x kv							
s							
MV/m							
s							

## Liite 6. Mittauspöytäkirja Ainuo-laitteella terconpaperista DC:lla

TOY

Ainuo

KAAPELIPAPERI

DC-LÄPILYÖNTITESTI (Ainuo)

Pvm	30.1.	30.1.	30.1.	30.1.	30.1.		
Valm nro	3449043	3449043	3449041	3448450	3446840		
Rulla nro	010-	002-	006-	002-	016-		
Paks µm	36,5	37,4	35,1	31,8	27,5		
Nro/kV	1	2	3	4	5		
	2,14	2,56	2,56	2,51	2,33		
	2,35	3,07	2,27	2,44	2,66		
	2,75	3,14	2,98	2,40	2,55		
	2,54	3,40	3,25	2,48	2,26		
	2,70	3,02	3,39	2,15	2,48		
	2,68	2,94	2,91	2,53	1,59		
	2,46	3,52	2,86	2,88	2,24		
	2,89	2,73	3,65	2,41	2,70		
	2,56	2,98	2,82	2,26	2,42		
	2,82	3,27	2,68	2,58	2,70		
	3,03	2,89	2,90	2,22	2,51		
	2,75	3,33	2,99	2,67	2,41		
	3,05	3,26	3,06	2,33	2,47		
	2,98	2,83	2,76	2,19	2,16		
	2,76	3,31	2,78	2,64	2,02		
	2,95	3,27	3,29	2,26	2,55		
	2,45	3,31	3,27	2,66	2,43		
	2,47	3,12	3,23	2,28	2,46		
	2,08	3,18	3,05	2,46	2,11		
	2,66	2,66	3,10	2,10	2,55		
x kv							
s							
MV/m							
s							

Liite 7. Mittauspöytäkirja Hipotronics-laitteella laminaatilla sekä yksin- ja kaksinkertaisella paperilla AC:lla ja DC:lla

TOY

Pvm	AC - DC-LÄPILYÖNTITESTI						Hipotronics (Airwe)	50nm
	KAAPELIPAPERI AC 2x Paperi	AC 2x Paperi	DC 1x Paperi	DC 2x Paperi	DC 1x Paperi	DC 2x Paperi		
Valm nro	3439579	3449723	3439579	3439579	3449723	3449723		
Rulla nro	002-	002-	002-	002-	002-	002-		
Paks µm	162,6	414,0	81,3	162,6	205,0	410,0		
Nro/kV	1	2	3	4	5	6		
1	9,40	18,25	8,25	25,66	20,90	53,85		
2	9,47	20,79	7,17	18,83	34,92	50,99		
3	10,64	22,91	8,47	25,25	30,29	52,85		
4	10,72	22,18	8,43	27,32	16,17	46,54		
5	10,36	23,73	6,22	24,81	32,11	59,95		
6	11,10	21,28	9,50	25,19	25,21	63,52		
7	10,19	22,59	7,35	25,69	30,36	58,90		
8	10,54	23,21	3,23 *	25,04	27,10	54,83		
9	10,34	23,07	6,92	28,72	17,04	58,20		
10	10,17	23,74	8,95	21,39	29,10	58,34		
11		23,75	7,80		31,31	64,29		
12		22,99	9,07		27,36	59,31		
13		16,82	8,61		27,36	60,88		
14		23,90	7,05		31,63	66,38		
15			7,19		30,34			
16			8,43		25,00			
17			7,56		21,83			
18			7,10		31,63			
19			6,77		25,78			
20			8,36		29,00			
x kv								
s								
MV/m								
s								

## Liite 8. Mittauspöytäkirja Hipotronics-laitteella RER PP kalvomittauksista

TOY  
KAAPELIPAPERI AC - DC-LÄPILYÖNTITESTI Hipotronics  
muovikalvo ~~(Alumiini)~~

Pvm	21.2.	21.2.					
Valm nro							
Rulla nro							
Paks $\mu\text{m}$	12,7 $\mu\text{m}$	12,7 $\mu\text{m}$					
Nro/kV 1	8,09	4,34					
2	8,29	4,29					
3	8,77	4,18					
4	8,53	4,26					
5	8,37	4,29					
6	8,01	4,11					
7	8,07	4,19					
8	8,49	4,20					
9	8,40	4,14					
10	8,21	4,21					
11	7,84	4,11					
12	8,19	4,26					
13	8,29	4,31					
14	8,17	4,32					
15	8,32	4,34					
16	7,44	4,17					
17	7,55	4,32					
18	8,41	4,34					
19	6,95	4,42					
20	8,28	4,30					
x kv							
s							
MV/m							
s							