



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

OTTO RANTANEN
LÄPILYÖNTITESTIJÄRJESTELMIEN KEHITTÄMINEN TERICHEM
TERVAKOSKI OY:SSÄ

Diplomityö

Tarkastajat: Tutkimuspäällikkö Kari
Lahti ja tutkijatohtori Ilkka Rytöluoto
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
28. helmikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

OTTO RANTANEN: Läpilyöntitestijärjestelmien kehittäminen Terichem Tervakoski Oy:ssä

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 91 sivua, 11 liitesivua

Heinäkuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähkövoimatekniikka

Tarkastajat: tutkimuspäällikkö Kari Lahti ja tutkijatohtori Ilkka Rytöluoto

Avainsanat: läpilyönti, suurjännitemittaus, testaustekniikka

Läpilyönti on oikosulku eristemateriaalissa, joka aiheutuu johtavan purkauskanavan muodostuttua eristeen halki jänniterasituksen aiheuttamien molekyyllitason ilmiöiden seurauksena. Materiaalien dielektriset ominaisuudet eristerakenteessa aiheutuvat pitkälti niissä esiintyvistä polarisaatiomekanismeista. Permittiiviteetti on suure, jolla kuvataan materiaalin kykyä heikentää ulkoista sähkökenttää ja se on tärkein tekijä jänniterasituksen jakautumisessa eristerakosten kesken ajan suhteen muuttuvalla jännitteellä. Vakiosuuruisella jännitteellä tähän vaikuttaa sen sijaan aineiden resistiivisyys. Läpilyönnin syntymiseen vaikuttavat monet muut tekijät, kuten materiaalien huokoisuus ja käytetyn jännitteen muoto, taajuus ja nousunopeus. Elektrodiin koko vaikuttaa mitattuun läpilyöntilujuuteen, koska mitä suurempi elektrodipinta-ala on, sitä todennäköisemmin näytteessä on vastaavalla alalla heikompia kohtia. Lisäksi läpilyönti on tilastollinen ilmiö, eli ideaalisessa tilanteessakin saman materiaalin läpilyöntijännitteessä on hajontaa.

Läpilyönnin tunnistus perustuu testipiiristä mitattujen jännitteen ja virran jatkuvan tilan arvojen muutoksiin ja havaittuihin transientteihin. Testausjärjestelmää suunniteltaessa on kolme keskeistä asiaa: mittaustarkkuudeltaan ja dynaamisilta ominaisuuksiltaan sopivan mittalaitteen ja mittapään valitseminen, oikeanmuotoisten elektrodien käyttäminen mahdollisimman homogeenisen sähkökentän aikaansaamiseksi ja testipiirin komponenttien yhdistäminen siten, että häiriöitä aiheuttavia hajaimpedansseja ja maasilmukoita ei muodostu. Lisäksi suurjännitetestauksessa on turvallisuus otettava huomioon tarkasti.

Terichem Tervakoski Oy:n kuivien papereiden AC-läpilyöntiin käytetty Helvar korvattiin uudella laitteella, koska siinä ei ollut standardien vaatimaa automaattista jännitteennostoa eikä läpilyöntijännitettä tallentavaa mekanismia. Laite korvattiin Chroma 19032-P laitteella, jossa on edellä mainitut ominaisuudet. Laitteiden pätevyyden toteamiseen käytettiin pääasiassa vertailua Tampereen teknillisen yliopiston suurjännitelaboratorion referenssijärjestelmään. Mittaustulosten vertailu toteutettiin Weibull-jakaumien varmuusmarginaalianalyysin avulla.

Öljyimpregnoitujen paperi- ja laminaattinäytteiden testaukseen käytettävää Ferranti-laitetta haluttiin parantaa siinä esiintyvien osittaispurkausten, elektrodien kulumisen ja jännitemittarin epävarmuuden takia. Laitteen toimintaa tutkittiin oskilloskooppimittausten avulla. Laitteeseen suunniteltiin ylivirtareleeseen ja suur-

jännitemuuntajan ensiöpuolen virranmittausmuuntajaan perustuva järjestelmä, joka katkaisee läpilyönnin seurauksena jännitteen suurjännitepuolelta. Laitteen jännitemittauksen muuttamista mittauskorttipohjaiseksi ja tietokoneelta operoitavaksi pohdittiin teoriatasolla, mutta toimenpiteisiin ei ryhdytty, koska nykyisen järjestelmän katsottiin toimivan käyttötarkoitukseensa riittävän hyvin. Laitteen hajoamisen varalta kartoitettiin mahdollisuuksia rakentaa tulevaisuudessa samaan käyttötarkoitukseen uusi laite modulaarisena järjestelmänä. Uuden järjestelmän tärkeimmät osat ovat tehoelektroniikkaan perustuva säädettävä jännitelähde sekä mittauskorttiin ja tietokonesovellukseen perustuva mittaus ja tulosten analysointi.

Elektrodien optimaalista muotoilua tutkittiin Comsol Multiphysics- simulointiohjelmalla. Päävaihtoehdot olivat tasopohjainen, ympyräpyörästetty ja Rogowski-elektrodi. Rogowski-elektrodin tapauksessa tutkittiin lisäksi karakteristisen etäisyyden ja pyöristyksen jyrkkyyden vaikutusta. Erot sähkökentän tihtymissä olivat pieniä tasopohjaista lukuun ottamatta, joka aiheutti huomattavan kentäntihentymän elektrodin reunan kohdalle näytteeseen. Parhaaksi elektrodimuodoksi todettiin Rogowski-muotoilu, jossa karakteristinen etäisyys a on vähintään $1,5$ kertaa elektrodivälin pituus ja muotoparametrin ψ arvo on noin $0,4\pi$.

Messinki- ja teräselektrodien pintoja kuvattiin optisella profilometrillä, ja tulosta käsiteltiin Gwyddion-ohjelmalla. Huomattiin, että läpilyöntijäljissä esiintyy selkeästi erilaisia tyyppejä, jotka eroavat syvyydeltään ja korkeusprofiililtaan. Matalat kuopat ovat enimmäkseen kraatterimaisia ja syvemmät jyrkkäreunaisempia. Erojen syynä pidettiin eroja jännitteiden suuruudessa ja eroja materiaalien välillä. Yleisenä trendinä havaittiin, että läpilyönnit olivat osuneet todennäköisemmin aiemman läpilyöntijäljen tai uran viereen. Matalimpien kuoppien ei todettu vaikuttavan merkittävästi läpilyöntijännitteen suuruuteen.

ABSTRACT

OTTO RANTANEN: Development of dielectric breakdown test systems at Terichem Tervakoski Ltd.

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 91 pages, 11 Appendix pages

August 2018

Master's Degree Programme in Electrical engineering

Major: Electrical power engineering

Examiners: Research Manager Kari Lahti and Postdoctoral Researcher Ilkka Rytöluoto

Keywords: Dielectric breakdown, high voltage measurement, testing technique

Dielectric breakdown is a short circuit in an insulating material. It occurs when a conducting channel emerges through the insulator because of nanomechanical phenomena caused by voltage stress. Dielectric characteristics of the materials in insulator structure are mostly caused by polarization mechanisms which occur in those materials. Permittivity is a quantity that describes how much the material weakens an external electric field. It is the most important factor to determine how the voltage stress is divided between insulator layers when time-variable voltage is used. Instead, with constant voltage, resistivity of the materials is a dominant factor that determines voltage division in such structures. Breakdown phenomenon is also affected by many other factors such as porosity of the material and frequency and increase rate of the applied voltage. The size of the electrodes has an impact on measured breakdown voltage. The bigger the area of the electrodes is, the more likely there are weak spots in respective area of the sample. In addition, the dielectric breakdown is a statistical phenomenon, which means that even in ideal situation there is always deviation in breakdown voltages of the same material.

Detecting of electrical breakdown in test circuits is based on steady state and transient values of voltage and current measured from the test circuit. When the test system is being designed, there are three main things to be considered. The measuring instrument including its probe must be suitable by its dynamic characteristics and measurement accuracy. The electrodes should be shaped correctly so that there is homogenous electric field between them. Thirdly, the components of the test circuit should be connected in a way that disturbances caused by grounding loops and parasitic impedances are at minimum. In addition, safety issues must be taken into account in high voltage testing.

At Terichem Tervakoski Ltd, a device named Helvar, used for AC-breakdown testing of dry papers was replaced by a new device because it had neither automatic voltage control system nor mechanism to save breakdown voltage values. The device was replaced by Chroma 19032-P, that has features mentioned before. In order to prove validity of the new system, reference measurements were made in the high voltage laboratory at Tampere University of Technology. Comparison of the measurement results was carried out with a confidence margin analysis of Weibull distribution by Matlab software.

A device named Ferranti, which is used to breakdown testing of oil impregnated paper and laminate samples, was intended to be improved because of problems occurred in it. The problems included excessive amount of partial discharges, wearing of electrodes and uncertain behavior in its voltage meter. The operation of the device was researched by oscilloscope measurements. An automatic system that drops voltage to zero after breakdown was designed. It is based on overcurrent relay and current measuring transformer placed on the primary side of the step-up transformer. Creating a new voltage measurement based on measuring card and computer software was considered, but it was not carried out in practice because the existing voltage meter is accurate enough for its purpose. However, for that situation the system gets irreparably broken, a rough design for a replacing system was made. The new system should be designed as a modular system. The most important parts of the new system would be power electronics based controllable voltage source and a metering and analysis of result data based on measuring card and computer software.

The optimal shaping of the electrodes was researched by a simulation software Comsol Multiphysics. Simulated bottom profile options of electrodes were unrounded, circularly rounded and Rogowski profiles with several parameter combinations. These parameters define characteristic distance and steepness of the curved profile. Differences in electric field deviation were small excluding unrounded electrode, which caused a significantly dense electric field in the sample next to the edges of the upper electrode. The best electrode shape was Rogowski electrode with characteristic distance of 1.5 - 2 times thickness of the sample and shape parameter value from 0.3π to 0.4π .

Electrodes made of brass and stainless steel were detected by an optical profilometer and result data was studied by Gwyddion software. It was noticed that the grooves caused by breakdown can be divided into several categories that differ by depth and altitude profile. Shallower pits have elevated area in the middle of them and are mostly circularly symmetrical. Deeper ones have steeper slopes and they lack symmetry. Differences can be explained by different voltage levels used and by material characteristics. A general trend was that breakdowns had hit more likely next to existing breakdown groove or unsmooth surfaces and channels caused by grinding of the electrodes. Shallow grooves were proved not having a significant impact on breakdown voltage.

ALKUSANAT

Tein diplomityöni Terichem Tervakoski Oy:lle Tampereen teknillisen yliopiston suurjännitelaboratorion avustuksella. Työn tekoaika paikan päällä oli elokuusta 2017 toukokuuhun 2018 painottuen vuoden 2018 puolelle. Viimeistelin työni kesän 2018 aikana.

Haluaisin kiittää kaikkia diplomityöni tekoprosessissa avustaneita henkilöitä. Terichem Tervakoski Oy:ssä ohjaajani toimineen Juha Laakon lisäksi laboratoriotyöntekijä Satu Harju on auttanut merkittävästi laboratoriotyöhön perehdyttämisessä ja mittauksien tekemisessä. Muut yrityksen työntekijät ovat olleet osaltaan luomassa viihtyisää työilmapiiriä.

Tampereen teknillisen yliopiston tutkijoista tarkastajien Kari Lahden ja Ilkka Rytöluodon lisäksi Mikael Ritamäki on ollut huomattavana apuna tutkimusprosessin aikana.

Tampereella, 18.7.2018

Otto Rantanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	LÄPILYÖNTI KIIINTEISSÄ ERISTEISSÄ	3
2.1	Kiinteä eristemateriaali sähkökentässä	3
2.2	Osittaispurkaukset	10
2.3	Läpilyönnin mekanismit	11
2.4	Läpilyöntilujuuteen vaikuttavat tekijät	13
2.5	Läpilyöntilujuuden tilastollinen analyysi.....	18
3.	LÄPILYÖNNIN TESTAUSTEKNIikka	21
3.1	Yleistä teoriaa testauksesta	21
3.2	Läpilyönnin sähkötekkinen mallintaminen ja havaitsemismekanismit	24
3.3	Elektrodijärjestelyt.....	29
3.4	Johtimet ja maadoitukset virhelähteinä.....	33
3.5	Mittausinstrumentit.....	35
3.6	Mittausten luotettavuus ja oikeellisuus.....	39
3.7	Turvallisuus.....	42
4.	HELVAR -LAITTEEN KORVAAMINEN	44
4.1	Laitteen toiminta.....	44
4.2	Laitteessa havaitut ongelmat	45
4.3	Helvariin liittyvä tutkimus	46
4.4	Chroma-laitteen tutkimus ja käyttöönottotestaus	53
5.	FERRANTI-LAITTEEN KEHITTÄMINEN.....	57
5.1	Laitteen toiminta.....	57
5.2	Kehittämiskohteet.....	59
5.3	Ferrantiin liittyvä tutkimus.....	60
5.4	Mahdollisuudet nykyisen laitteen kehittämiseksi.....	62
5.5	Suunnitelma Ferrantin korvaavalle laitteistolle.....	65
6.	ELEKTRODIEN OPTIMAALISEN MUODON TUTKIMINEN	68
6.1	Sähkökenttien simuloinnit eri elektrodimuodoilla	68
6.2	Elektrodien kulumisen tutkimus.....	77
7.	YHTEENVETO.....	86
	LÄHTEET	89
	LIITE A: TAULUKOITA TESTITULOksISTA.....	92
	LIITE B: PROFILOMETRIKUVIA ELEKTRODEISTA.....	99

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Alternative current, vaihtovirta
DC	Direct current, tasavirta
HV	High voltage, suurjännite
HVP	High voltage probe, suurjännitemittapää
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälisiä sähköstandardeja ylläpitävä järjestö
MIKES	Mittatekniikan keskus, mittanormaalien ylläpidosta ja kalibrointi-palveluista Suomessa vastaava organisaatio, nykyään VTT:n alaisuudessa
PD	Partial discharge, osittaispurkaus
PWM	Pulse width modulation, pulssinleveysmodulaatio
RMS	Root mean square, vaihtojännitteen tai -virran tehollisarvo
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
VSI	Vertical scanning interferometry, profilometrin kuvantamistekniikka
A	pinta-ala
a	elektrodin karakteristinen etäisyys Rogowski-yhtälöiden määrittelyssä, käytännössä Rogowski-tasopotentiaalikäyrän skaalausparametri
C	kapasitanssi
D	sähkövuon tiheys
E	sähkökenttä
E_P	polarisaation aiheuttama sähkökenttä
F	voima
$F(x)$	tilastollisen muuttujan x todennäköisyysfunktio
f	taajuus
I	sähkövirta
k	kattavuuskerroin
l	etäisyys (erityisesti elektrodivälin etäisyys eli lyhin läpilyönnin purkautumismatka)
P_d	dielektriset häviöt
p	paine
Q	sähkövaraus
R	resistanssi
R_e	näytteen kanssa sarjassa oleva virranrajoitusvastus, ”etuvastus”
R_m	vastus, jota käytetään virran mittaukseen oskilloskoopilla, ”mittausvastus”
r	ympyräpyörityksen pyörityssäde
u	mittausepävarmuus
V	jännite
V_{50}	jännite, jolla läpilyönnin todennäköisyys on 50 % eli keksimääräinen läpilyöntijännite
x	yleinen tilastollinen muuttuja
x_i	tilastollisen muuttujan i :s persentiili
α	Weibull-jakauman skaalausparametri
β	Weibull-jakauman muotoparametri

$\tan(\delta)$	dielektrinen häviökerroin
ε	permittiviteetti
ε_0	tyhjiön permittiviteetti
ε_r	suhteellinen permittiviteetti
ρ	resistiivisyys
Φ	Rogowski-tasopotentiaalikäyrän juokseva parametri
χ	suskeptibiliteetti
ψ	Rogowski-tasopotentiaalikäyrän muotoparametri

.

1. JOHDANTO

Eristerakenteet ovat tärkeitä komponentteja sähkötekniikassa, niin suuren teho- ja jänniteluokan sähkönsiirtojärjestelmissä kuin pienen kokoluokan elektroniikassakin. Eristerakenteiden tärkein ominaisuus on estää oikosulkujen syntyminen ei-haluttuihin paikkoihin, kuten jännitteisten osien ja maapotentiaalin sekä kosketusalttiiden osien välille. Eristeillä on kuitenkin rajansa, kuinka suurta jänniterasitusta ne kestävät ennen kuin tapahtuu läpilyönti, eli eriste menettää eristysominaisuutensa joko hetkellisesti tai pysyvästi. Kiinteillä materiaaleilla läpilyönti vaurioittaa eristysrakenteen dielektrisiä ominaisuuksia pysyvästi.

Eristerakenteiden läpilyöntilujuuksia on tutkittu siitä asti, kun sähkövoimajärjestelmät tulivat yleiseen käyttöön 1900-luvun alussa. Vaikka läpilyönti-ilmiötä ja eristeiden testausmenetelmiä on tutkittu pitkään ja alalla on tapahtunut huomattavaa kehitystä, tieteenalalla on edelleen huomattavia haasteita. Keskeisenä syynä on läpilyönnin tilastollinen luonne, jonka takia läpilyöntilujuuksia ei voida kuvata materiaalikohtaisina vakioarvoina, vaan ne on aina ilmoitettava jakaumien avulla. Tämän takia läpilyöntitutkimus on edelleenkin 2000-luvulla lähes yksinomaan kokeellista, koska yleispäteviä määrittäviä malleja läpilyönnille on ollut hyvin haastavaa luoda. Toiseksi läpilyöntiprosessiin vaikuttavat ympäristön olosuhteet, joten eristeiden läpilyöntilujuus normaaleissa laboratorio-olosuhteissa ei välttämättä anna oikeaa kuvaa sen kestävydestä todellisessa käytössä, vaan on sovellettava erilaisia korjauskerroinapproksimaatioita. Testauspiirejä suunniteltaessa on oltava tarkkana, ettei testipiiriin synny tulosta vääristäviä häiriösignaaleja, tai testipiirin komponenttien asettelusta johtuvaa vääristymää tuloksiin.

Terichem Tervakoski Oy:n läpilyöntitestaus keskittyy suurjännitekondensaattoreissa käytettävän polypropeenikalvon, sähköeristepaperin ja polypropeenilaminaatin testaamiseen. Yritys valmistaa itse polypropeenilaminaattia, ja paperit tuotetaan Tervakosken paperitehtaalla, joka on nykyään osa Delfort Group –yrityskonsernia. Laminaatin keskeisin käyttökohde on suurjännitteiset AC-kaapelien ja massaimpregnoitujen DC-kaapeleiden eristykset. Muodostamalla eristemateriaaleista kerrosmaisista rakenteista voidaan saavuttaa yli 400 kV läpilyöntilujuuksia. Tervakoski Oy:n tuottamaa sähköeristyspapereita käytetään muuntajissa ja pienemmän jännitetasoisen kaapelieristyksissä. Eristeiden testauksessa merkittävämpää on läpilyöntilujuuden keskiarvon sijaan jännitelujuuden arvo, jonka materiaali kestää suurella todennäköisyydellä. Yleisimmin tutkitut todennäköisyydet ovat 90 % tai 95 %. Tämän takia läpilyöntitestisarjojen hajonnan tutkiminen on tärkeää keskiarvon lisäksi.

Tässä työssä käsitellään aluksi luvussa 2 kiinteän eristemateriaalin käyttäytymistä sähkökentässä, ja esitellään polarisaatiomekanismeja, jotka ovat materiaalien dielektristen ominaisuuksien taustalla. Jonkin verran käydään läpi syvällisempiä teorioita, jotka liittyvät avaruusvarauksiin. Osittaispurkausten ja läpilyönnin keskeisimmät mekanismit esitellään lyhyesti. Tämän jälkeen eritellään läpilyöntiin vaikuttavia tekijöitä kategorioittain ja esitetään perusteet läpilyöntilujuuksien tilastollisesta mallintamisesta.

Luku 3 käsittelee läpilyönnin testaustekniikkaa ja testauspiirin komponenttien vaikutusta testituloksiin ja oikeanlaisten komponenttien valitsemista häiriöiden minimoimiseksi. Erityisen suuri painoarvo luvussa on elektrodien muotoilulla ja materiaalivalinnoilla, ja tässä yhteydessä esitellään Rogowskin elektrodimallinnukseen liittyvä teoria. Luvussa käsitellään myös mittausrvirheen ja -epävarmuuden laskemista matemaattiselta kannalta sekä turvallisuuden huomioimista läpilyöntitestauksessa.

Luvut 4 ja 5 liittyvät Terichem Tervakoski Oy:ssä suoritettaviin projekteihin, joista toinen koskee kuivaläpilyöntitestauslaitteen korvaamista uudella, standardit täyttävällä laitteella ja toinen impregnoitujen paperi- ja laminaattinäytteiden testaukseen tarkoitetun laitteen toiminnan kehittämistä ja suunnitelmaa koko laitteiston uusimisesta sen hajoamisen varalta. Projektit toteutettiin osittain päällekkäin elokuun 2017 ja toukokuun 2018 välisenä aikana.

Helvar-nimisen kuivaläpilyöntitestauslaitteen korvaamisprojektissa keskeisiä aiheita on vertailumittausten tekeminen ja erojen merkittävyyden toteaminen tilastollisen analyysin avulla, mittalaitteiden kalibrointiprosessin läpikäynti ja skaalauskerroimen ominaisuuksien tutkiminen. Weibull-jakaumaan perustuvan varmuusmarginaalianalyysin käyttö ja tyhjäkäyntimittaukset olivat pääasiallisia tutkimusprosessissa käytettyjä menetelmiä.

Toisessa, Ferranti-nimisen läpilyöntitestilaitteen toiminnan parantamiseen tähtäävässä projektissa pohditaan, mitä parannuksia nykyiseen laitteeseen olisi mahdollista tehdä. Lisäksi kartoitetaan laitteen korvaavan uuden modulaarisen laitteiston komponenttivalintoja.

Työn viimeisenä osana on elektrodimateriaalien ja elektrodien muotoiluvaihtoehtojen vertailu, joka toteutetaan pitkälti tietokonesimulaatioiden avulla. Simuloinnit keskittyvät pitkälti ilmassa tehtäviin läpilyöntitesteihin, mutta myös eristeöljyyn upotettujen näytteiden läpilyöntitestaukseen tutkitaan lyhyesti. Lisäksi tutkitaan eri materiaaleista tehtyjen elektrodien kulumista läpilyönneissä profilometrimittausten pohjalta tehtävän analyysin avulla.

2. LÄPILYÖNTI KIIINTEISSÄ ERISTEISSÄ

Tässä työssä tehtävä tutkimus liittyy kiinteiden eristeiden läpilyöntilujuuden mittaamiseen, joten rajoitutaan esittelemään läpilyönnin teoriaa niiden osalta. Aluksi käsitellään yleisesti kiinteän eristeen käyttäytymistä sähkökentässä, koska siihen liittyvät mallit ovat välttämättömiä pohjatietoja läpilyönti-ilmiön ymmärtämiselle.

2.1 Kiinteä eristemateriaali sähkökentässä

Ideaalinen eriste on materiaali, jonka resistiivisyys on ääretön, eli joka ei johda lainkaan sähkövirtaa. Ollessaan ulkoisessa sähkökentässä eristeen sisällä oleva sähkökenttä on heikompi kuin ulkoinen sähkökenttä, mutta ei kuitenkaan nolla kuten johteilla. Eristeitä kutsutaan yleisesti dielektriseksi materiaaleiksi. Eristerakenne on useasta eristemateriaalista koostuva kokonaisuus. On tärkeä erottaa yksittäisen eristemateriaalin ja kokonaisen eristerakenteen käyttäytyminen sähkökentässä. Eristemateriaalit ovat osana joko sisäistä tai ulkoista eristystä. Sisäinen eristys on varsinainen eristysrakenne, joka on suojattu ympäristön vaikutuksilta [1]. Tällaisia ovat esimerkiksi muuntajaöljyt ja kaapeleiden eristykset. Ulkoisella eristyksellä tarkoitetaan luonnollista ympäristön eristystä, joka on yleensä ilmaa. Ulkoista eristystä tutkitaan esimerkiksi sähkölinjojen ja ulkomuuntamoiden tapauksissa, kun jännitteiset osat ovat ainoastaan ympäröivän ilman eristämiä. Ulkoisen eristyksen merkitys on kuitenkin otettava huomioon myös varsinaisissa eristysrakenteissa, jotka ovat kosketuksissa ilman kanssa.

Todelliset eristeet eivät ole ideaalisia, eli ne päästävät lävitsensä pienen vuotovirran. Eriste käyttäytyy hyvin eri tavalla vakiosuuruudessa ja ajan suhteen muuttuvassa sähkökentässä. Tasasähkökentässä eriste käyttäytyy vuotovirran takia suuri-impedanssisena vastuksena. Muuttuvassa sähkökentässä, joka esiintyy vaihtojännitteellä ja transienttien yhteydessä, sähköenergiaa varautuu eristeen sähkökenttään hetkellisen jännitteen kasvessa ja energia purkautuu jännitteen laskiessa, jolloin eriste voidaan mallintaa kondensaattorina.

Sähkökentän voimakkuus E määritellään voiman F derivaattana sähkövarauksen Q suhteen

$$E = \frac{dF}{dQ} \quad (2.1)$$

Se voidaan tulkita voimana, jonka sähkökenttä tietyssä pisteessä kohdistaa yksikkövaraukseen. Sähkökenttä voidaan määritellä myös sähköisen potentiaalin derivaattana etäisyyden suhteen.

$$\mathbf{E} = \frac{d\mathbf{V}}{dl} \quad (2.2)$$

Sähkökenttä on homogeeninen, jos se on tarkastellun alueen jokaisessa pisteessä itseisarvoltaan yhtä suuri ja samansuuntainen. Homogeenisen sähkökentän tapauksessa kaava (2.2) muuttuu muotoon

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta l} \quad (2.3)$$

Tämän kaavan avulla voidaan määrittää vain sähkökentän itseisarvo, minkä vuoksi vektoritunnukset on jätetty pois. Sähkökentän voimakkuuden tätä muotoa kutsutaan myös jänniterasitukseksi. Tämä muoto on erityisen kätevä materiaalin läpilyöntilujuuden määrittämisessä. Sen käytön oletuksena kuitenkin on, että sähkökenttä on homogeeninen.

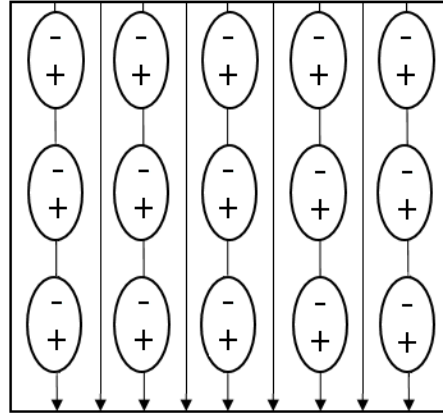
Sähkökentän aiheuttajina pidetään positiivisia ja negatiivisia sähkövarauksia. Positiiviset varaukset ovat sähkökentän lähteitä ja negatiiviset varaukset nieluja. Sähkökentän mallinnuksessa käytetään apusuuretta sähkövuo Φ , joka kuvaa tietyn pinnan lävistävien positiivisista varauksista lähtevien ja negatiivisiin varauksiin loppuvien kenttäviivojen kokonaismäärää. Gaussin lain mukaan tyhjiössä sähkövuon suuruus suljetun pinnan läpi on yhtä suuri kuin sähkökentän ja sen normaalivektorin pintaintegraali. Sähkövuo on myös yhtä suuri kuin pinnan rajaaman avaruuden osan sisältämä kokonaisvaraus jaettuna vakiolla ϵ_0 jota kutsutaan tyhjiön permittiviteetiksi. Asettamalla nämä määritelmät yhtä suuriksi saadaan yhtälö [2]

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} da = \frac{Q}{\epsilon_0}, \quad (2.4)$$

jota kutsutaan Gaussin lain integraalimuodoksi. Vakion ϵ_0 arvo on likimain $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$.

Eristeen polarisaatio on merkittävä ilmiö sähkökentän voimakkuuden kannalta, sillä se muuttaa eristeen kokonaisvarausta. Normaalisti eristeiden uloin elektronikuori on täysi, eikä vapaita varauksenkuljettajia pysty irtoamaan. Kun eriste tuodaan sähkökenttään, atomin tai molekyylin varaukselliset osaset siirtyvät sähköisen voiman takia jonkin verran. Polarisaatiotyypit ovat elektroni-, dipoli-, ioni- ja avaruusvarauspolarisaatio. Elektronipolarisaatiossa atomin elektroniverho siirtyy, dipolipolarisaatiossa pysyvän dipolimomentin omaavat molekyylit kääntyvät sähkökentän mukaisesti, ionipolarisaatiossa varaukselliset ionit siirtyvät kidehilassa ja avaruusvarauspolarisaatiossa varauksenkuljettajat kulkeutuvat ja kertyvät hitaasti materiaalin sisäisille rajapinnoille, joissa permittiivisyys tai johtavuus muuttuu. Kovalenttisia sidoksia sisältävillä yhdisteillä esiintyy ionipolarisaatiolle analoginen, mutta heikompi atomipolarisaatio. Vaikuttavan jännitteen taajuus vaikuttaa siihen mitkä polarisaatiomekanismit ovat voimakkaimpia. Kullakin polarisaatiomekanismilla on ominaistaajuus, jota pienemmillä taajuuksilla ne vaikuttavat. [3]

Verkkotaajuisella 50 Hz jännitteellä merkittävin polarisaatiotyyppi on dipoli- eli orientaatiopolarisaatio. Sitä esiintyy molekyyleillä, joiden atomien elektronegatiivisuus eroaa huomattavasti ja molekyylin epäsymmetrian takia atomien osittaisvaraukset eivät kumoa toisiaan. Tällaisia molekyylejä kutsutaan dipoleiksi. Dipolit kääntyvät ulkoiseen sähkökenttään joutuessaan siten, että niiden elektronegatiivisempi atomi tai atomit osoittavat sähkökentän positiivista päätä kohti. Dipolit ovat yleisiä orgaanisilla materiaaleilla [4].



Kuva 1. Dipolit sähkökentässä

Elektronipolarisaatiota tapahtuu kaikilla materiaaleilla, ja sen taajuusalue on kaikkein laajin, mutta sen vaikutus on suhteellisen heikko ja merkittävimmillään se on hyvin korkeilla taajuuksilla, joilla muut mekanismit eivät vaikuta [3]. Ionipolarisaatio on suhteellisen voimakas, mutta sitä esiintyy ainoastaan ionisilla yhdisteillä. Avaruusvarauspolarisaatio on merkittävää heterogeenisten, useista eri materiaaleja sisältävistä kerroksista koostuvien eristeiden tapauksessa [4].

Polarisaation aiheuttamien varausten siirtymien vaikutukset kumoavat toisensa eristeen keskellä, mutta eristeen reunoille jää nettovarausta. Negatiivinen sähkövaraus positiivisen elektrodin pinnalla toimii sähkökentän nieluna, joten eristeeseen etenevä sähkökenttä on pienempi kuin ulkoinen sähkökenttä. Positiivinen nettovaraus negatiivisen elektrodin pinnassa toimii sähkövuon lähteenä, jolloin sähkökenttä jatkuu eristeen jälkeen yhtä suurena kuin ennen eristeeseen tunkeutumista, koska positiivinen ja negatiivinen nettovaraus ovat yhtä suuria. Toisen tulkinnan mukaan polarisoituneet hiukkaset muodostavat sähkökentän, jonka suunta on vastakkainen ulkoiselle sähkökentälle, ja siten heikentää sitä [5]. Gaussin laki polarisoituneelle sähkökentälle saa muodon

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} da = \frac{Q + Q_P}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

Dielektrinen aine siis heikentää aina ulkoista sähkökenttää. Tällöin varaukset mallinnetaan negatiivisena Gaussin laissa, joka polarisaation luomalle sähkökentälle on

$$\frac{Q_P}{\epsilon_0} = - \oint_S \mathbf{E}_P \cdot \mathbf{n} da \quad (2.6)$$

Kun tämä sijoitetaan kaavaan 2.5, sähkökenttää sisältävät termit siirretään vasemmalle puolelle ja yhtälö kerrotaan puolittain vakiolla ϵ_0 saadaan kaava

$$\oint_S \epsilon_0 (\mathbf{E} + \mathbf{E}_P) \cdot \mathbf{n} da = Q \quad (2.7)$$

Lauseke $\epsilon_0(\mathbf{E} + \mathbf{E}_P)$ voidaan merkitä suureella \mathbf{D} , jota kutsutaan sähkövuon tiheydeksi. Se on luonteeltaan makroskooppinen kenttävektori. Sähkövuon tiheyden yksikkö on sähkövaraus pinta-alaa kohti eli C/m^2 . Käyttämällä \mathbf{D} :tä saadaan ns. Gaussin laki dielektriselle aineelle:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dA = Q \quad (2.8)$$

Sähkövuon tiheyden ja sähkökentän voimakkuuden välillä on siis riippuvuus

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 (\mathbf{E} + \mathbf{E}_P) \quad (2.9)$$

Määritellään suure sähköinen susceptibiliteetti χ yhtälön

$$\epsilon_0 \mathbf{E}_P = \chi \mathbf{E} \quad (2.10)$$

mukaan. Susceptibiliteetti kuvaa materiaalin polarisoitumisen suuruutta ja sillä on sama yksikkö kuin ϵ_0 :lla. Kaava 2.9 ilmaistuna susceptibiliteetin avulla on

$$\mathbf{D} = (\epsilon_0 + \chi) \mathbf{E} \quad (2.11)$$

Lauseke $\epsilon_0 + \chi$ voidaan ilmaista yhdellä vakiolla ϵ , joka on materiaalin permittiviteetti. Tällöin sähkövuon tiheyden ja sähkökentän voimakkuuden välille saadaan yksinkertainen riippuvuus

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.12)$$

Kaava pätee ainoastaan homogeeniselle ja isotrooppiselle sähkökentälle. Sähkökenttä on isotrooppinen, jos sen vuoviivat ovat yhdensuuntaisia kenttäviivojen kanssa [6].

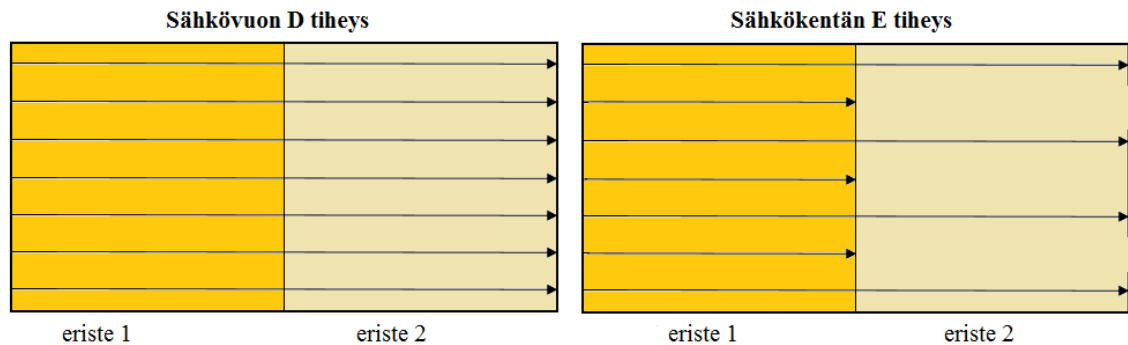
Susceptibiliteetin sijaan usein on kätevämpi käyttää materiaaliakohtaisena suureena suhteellista permittiviteettiä ϵ_r , joka on kokonaispermittiviteetti jaettuna tyhjiön permittiviteetillä.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.13)$$

Suhteellinen permittiviteetti on aina suurempi kuin 1 eli mikä tahansa väliaine heikentää tietyn suuruisen vuon aiheuttamaa sähkökenttää tyhjiöön verrattuna. Kaasujen permittiviteetti on kuitenkin hyvin lähellä lukua 1, koska molekyylit ovat niissä harvassa ja ovat yleensä symmetrisiä. Kiinteillä tai nestemäisillä materiaaleilla, joilla ei esiinny juuriakaan dipolipolarisaatiota, permittiviteetti on noin 2. Tällaisia materiaaleja ovat esimer-

kiksi mineraaliöljyt sekä useimmat synteettiset muovimateriaalit. Jos dipolipolarisaatio esiintyy, mikä on tyypillistä suurimolekyylisillä orgaanisilla aineilla, permittiviteetti voi olla yli 10. Poikkeuksellisen suuri permittiviteetti on vedellä ja glyserolilla (verkko-
taajuudella 50 Hz $\epsilon_r(H_2O) \approx 80$ ja $\epsilon_r(C_3H_8O_3) \approx 40$. [5]

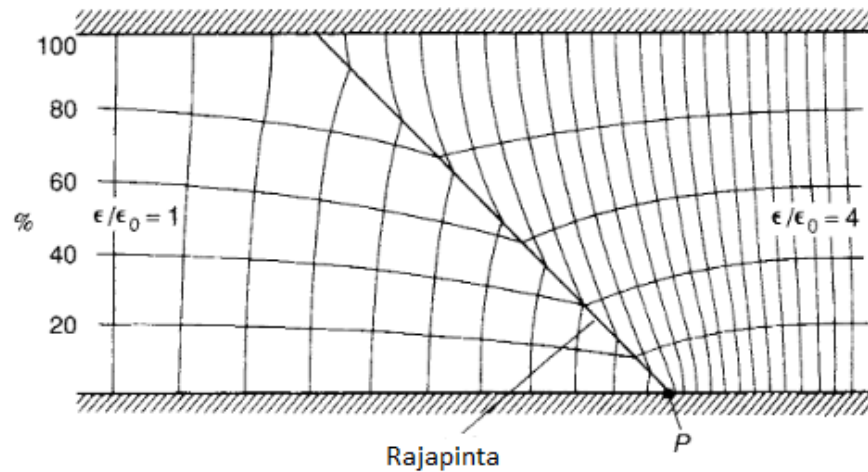
Eristerakenteessa, jossa materiaalit ovat sähkövuon suhteen sarjassa, rakenteen läpi kulkeva sähkövuon tiheys pysyy samana, mutta sähkökentän voimakkuus muuttuu siten, että se on suurempi pienemmän permittiviteetin omaavassa aineessa. Siten jänniterasitus ja läpilyönnin riski ovat suurempia materiaalissa, jonka suhteellinen permittiviteetti on pienempi. Yleisesti kaasujen permittiviteetti on pienempi kuin kiinteiden aineiden tai nesteiden. [2, 4]



Kuva 2. Sähkövuo ja sähkökenttä kahden eristemateriaalin sarjaankytkennässä, kun $\epsilon_{r2} = 2\epsilon_{r1}$

Permittiviteetti vaikuttaa sähkövuon suunnan muutokseen eri permittiviteetin omaavien materiaalien rajapinnoilla. Tätä kutsutaan sähkökentän taipumiseksi ja se on analoginen valon taittumiselle optiselta tiheydeltään erilaisten materiaalien rajapinnoilla. Siirryessään suuremman permittiviteetin omaavaan aineeseen ei-kohtisuorassa rajapintaan nähden, vuovektori taipuu poispäin rajapinnan normaalista. Tulo- ja lähtökulmien rajapinnan normaaliin nähden tangenttien suhde on ideaalisessa tapauksessa permittiviteettien suhde tai sähkökenttien suhteen käänteisluku [6]. Sähkövuon taipumista havainnollistetaan kuvassa 3.

Todellisissa eristeissä on jonkin verran johtavuutta, jolloin varauksia siirtyy eristeiden rajapinnoille, ja taipumisen suuruus poikkeaa hieman ideaalisesta tapauksesta. Käytännössä tällä ei ole kuitenkaan merkitystä vaihto- ja impulssijännitteillä. Sähkövuon taipumisen merkittävin seuraus on sähkökentän tihentymien syntyminen elektrodien, tutkittavan eristenäytteen ja ilmapälin rajapinnoilla. [4]



Kuva 3. Sähkökentän taipuminen eristeiden rajapinnassa lähteen [6] mukaan

Molekyylien liikkeessa syntyy kitkaa, joka lämmittää eristettä ja aiheuttaa tehohäviöitä, ns. dielektrisiä häviöitä P_D . Dielektriset häviöt ovat suoraan verrannollisia suhteelliseen permittiviteettiin ja suurin piirtein verrannollisia sähkökentän voimakkuuden neliöön [4]. Todellisilla eristeillä esiintyvä johtavuus on toinen tehohäviöitä aiheuttava tekijä. Johtavuus ja siitä aiheutuvat häviöt kasvavat lämpötilan kasvaessa. Permittiviteetti voidaan ajatella kompleksisena eli koostuvan kapasitiivisesta ja resistiivisesta komponentista [5, 7]. Resisttiivisen komponentin suhdetta kapasitiiviseen komponenttiin kutsutaan materiaalin häviökertoimeksi $\tan(\delta)$ [7]. Häviökerroin yksi tapa kuvata eristeen epäideaalisuutta. Useimmissa eristeissä permittiviteetin resistiivinen osuus on huomattavasti kapasitiivista pienempi [4].

Tasasähkökentässä eriste käyttäytyy eri tavoin kuin vaihtosähkökentässä. Koska sähkökentän polariteetti säilyy samansuuntaisena eristeen ollessa sähkökentässä, varautuneet hiukkaset eivät liiku jaksottaisesti edestakaisin polariteetin vaihtumisen mukaan. Materiaali polarisoituu, kun tasajännite kytketään päälle, jolloin transienttitilanteessa se käyttäytyy muuttuvan jännitteen tavoin, ja permittiviteetti on määräävä tekijä jännitteiden jakautumisessa. Transientti voi olla värähtelevä jolloin hetkellisesti tapahtuu myös polariteetin muutosta. Kun sähkökenttä muuttuu vakiosuuruiseksi ja -suuntaiseksi, molekyylit eivät enää liiku polarisaation vaikutuksesta, jolloin materiaalien polarisaatioeroista aiheutuvilla permittiviteeteillä ei ole enää vaikutusta eristeen läpilyöntilujuuteen. Tällöin eristeessä olevat varauksenkuljettajat siirtyvät sähköisen voiman takia eristeen dielektrisille rajapinnoille muodostaen avaruusvarausta. Alussa tämä varausvirta on voimakkaampi mutta pienenee kaikkien vapaiden varauksenkuljettajien saavutettua rajapinnan eristeen läpi kulkevaksi pysyvän tilan vuotovirraksi. Todellisuudessa kaikkien varauksenkuljettajien kulkeutuminen eristeen reunalle on hidasta ja voi kestää useita vuorokausia, mutta on loppua kohden niin voimakkaasti hidastuvaa, että useimmissa testitilanteissa on hyväksyttävää olettaa varausvirran täysin saturoituneen, jolloin pysyvän tilan vuotovirta olisi vakio ja yhtä suuri eristerakenteen sarjaankytketyissä kerrok-

sisä. Siinä tapauksessa jänniterasituksen jakautuminen useasta sarjaankytketystä eristeestä koostuvassa eristerakenteessa voidaan määritellä tasajännitteellä Kirchhoffin virtalain mukaan seuraavasti.

$$I_0 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{V_2}{R_2} \quad (2.14)$$

Tästä saadaan jännitteiden suhteelle

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.15)$$

Koska sähkökentän voimakkuus on kaavan (2.3) mukaan jännitteen muutos jaettuna etäisyyden muutoksella, ja resistanssi on riippuvainen resistiivisyydestä kaavan

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.16)$$

mukaan, jossa ρ tarkoittaa materiaalin resistiivisyyttä, l eristekerroksen paksuutta ja A eristeen pinta-alaa. Jakamalla yhtälö 2.15 etäisyydellä termeittäin hyödyntäen kaavaa 2.3 saadaan

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\rho_1/A_1}{\rho_2/A_2} \quad (2.17)$$

Koska eristerakenteen poikkipinta-ala on useimmiten sama eri eristekerroksissa, sähkökentän voimakkuus on tasajännitteellä suoraan verrannollinen aineiden resistiivisyyteen. Resisttiivisyyksien ero voi olla eri materiaaleilla useita dekaadeja, ja ero voi olla hyvin erilainen kuin samojen materiaalien permittiviteeteilla. Esimerkkinä tästä on öljyimpregnoidut eristysrakenteet, jotka tasoittavat jänniterasitusta vaihtojännitteellä halutusti, mutta tasajännitteellä lähes koko jännite jakautuu paperiin sen öljyyn verrattuna suuren resistiivisyyden takia eikä impregnoinnista ole apua [4]. Sähkökentän taipumista tapahtuu myös tasajännitteellä, jolloin tulo- ja lähtökulmien tangenttien suhde on yhtä suuri kuin resistiivisyyksien suhde [5].

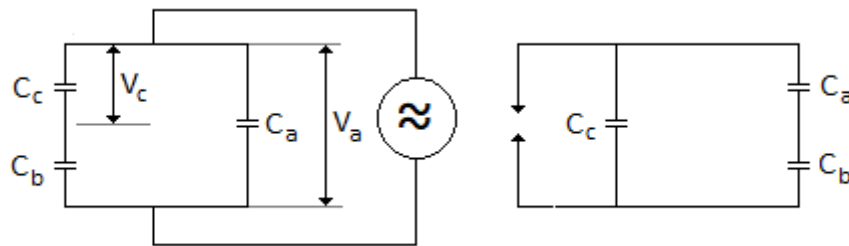
Varattuja hiukkasia voi injektoida elektrodimateriaalista eristeeseen ja jäädä jumiin sen kiderakenteeseen muodostaen avaruusvarausta. Yleensä tällainen avaruusvaraus muodostuu näytteen ja elektrodin rajapintojen läheisyyteen, mutta sitä voi muodostua myös muualle eristeeseen. Avaruusvarauksen määrä kasvaa ajan kuluessa, kun eristenäyte on sähkökentässä. Tasajännitteellä varauksenkuljettajien injektoituminen ja avaruusvarauksen kasaantuminen ovat keskeinen osa läpilyöntiprosessia. Avaruusvarauksen kasaantumisessa sähkökenttäjakauma vääristyy siten, että se voimistuu näytteen keskellä ja heikenee reunoilla. Lopulta läpilyönti tapahtuu näytteen keskellä kriittisen sähkökentänvoimakkuuden ylittyessä. Edellä mainittu prosessi pätee kuitenkin vain homovarauksen tapauksessa. Perinteisesti on uskottu, ettei avaruusvarausta synny AC:llä polarisaatioltaan muuttuvan kentän vuoksi, mutta uudemmissa tutkimuksissa sitä on havaittu esiintyvän

myös AC:llä aivan rajapintojen läheisyydessä. Taajuuden kasvun on havaittu lisäävän avaruusvarausjakauman tiheyttä. Avaruusvarauksen merkitys AC-läpilyönnissä on kuitenkin edelleen epäselvä. [8]

2.2 Osittaispurkaukset

Osittaispurkaus (*partial discharge*, PD) on yleisnimitys eristeessä tapahtuville paikallisille sähköpurkauksille jotka oikosulkevat vain osan elektrodivälistä [1]. Osittaispurkaus tapahtuu, kun sähkökentän voimakkuus ylittää tietyn eristerakenteen osan läpilyöntilujuuden. Oikosulkeutuva elektrodivälin osa on siten materiaalia, jonka permittiviteetti on muuta elektrodiväliä pienempi [4]. Osittaispurkaus aiheutuu myös silloin, jos sähkökenttä eristeessä on niin epähomogeeninen, että läpilyöntilujuus ylittyy paikallisesti jossain eristeen kohdassa. Osittaispurkaukset ovat keskeisessä osassa useimmissa läpilyöntimekanismeissa, joten niitä käsitellään ennen varsinaisia läpilyöntimekanismeja. Ne jaetaan kolmeen eri tyyppiin: sisäisiin eli ontelopurkauksiin, pintapurkauksiin, sekä koronapurkauksiin, jotka muista poiketen tapahtuvat johtimen pinnalla [4].

Sisäiset purkaukset voidaan mallintaa kolmikapasitanssimallilla, jossa ontelon kapasitanssi C_c on sarjassa ontelon kohdalla olevan muun eristeen kapasitanssin C_b kanssa, ja nämä ovat yhdessä rinnan normaalin eristeen kapasitanssin C_a (ei onteloa) kanssa. Malli voidaan kääntää myös ontelosta katsotuksi ekvivalentiksi, jossa C_a ja C_b ovat keskenään sarjassa ja rinnan ontelon kapasitanssin kanssa.



Kuva 4. Kolmikapasitanssimalli (vasemmalla) ja sen ekvivalentti ontelosta katsottuna (oikealla) lähteen [4] perusteella

Kun sähköpurkaus tapahtuu ontelossa ilman kynnysjännitteen ylityttyä, se näkyy nopeana kondensaattorin C_b jännitteen muutoksena. Ulkoinen jännitelähde yrittää kompensoida jännitteen laskua ja puuttuvaa varausta, jolloin eristysrakenteeseen siirtyy huomattava virtapulssi, joka aiheuttaa rakenteen lämpenemistä ja aiheuttaa mahdollisesti kemiallisia reaktioita, mikä edesauttaa läpilyönnin syntymistä. Osittaispurkauksen loputtua ontelon jännite jää sammumisjännitteen suuruiseksi ja sen kanssa sarjassa olevan C_b :n jännitteeksi tulee ontelon syttymisjännitteen ja alkuperäisen jännitteen summa. Osittaispurkauksia esiintyy todennäköisemmin jännitteen muutosnopeuden ollessa suuri. Täten sinimuotoisella jännitteellä ne useimmin sijoittuvat jännitteen nouseville reu-

noille, jolloin niiden esiintymistiheys on suurempi kahdesti vaihtojännitejakson aikana. Yksittäisellä nousevalla reunalla voi tapahtua useita osittaispurkauksia. Niitä voi myös tapahtua muissa aaltomuodon kohdissa, jos kriittinen kentäntiheys ylittyy paikallisesti. [4]

Liukupurkaus on osittaispurkaus, joka tapahtuu voimakkaassa eristeen suuntaisessa kentässä. Käytännössä tämä tarkoittaa kiinteän eristeen ja ilman tai nesteen rajapintaa, jossa sähkökenttä taipuu ja sillä on eristeen suuntainen komponentti. Liukupurkaus voidaan mallintaa samoin kuin ontelopurkaus, mutta ontelon kapasitanssi korvataan kentän suuntaisen ilma- tai nestevälin kapasitanssilla. Liukupurkauksissa virtapulssi siirtyy eristeiden rajapintaa pitkin muuttaen sähkökentän jakaumaa. Ne johtavat useimmiten ylilyöntiin eli sähköpurkaukseen eristettä ympäröivän ilman läpi. Lisäksi ne vaurioittavat kiinteän eristeen pintaa ja voivat myös aiheuttaa radiohäiriöitä. [4]

2.3 Läpilyönnin mekanismit

Läpilyönti (*dielectric breakdown*) on tilanne, jossa eristemateriaali oikosulkeutuu jänniterasituksen, mekaanisen tai termisen rasituksen seurauksena. Kiinteillä materiaaleilla läpilyönnissä syntyneet palamistuotteet aiheuttavat johtavan purkauskanavan. Jos johtava kanava ulottuu eristeen halki, läpilyönnin aiheuttama oikosulku on pysyvä. Muussa tapauksessa materiaalin eristeominaisuudet palautuvat osittain, ja eristeen yli oleva jännösjännite riippuu purkauskanavan laajuudesta ja johtavuudesta. Kiinteät eristeet ovat siten palautumattomia eristeitä. Useimmilla kaasuilla ja nesteillä eristeominaisuudet säilyvät muuttumattomina läpilyönnin jälkeen, eli ne ovat palautuvia eristeitä. Materiaalin läpilyöntilujuudeksi kutsutaan jänniterasituksen arvoa, jolla läpilyönti keskimäärin tapahtuu kyseisellä materiaalilla.

Perustavanlaatuisin läpilyöntimekanismi on sisäinen sähköläpilyönti (*intrinsic breakdown*). Siinä jännitteen kasvaessa riittävän suureksi koko eristeen kiderakenne luhistuu ja aine muuttuu johtavaksi. Tämä tapahtuu, vaikka materiaali olisi ideaalisen homogeeninen. Läpilyöntiin tarvittava jänniterasitus on riippuvainen materiaalin kiderakenteesta ja lämpötilasta. Sisäisen sähköläpilyönnin syynä on joko elektronien sähkökentältä absorboima energia, joka siirtyy kiderakenteeseen, sysäysionisaation aiheuttama elektronivyöry tai näiden yhdistelmä [4]. Sisäinen sähköläpilyönti on hyvin harvinainen, koska se vaatii materiaalista riippuen kertaluokkaa $10^8 - 10^9$ V/m olevan jänniterasituksen [9]. Normaalitilanteessa läpilyönti tapahtuu materiaalin epäideaalisuudesta johtuen muilla mekanismeilla huomattavasti pienemmillä sähkökentän voimakkuuksilla [4, 9]. Sisäinen sähköläpilyönti voidaan toteuttaa vain hyvin tarkkoissa laboratorio-olosuhteissa ja hankalan testijärjestelyn ja siitä johtuvan vähäisen tutkimuksen takia sen perimmäinen syy on edelleenkin epäselvä [4].

Normaali sähköläpilyönti on monivaiheinen ilmiö, johon vaikuttaa useat eri fysikaaliset ja sähkökemialliset mekanismit. Läpilyönti alkaa yleensä eristeen tai elektrodipinnan

epähomogeenisesta kohdasta, jossa sähkökenttään syntyy tihentymä sen taipumisen takia. Tämä ylittää paikallisesti kriittisen kentänvoimakkuuden ja aiheutuu sähköpurkauksia. Purkaukset aiheuttavat eroosiota eristeeseen ja synnyttävät siihen sähköisesti johtavan kanavan. Kanava etenee eristeessä ja läpilyönti tapahtuu sen saavuttaessa eristeen ja vastakkaisen elektrodin rajapinnan. Sähköläpilyönnin kehittymisnopeuteen vaikuttaa purkaukskanavaan kertyvä avaruusvaraus, muutokset molekyyli- ja kiderakenteissa sekä sähköpurkausten aiheuttama eristeen lämpeneminen. [4]

Osittaispurkausläpilyönti eroaa normaalista sähköläpilyönnistä siten, että siinä sähköpurkaus tapahtuu eristeen onteloon jääneessä aineessa, jonka permittiviteetti on eristemateriaalia pienempi ja joka lyö siten läpi jo pienemmällä jännitteellä. Permittiviteetieroista johtuen tämä on yleisintä ilmatäytteisissä onteloissa. Purkaus vapauttaa ioneja, jotka törmäilevät ontelon seiniin ja aiheuttavat eroosiota seinämiin. Lisäksi purkauksen vapauttamat kemialliset yhdisteet saattavat vahingoittaa eristettä. Erityisesti, jos ontelossa on uloke tai epätasaisuus, jonne syntyy sähkökentän tihentymä, purkauksen keskittyminen kyseiseen pisteeseen aiheuttaa purkaukskanavan syntymisen eristeeseen, mikä lopulta johtaa läpilyöntiin. [4]

Sähköpuiksi kutsutaan pitkän ajan kuluessa syntyviä osittaispurkausten aiheuttamia eroosio-onteloita, jotka yleensä haarautuvat puumaiseksi muodoksi. Varsinaiset sähköpuut syntyvät kuivissa olosuhteissa, ja kosteissa olosuhteissa syntyviä eroosiokanavia kutsutaan vesipuiksi. Sähkö- tai vesipuu johtaa läpilyöntiin yleensä kuukausien tai vuosien jälkeen eroosion alkamisesta. [4] Sähkö- ja vesipuut ovat yleisin kiinteiden eristeiden tuhoutumismekanismi niiden ikääntyessä [9]. Lyhytaikaisessa tasaisella nopeudella nostettavaan jännitteeseen perustuvassa läpilyöntitestauksessa ne ovat merkityksettömiä, joten niitä ei käsitellä enempää tässä työssä.

Lämpöläpilyönti on yksi vaihtoehtoinen mekanismi kiinteiden eristeiden läpilyönnissä. Eristeen johtavuus lisääntyy yleisesti sen lämmetessä, jolloin siinä syntyvät pätötehohäviöt kasvavat. Lisäksi vaihtojännitteellä dielektriset häviöt lämmittävät eristettä. Jos eriste tuottaa enemmän lämpöä kuin siitä pystyy siirtymään pois jäähdytyksen avulla, syntyy epästabiili tilanne. Lopulta eriste menettää eristysominaisuutensa ja alkaa johtaa. Lämpöläpilyöntiin vaadittava jännite on samalla materiaalilla pienempi vaihtojännitteellä kuin tasajännitteellä, mutta silloinkin tarvittava jänniterasitus on huoneenlämpötilassa (20 °C) useimmilla materiaaleilla satoja MV/m. Joillakin orgaanisilla materiaaleilla, kuten akryylihartsilla se on kertaluokkaa pienempi [6]. Ulkoisen lämpötilan kasvaessa tarvittava kentänvoimakkuus putoaa merkittävästi. Lämpöläpilyönti on kuitenkin yleisempää tasajännitteillä, koska vaihtojännitteellä osittaispurkauksiin liittyvät mekanismit johtavat läpilyöntiin usein jo pienemmillä jännitteillä. [4, 9].

Sähkömekaanisessa läpilyönnissä eristettä ympäröivien sähkövarausten aiheuttama sähköstaattinen voima kohdistaa eristeeseen niin suuren paineen, että eristemateriaalin kiderakenne luhistuu paineen takia. Tämä mekanismi on mahdollinen vain tasajännitteillä,

koska niillä varausjakauma pysyy paikallaan. Sähkömekaaniseen läpilyöntiin vaaditaan yleensä megapascalien suuruusluokkaa oleva paine ja sähkömekaaniset läpilyöntijännitteet ovat satoja MV/m. Lämpötilan nousu laskee jonkin verran sähkömekaanista läpilyöntijännitettä, koska se lisää molekyylien lämpöliikettä ja samalla mekaanista rasitusta. Käytännössä mekanismi on harvinainen, koska lämpöläpilyönti tapahtuu usein pienemmillä jännitteillä. [9]

Ylilyönniksi (*flashover*) kutsutaan sähköpurkausta, joka tapahtuu varsinaisen eristeen sijaan sitä ympäröivässä aineessa, joka on yleensä ilma tai öljy [4]. Ylilyönti tapahtuu, koska ympäröivän aineen läpilyöntilujuus on huomattavasti pienempi kuin varsinaisen eristeen. Ilmassa tapahtuvasta ylilyönnistä aiheutuu yleensä valokaari, koska ilman molekyylit ionisoituvat tuottaen valo- ja lämpöenergiaa.

2.4 Läpilyöntilujuuteen vaikuttavat tekijät

Läpilyönti on useiden fysikaalisten ja kemiallisten reaktioiden tulos, joten sen suuruuteen vaikuttaa hyvin monet tekijät. Karkeasti ne voidaan jakaa yksittäisen eristemateriaalin ominaisuuksista johtuviin, koko eristerakenteen ominaisuuksista johtuviin, jännitemuotoon liittyviin sekä ympäristötekijöihin. Jaottelu ei ole yksiselitteistä, koska jännitemuoto vaikuttaa pitkälti siihen, millainen vaikutus ympäristötekijöillä on eristeen läpilyöntilujuudelle. Lisäksi läpilyönti on pohjimmiltaan tilastollinen ilmiö, joten vaikka kaikki sisäiset ja ulkoiset parametrit olisivat identtisiä, läpilyönti ei tapahdu aina samalla sähkökentän voimakkuudella vaan sijoittuu tietyllä todennäköisyydellä tietylle läpilyöntilujuusvälille. Epäideaalisilla eristeillä myös eristemateriaalin jännitelujuus vaihtelee eristeen pinnalla, jolloin testattavan eristepinta-alan suuruudella on vaikutusta mitattuun läpilyöntilujuuteen.

2.4.1 Materiaalin ominaisuuksien vaikutus

Yksittäisellä eristemateriaalin permittiviteetillä tai resistiivisyydellä ei ole suoraa riippuvuutta materiaalin läpilyöntilujuuteen, koska sähkökentän voimakkuus homogeenisessä materiaalissa riippuu vain sen yli olevasta jännitteestä ja materiaalin paksuudesta. Johtavuus vaikuttaa kuitenkin avaruusvarauksen kertymisnopeuden ja eristeen lämpenemisen muodossa.

Materiaalin kiderarakenteella ja mikrorakenteella yleisesti on huomattava merkitys läpilyöntilujuuteen useasta syystä. Se vaikuttaa siihen, miten herkkä materiaali on jännitetasituksen termisille vaikutuksille, kuten dielektrisille häviöille ja osittaispurkausten synnyttämälle lämmölle. Materiaalin johtavuusominaisuudet vaikuttavat avaruusvarauksen kertymisnopeuteen ja laajuuteen.

Lisäksi huokoisiin materiaaleihin syntyy helpommin ilmaonteloita, joissa syntyy osittaispurkauksia, ja osittaispurkausten eroosiovaikutus on kyseisissä materiaaleissa voi-

makkaampi. Materiaalin mekaaninen tai kemiallinen käsittely ennen läpilyöntiä, kuten veto, puristus tai säteilylle altistaminen, vaikuttaa materiaalin mikrorakenteeseen ja yleensä heikentää sen läpilyöntilujuutta [4].

Materiaalin homogeenisuus vaikuttaa jänniterasitukseen. Epähomogeenisessa materiaalissa esiintyy mikroskooppisessa kokoluokassa tarkasteltuna permittiviteetiltään erilaisia aineita, jolloin syntyy sähkökentän tihentymiä, joissa jänniterasitus kasvaa ympäristöön suuremmaksi, jolloin läpilyönti tapahtuu todennäköisemmin pienemmällä jännitteellä. Tällaisia mikroepäpuhtauksia esiintyy esimerkiksi polymeereillä.

2.4.2 Eristysrakenteen vaikutus kokonaisuutena

Useasta eri materiaalista koostuvissa rakenteissa läpilyöntilujuuteen vaikuttaa sähkökentän jakaantuminen materiaalien kesken. Vaihtojännitteellä sähkökenttä jakautuu kerroksista koostuvan eristerakenteen osien kesken siten, että sähkökenttien voimakkuuksien suhde on eristemateriaalien permittiviteettien suhteen käänteisluku ja tasajännitteellä kerrosten resistiivisyyksien suhde. Tästä seuraa, että kun jännite koko eristerakenteen yli on vakio, materiaalien permittiviteettien suhteen ollessa suuri sähkökenttä pienemmän permittiviteetin omaavassa aineessa on suurempi sellaiseen tilanteeseen nähden, jossa permittiviteetit olisivat samaa suuruusluokkaa. Ensimmäisessä tapauksessa osittaispurkaus pienemmän permittiviteetin omaavassa aineessa käynnistyy pienemmällä jännitteellä, ja todennäköisesti läpilyönti koko eristerakenteessa tapahtuu pienemmällä jännitteellä. Sama periaate pätee materiaalien johtavuuksien eroon. Permittiviteettiin sinänsä vaikuttaa aineen molekyyli- ja kidehilarakenne, jotka määräävät, miten voimakkaasti aine polarisoituu. [4].

Eristeen pinnoilla olevat epäpuhtaudet lisäävät sähkökentän epähomogeenisuutta johtuen paikallisiin sähkökentän tihentymiin. Tyypillisiä epäpuhtauksia ovat noki ja pöly kaupungissa sekä suola rannikkoseuduilla [7]. Eristenäytteisiin ja elektrodeihin voi siirtyä myös testitapahtuman yhteydessä epäpuhtauksia, esimerkiksi rasvaa paljain käsin koskettaessa. Tämän torjumiseksi testausta suoritettaessa näytteitä tulisi käsitellä suoja-hansikkailla tai pinseteillä.

Eristysrakenteen osien rajapintojen ominaisuudet ovat merkittäviä koko järjestelmän dielektristen ominaisuuksien kannalta. Rajapintojen epätasaisuus lisää sähkökentän epähomogeenisuutta rajapinnoilla. Epätasaisuus voi olla seurausta läpilyöntien aiheuttamista kolhuista elektrodien pinnoilla, mutta monet näyttemateriaalien kuten paperien pinnat ovat usein luonnostaan epätasaisia mikroskooppisessa kokoluokassa tarkasteltuna. Epätasaisuudesta ja eroosiosta aiheutuvat ontelot täyttyvät ilmalla, jossa syntyy helposti osittaispurkauksia ilman pienemmän permittiviteetin takia. Tämän takia kiinteät paperieristykset usein impregnoidaan öljyssä, koska öljyn permittiviteetti on lähellä paperin permittiviteettiä, ja öljyn täyttyessä materiaalin ontelot ei vastaavia heikkoja koh-

tia synny. Rajapintojen merkitys on erityisen suuri ohuilla näytteillä, joissa rajapinnan paksuus on merkittävä näytteen paksuuteen verrattuna.

Rajapintojen kaareutumisella on merkitystä läpilyöntilujuuteen sähkökentän taipumisen ja tihentymisen takia. Tasopohjaisessa elektrodissa sähkökenttä tihentyy elektrodien reunoilla huomattavasti vastaavan homogeenisen kentän arvoa suuremmaksi. Tästä syystä elektrodien reunat yleensä pyöristetään, jolloin kentänvoimakkuus pienenee reunoilla vähentäen kentäntihentymää. [4, 10]

2.4.3 Jännitemuodon vaikutus

Eristeen yli olevan jännitteen muoto, erityisesti se, muuttuuko jännitteen polariteetti, vaikuttaa materiaaliin kohdistuvaan rasitukseen, ja myös mekanismeihin, miten muut ulkoiset parametrit, kuten lämpötila vaikuttavat siihen. Samanlaisen eristerakenteen läpilyöntilujuus on tasajännitteellä yleensä merkittävästi suurempi vaihtojännitteeseen verrattuna [8, 11]. Lisäksi on huomattava, että vaihtojännitteellä läpilyöntilujuuden määrää jännitteen huippuarvo tehollisarvon sijaan, mikä lisää nimellisjännitteeltään samanlaisen eristysvälin läpilyöntilujuutta tasajännitteen hyväksi. Erityisen suuri ero tasa- ja vaihtojännitteen läpilyöntilujuudella on epähomogeenisilla materiaaleilla, joilla osittaispurkauksien riski vaihtojännitteellä on suuri [12].

Vakiosuuruisella tasajännitteellä aineiden resistiivisyys on määräävä tekijä jännitteen jakautumisessa eri eristerakenteiden kesken. Lämpötilan nousu muuttaa aineen johtavuutta ja siten vaikuttaa jännitteiden jakautumiseen materiaalien kesken. Lisäksi resistiivisyys on riippuvainen sähkökentän voimakkuudesta ja lämpötilasta. Tasajännitteellä sähkökentän voimakkuuteen vaikuttaa absoluuttisen lämpötilan lisäksi eristeen yli oleva lämpötilaero [4]. Nopeilla impulssijännitteillä polarisaatio on tasajännitettä merkittävämpi, jolloin materiaalien permittiviteetti on merkittävämpi.

Jännitteen hetkellinen nousunopeus vaikuttaa osittaispurkauksien todennäköisyyteen, joka lisääntyy nousunopeuden kasvaessa. Tämän seurauksena läpilyöntilujuus heikenee, jos jännitteen nousunopeus kasvaa. Tämä kuitenkin pätee vain tasajännitteelle, koska sinimuotoisella vaihtojännitteellä hetkellisen nousunopeuden määrää lähinnä siniaallon taajuus ja amplitudi RMS-arvon kasvunopeuden sijaan.

Toisaalta vakiosuuruista jänniteramppia käyttävissä läpilyöntitesteissä suurella nousunopeudella osittaispurkauksien ja lämpenemisen aiheuttama eroosio ei ehdi kehittyä niin pitkälle, mikä parantaa läpilyöntilujuutta [9]. Tasajännitteellä lisäksi avaruusvarausta muodostavia varauksenkuljettajia ehtii siirtyä vähemmän suurella nousunopeudella. Vaihtojännitteellä nousunopeuden läpilyöntilujuutta parantava vaikutus on paljon suurempi kuin tasajännitteellä, koska tälle vastakkainen vaikutus on merkityksetön.

Taajuuden kasvu heikentää läpilyöntilujuutta, sillä se lisää osittaispurkauksen riskiä ja dielektrisiä häviöitä. Taajuuden kasvaessa edellä mainittu hetkellinen nousunopeus on

suurempi, ja lisäksi hetkiä, jolloin osittaispurkauksia todennäköisesti syntyy, on useammin. Taajuuden kasvun läpilyöntilujuutta heikentävä vaikutus on todettu lähteen [8] tutkimuksessa, jossa riippuvuutta perusteltiin lisäksi avaruusvarauksen kasvavalla kasaantumisnopeudella taajuuden kasvaessa.

Samankaltaisiin tuloksiin on päädytty lähteessä [13] tehdyssä tutkimuksessa. 50 Hz taajuudella nousunopeuden kasvattaminen arvosta 100 V/s arvoon 500 V/s kasvatti läpilyöntilujuutta noin 50 %. Tasajännitteelläkin läpilyöntilujuus kasvoi, mutta vain muutamia prosentteja, mikä sopii yhteen teorian kanssa. Testi tehtiin matalatiheyksisillä polyetyleenikalvoilla, joilla avaruusvarauksen vaikutus on keskimääräistä suurempaa. Paperinäytteillä erot ovat todennäköisesti pienemmät, mutta vaihtelun trendi on samanlainen.

Standardeissa on määritelty tarkat arvot ramppiteisteissä käytettäville jännitteen nostonopeuksille. IEC:n (*International Electrotechnical Commission*) standardin 60243-1 mukaan sallitut nousunopeudet ovat numeroilla 1, 2, ja 5 alkavia tasalukuja, eli esimerkiksi 100 V/s, 200 V/s ja 500 V/s. Käytettävä nopeus tulee valita siten, että läpilyönti tapahtuu 10-20 s jännitteen noston alkamisen jälkeen [14].

2.4.4 Ilmastollisten olosuhteiden vaikutus

Ilmastolliset olosuhteet vaikuttavat voimakkaimmin ilmaeristyksen läpilyöntilujuuteen, mutta myös kiinteisiin eristeisiin, jotka ovat kosketuksissa ilman kanssa. Hermeettisesti suljettuihin sisäisiin eristysrakenteisiin ne eivät vaikuta, mutta testattaessa kiinteitä eristysmateriaaleja laboratoriossa elektrodijärjestelyihin sisältyy usein ilmapälejä elektrodien pyöristämisen takia. Ilmastolliset tekijät vaikuttavat lisäksi välillisesti materiaalien lämpenemisen ja niihin sitoutuneen ilmankosteuden kautta.

Ilmanpaineen kasvu heikentää jossain määrin ilmaeristyksen läpilyöntilujuutta, koska se lisää ionisoivien sysäyksien todennäköisyyttä [7]. Paineen merkitys on kuitenkin pieni normaali-ilmanpaineolosuhteissa, mutta tiloissa, joissa paine on moninkertainen normaali-ilmanpaineeseen, ja yli 1000 m korkeudella merenpinnasta, jossa paine on huomattavasti pienempi, se on otettava huomioon. Paine ja lämpötila vaikuttavat ilman tiheyteen, jolla on suora vaikutus läpilyöntiin [1].

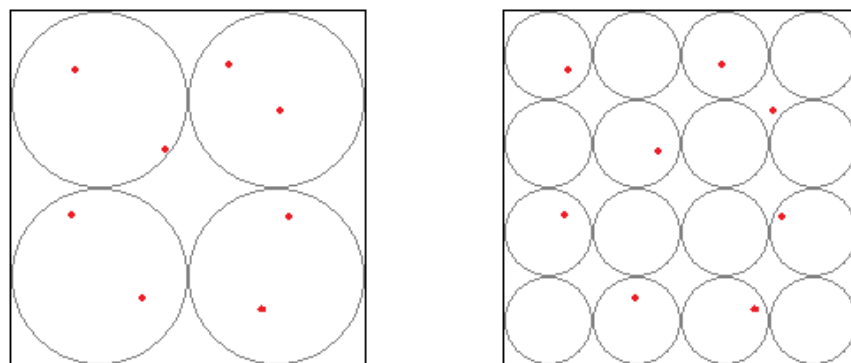
Eristemateriaaliin sitoutunut vesi kasvattaa materiaalin läpilyöntilujuutta. Tämä johtuu siitä, että vesimolekyylit ovat lievästi elektronegatiivisia ja pystyvät sieppaamaan varauksenkuljettajia, mikä vähentää avaruusvarausten suuruutta [7]. Vaikutus pätee ilman läpilyöntilujuudelle [7]. Eristeeseen sitoutuneen veden vaikutus on havaittu myös kuivilla paperieristeillä, jotka imevät itseensä kosteutta. Kosteuseroista johtuvan virhetekijän poissulkemiseksi testattavat eristeet on kuivattava ennen testausta ja testaus on pyrittävä suorittamaan mahdollisimman nopeasti kuivaamisen jälkeen.

Vesipisarat eristeen pinnalla, jotka tulevat sinne joko sateen mukana tai ilmankosteuden tiivistyessä, huonontavat eristeen eristysominaisuuksia. Pisarat muodostavat paikallisen sähkökentän tihtentymän, jolloin eristimen ja ilman rajapinnan ylilyöntilujuus kasvaa. Kosteus yhdistettynä eristeen pinnalla oleviin epäpuhtauksiin aiheuttaa lisäksi johtavuuden kasvua eristeen pinnalla. Tämä lämmittää eristettä ja synnyttää kuivia vyöhykkeitä, joissa kentänvoimakkuus kasvaa suuremmaksi kuin kosteilla ja enemmän johtavilla vyöhykkeillä. [7]

2.4.5 Elektrodien suuruusvaikutus

Käytettyjen elektrodien koko vaikuttaa läpilyöntijännitteen testituloksiin. Mitä suurempia elektrodeja käytetään, sitä todennäköisemmin elektrodien kokoa vastaavalla pinta-alalla on eristemateriaalissa läpilyönteiltään selvästi pienempiä alueita, ns. heikkoja pisteitä, joissa läpilyönti tulee tapahtumaan todennäköisemmin pienemmällä jännitteellä. Siten käytettäessä suuria elektrodeja havaittu läpilyöntilujuus pienenee. Vastaavasti, jos käytetyt elektrodit ovat pieniä, niiden kattamalla eristepinta-alalla on vähemmän heikkoja pisteitä. Jos läpilyöntitestien määrää kasvatetaan kääntäen verrannollisesti elektrodien pinta-alaan nähden, pienillä elektrodeilla hyvin suuri osa testeistä osuu kohtaan, jossa ei ole heikkoa pistettä, jolloin näyttää siltä, että materiaalin läpilyöntilujuus olisi suurempi kuin suuremmilla elektrodeilla saatujen tulosten perusteella. Elektrodien suuruusvaikutuksen takia standardeissa on määritelty hyvin tarkkaan elektrodien koot, joita tulisi käyttää vertailukelpoisten tulosten aikaansaamiseksi.

Elektrodien suuruusvaikutusta on esitetty yksinkertaistetusti kuvassa 5. Siinä punaiset pisteet kuvaavat eristemateriaalin heikkoja pisteitä. Suuria elektrodeja käytettäessä jokaiseen testattavaan alueeseen osuu vähintään yksi heikko piste. Halkaisijaltaan puolet pienemmillä elektrodeilla heikko piste osuu vain noin 44 % (7/16) testattavista alueista.



Kuva 5. Yksinkertaistettu malli elektrodin suuruusvaikutuksesta

On huomattava, että todellisuudessa läpilyöntilujuus on jakautunut pinta-alalle tilastollisen jakauman mukaan ja läpilyöntilujuudeltaan heikommilla alueillakin voi olla suuria keskinäisiä eroja. Suuruusvaikutus ilmenee yleisesti testattaessa vakiomäärä näyteitä

erikokoisilla elektrodeilla, vaikka koko tutkittavan näytteen alaa ei systemaattisesti testattaisi.

Toinen esimerkki suuruusvaikutuksesta liittyy eristekaapeleiden mittaamiseen. Läpilyöntitesti lyhyestä kaapelinpätkästä antaa paremman tuloksen, kuin mitä voidaan olettaa koko pitkän kaapelieristyksen kestävän, koska läpilyöntilujuuden hajonta suuremmalla pinta-alalla on todennäköisesti suurempaa, jolloin pitkässä kaapelissa pienimmän läpilyöntilujuuden omaavan pisteen läpilyöntilujuus on todennäköisesti pienempi kuin lyhyessä kaapelissa. [4]

2.5 Läpilyöntilujuuden tilastollinen analyysi

Läpilyönti on tilastollinen ilmiö, joka perustuu stokastisiin prosesseihin ja tapahtuu jollakin todennäköisyydellä tietyllä jännitelujuusvälillä. Voidaan ajatella myös toisin päin, eli jokaiselle jännitelujuuden eli sähkökentän voimakkuuden arvolla on tietty todennäköisyys, että läpilyönti tapahtuu, kun jännitelujuus on tai pienempi tai yhtä suuri kuin kyseinen arvo. Tällaisia arvoja kutsutaan tietyn todennäköisyyden persentiileiksi. Tärkeimmät persentiilit ovat 50 % persentiili eli keskimääräinen läpilyöntilujuus sekä 5 % ja 10 % persentiilit, joiden mukaan yleisimmin määritellään materiaalin jännitekesto standardeissa.

Läpilyöntilujuuden määrittäminen tapahtuu siten, että läpilyöntilujuutta mallintava jakauma sovitetaan mitatun näytejoukon data-alkioihin, ja jakauman kertymäfunktio ja tunnusluvut määritetään. Weibull-jakauma on yleisin läpilyöntianalyysissä sovellettava jakauma. Sen etuna on se, että se on suljettu jakauma, jolloin todennäköisyys tietyn arvon alapuolella on 0, mikä kuvaa paremmin läpilyönti-ilmiötä kuin jakaumat, joissa todennäköisyys jakauman laidoilla lähestyy nollaa koskaan sitä saavuttamatta. Myös muita jakaumia, varsinkin normaalijakaumaa ja Gumbelin jakaumaa käytetään läpilyöntianalyysissä.

2-parametrinen Weibull-jakauman kertymäfunktio määritellään kaavalla

$$F(x; \alpha; \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (2.18)$$

jossa x tarkoittaa tilastollisesti käyttäytyvää muuttujaa [15]. Parametri α on Weibull-skaalausparametri ja β on Weibull-muotoparametri. Skaalausparametri α , joka on analoginen normaalijakauman odotusarvolle, määritellään Weibull-todennäköisyysjakauman huippuarvon x -koordinaattina ja persentiilinä todennäköisyydelle $1 - e^{-1}$ eli 63,2 %. Tämä arvo voidaan johtaa kaavasta asettamalla x yhtä suureksi kuin α . Muotoparametri β on analoginen normaalijakauman keskihajonnalle, tosin keskihajonnasta poiketen se on sitä suurempi, mitä kapeampi jakauma on. Lisäksi hyvin pienillä β :n arvoilla Weibull-jakauman todennäköisyysfunktio kasvaa eksponentiaali-

sesti lähestyttäessä nollaa, jolloin jakaumalla ei voida mallintaa samanlaisia prosesseja kuin normaalisti.

Weibull-kertymäfunktioita käyttökelpoisempi tapa tilastollisen datan analysointiin on lineaarisoitu Weibull-kertymäfunktio, joka muodostetaan kaavasta (2.18) siirtämällä termejä, ottamalla kaksinkertainen logaritmi puolittain, ja käyttämällä logaritmien laskusääntöjä. [15]

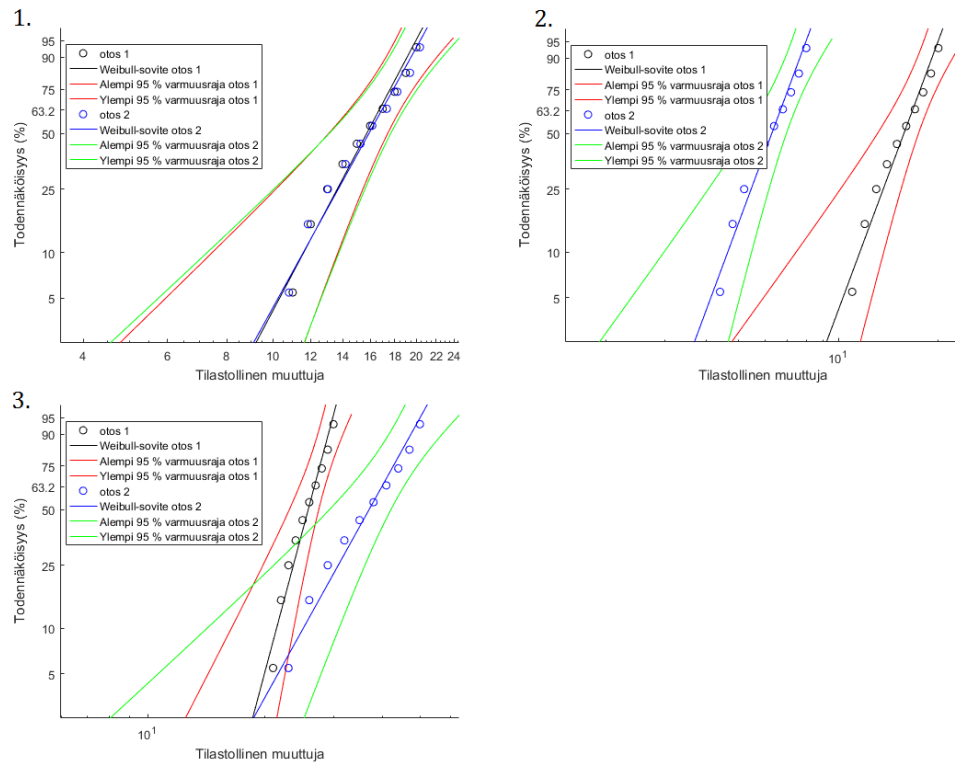
$$\ln[-\ln(1 - F)] = \beta(\ln(x) - \beta\ln(\alpha)) \quad (2.19)$$

Linearisoidussa Weibull-kertymäfunktiossa on se etu, että sen muotoparametri β vastaa suoran kulmakerrointa. Lisäksi vertailtaessa eri datajoukkojen jakaumia varmuusrajojen päällekkäisyys nähdään helposti kuvasta.

Koska todelliset läpilyöntimittaukset eivät koskaan asetu jakaumaan ideaalisesti, on laskettava jakauman varmuusrajat. Niiden avulla voidaan laskea otoksen tilastollinen virhe ja analysoida datajoukkojen erojen merkittävyyttä. Minimi- ja maksimivarmuusraja määritellään erikseen jokaiselle todennäköisyysfunktion F arvoa vastaavalle persentiilille. Yleisimmin käytetyt varmuusrajat ovat 90 % ja 95 % varmuusrajat. Esimerkiksi 90 varmuusrajan tapauksessa tietty persentiili osuu 90 % todennäköisyydellä välille $[x_1, x_2]$, on 5 % todennäköisyydellä pienempi kuin x_1 ja 5 % suurempi kuin x_2 . Vastaavat varmuusrajafunktiot muodostuvat varmuusrajapisteistä x - F -koordinaatistossa. Varmuusmarginaali tarkoittaa varmuusrajafunktioiden rajaamaa aluetta, jolle datapisteet sijoittuvat lineaarisoidussa x - F koordinaatistossa varmuusrajoja vastaavalla todennäköisyydellä.

Varmuusrajoihin liittyy läheisesti käsite tilastollinen merkitsevyys. Kahden datajoukon ero on tilastollisesti merkitsevä, jos niiden varmuusmarginaalit eivät leikkaa toisiaan, ja merkittävyyttä ei ole lainkaan, jos varmuusmarginaalien leikkaus ulottuu yhtenäisenä koko todennäköisyysvälin $[0, 1]$ yli. Joukkojen ero on ehdollisesti tilastollisesti merkitsevä, jos varmuusmarginaalit leikkaavat toisensa jollain todennäköisyysvälin osalla. Näin tapahtuu tilanteissa, jossa jakaumien skaalausparametrit poikkeavat merkittävästi, mutta myös jakaumien muotoparametrit ovat hyvin erisuuret, jolloin jakauman toisella reunalla voidaan saavuttaa samansuuruisia arvoja ja toisella reunalla hyvin erilaisia arvoja.

Kuvassa 6 on esitelty kolme perustapausta varmuusmarginaalien merkitsevyydestä. Ensimmäisessä kuvassa varmuusmarginaalit leikkaavat toisensa kaikilla todennäköisyyksillä, jolloin jakaumien ero ei ole tilastollisesti merkitsevä. Toisessa kuvassa varmuusmarginaalit ovat toistensa ulkopuolella, jolloin jakaumien ero on tilastollisesti merkitsevä. Kolmannessa kuvassa varmuusmarginaalit leikkaavat toisensa matalilla todennäköisyyksillä. Jakaumat ovat tilastollisesti merkitseviä likimain 40 % persentiilin yläpuolella.



Kuva 6. Kolme perustapausta tilastollisen muuttujan varmuusmarginaaleista

Kolmannen kuvan tyyppisiin tilanteisiin on kiinnitettävä erityistä huomiota läpilyönti-analyysin tapauksessa, jossa jakauman pienillä todennäköisyyksillä on huomattava merkitys. Sovitefunktioiden varmuusmarginaalien leikatessa siellä alhaiset persentiilit (5 % ja 10 %) ovat hyvin lähellä toisiaan. Tällöin materiaalien kriittinen jännitteenkesto on hyvin samanlainen, vaikka jakaumien tunnuslukujen perusteella jakaumat olisivat täysin erilaiset. Tämän takia materiaalien läpilyöntilujuutta ei voi luotettavasti määrittää tutkimalla ainoastaan keskiarvoja.

3. LÄPILYÖNNIN TESTAUSTEKNIikka

Läpilyöntitutkimus on kokeellista tutkimusta, jossa käytettävillä testausmenetelmillä ja laitteistoilla on huomattava merkitys lopputulokseen. Siksi testausjärjestelmän rakentaminen on tehtävä huolella. Luvun alussa esitellään testaamisen peruseriaatteita ja yleisiä vaatimuksia. Sen jälkeen käsitellään läpilyöntitestausjärjestelmän osia, erityisesti niihin liittyviä virhetekijöitä ja niiden minimoimista. Lopuksi käsitellään läpilyöntitestauksen turvallisuutta ja sen huomioon ottamista testausjärjestelmän suunnittelussa.

3.1 Yleistä teoriaa testauksesta

3.1.1 Määritelmiä

Testausjärjestelmä (*test system*) on kaikkien testaukseen liittyvien laitteiden ja välineiden sekä niiden yhdysjohtojen kokonaisuus. Läpilyöntitestausjärjestelmän muodostaa jännitelähde, suurjännitemuuntaja, elektrodijärjestely ja mittausinstrumentit sekä näiden keskinäiset kytkennät [1]. Usein testausjärjestelmään liittyy myös ohjausjärjestelmä sekä suojausjärjestelmä.

Mittausjärjestelmä (*measurement system*) on testausjärjestelmän osa, johon kuuluu mittausinstrumentit ja niihin välittömästi liittyvät laitteet, kuten jännitteenjakajat sekä mittalaitteiden kytkennät ja maadoitukset [4].

Näyte eli **testikappale** (*test object/specimen*) on yksittäisen testin kohteena oleva kappale. Näyte voi olla joko pala testattavaa materiaalia, kuten paperia tai kokonainen laite, kuten valmis eristin. Joissakin yhteyksissä näytteellä voidaan tarkoittaa myös suurempaa samasta materiaalista koostuvaa kokonaisuutta, josta suoritetaan useita testejä.

Otos (*statistical sample*) on testien kokonaisuus, joiden tuloksista tehdään yhtenäinen tilastollinen analyysi. Esimerkkinä otoksesta on läpilyöntitestauksessa 10 testiä saman materiaalin näytteistä materiaalin läpilyöntilujuuden määrittämiseksi.

Skaalauskerroin (*scale factor*) on luku, jolla mittarin osoittama arvo on kerrottava, jotta saadaan todellinen mittausjärjestelmään menevän suureen arvo [1, 16]. Skaalauskerroin on oikeastaan kahden erillisen kertoimen tulo: nimellinen skaalauskerroin kuvaa käytetyn jännitteenjakajan nimellistä jakosuhdetta, ja korjauskerroin kuvaa mittausjärjestelmän komponenttien aiheuttamaa virhettä. Skaalauskerroin on lineaarisessa järjestelmässä vakio, mutta muussa tapauksessa se on mitattavan suureen ja usein myös muiden suureiden, kuten ajan tai jännitteen funktio.

Skaalauskerroimen lineaarisuus kuvaa skaalauskerroinfunktion arvojen hajontaa mitattavan suureen arvojen muuttuessa. Täysin lineaarisessa mittausjärjestelmässä skaalauskerroin on mitattavan suureen arvosta riippumaton vakio. Matemaattisesti lineaarisuus määritellään mitattujen skaalauskerroinfunktion arvojen maksimihajonnan avulla niiden keskiarvon suhteen. [16]

Skaalauskerroimen stabiilius tarkoittaa sitä, kuinka paljon skaalauskerroin muuttuu ajan kuluessa eli ajautuu. Täysin stabiilissa tilanteessa skaalauskerroin on ajan suhteen vakio. Lyhytaikainen stabiilius kuvaa muutosta yksittäisen mittauksen aikana, kun suurjännite on päällä, eli sen aikaväli on sekunteja tai korkeintaan minuutteja. Pitkäaikainen stabiilius kuvaa skaalauskerroimen ajautumista kuukausien tai jopa vuosien aikavälillä, joka on usein riippumatonta laitteen käytöstä. Yksi stabiiliuden muoto on lämpöstabiilius, eli miten ulkoinen lämpötila vaikuttaa testijärjestelmään. Lämpötilan vaikutus on pääasiassa pitkäaikainen. [16]

3.1.2. Testityyppien luokittelu

Läpilyöntitestit jaetaan tarpeiden ja testausvaatimusten mukaan kahteen pääryhmään: yksityiskohtaisempiin suunnittelu- ja tyyppitesteihin sekä usein toistettaviin, mutta vähemmän tarkkoihin rutiinitesteihin [4]. Kolmannen testityypin muodostavat pitkäaikais-testaukset, joilla testataan yleensä näytteiden ikääntymistä ja pitkäaikaisten rasitusten kestoja, ja joiden suoritus saattaa kestää vuosia [4]. Mittalaitteet on suunniteltava hyvin erilaisiksi eri testityyppejä varten. Toisen tavoitteisiin perustuvan jaottelutavan mukaan suunnittelutestaukset muodostavat oman ryhmänsä ja tyyppi- sekä rutiinitestaukset yhdistetään laatutestaukset-käsitteen alle, koska niissä testataan valmiin tuotteen laatua [1]. Testit voidaan jakaa myös sen perusteella, onko niiden kohteena itse testaus- tai mittausjärjestelmä vai ulkoinen näyte. Kaikkia edellä mainittuja testityyppejä voidaan kohdistaa sekä testausjärjestelmään että ulkoisiin näytteisiin, mutta tulosten jäljitettävyyksivaatimukseen perustuen samanaikainen testijärjestelmän ja näytteiden tutkiminen ei ole sallittua.

Suunnittelutestausta tehdään uutta eristysrakennetta tai testausmenetelmää kehitettäessä ja siinä testataan yleensä yksittäisiä tilanteita kerrallaan. [1]. Suunnittelutestauksissa on usein tavoitteena poissulkea joidenkin parametrien merkitystä tai vertailla eri materiaalien soveltuvuutta tiettyyn eristysrakenteeseen tai testijärjestelmän osaan. Mittauksien on oltava tarkkoja ja tieteellisesti päteviä, mutta otosten ei tarvitse olla suuria varsinkaan tapauksissa joissa menetelmä, materiaali tai muu testattava vaihtoehto todetaan tarkoitukseen sopimattomaksi.

Tyyppitestaus tehdään otettaessa uusi testausjärjestelmä käyttöön tai aloitettaessa uuden tuotteen, kuten eristimen kaupallinen levittäminen. Tyyppitestauksen yleisenä tavoitteena on todeta, että laite toimii sen spesifikaation määrittelemällä tavalla, ja laitteen käyttöön liittyvän epävarmuuden laskennallinen määrittäminen. Testausjärjestelmän tyyppi-

testauksessa mitattavia asioita ovat esimerkiksi skaalauskerroimen itseisarvon ja hajonnan sekä dynaamisten ominaisuuksien määrittäminen, järjestelmän stabiiliuden tarkastelu ja ympäristövaikutusten korjauskertoimien määrittäminen [1]. Tyypitestausta on testityypeistä kaikkein seikkaperäisin ja siinä on otettava mahdollisimman monet parametrit ja poikkeustilanteet huomioon. Tyypitestausta on myös dokumentoitava testausselosteen muodossa ja testausselosteen on oltava vapaasti asiakkaiden saatavilla [4]. Tyypitestausta on lisäksi uusittava säännöllisin väliajoin, yleensä 3-5 vuoden välein, tai useiminkin, jos laitteeseen tehdään huomattavia muutoksia [7].

Rutiinitestauksessa testataan tuote-erän yksittäisiä kappaleita tuotteen laadun varmistamiseksi. Mittalaitteen testauksessa määrääjoin tehtävä kalibrointi katsotaan rutiinitestaukseksi. Rutiinitestauksissa tärkeää on testauksen nopeus ja sujuvuus, minkä mahdollistamiseksi mittaustarkkuudesta ja luotettavuudesta joudutaan tinkimään [4]. Rutiinitestausta on yleensä tarkasti standardien ja organisaatiokohtaisten mittausohjeiden säätelmää ja siksi joustamatonta virheellisten testitapausten suhteen. Yleisen käytännön mukaan testisarjan yksittäisiä testejä ei saa uusida, vaikka tulokset poikkeaisivat ja olisi aiheutta epäillä mittausvirhettä, vaan joko poikkeava tulos on laskettava mukaan mittausdatan analyysiin tai vaihtoehtoisesti koko testisarja on uusittava.

3.1.3 Testauksen yleiset vaatimukset

Testauksella on tavoitteista riippumatta yleisiä vaatimuksia, joiden on toteuduttava tietyssä määrin. Testin on oltava selektiivinen eli edustettava riittävän suurta näytejoukkoa, jotta satunnaisuuden vaikutus ei olisi merkittävä ja tuloksista voitaisiin tehdä päteviä johtopäätöksiä. Testaus on pystyttävä toistamaan mahdollisimman samanlaisissa olosuhteissa. Toisin sanoen testauksen tulokset eivät voi olla riippuvaisia testauksen paikasta ja ajankohdasta. Testauksen toistettavuutta voidaan parantaa käyttämällä ilmastollisia korjauskertoimia. Testauksen on oltava riippumaton, eli näytekappaleiden aiemmat rasitukset eivät saa vaikuttaa tulokseen. Lisäksi testin on kuvattava mahdollisimman hyvin koekappaleen todellista käyttörasitusta. Esimerkiksi kosteisiin tai korkeapaineisiin tiloihin suunniteltavia läpilyöntieristimiä ei voida testata pelkästään normaaleissa laboratorio-olosuhteissa. [4]

Testauksella on lisäksi vaatimuksia mittaamisen näkökulmasta, kuten riittävä mittaustarkkuus, alhainen häiriöherkkyys ja mittausjärjestelmän tarkastelu kokonaisuutena. Mittaustarkkuuteen vaikuttavia tärkeimpiä tekijöitä ovat mittausjärjestelmän dynaamiset ominaisuudet ja stabiilius. Toistettavuusvaatimus johtaa jäljitettävyyteen, eli mittaus-tulos pitää voida jäljittää kansallisiin tai kansainvälisiin mittanormaaleihin katkeamattoman kalibrointien ketjun avulla. Suurjännitemittauksessa keskeisin häiriöherkkyteen liittyvä seikka on sähkömagneettinen yhteensopivuus. Mittausjärjestelmän kokonaisuutena tarkastelu tarkoittaa, että kytkentäjohtimien, maadoitusten ja muiden mittauspiirin parasiittisten komponenttien vaikutus on otettava huomioon. Lisäksi itse mittalaitteet apukomponentteineen kuormittavat mittauspiiriä ja vaikuttavat koejännitteeseen, minkä

vuoksi mittarien on oltava kytkettynä testauspiiriin koko testausprosessin ajan. Lisäksi mittausjärjestelmää suunniteltaessa on turvallisuusseikat otettava huomioon. [4]

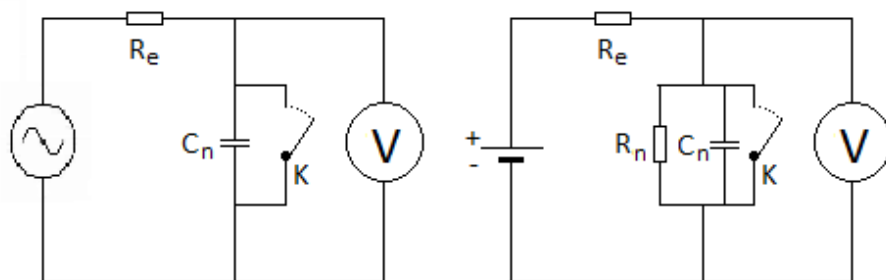
3.2 Läpilyönnin sähkötekniinen mallintaminen ja havaitsemismekanismit

Läpilyönnin tapahtuminen havaitaan yleensä voimakkaana äänenä tai valonvälähdyksenä, mutta näihin perustuva havainnointi on epätarkkaa. Läpilyönnin havaitsemistekniikat perustuvat läpilyönnissä tapahtuvien sähköisten suureiden, yleensä virran tai jännitteen, muutoksiin [14].

Tutkittavan eristenäytteen ja elektrodien muodostamaa kokonaisuutta voidaan vaihtovirtapiirissä mallintaa tasokondensaattorina, jossa kondensaattorin pinta-ala A on elektrodin pohjan pinta-ala ja etäisyys l on eristenäytteen paksuus. Näytteen sähköpiiriin muodostama kapasitanssi lasketaan kaavan

$$C = \frac{\epsilon A}{l} \quad (3.1)$$

mukaan. Ennen läpilyöntiä testauspiiri on mallinnettavissa säädettävällä jännitelähteellä, näytettä kuvaavalla kondensaattorilla ja mahdollisesti tämän kanssa sarjassa olevalla vastuksella R_e , jota käytetään virran rajoittamiseksi. Kondensaattorin rinnalle on kytketty jännitemittari, mutta tämän resistanssi on hyvin suuri, yleensä kymmeniä tai satoja megaohmeja, jolloin piirissä ennen läpilyöntiä kulkevan virran määrää pääasiassa näytteen impedanssi. Johdoilla on myös jonkin verran resistanssia ja induktanssia, mutta ne ovat kondensaattorin impedanssiin verrattuna merkityksettömiä. Tasajännitteellä mitauspiiri on muuten samanlainen, mutta näytettä kuvataan pysyvässä tilassa kondensaattorin lisäksi sen rinnalle kytkettynä suuriresistanssisena vastuksena, joka kuvaa näytteen läpi kulkevaa pysyvän tilan vuotovirtaa.

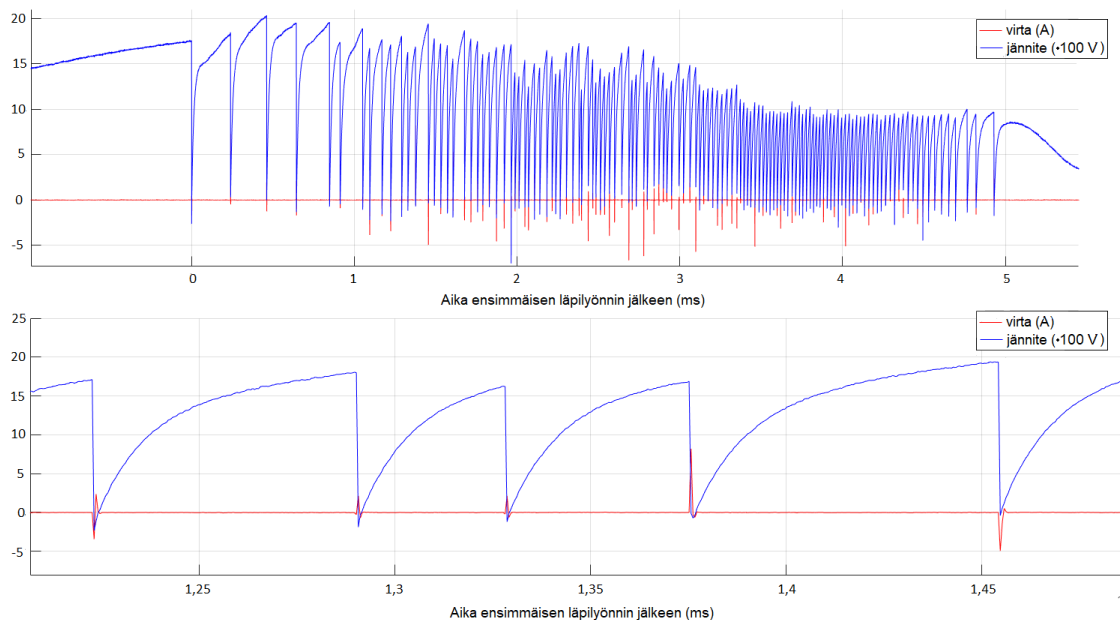


Kuva 7. Yksinkertaistettu läpilyöntipiirimalli vaihtojännitteelle (vasemmalla) ja tasajännitteelle (oikealla). Johdinten resistanssia ja induktanssia ei ole huomioitu ja jännitemittari erotetaan käytännössä aina jännitteenjakajalla muusta testauspiiristä. Läpilyöntihetkellä kytkin K sulkeutuu oikosulkien näytteen impedanssin.

Läpilyönnin tapahtuessa eristettä kuvaava kondensaattori oikosulkeutuu, jolloin jännite näytteen yli putoaa nolleen. Kondensaattorin varauksen purkautuessa tapahtuu hyvin

lyhyt virtapulssi. Juuri ennen jännitteen putoamista tapahtuu yleensä hyvin nopea jännitetransientti, jonka aikana jännite voi nousta moninkertaiseksi sitä edeltäneeseen arvoon verrattuna. Korkea jännitepiikki aiheutuu todennäköisesti virtapiirin oikosulkeutumisesta läpilyönnin aikana. Tämä on analoginen erottimien päälle- ja poiskeytymiseen liittyville valokaaren katkeamisille ja jälleensyttymisille, jotka aiheuttavat hyvin korkeataajuisen (100 kHz-10 MHz) värähtelyn [4].

Läpilyönnin jälkeen jännite kondensaattorin yli palautuu yleensä osittain, koska läpilyönti polttaa eristeeseen reiän joka välittömästi täyttyy ympäröivällä aineella, testaus-
tavasta riippuen ilmalla tai öljyllä. Toisilla materiaaleilla syntyy läpilyöntireikien reunoille palamisprosessin seurauksena hiiltä, joka on johtavaa ja jättää läpilyöntikohdan oikosulkuun läpilyönnin jälkeenkin, jolloin jännitteen palautumista ei tapahdu. Tässä tapauksessa virta asettuu pysyvän tilan oikosulkuvirraksi, jonka suuruutta rajoittaa ainoastaan etuvastus R_e . Yleensä läpilyönnin jälkeinen jännite on jonkin verran pienempi kuin sitä edeltävä jännite. Jännitteen putoamisen suuruus riippuu pääosin läpilyönnissä syntyvän purkauskanavan laajuudesta ja johtavuudesta. Läpilyönnit ja osittaispurkaukset toistuvat ensimmäisen läpilyönnin jälkeen niin kauan kuin elektrodivälin yli on riittävän suuri jännite, tai kunnes jatkuvan oikosulun aiheuttama hiiltymä on muodostunut koko näytteen läpi. Itse läpilyönnin aiheuttaman oikosulun kesto on yleensä mikrosekuntien luokkaa, mutta vaihtelee paljon materiaalin ja käytetyn testijärjestelyn mukaan. Matlabilla piirretty jännitemuoto erään AC-läpilyönnin mittausdatan pohjalta on seuraavassa kuvassa.



Kuva 8. Esimerkkikäyrä jännitteestä ja virrasta kuivan paperin AC-läpilyönnissä 5 ms ensimmäisen läpilyönnin jälkeen (ylempi) ja zoomattu kuva 1,2-1,5 ms kohdalta (alempi).

Kuvaajasta nähdään, että läpilyöntien välisten jännitepiikkien huippuarvo laskee tasaisesti, kunnes saturoituu johonkin arvoon. Hyvin nopea oikosulun päälle- ja poiskykeytyminen jatkuu jännitteen itseisarvon kasvaessa jälleen riittävän suureksi. Jännitepiikkien huippu jää melko tarkkaan 1,0 kV kohdalle seuraavilla verkkotaajuuden puolijaksoilla. Jännitteen palautuminen kestää huomattavasti kauemmin kuin sen putoaminen nollaan läpilyönnissä. Virtapiikit ovat hyvin lyhyitä ja niiden suuruus ja polariteetti vaihtelevat. Polariteetin vaihtelu saattaa olla mittauspiirissä esiintyvän värähtelyn aiheuttamaa vääristymää, jota ei kyseisen mittauksen näytteenottotaajuudella pysty näkemään tarkasti. On huomattava, että läpilyöntien jänniteprofiili vaihtelee tapauskohtaisesti, eikä yksittäinen kuva anna yleispätevää mallia jännitteen ja virran käyttäytymisestä läpilyöntitilanteessa.

Yksinkertaisin tapa havaita läpilyönti on jännitteen putoaminen läpilyönnin jälkeiseen arvoon. Vanhimmissa laitteissa, joissa jännite luettiin suoraan viisarinäytöltä, tämä on ollut yleinen tapa. Viisarimittarit ovat hitaita reagoimaan, eivätkä siksi reagoi lainkaan läpilyönnin aikaisiin jännitetransientteihin. Läpilyönnin tunnistaminen automaattisesti kynnysarvoon perustuvalla menetelmällä on jännitteen perusteella hankalaa, koska jännitteen putoamistaso on riippuvainen jännitteen suuruudesta. Tällöin kiinteän kynnysarvon omaavaa relettä ei voida käyttää, jos mitattavissa läpilyöntijännitteissä on vähänkin hajontaa. Läpilyönnissä esiintyvät jännitetransientit taas ovat liian lyhytaikaisia, jotta sähkömekaaniset releet voisivat havaita niitä. Digitaalisella ohjelmoitavalla mittausjärjestelmällä jännitteen hetkellinen putoaminen nollaan on ehkä yksiselitteisin tapa tunnistaa läpilyönti, mutta vaatii suuren näytteenottotaajuuden.

Toinen tapa havaita läpilyönti on näytteen läpi kulkevan virran voimistuminen joko läpilyöntitransientin aikana tai tätä seuraavassa pysyvässä oikosulkuutilassa [14]. Mittalaitteeseen asetetaan kynnysvirran arvo, jonka ylittyessä mittalaite reagoi. Kynnysvirran arvon on oltava huomattavasti suurempi kuin kondensaattorin läpi kulkeva kapasitiivinen virta AC:llä tai pysyvän tilan vuotovirta DC:llä, jotta laite ei reagoisi niihin. Kynnysvirran on oltava myös suurempi kuin mahdollisten osittaispurkauksien tai laitteen magnetoinnin aiheuttama virta [14]. Virtatransienttiin perustuvassa tunnistuksessa mittalaite ei saisi reagoida osittaispurkausten aiheuttamiin virtapiikkeihin. Sähkömekaaniset releet eivät ehdi reagoimaan läpilyönnin aikaiseen virtatransienttiin, mutta kylläkin läpilyöntiä seuraavaan oikosulkuvirtaan. Virtarele olikin yleisin automaattinen läpilyönnin katkaisumekanismi analogiakomponenttien aikakaudella, ja sitä käytettiin esimerkiksi teollisuuslaitosten turvalaitteissa. Menetelmä on periaatteellisesti edelleen käytössä, mutta nykyisin käytetään pääasiassa digitaalisia releitä, joiden kynnysvirran arvo on helposti säädettävissä ja joita on monipuolisesti saatavilla erilaisiin olosuhteisiin. Koska useimpien virtamittarien tarkkuusalue on parempi suuremmilla virran arvoilla, virranmittaus sijoitetaan usein muuntajan ensiöpuolelle, jossa virrat ovat suurempia. Oikosulkuvirtamenetelmä toimii erityisen hyvin, jos näytteeseen syntyy oikosulkua ylläpi-

tävä johtava purkauskanava. Jos johtavaa kanavaa ei synny, oikosulkuvirtaa on mahdollista tasoittaa ainakin teoriassa lisäämällä piiriin induktanssia.

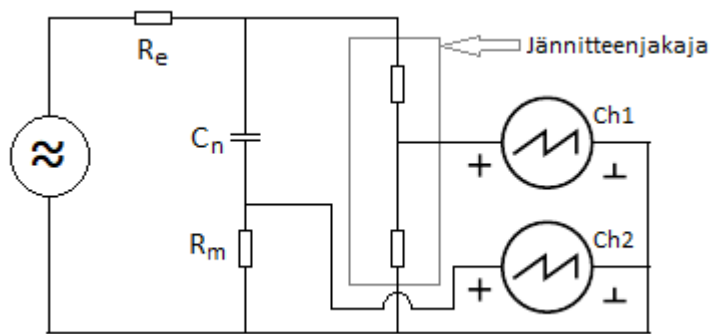
Digitaalisella jatkuvasti dataa tallentavalla mittausjärjestelmällä on mahdollista havaita läpilyöntihetken virtatransientti, mutta menetelmässä on omat ongelmansa. AC:lla osittaispurkausten tuottamat virtapiikit saattavat nousta lähelle läpilyönnin virtapiikkien arvoja, ja läpilyönnin virtapiikkien maksimiarvo voi vaihdella suuresti ollen pienimmillään samaa luokkaa osittaispurkauksien aiheuttamien virtapiikkien kanssa. Tällöin ainoastaan läpilyöntiin reagoivan kynnysvirran arvon määrittäminen on hankalaa. DC:llä menetelmä toimii luotettavammin, koska osittaispurkauksia esiintyy harvemmin ja niiden virtatransientit jäävät läpilyöntiä vastaavia huomattavasti matalammiksi.

Kolmas tapa läpilyöntimittauksiin on virran ja/tai jännitteen muutosnopeuden (di/dt ja du/dt) tarkkailuun perustuvat menetelmät. Näytteen läpi kulkevaa vuotovirtaa voidaan mitata jatkuvasti ja viimeisimpien mittausten mukaan lasketaan virran muutosnopeus. Muutosnopeuden ollessa tarpeeksi suuri laite reagoi siihen. Samoin jännitteen suuren muutosnopeuden perusteella voidaan tunnistaa läpilyönti. Derivaattoreita on ollut mahdollista rakentaa analogisesti operaatiovahvistinpohjaisesti, mutta digitaalitekniikka on tehnyt mahdolliseksi datan derivoinnin mikroprosessorilla, mikä on tehnyt menetelmän huomattavasti helpommaksi ja yleisemmäksi. Näissä menetelmissä on yksinään käytettynä ongelmana se, että myös osittaispurkaukset voivat aiheuttaa nopeita suureiden muutoksia, mikä voi johtaa virhepäätelmiin. Mittausohjelmistoilla on mahdollista ohjelmoida läpilyönnin tunnistusalgoritmi, joka sisältä useita ehtoja, joiden yhtäaikainen toteutuminen johtaa ilmoitukseen läpilyönnistä. Hyvin lyhyen ajan sisällä tapahtuva virran nousunopeuden kynnysarvon ylittyminen, virran absoluuttisen kynnysarvon ylittyminen ja jännitteen nopea putoaminen todistavat melko luotettavasti läpilyönnin tapahtuneen.

Läpilyöntijännitteen tallennus perustuu analogisissa järjestelmissä niin sanottuihin max-hold-piireihin eli huippujännitteen pitopiireihin. Ne perustuvat kondensaattoreihin, joiden latautuessa latausvirta kulkee diodin läpi. Kun jännite alkaa laskea, kondensaattori ei pysty purkautumaan, koska diodi on estosuunnassa purkausvirtaan nähden, jolloin kondensaattorin yli jää suurin mittauksen aikana esiintynyt jännitteen arvo. Kun jännitemittari on kytketty rinnan tämän kondensaattorin kanssa, mittari jää näyttämään maksimiarvoa läpilyönnin jälkeen. Digitaaliset mittausjärjestelmät tallentavat jännitteen arvoja järjestelmän näytteenottotaajuuden mukaisin välein, ja siihenastinen maksimiarvo voidaan ohjelmallisesti tallentaa erikseen. Standardissa IEC 60243-1 suositellaan vahvasti läpilyöntijännitteen tallentavan mittarin käyttöä [14]. Yksinkertaisissa mittareissa esiintyy kuitenkin ongelma: Mittalaite, jonka taajuuskaista on riittävän leveä tunnistamaan jännitetransientin, tallentaa tämän huippuarvon sitä välittömästi edeltäneen jännitteen arvon sijaan. Transientti pystytään suodattamaan mitattavasta signaalista alipäästösuotimen avulla, mutta suotimen jännitehäviön vaikutus tulokseen on otettava

huomioon. Reaaliaikaista mittausdataa prosessorille lähettävillä mittalaitteilla transientti ei ole ongelma, koska se pystytään suodattamaan mittausdatasta digitaalisesti.

Oskilloskooppiin perustuvissa menetelmissä näytteen yli olevan jännitteen käyrämuoto kuvataan oskilloskoopin näytölle keskimäärin verkkojakson verran ennen ja jälkeen läpilyöntihetken. Yleisesti käytetyssä menetelmässä oskilloskooppi mittaa yhtäaikaaisesti näytteen yli olevaa jännitettä ja näytteen läpi kulkevaa virtaa, joka on käytännössä näytteen kanssa sarjassa olevan vastuksen yli olevaa jännite, joka skaalataan virraksi Ohmin lain mukaan. Oskilloskoopin triggeraushetki määritetään tällöin virran kynnysarvon avulla läpilyönnin aikaisesta virtapiikistä. Triggerin kynnysarvon ylittyessä oskilloskooppi tallentaa jännitteen käyrämuodon lyhyeltä ajanjaksolta ennen ja jälkeen triggeraushetken. Tallennettu jännitekäyrä tulee näkyviin oskilloskoopin näytölle ja voidaan tallentaa numeerisena datana. Läpilyöntijännite luetaan vaihtojännitteellä läpilyöntiä edeltäneen jännitehuipun arvosta ja tasajännitteellä läpilyöntiä edeltäneestä arvosta.



Kuva 9. Periaatekuva läpilyöntitestauksessa käytettävästä oskilloskooppikytkennästä

Edellä kuvatun menetelmän mukainen oskilloskooppikytkentä on esitetty kuvassa 9. Suurjännite kytketään kanavaan 1 jänniteenjakaajan välityksellä. Kanava 2 mittaa jännitettä näytteen C_n kanssa sarjassa olevan mittausvastuksen R_m yli. R_m :n kokoluokka on pieni, yleensä 1-10 Ω . Jänniteenjakaajan jakosuhte riippuu mitattavan jännitteen suuruudesta. Myös muunlaisten oskilloskooppimenetelmien, kuten jännitetransienttiin perustuvan triggerin käyttäminen on mahdollista, jos niiden todetaan toimivan luotettavasti kyseisessä testijärjestelyssä.

Oskilloskooppimenetelmien etuna on se, että jännitekäyrästä voidaan yksiselitteisesti todeta läpilyönnin tapahtuneen ja välttää osittaispurkauksien aiheuttamilta virhepäätelmiltä. Lisäksi voidaan tutkia jännitemuodon epäpuhtautta sekä jännite- ja virtatransienttien kestoajkoja ja käyrämuotoja. Oskilloskooppimenetelmät ovat käytännössä ainoita päteviä mittausmenetelmiä suunnittelu- ja tyyppitestauksessa.

Menetelmät kuitenkin soveltuvat huonosti rutiinitestaukseen, koska ne ovat hitaita ja monimutkaisia toteuttaa, ja vaativat käyttäjältä syvällisempää läpilyönti-ilmiön ymmärtämistä kuin suoraan numeroarvon lukemiseen perustuvat mittalaitteet. Oskilloskoopit

ovat usein resoluutioltaan epätarkkoja verrattuna yleismittareihin. Lisäksi menetelmissä on haasteena, että oskilloskoopin ja sen mittapäiden suora kytkeminen testipiiriin muodostaa usein maasilmuksia ja ylimääräisiä impedansseja, joten tilanne ei täysin vastaa läpilyöntitestilaitteen normaalia toimintatilaa. Jotta oskilloskooppia voidaan käyttää luotettavasti mittauksiin, on huolehdittava, että testipiirin maadoitusjärjestely on sellainen, ettei merkittävää virhettä aiheuttavia maasilmuksia esiinny. Usein myös oskilloskoopin liitäntäjohtojen vaikutusta on tarpeen kompensoida.

3.3 Elektrodijärjestelyt

Elektrodien tehtävänä on läpilyöntitestauksessa muodostaa kondensaattorirakenne näytteen kanssa. Elektrodien jännite-eron ja geometrian perusteella muodostuu sähkökenttä, joka aiheuttaa läpilyöntiin johtavan jänniterasituksen näytteessä. Kiinteän eristeen mittauksissa elektrodit ovat useimmiten metallisia lieriöitä, joista toinen yhdistetään jännitegeneraattorin tuottamaan jännitteeseen ja toinen maapotentiaaliin. Edellä mainittua kutsutaan yleisesti yläelektrodiksi ja jälkimmäistä alaelektrodiksi.

Perinteisiä lieriöelektrodeja käytettäessä näyte asetetaan alaelektrodin päälle, ja yläelektrodi asetetaan näytteen päälle. Tällöin alaelektrodi on pinta-alaltaan huomattavasti suurempi, yleensä halkaisijaltaan noin kolminkertainen yläelektrodiin verrattuna. Suuremman alaelektrodin käyttö perustuu pitkälti käytännöllisyyteen, koska se ei vaikuta sähkökenttäjakauman homogeenisuuteen parantavasti [9]. Rakenne on tukevampi ja yläelektrodi peittää aina saman alan näytteestä, jolloin kohdakkain asetteluun ei tarvitse kiinnittää huomiota rutiinitestauksessa. Elektrodien muodolla ja koolla on merkitystä pinta-alavaikutuksen takia, joten niiden koot on määriteltävä sähkötekniisissä standardeissa. Standardin IEC 60243 suosittelemat elektrodikoot ovat yläelektrodille 25 ± 1 mm ja alaelektrodille 75 ± 1 mm [14].

Läpilyöntitestauksella tavoitellaan mahdollisimman homogeenista sähkökenttää elektrodivälissä. Tasopohjaista elektrodia käytettäessä syntyy sähkökentän taipumisen takia elektrodin reunojen lähelle huomattava sähkökentän tihentyminen. Ratkaisuna sähkökentän tasoittamiseen elektrodin pohjaa on pyöristettävä. Saksalainen fyysikko Walter Rogowski kehitti mallin elektrodien pyöristämiseksi, jossa niiden pohjan muoto määritellään sähköisen potentiaalin tasa-arvopintana pinta-alaltaan äärettömän maapotentiaalissa olevan levyn yläpuolella. Todellisuudessa kolmiulotteinen elektrodirakenne on z -akselin suhteen symmetrinen, jolloin sen poikkileikkauksen tasa-arvokäyrät vastaavat todellisia tasa-arvopintoja ja mallinnus voidaan tehdä kaksiulotteisena. Tasa-arvokäyrät mallinnetaan yleisesti muuttujan Φ parametrisoituina käyrinä, joiden x - ja y -koordinaatit ovat

$$x = \frac{a}{\pi} (\Phi + e^{\Phi} \cos(\Psi)) \quad (3.2a)$$

$$y = \frac{a}{\pi}(\Psi + e^{\Phi} \sin(\Psi)) \quad (3.2b)$$

ja joissa a tarkoittaa elektrodin karakteristista etäisyyttä äärettömän suuresta maapotentiaalitasosta, ja Ψ kuvaa kaareutumisen jyrkkyyttä. Rogowski havaitsi, että kun $\Psi \leq \pi/2$, sähkökentän arvo on yläelektrodin reunan ulkopuolella aina pienempi kuin elektrodin keskiakselilla. Raja-arvolla $\Psi = \pi/2$ käyrän koordinaatit yksinkertaistuvat muotoon

$$x = \frac{a}{\pi} \Phi \quad (3.3a)$$

$$y = \frac{a}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + e^{\Phi} \right) \quad (3.3b)$$

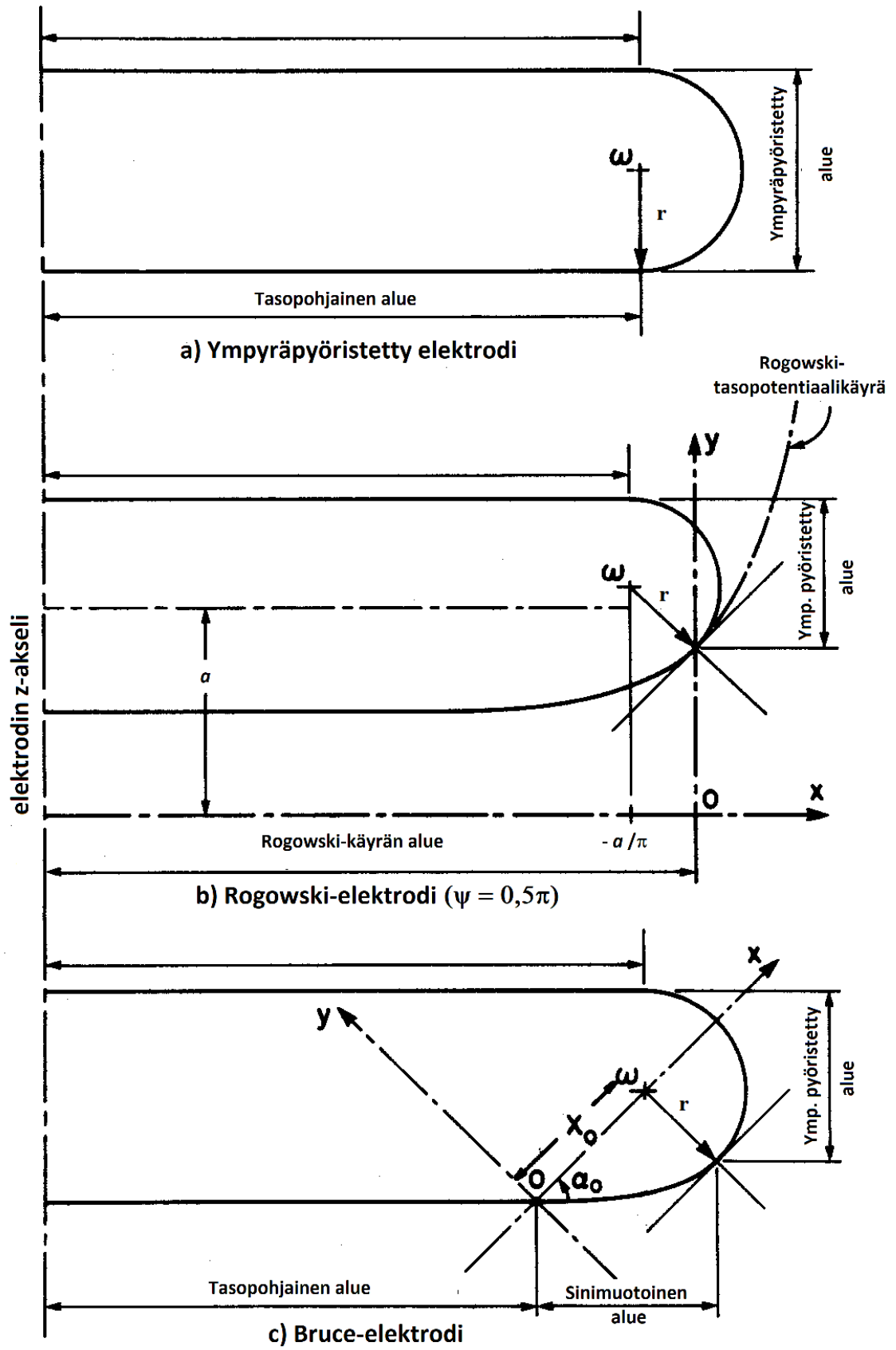
jota kutsutaan tavanomaiseksi Rogowski-malliksi, ja jota on yleisesti käytetty sen yksinkertaisuuden takia. Lähemmäksi homogeenista kenttää päästään hieman pienemmillä Ψ :n arvoilla. Rogowski-muotoilulla on saatu sähkökentän vaihtelun hajonnaksi parhaimmillaan kertaluokkaa 10^{-7} oleva osuus keskimääräisestä sähkökentästä. [10]

Rogowski-muodon laskukaava on melko monimutkainen sisältäen trigonometrisia ja eksponenttifunktioita, mikä oli ongelma ennen tietokonepohjaisten mallintamishojelmien kehittymistä. Tämän takia etsittiin yksinkertaisimpia approksimaatioita elektrodien muodolle. Tunnetuin tällainen approksimaatio on Brucen malli, jossa mallinnuksen pohjana ovat sini- ja kosinifunktiot. Elektrodin pohjaa kuvaava käyrä koostuu siinä kolmesta osasta: tasaisesta pohjasta, ympyräpyörästetystä osasta ja niiden välillä olevasta erillisten Brucen elektrodyhtälöiden mukaan määritetystä osasta. Brucen malli ei ole aivan niin tarkka kuin Rogowskin malli ja siinä sähkökentän arvojen hajonta on pienimmillään kertaluokkaa 10^{-2} eli prosentin luokkaa. [10]

Periaatekuvat yleisimmistä elektrodityypeistä on esitetty kuvassa 10. Merkintä r tarkoittaa ympyräpyöristykseen pyöristyssädettä, O koordinaatiston origoa ja ω ympyrän keskipistettä. Kulmaa α_0 käytetään käyrän sinimuotoisen osan määrittämiseen. Yhtälöt on määritetty kuvien pohjalta levyelektrodeille, mutta ne ovat sovellettavissa lieriöelektrodeille ottamalla huomioon vain levyn alempi puolisko ja jatkamalla elektrodin reunaa ylös reunakäyrän pystysuuntaista tangenttia pitkin.

Kolmas tunnettu elektrodimallinnusprofiili on Bordan profiili. Sen mallinnuksessa käytetään trigonometristen funktioiden lisäksi luonnollista logaritmia. [17]

Lieriöelektrodien ohella muita elektrodityyppejä ovat pallo- ja levyelektrodit. Palloelektrodijärjestelmässä yläelektrodi on pallo, ja alaelektrodi on yleensä levymäinen. Näyte kappaleeseen kaiverretaan kuoppa, johon yläelektrodi asetetaan. On myös olemassa koejärjestelyjä, joissa molemmat elektrodit ovat palloelektrodeja ja näyte on levymäinen, jolloin näytteen ja elektrodin välinen tila täytetään epoksihartsilla. [11]



Kuva 10. Yleisimmät elektrodimallit lähteen [10] mukaan

Palloelektrodien hyötynä on yksinkertaisempi valmistus Rogowski-elektrodeihin verrattuna ja sähkökenttäjakauma näytteessä on niillä melko homogeeninen. Rakenteessa ei ole elektrodin reunan lähellä ilmväliä, jossa voisi syntyä liukupurkauksia tai ylilyöntiä. Haittapuolena on näytteen kaivertaminen, mikä on työlästä ja rajoittaa menetelmän paksumiin ($l > 1$ cm) näytteisiin. Palloelektrodeja käytetään lähinnä sisäisen sähköläpilyöntin tutkimiseen, jossa tarkkuus on tärkeää, mutta kustannuksia ja aikaa on hyvin käytettävissä. [11]. Niitä voidaan käyttää myös impregnoitujen näytteiden testauksessa, jossa elektrodit ovat öljyastiassa [18]. Tällöin voidaan käyttää levymäisiä näytteitä, ja elektrodien ja näytteen välinen tila täyttyy luonnostaan öljyllä.

Levyelektrodit ovat ohuita metallilevyjä, joiden väliin näyte asetetaan. Levyelektrodien paksuus on samaa luokkaa tai pienempi kuin näytteen paksuus. IEC-standardin mukaan levyelektrodit soveltuvat paksujen yli 1,5 mm näytteiden testaamiseen [14]. Myös yhdistelmät, joissa alaelektrodi on levy ja yläelektrodi lieriömäinen, ovat mahdollisia.

Elektrodien materiaalina on perinteisesti käytetty messinkiä sen hyvän työstettävyyden vuoksi. Messingin haittapuolena on kuitenkin sen pehmeys, jolloin se kolhiintuu ja kuluu helposti. Tämän takia nykyään ruostumattomasta teräksestä tehtyjen elektrodien käyttö on kasvanut. Ruostumattoman teräksen hyötynä on kovuuden ohella parempi kestävyys kemiallista korroosiota vastaan ja parempi kemiallinen stabiilius. [11]

Käytettyjen elektrodien materiaalin on todettu vaikuttavan testikappaleen läpilyöntilujuuteen. Pääasiallisena syynä eroihin pidetään erilaista avaruusvarauksen injektointimäärää ja -nopeutta eri elektrodimateriaaleilla. Vuonna 2016 tehtiin tutkimus lähteen [19] mukaan, jossa elektrodimateriaalien vaikutusta läpilyöntiin vertailtiin propyleenikarbonaatilla. Elektrodimateriaaleina käytettiin alumiinia, kuparia ja ruostumatonta terästä. Näistä ruostumattomasta teräksestä tehtyjen elektrodien todettiin antavan huomattavasti suurempia läpilyöntilujuuden arvoja kuin muiden metallien, 14 % korkeampi kuin kupari- ja 21 % korkeampi kuin alumiiniektrodeilla. Hajonta oli alumiinilla selkeästi pienempää kuin kuparilla tai teräksellä. Tutkimus tehtiin impulssijännitteellä, mutta avaruusvarausten vaikutus on nähtävissä myös tasajännitteellä [19]. Tutkimus osoittaa, että vertailtaessa eri metallien soveltuvuutta elektrodimateriaaliksi, myös niiden avaruusvarauksen muodostumiseen liittyvillä ominaisuuksilla on vaikutusta. Vaikutuksen absoluuttinen suuruus kuitenkin vaihtelee ja on riippuvainen testattavasta materiaalista ja testijärjestelystä. Lisäksi avaruusvarauksen muodostumiseen mitattavaan materiaaliin vaikuttaa kontaktin voimakkuus elektrodien ja mitattavan materiaalin välillä.

Öljyimpregnoitujen näytteiden mittauksessa elektrodien muotoilulla on pienempi merkitys, koska elektrodeja ympäröivän öljyn permittiviteetti on lähellä näytteen permittiviteettiä, jolloin sähkökentän taipuminen on vähäistä, ja sähkökentän jakauma on homogeenisempi. Esimerkiksi yleisesti impregnointiöljynä käytetyn dodekyylibentseenin $C_{18}H_{30}$ suhteellinen permittiviteetti on noin 2,25. [20]. Yleisesti muuntajissa käytetyn mineraaliöljyn permittiviteetti on hieman pienempi, 2,135 [21]. Öljyn permittiviteetti ei

ole vakio, vaan on riippuvainen käytetyn jännitteen taajuudesta ja altistamisesta jännitteelle, siten että se pienenee taajuuden kasvaessa ja kasvaa pitkäaikaisessa jänniterasituksessa. [20]. Permittiviteettiä pystytään lisäksi keinotekoisesti kasvattamaan lisäämällä öljyyn eräiden metalliyhdisteiden nanopartikkeleita [21]. Sähkökenttajakauaman taasoittumisen lisäksi öljy estää tehokkaasti purkausten etenemistä, minkä vuoksi sitä käytetään myös DC-läpilyöntimittauksissa, joissa permittiviteetillä ei ole vaikutusta.

Impregnoitujen näytteiden mittauksissa käytettävällä öljyllä on permittiviteetin lisäksi vaatimuksena se, ettei se saa olla helposti syttyvää tai räjähdysherkkää. Tämä rajoittaa huomattavasti käytettäviä öljyalaatuja. On kuitenkin joitakin öljyjä, kuten alkyylilientseenit, jotka ovat heikosti reagoivia. Muita läpilyöntitesteihin soveltuvia nesteitä ovat mineraaliöljyt, silikoninesteet ja esteripohjaiset nesteet [14].

3.4 Johtimet ja maadoitukset virhelähteinä

Koska testijärjestelmää on tarkasteltava kaikkien sen osien kokonaisuutena, komponenttien välisten johtimien impedanssit on otettava huomioon. Resistanssin osuus on merkityksetön virranrajoitusvastusta käytettäessä. Johtimilla on johtopituudesta ja johtimen poikkipinta-alasta riippuvaa induktanssia. Lisäksi johtojen muodostamat silmukat lisäävät induktanssia testipiiriin ja toimivat lisäksi antennina häiriösignaaleille. Vierekkäisillä eri potentiaalissa olevilla johtimilla on keskinäistä kapasitanssia, kuten on myös johtimen ja maapotentiaalin välillä. Mitä suurempi tällainen hajakapasitanssi on, sitä suurempi vuotovirta kyseisten johtimien välillä kulkee. Oskilloskoopin yhdyskaapeleiden kapasitanssi maahan nähden on sitä luokkaa, että se helposti vääristää kapasitiivisen jännitteenjakajan jakosuhdetta, mikä johtaa oskilloskoopille menevien signaalien muodon vääristymiseen [22].

Korkeilla taajuuksilla johdotuksien geometriasta aiheutuvien hajainduktanssien ja hajakapasitanssien merkitys korostuu, koska induktiivinen reaktanssi kasvaa taajuuden suhteessa ja kapasitiivinen reaktanssi pienenee lisäten vierekkäisten johtojen välisiä vuotovirtoja. Vaikka AC- suurjännitepiirit operoivat lähes poikkeuksetta 50 Hz verkkotaajuuksilla, niissä esiintyy korkeataajuisia transienttivärähtelyjä. Nopeiden pulssimaisten jännitteiden suurjännitetestauksessa korkeisiin taajuuksiin liittyvät ilmiöt ovat merkittävämpiä. Induktiivisten ja kapasitiivisten komponenttien välillä syntyvät resonanssi-ilmiöt vahvistavat häiriösignaaleja, jos ne osuvat sopivalle taajuudelle.

Johdinten impedansseja voidaan vähentää minimoimalla johtojen pituutta ja induktiivista hajareaktanssia sijoittamalla meno- ja paluujohdot lähemmäksi, ettei silmukoita muodostu. Koska lähekkäiset eri potentiaaleissa olevat johdot toisalta lisäävät kapasitiivista vuotovirtaa, optimaalisin ratkaisu löytyy leveän silmukan ja vierekkäisten johtojen välimaastosta. Kaapeleiden kapasitanssista johtuvia vääristymiä vähentää oleellisesti pintakerroksestaan maadoitettujen koaksiaalikaapeleiden käyttö. Vaikka koaksiaalikaapelin

kapasitanssi on varsin suuri, se on hyvin tunnettu ja lähes vakio suurella taajuusalueella, eikä riipu mittausjärjestelmän geometriasta.

Eristerakenteen ympärillä olevat maadoitetut tai varautuneet rakenteet, kuten seinät, lattiat tai sähkölaitteet aiheuttavat häiriöitä eristeen sähkökenttään. Yleisesti määritellään, että nämä häiriöt ovat merkittäviä, jos niiden etäisyys on alle 1,5 kertaa elektrodivälin etäisyys, jossa läpilyönti tapahtuu. Käytännössä näillä ei ole siten merkitystä paperieristysten läpilyöntimittauksissa, joissa elektrodien välissä on ainoastaan tutkittava paperinäyte, jonka paksuus on kymmeniä tai korkeintaan satoja mikrometrejä. [1]

Maadoitetuilla ja varautuneilla rakenteilla on vaikutusta myös niiden läheisyydessä oleviin johtimiin. Maadoittamattoman kaapelin ja maapotentiaalissa olevan seinän välille syntyy sähkökenttä, joka on sitä voimakkaampi, mitä lyhempi väli on. Jos väli on riittävän lyhyt ja heikosti dielektristä ainetta, kuten ilmaa, ilman jännitelujuus saattaa ylittyä aiheuttaen osittaispurkauksia tai jopa läpilyönnin. Tämän torjumiseksi käytetään läpivientieristimiä suurjännitteisten johtojen kulkiessa seinien tai muiden rakenteiden läpi.

Koska maaperän ylimpiin kerroksiin ja rakennuksen yleiseen maadoitusjärjestelmään välittyy häiriösignaaleja teollisuuslaitoksissa olevien tehoelektroniikkalaitteiden maadoituksesta, jännitemittalaitteita ei pitäisi kytkeä rakennusten yleiseen maadoitusjärjestelmään. Sen sijaan olisi hyvä käyttää erillistä testialueen maadoitusta, joka maadoitetaan erillisillä maadoitussauvoilla useiden metrien syvyyteen. Nämä maadoitussauvat on eristettävä ylemmistä maakerroksista. Testialueen maadoitus eristetään kokonaisuudessaan rakennuksen yleisestä maadoituksesta. Käytännössä erillisen maadoituksen toteuttaminen vaihtelee ja varsinkin vanhemmissa teollisuusrakennuksissa se puuttuu kokonaan. [1]

Maasilmukat ovat yleinen häiriötekijä mittauspiireissä, joissa johtimien etäisyydet ovat pitkiä. Oskilloskooppi aiheuttaa myös useimmiten maasilmukan testipiiriin. Mittauspiirien läheisyydessä on hyvin usein käynnissä olevia sähkölaitteita ja sähkönjakelujohtoja, joissa kulkeva virta synnyttää ympärilleen magneettikentän. Koska virta muuttuu sinimuotoisesti, myös syntyvä magneettikenttä on sinimuotoista. Faradayn lain mukaan muuttuva magneettikenttä indusoi virtasilmukoihin jännitteen. Indusoituvan jännitteen suuruus on verrannollinen silmukan pinta-alaan. Maasilmukat ovat erityisen haitallisia pieniä virtoja tai jännitteitä mitattaessa, jossa niihin indusoituvien jännitteiden osuus mitattavasta jännitteestä on merkittävä. Läpilyöntimittauksiin liittyvä esimerkki tällaisesta suureesta on näytteen läpi kulkeva vuotovirta. Sen lisäksi, että maasilmukat aiheuttavat ylimääräisiä virtoja ja jännitehäviöitä mittauspiiriin, ne toimivat antennina häiriösignaaleille [1].

Yksi maadoitukseen liittyvä häiriötyyppi on jännite-ero nimellisten maapotentiaalien välillä, erityisesti testauslaboratorion suojamaakiskon ja laitteiden virransyötön, yleensä pistorasioiden, maapotentiaalien välillä. Pääasiallinen ongelman aiheuttaja on vanhem-

missa rakennuksissa vallalla oleva TN-C -maadoitusjärjestelmä. Siinä ei ole erillistä suojamaajohtoa, vaan laitteen nollajohto on yhdistetty maapotentiaaliin jakeluverkon maadoitetussa pisteessä, jolloin se toimii vikatilanteessa suojamaajohtona [23]. TN-C -järjestelmä on ongelmallinen läpilyöntimittauksen kannalta, jos mittauksessa käytetyt instrumentit mittaavat jännite-eroa maapotentiaaliin. Läpilyöntitestausjärjestelmän nol-lapotentiaali, jossa negatiivinen elektrodi on, eroaa todellisesta referenssimaasta nol-lajohdossa tapahtuvan jännitehäviön takia. Tästä seuraa, että jännitemittari näyttää nol-lasta poikkeavaa jännitettä, vaikka jännitteen syöttö ei ole päällä.

Mittaushäiriöiden torjunnan kannalta parempi maadoitusjärjestelmä on TN-S-järjestelmä. Siinä on erillinen suojamaajohto, joka on yhdistetty laitteen kuoreen. Suojamaajohdossa ei normaalitilanteessa kulje virtaa [23]. Myös näiden yhdistelmä TNC-S-järjestelmä, jossa syöttävän verkon puolella nolla- ja suojamaa on samassa johdossa ja ne erkanevat yleensä viimeisellä jakorasiolla, aiheuttaa TN-C -järjestelmää vähemmän haitallista potentiaalieroja.

Maasilmukoiden pienentämiseksi rakennuksen maadoitus, testialueen maadoitus, sähkömagneettinen suojakuori ja mittauspiirin maaliitettä tulee yhdistää ehdottomasti vain yhdestä pisteestä [1]. Tätä kutsutaan potentiaalintasaukseksi. Potentiaalitasaus voidaan tehdä myös paikallisesti, jolloin vain välittömästi testipiiriin liittyvät maareferenssit kuten passiivisten mittapäiden ja oskilloskooppien maadoitukset kytketään ulkoiseen maareferenssiin yhdestä pisteestä mahdollisimman lähellä testijärjestelmää. Käytännössä tämä tarkoittaa yhden kattavan maasta erotetun maadoituslevyn asettamista koko testauspaikan alle, johon kaikki testipiirin maadoitettavat osat liitetään, ja joka maadoitetaan yhdestä pisteestä. Paikallinen potentiaalintasaus poistaa lisäksi TN-C -järjestelmästä aiheutuvan potentiaalieron rakennuksen eri maareferensseissä. Toinen vaihtoehto on erotusmuuntajien käyttö, jossa erilliset maapotentiaalit on galvaanisesti erotettu toisistaan, jolloin suljettuja maasilmukoita ei pääse syntymään.

3.5 Mittausinstrumentit

Mittausinstrumenttien valinta on keskeinen osa läpilyöntitestauksen suunnittelua. Nii-den lineaarisuus ja dynaamiset ominaisuudet vaikuttavat siihen, miten luotettavasti ha-luttuja suureita pystytään mittaamaan. Mittalaitteiden oikeanlainen kytkeminen testipiiriin on tärkeää. Läpilyöntijännite on mitattava siten, että mittausinstrumentin positiivi-nen ja negatiivinen mittapää on samoissa potentiaaleissa kuin ylä- ja alaelektrodit. Esi-merkiksi virranrajoitusvastusta ei saa kytkeä mittauskohdan ja elektrodin väliin. Muun-tajan ensiöpuolelta mitattuja ja muuntosuhteella skaalattuja suureita pystyy käyttämään vain karkeisiin approksimaatioihin, kuten läpilyöntivirran suuruusluokan määrittämi-seen virrankatkaisurelettä varten.

3.5.1 Mittausinstrumenttien dynamiikka

Mittausinstrumenttien dynaamisilla ominaisuuksilla on merkitystä laitteiden läpilyöntimittauksiin soveltuvuuden kannalta ja niillä on myös suora vaikutus mittausvirheeseen. Lineaarista mittausjärjestelmää mallinnetaan nelinapaesityksenä, jossa on kaksi sisäänmenoa ja ulostuloa, erikseen avoimelle (suureena jännite) ja suljetulle (suureena virta) järjestelmälle. Ulostulon ja sisäänmenon suhde on järjestelmän siirtofunktio, jota merkitään yleisesti G :llä. [4]. Todellisuudessa mittausjärjestelmät eivät ole täysin lineaarisia, ja erityisesti monimutkainen maadoitusjärjestelmä ylimääräisine virtateineen aiheuttaa sen, ettei komponentti ole nelinapaesityksen mukainen. Kuitenkin useimmiten eroavaisuudet ovat sen verran pieniä, että riittävän hyviä approksimaatioita saadaan nelinapamallia käyttämällä.

Askelvaste tarkoittaa järjestelmän vastetta eli ulostuloa silloin kun sen sisäänmenona on äärettömän nopeasti nolasta täyteen arvoon nouseva signaali. Käytännön mittauksissa askeljännitteen nousuaika on joitakin nanosekunteja. Askelvaste kuvaa, kuinka nopeasti järjestelmä reagoi muutokseen, eli kuinka suuri viive sillä on. Toisen tai korkeamman kertaluvun systeemeillä askelvaste on lisäksi usein värähtelevä, eli se nousee tavoitearvoa suuremmaksi ja värähtelee vaimentuen sen ympäristössä. Yleensä askelvaste normalisoidaan eli skaalataan yksikköaskelvasteeksi, jonka alkuarvo on 0 ja loppuarvo on 1. [4]

Askelvasteen loppuarvon ja askelvastefunktion erotuksen integraalia ajan suhteen kutsutaan yleisesti muuttuvaksi vastausajaksi. Se lasketaan normalisoidusta askelvasteesta kaavalla

$$T(t) = \int_{t_0}^t (1 - g(t)) dt. \quad (3.4)$$

Kokeelliseksi vastausajaksi T_N kutsutaan vastaavaa integraalia koko mitattavalta aikaväliltä $t_0 - t_{max}$. Osavastausajalla tarkoitetaan vastaavaa integraalia mitattavan aikavälin alkuhetkestä t_0 ajanhetkeen, jolloin askelvastefunktio ensimmäisen kerran saavuttaa arvon 1. Jäännösvastausaika lasketaan kokeellisen vastausajan ja muuttuvan vastausajan erotuksena tietyllä ajanhetkellä. Ylitys kuvaa kuinka korkealle tavoitearvon yläpuolelle askelvaste nousee, ja se lasketaan askelvasteen suurimman arvon ja tavoitearvon erotuksena. Vaimentumisaika tarkoittaa lyhintä aikaa, jonka kuluttua jäännösvastausajan itseisarvo on pysyvästi alle 2 % tästä ajasta. Alkuvääristymäaika on askelvasteen ensimmäisen nousukohdan jyrkimmän tangentin, askelvastefunktion ja aika-akselin väliin jäävä pinta-ala. [4]

Ideaalista askelvastetta on vaikea määritellä yksiselitteisesti, mutta optimaalisessa järjestelmässä osavastausaika, vaimentumisaika ja alkuvääristymäaika ovat mahdollisimman pieniä. Suuri ylitys ja värähtely ovat ei-toivottavia ominaisuuksia, mutta värähtelyssä haitallisempaa on hidas vaimeneminen kuin yksittäinen korkea ylitys. [4]

Jänniteramppia käyttävissä suurjännitekokeissa askelvasteen merkitys on suurin hetkellä, jolloin läpilyönti tapahtuu ja jännite putoaa nopeasti. Jos mittausjärjestelmän vastausaika on hidas, jännite ei putoa heti ja saattaa jopa jatkaa nousuaan vielä läpilyönnin jälkeen. Mitä jyrkempää jänniteramppia käytetään, sitä suurempi virhe aiheutuu. Käytettäessä 100 tai 200 V/s nousunopeuksia virhe on yleensä merkityksetön, mutta salamaimpulssijännitteillä, joilla nousunopeudet voivat olla luokkaa MV/s askelvaste on merkittävä virhelähde.

Taajuusvaste kuvaa mittausjärjestelmän siirtofunktion käyttäytymistä mitattavan signaalin taajuuden muuttuessa. Se jakautuu siirtofunktion itseisarvoa kuvaavaan amplitudivasteeseen ja siirtofunktion vaihesiirtoa kuvaavaan vaihevasteeseen, joista kumpikin on taajuuden funktio. Amplitudivaste on tapana ilmoittaa kuvaajassa desibeleissä, koska vahvistuksen suuruus vaihtelee taajuuden mukaan yleensä huomattavasti.

Amplitudivaste on suurjännitetestauksessa vaihevastetta merkittävämpi, koska jännitteiden itseisarvot ovat merkittävämpiä kuin pätö- ja loistehot. Mittalaitteille määritellään amplitudivasteen avulla taajuuskaistat, eli taajuusalueet, joiden signaaleja ne eivät vaimenna merkittävästi. Merkittävyyden rajana pidetään yleisesti 3 dB pudotusta mittalaitteen tai jännitteenjakajan nimellisestä vahvistuksesta. Monen laitteen järjestelmissä kapein taajuuskaista on määräävä, eli jos yhden laitteen taajuuskaista on hyvin kapea, koko systeemin taajuuskaista on kapea, vaikka muilla laitteilla olisi hyvin laajat taajuuskaistat. Tyypillisesti mittalaitteiden taajuuskaista sijoittuu matalille taajuuksille, usein sisältäen myös DC-komponentin. Yleismittarien taajuuskaista voi loppua jo 50 Hz jälkeen, jolloin ne vaimentavat harmoniset jännitekomponentit ja nopeat transienttipiikit mitattavasta jännitteestä, mikä rajoittaa mittarien tutkimuskäyttöä. Rutiinimittauksissa liian leveästä taajuuskaistasta voi kuitenkin olla haittaa, koska silloin mittalaite tunnistaa mittauksen kannalta epäolennaisia transientteja ja saattaa näin ollen tallentaa virheellisesti transienttipiikin huippuarvon jännitteen tai virran huippuarvona. Tämä ongelma mainitaan standardissa IEC 60243-1, joka kieltää virheellisesti transientin tallentavan laitteen käytön mittauksissa [14]. Kehittyneemmillä digitaalimittareilla ja tietokoneella operoivilla mittausohjelmistoilla ongelmasta päästään kuitenkin helposti eroon suodatuksen avulla.

3.5.2 Jännitteenjakajat

Yleensä mittarit eivät kestä suurjännitteitä, joten ne on erotettava suurjännitepiiristä jännitteenjakajan avulla. Jännitteenjakajan periaate on se, että siinä kaksi impedanssia on sarjassa, jolloin jännite jakautuu komponenttien yli niiden impedanssien suhteessa. Kun mittalaite kytketään rinnan pienemmän impedanssin kanssa, suurjännitepiiriin jännite saadaan kertomalla mittarin näyttämä lukema pienemmän impedanssin ja impedanssien summan suhteella, jota kutsutaan jännitteenjakajan jakosuhteeksi.

Jännitteenjakajat ovat resistiivisiä, jolloin impedanssit ovat vastuksia tai kapasitiivisia, jolloin impedanssit ovat kondensaattoreita. Resistiivisiä jännitteenjakajia käytetään pääasiassa tasajännitteen mittauksessa ja kapasitiivisia jännitteenjakajia vaihtojännitteen mittauksessa. Sekajakajia, joissa on sekä resistiivisiä ja kapasitiivisiä komponentteja voidaan käyttää molempien jännitemuotojen mittaukseen.

3.5.3 Oskilloskoopin mittapäät

Oskilloskoopilla jännitteenjakaja on yleensä sisällytetty sen mittapäähän, mutta erillistä jännitteenjakajaa voidaan myös käyttää. Oskilloskoopin mittapäät ovat joko aktiivisia tai passiivisia, mikä vaikuttaa ratkaisevasti niiden soveltuvuuteen mittauksissa. Passiivinen mittapää on käytännössä yhdistetty resistiivinen ja kapasitiivinen jännitteenjakaja. Mittapäässä on kapasitanssi rinnankytkettynä suuren, vähintään kokoluokkaa 1 M Ω olevan vastuksen kanssa. Oskilloskoopin sisällä on toinen ekvivalenttinen kapasitanssi ja resistanssi. Kaapelin kapasitanssi on mallissa lisättävä oskilloskoopin sisäiseen kapasitanssiin. Passiivisen mittapään negatiivinen napa on aina maadoitettu. Mittapää mittaa siten aina yhden pisteen ja maapotentiaalin välistä jännite-eroa. Aktiivinen mittapää perustuu operaatiovahvistimeen ja se mittaa kahden pisteen välistä potentiaalia differentiaalisesti. [22]

Passiivisten mittapäiden etuna on niiden aktiivisiin verrattuna edullinen hinta sekä pienempi koko, jolloin ne pystytään yleensä kytkemään suoraan kiinni mitattavaan potentiaaliin ja ylimääräisten johtojen ja yhdyskohtien aiheuttamilta häiriöiltä välttämään. Niiden jännitteenkesto on yleensä aktiivisia paljon suurempi, minkä vuoksi niiden avulla pystytään mittaamaan korkeampia jännitteitä. Kapasitiivisen latauksen osuus on lisäksi pienempi kuin aktiivisilla mittapäillä [24].

Passiivisten mittapäiden käytön merkittävin rajoitus liittyy niiden maadoitukseen. Mittapään käyttö vaatii, että jännitelähde, joka on kytketty mittaussiiriin, on myös maadoitettu. Jos mittaussiirissä on kelluva jännite, aiheutuu maadoitusvirta passiivisen mittapään läpi, mikä vääristää tuloksia ja mahdollisesti aiheuttaa ylikuumentumista mittaussiirin johdoilla. Passiiviset mittapäät ovat lisäksi ongelmallisia testipiireissä, joissa ei ole paikallista potentiaalintasausta ja syntyy maasilmukoita. Maasilmukoihin indusoituvat jännitteet aiheuttavat passiivisella mittapäällä nollasta poikkeavan signaalin, joka summautuu jännitelähteen tuottamaan jännitteeseen. Pieniä jännitteitä, jotka ovat amplitudiltaan samaa kertaluokkaa tai pienempiä kuin maasilmukoiden aiheuttamat signaalit ei voida tällöin luotettavasti mitata. Lisäksi passiivisen mittapään jakosuhte on aina signaalia heikentävä eli mittaaminen 1:1 -suhteella ei ole mahdollista. [22]

Aktiivisen mittapään tärkeä etu passiivimittapäähän on se, että se on differentiaalinen, eli mittaa kahden pisteen välistä jännitettä ilman maareferenssiä. Tästä syystä erot järjestelmän maapotentiaaleissa eivät vaikuta mittaustulokseen. Aktiivinen mittapää toimii myös erotusmuuntajana estäen maasilmukoiden syntymisen. Tällöin maasilmukoihin

liittyviä häiriöitä ei esiinny mittaussignaaleissa. Aktiivisilla mittapäillä on mahdollista mitata korkeataajuisempia signaaleja kuin passiivisilla, tosin halvempien aktiivimittapäiden taajuuskaistan yläraja on matalammalla kuin samaa hintaluokkaa olevien passiivimittapäiden [24]. Lisäksi aktiivisten mittapäiden jakosuhte vaihtelee laajemmalla skaalalla ja erityisesti pienien jännitteiden mittaaminen esimerkiksi 1:1 -jakosuhteella tai jopa vahvistavalla jakosuhteella on mahdollista [22]. Aktiivisten mittapäiden jännitteenkesto on yleensä passiivimittapäitä heikompi, jolloin ne eivät sovellu kovin suurten jännitteiden mittaamiseen [24]. Lisäksi niiden haittapuolena on kallis hinta ja se, että ne vaativat ulkoisen teholähteen. Jotkut modernit laitteet pystyvät ottamaan tehoa oskilloskoopin kytkentäjohtoon kautta [24].

Sisäänmeno- ja ulostuloimpedanssit liittyvät sarjaan kytkettyjen instrumenttien järjestelmiin, esimerkiksi mittapään ja oskilloskoopin kytkentään. Sisäänmenoimpedanssi on laitteen impedanssi sen piirin puolelta, jossa laite on kuormana. Ulostuloimpedanssi on vastaava impedanssi piirissä, jossa laite on tehollähteenä. Nämä impedanssit eivät kapasitiivisten komponenttien takia ole vakioita, vaan pienenevät taajuuden kasvaessa [24]. Alle 1000 Hz taajuuksilla ne ovat kuitenkin lähes vakioita, koska resistanssin ja kapasitanssin rinnankytkennässä määräävänä impedanssina on pienemmän haaran impedanssi, joka pienillä taajuuksilla on resistanssi. Aktiivisten mittapäiden ulostuloimpedanssi pysyy taajuuden kasvaessa vakiona pidempään kuin passiivisten mittapäiden [24].

Kun laitteita kytketään sarjaan, optimaalinen tehonkulutus saadaan tilanteessa, jossa yhteen kytkettyjen laitteiden sisäänmeno- ja ulostuloimpedanssit ovat yhtä suuret yhdysjohtoon päissä. Esimerkiksi mittapään ulostuloimpedanssin on oltava yhtä suuri kuin oskilloskoopin tai yleismittarin sisäänmenoimpedanssi. Jos nämä poikkeavat toisistaan merkittävästi, syntyy tehohäviöitä ja mittareiden tapauksessa mittausrvirhe kasvaa. Impedanssien yhteensopivuusongelma voidaan ratkaista käyttämällä säädettävää kapasitanssia mittapään ulostulossa oskilloskoopin puolella [22].

3.6 Mittausten luotettavuus ja oikeellisuus

Mittaustarkkuus on yleinen käsite, joka kuvaa mittauksen täsmällisyyttä ja luotettavuutta. Mittausvirhe ja mittausepävarmuus ovat mittaustarkkuutta kuvaavia matemaattisia suureita. Mittausvirhe tarkoittaa järjestelmässä olevaa systemaattista virhettä, joka voidaan paikantaa ja korjata. Jos mittausrvirhettä ei pystytä korjaamaan, se on huomioitava mittausrjärjestelmän skaalauskerrotimeksi. Mittausepävarmuus tarkoittaa satunnaisten virhetekijöiden aiheuttamaa virhettä, jota ei voida koskaan täysin poistaa ja tuntemattomien systemaattisten virhetekijöiden vaikutusta.

Mittausvirhe määritellään yleensä kalibroinnin avulla. Kalibrointi on mittalaitteen tulosten vertaamista tunnetussa referenssijärjestelmässä saatuihin tuloksiin. Kalibrointi on suoritettava mittalaitteelle säännöllisin väliajoin ja se on dokumentoitava. Kalibroinnissa määritettäviä parametreja ovat skaalauskerroimen itseisarvo kalibroitavan ja referens-

sijärjestelmän välillä, skaalauskerroimen lineaarisuus sekä lyhyt- ja pitkäaikainen stabiilius. Kalibrointi voidaan tehdä koko mittausjärjestelmän lisäksi myös yksittäisille komponenteille, kuten jännitteenjakajille.

Kalibrointimenetelmänä käytetään läpilyöntitestilaitteiden määraikaistarkistuksissa useimmiten tyhjäkäyntimittausta, eli laitteen jännitettä nostetaan siten, että laitteeseen ei ole kytketty kuormaa, jolloin testipiiri on avoin. Tyhjäkäyntimittauksen avulla mittalaitteen skaalauskerroimen arvo ja sen lineaarisuus pystytään määrittämään yksiselitteisesti. Testausjärjestelmän stabiilisia ominaisuuksia sillä voidaan kuitenkin tutkia vain rajoitetusti. Testipiirissä ei esimerkiksi kulje suuria virtoja, jotka lämmittäisivät piirin resistiivisiä komponentteja, ja vaikuttaisivat laitteiston lyhytaikaiseen stabiiliuteen.

Mittausepävarmuus jaetaan kahteen tyyppiin: Puhtaasti tilastollinen eli tyypin A epävarmuus johtuu testattavan muuttujan tilastollisesta luonteesta, ja se oletetaan yleensä jakautuneeksi Gaussin normaalijakauman mukaan [1]. Tilastollista epävarmuutta lisää testien määrän vähentäminen otoksessa [6]. Jokaiselle tilastollisen muuttujan mittausarjalle, jossa on n mittauksia, voidaan määrittää keskihajonta kaavalla

$$s_r = \frac{1}{x_{50}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{50})^2} \quad (3.5)$$

jossa x_{50} on tilastollisen muuttujan keskiarvo. Tyypin A epävarmuus u_r lasketaan kaavan

$$u_r = t s_r / \sqrt{n} \quad (3.6)$$

mukaan, jossa t on vapausastetta n vastaava Studentin jakauman arvo. Riittävän pitkillä mittausarjoilla, joissa on yli 20 mittauksia, ja 95 % luottamusväliä käytettäessä voidaan melko hyvällä tarkkuudella käyttää kiinteää arvoa $t = 2$, jota kutsutaan kattavuuskertoimeksi ja voidaan merkitä myös kirjaimella k [4]. Tyypin A epävarmuutta ei pidä sekoittaa kappaleessa 2.5 esiteltyyn tilastollisen muuttujan varmuusrajamäärittelyyn. Tämä liittyy mittausjärjestelmässä esiintyviin tilastollisiin ilmiöihin, jotka vaikuttavat tulosten hajontaan, eikä ota kantaa itse mitattavan suureen tilastolliseen käyttäytymiseen. Mitattaessa ilmiötä, joka antaisi ideaalisesti samanlaisia tuloksia joka kerta, mittausjärjestelmän epäideaalisuudet aiheuttavat hajontaa tuloksiin.

Toinen epävarmuuden tyyppi on systemaattinen epävarmuus eli tyypin B epävarmuus. [1]. Se johtuu ilmastollisista olosuhteista, järjestelmän epälineaarisuudesta ja epästabiiliudesta. Lisäksi tähän sisältyy mittaukseen vaikuttavat häiriöt sekä mittajan epävarmuus, johon kuuluu mittauksen manuaalinen toisto hieman ideaalisesta ohjeesta poikkeavasti ja mittareiden lukeminen hieman virheellisesti. Usein kalibroinnin epävarmuus lasketaan tähän ryhmään, koska kalibrointitapahtuma on itsessään mittaus, johon vaikuttavat edellä mainitut virhetekijät [4].

Tyypin B epävarmuustekijät ovat käytännössä satunnaisia, koska niiden vaikutuksen suuruutta ja tarkkaa jakaumaa ei tunneta. Niitä ei kuitenkaan voida mallintaa tilastollisen analyysin avulla kuten luokan 1 tekijöitä. Niitä ei voi myöskään yksiselitteisesti määrittää ja niiden vaikutusta kumota kiinteällä korjauskertoimella. Kalibroinnin epävarmuus oletetaan yleensä normaalijakautuneeksi ja muut virhetekijät oletetaan tasajakautuneeksi kaavan

$$s_{sa} = a/\sqrt{3} \quad (3.7)$$

mukaan [4]. Tyypin B keskihajontojen summa lasketaan yksittäisten tekijöiden vektorisummana.

$$s_s = \sqrt{(u_k/2)^2 + \sum_{i=1}^n \frac{u_{Bi}^2}{3}} \quad (3.8)$$

jossa u_k on kalibroinnin epävarmuus, u_B on yksittäisen tyypin B epävarmuustekijän epävarmuus prosentteina ja n on huomioon otettavien epävarmuustekijöiden määrä. Tyypin B epävarmuus saadaan kertomalla keskihajontojen summa kattavuuskertoimella.

Kokonaisepävarmuus lasketaan edelleen satunnaisten ja systemaattisten tekijöiden vektorisummana

$$u_{tot} = \sqrt{u_r^2 + u_s^2} \quad (3.9)$$

Kokonaisepävarmuus pyöristetään aina ylöspäin. [4]

Digitaalisilla mittalaitteilla laitteen resoluutio aiheuttaa rajoituksia mittaustarkkuuteen. Muutettaessa digitaalseksi suureen arvo pyöristyy lähimpään mahdolliseen arvoon, jonka laite pystyy tallentamaan resoluutionsa puitteissa. Täten tulokseen jää epävarmuustekijä, niin kutsuttu kvantisointivirhe, jonka suuruus on korkeimmillaan puolet tallennettavien suureiden arvojen pienimmästä mahdollisesta erosta [7]. Yleismittareilla kvantisointivirheen merkitys on yleensä olematon, mutta 8-bittisillä oskilloskoopeilla se heikentää oleellisesti tulosten tarkkuutta.

Eräänlainen kvantisointivirhe liittyy myös läpilyöntijännitteen tallentamiseen AC-ramppitestissä. Läpilyöntijännite määritellään sinimuotoisen jännitteen huippuarvona läpilyöntiä edeltävällä puolijaksolla. Tämä huippuarvo kasvaa jännitteen taajuudesta ja jänniterampin nousunopeudesta riippuen vakioarvon verran joka puolijaksolla, ja näin syntyvät mahdolliset diskreetit tasot läpilyöntijännitteelle. Esimerkiksi taajuudella 50 Hz ja 100 Hz nousunopeudella tästä johtuva virhe on enintään $\pm 0,5$ V, jolloin se ei ole merkittävä. Käytettäessä hyvin suurta nousunopeutta tai hyvin pientä taajuutta virhe on merkittävästi suurempi.

3.7 Turvallisuus

Suurjännitemittauksessa esiintyy huomattavia virtoja ja jännitteitä, minkä takia turvallisuusseikat on otettava huomioon hyvin tarkasti. Suurjännitetestipiirissä on yleensä suuria impedansseja, jolloin kosketustilanteessa impedanssit jakautuvat siten, että suuri osa virrasta kulkee ihmiskehon läpi, koska ihmiskehon impedanssi on pienempi. Ihmiskehon impedanssi pienenee jännitteen kasvaessa, esimerkiksi 5 kV jännitteellä se on noin 1000Ω [23]. Suurjännitteellisiä osia koskettaessa ihmiskehon lävistävä virta on hyvin suuri, mikä voi johtaa sydänkammiovärinä ja kuolemaan jo hyvin lyhyellä altistusajalla, alle sekunnissa. [23]. Tasavirta on vähemmän vaarallista kuin vaihtovirta, koska lihaskouristukset ja sydänkammiovärinä aiheutuvat pitkälti virran suuruuden vaihtelusta. On arvioitu, että samaan ärsytysvaikutukseen tarvitaan 2-4 -kertainen tasavirta vaihtovirtaan verrattuna [23].

Testilaitteen kuoren maadoitus on tärkeää turvallisuuden kannalta. Erityisesti vanhemmissa sähkölaitteissa on häiriönpoistokondensaattorit laitteen kuoren sekä vaihe- ja nolajohdon välillä. Tällöin nämä muodostavat jännitteenjakajan, ja laitteen kuoreen aiheutuu puolen verkkojännitteen suuruinen jännite, joka voi kosketettuna olla hengenvaarallinen. Kuoren maadoitus estää tämän jännitteen syntymisen. Uusissa laitteissa on ilmoitettu, jos kuoren suojamaadoitusta on käytettävä, mutta vanhempia ja erityisesti itse rakennettuja laitteita käytettäessä tämä varotoimenpide tulee aina tehdä.

Läpilyöntitapahtumaan liittyy lisäksi palo- ja räjähdysvaara hyvin suurilla jännitteillä. Testauspiiri on oikosulussa läpilyönnin aikana ja usein läpilyöntikohdassa esiintyy valokaaria. Testauspiiri lämpenee huomattavasti läpilyöntitapahtuman pitkittyessä. Tämän vuoksi läpilyöntitapahtuman kesto aika on rajattava niin lyhyeksi kuin läpilyönnin tunnistusmekanismien toiminnan kannalta on mahdollista. Testipiirissä kulkevan virran rajoittamiseksi käytetään yleensä sarjavastusta. Sähkövirran lämpövaikutuksen lisäksi läpilyönnin kemialliset reaktiot vapauttavat energiaa ja reaktiotuotteina syntyvät kaasut voivat materiaalista riippuen olla helposti syttyviä.

Ratkaisuna suurjännitetestijärjestelmien turvallisuusongelmille käytetään sekä fyysistä eristämistä ja kulkuesteitä että testipiiriin lisättäviä suojakomponentteja. Jännitteelliset osat pinnoitetaan yleensä eristeillä. Alue, jolla suurjännitettä tuotetaan ja läpilyöntitestit suoritetaan, on usein suljetussa kaapissa tai suuremmissa järjestelmissä puomilla erotetussa huoneen osassa, tai jopa erillisessä huoneessa.

Testipiiriin liitettäviä suojakomponentteja ovat sulakkeet ja ylivirtareleet, jotka katkaisevat jännitteen pois piiristä oikosulkuvirran kasvetta liian suureksi, sekä testauskaapien ja -huoneiden ovissa olevat turvakatkaisijat, jotka kytkevät suurjännitteen pois päältä, jos ovi avataan. Testipiiriä voidaan muokata turvallisemmaksi maadoittamalla kosketettavissa olevia osia, kun niiden fyysinen eristäminen ei ole mahdollista tai se on epäkäytännöllistä. Jos kosketusjännitteelle alttiin osan kiinteästi maadoittaminen on

mahdotonta laitteen toiminnan kannalta, käytetään maadoitussauvoja, joilla kyseinen osa maadoitetaan aina kun jännitteellisten osien lähelle siirrytään.

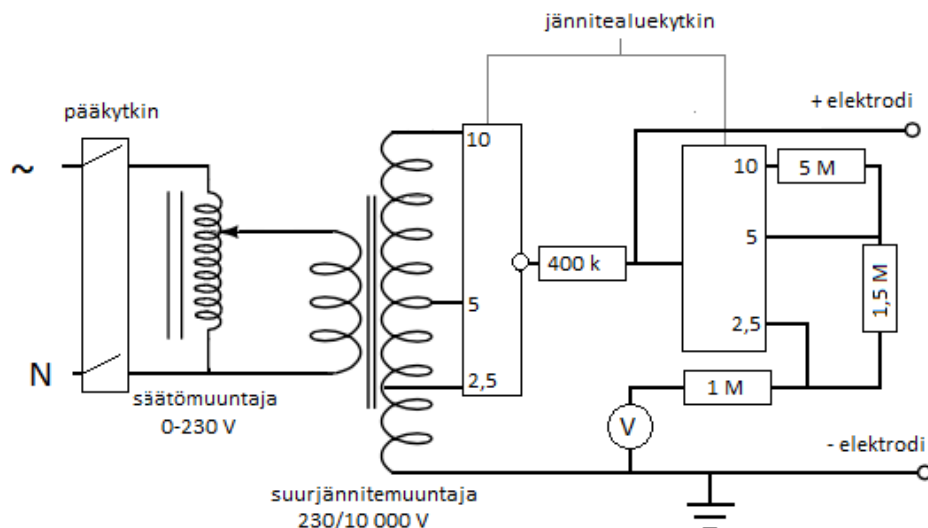
Kolmas tapa turvallisuuden lisäämiseksi on lainsäädäntö, jolla rajoitetaan, ketkä saavat työskennellä vaarallisten sähkölaitteiden kanssa, ja erityisesti rakentaa niihin liittyviä kytkentöjä. Sähköturvallisuuslain mukaan laitteiden ja testausjärjestelmien vaarallisuuden perusteella töitä saa suorittaa joko sähköalan ammattihenkilö, tehtävään tietyn protokollan mukaan opastettu henkilö tai maallikko. Vaarallisimmissa sähkötöissä vaaditaan normaalia sähköalan ammattihenkilöä korkeampia sähköpätevyyskykyjä. On myös tilanteita, joissa vähemmän koulutettu henkilö saa suorittaa testauksia korkeamman asennuspätevyden omaavan henkilön läsnä ollessa. [25]

4. HELVAR -LAITTEEN KORVAAMINEN

Terichem Tervakoski Oy:ssä tehtävistä käytännön tutkimuksista ensimmäinen koskee Helvar-nimisen AC-kuivaläpilyönteihin tarkoitetun testilaitteen korvaamista uudella käytännöllisemmällä ja paremmin standardit täyttävällä laitteella. Uuden laitteen pätevyys todetaan vertaamalla tuloksia kalibroituun referenssijärjestelmään, jona käytetään tässä työssä Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) suurjännitelaboratorion testauslaitteistoa.

4.1 Laitteen toiminta

Helvar on omavalmisteinen laite, jossa on joitakin Helvar Oy:n valmistamia osia. Se soveltuu AC-läpilyöntitestaukseen jännitevälillä 0,6 - 10 kV. Laitteessa on kolme jännitealuetta, joiden maksimijännitteet ovat 2,5 kV, 5 kV ja 10 kV. Jännitealuetta muutetaan siirtämällä muuntajan toision kontaktikohtaa sekä samalla kytkemällä mittausjärjestelmässä eri määrä vastuksia sarjaan, jotta jännitemittarin virta olisi riippumaton käytetystä jännitealueesta. Laitteessa on säätömuuntaja, joka muuttaa verkkojännitteen halutulle jännitetasolle. Jännitteensäätö tapahtuu manuaalisesti säätömuuntajan säätöpyörää kääntämällä.



Kuva 11. Helvarin yksinkertaistettu piirikaavio. Todellisuudessa vastukset koostuvat useista sarjassa ja rinnan olevista komponenteista.

Helvarissa on reaaliaikainen jännitteenmittaus. Mittaaminen perustuu mittarin läpi kulkevan virran mittaukseen, joka skaalataan jännitteeksi, joka näkyy viisarinäytöllä. Viisarinäytön mittaviivojen väli on 2,5 kV jännitteellä 50 V, mistä on laitteen kalibrointitodistuksessa mittausepävarmuudeksi määritelty 25 V. Laitteessa ei ole automaattista läpilyönnin tunnistusta, vaan läpilyöntijännite on luettava viisarinäytöltä juuri ennen jännitteen läpilyönnistä seuraavaa putoamista.

Helvariin liittyy testauskaappi, johon näytteet ja elektrodit asetetaan. Testauskaapin koko on 33,7 cm x 31,5 cm x 32,4 cm. Kaapin oveen on kytketty turvalukitus, joka nolaa jännitteen laitteen suurjännitepuolella, jos kaapin ovi avataan jännitteen ollessa päällä. Laitteessa käytetään alaelektrodina halkaisijaltaan 100 mm lieriöelektrodia ja yläelektrodina 25 mm messinkistä lieriöelektrodia, jonka pohjasärmä on pyöristetty.

Helvarilla testattavat paperinäytteet kuivataan uunissa niihin sitoutuneen kosteuden poistamiseksi. Terichem Tervakoski Oy:n mittausohjeen mukaan papereita on lämmitettävä vähintään 2 h ennen testausta 105°C:ssa ja testaus on suoritettava mahdollisimman nopeasti uunista poistamisen jälkeen.

4.2 Laitteessa havaitut ongelmat

Helvar on havaittu epäkäytännölliseksi ja vanhanaikaiseksi laitteeksi useasta syystä. Laitteen käsikäyttöinen jännitteen nosto lisää merkittävän epävarmuustekijän mittaukseen, koska mittaajan on mahdotonta kääntää säätömuuntajan säätöpyörää täysin kiinteällä nopeudella. Se on myös standardien vastaista, koska standardit määrittävät tarkasti sallitut jännitteen nousunopeudet [14].

Toinen syy Helvarin korvaamiseksi alun perin oli, että siinä ei ole automaattista läpilyöntitulosten tallentamista edes analogisen maxhold-piirin muodossa. Viisarinäytöltä tulosten lukeminen tietyllä hetkellä on epätarkkaa, varsinkin kun viisari putoaa hyvin nopeasti läpilyönnin seurauksena.

Lisäksi Helvarin mittari on virtaa mittaavana jännitemittarina tekniikaltaan vanhanaikainen. Ongelmaksi koituu mittausvastuksen lämpenemisen aiheuttama vastusarvon muutos ja siten virta-jännite –suhde ei ole vakio. Laitteen skaalauskerroin on vaihdellut useita prosentteja eri kalibrointikertojen välillä. Skaalauskerroin ei myöskään ole täysin lineaarinen. MIKES:in (*Mittatekniikan keskus*) suorittamissa kalibroinneissa Helvarilla mitatun jännitteen suhde referenssijärjestelmään vaihtelee erisuuruksilla jännitteillä. Esimerkiksi suurimman ja pienimmän skaalauskerroimen arvon erotus on elokuun 2013 kalibrointimittauksessa 2,8 prosenttia.

4.3 Helvariin liittyvä tutkimus

Seuraavassa kuvataan lopputuloksen kannalta tärkeimmät Helvar-laitteeseen tehdyt testit tuloksineen sekä laitteen korvausprosessiin liittyvät referenssimittaukset. Tarkempia tuloksia on liitteessä A.

4.3.1 Finero FST-110 mahdollisena korvaajana

Helvarin korvaavaksi laitteeksi oli alun perin suunniteltu Finero FST-110-läpilyöntitestilaitetta, joka oli vapautunut yrityksen toisesta toimipisteestä. Laitteessa oli haluttu automaattinen jännitteen säätö sekä läpilyönnin automaattinen tunnistus ja tulosten tallentaminen. Finerolla oli tehty joitakin testejä, joiden tulokset eivät olleet täysin linjassa Helvarin tulosten kanssa. Finerossa oli lisäksi ongelmana, että läpilyönnin tapahtuessa laitteen mittari hyppäsi hetkellisesti moninkertaiseen jännitelukemaan, ja ilmoitti tämän täysin virheellisen lukeman läpilyöntijännitteenä. Tämän pääteltiin johtuvan yksinkertaisesta maksimijännitteen mittauksesta, joka tallentaa läpilyöntihetkellä tapahtuvan jännitetransientin huippuarvon. Laitteen ei katsottu tämän virheikäyttyymisen takia soveltuvan haluttuun käyttöön.

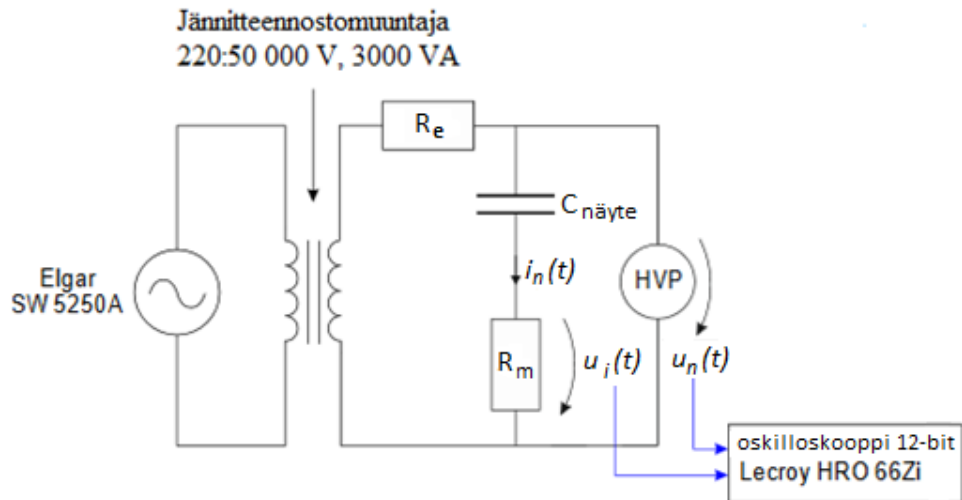
Fineron jännitemittarin uskottiin kuitenkin näyttävän oikeaa jännitelukemaa juuri ennen läpilyöntiä, ja huomattiin, että näytöltä luetut arvot erosivat jonkin verran Helvarin arvoista, erityisesti pienillä alle 1 kV jännitteillä. Tämä herätti epäilyksen, että Helvarin mittaustuloksissa esiintyy systemaattista virhettä laitteen muiden puutteiden lisäksi. Finerolla tuotetulla suurjännitteellä tehtyjä läpilyöntejä tutkittiin Bitscope BS325-NO -oskilloskoopin kanssa, ja huomattiin että oskilloskoopin näyttämät jännitelukemat erosivat Helvarin tuloksista eron ollessa suurimmillaan yli 10 %. Käytetty 8-bittinen oskilloskooppi on resoluutioltaan epätarkka, joten päätettiin tehdä jatkotutkimuksia tarkemmillä laitteilla.

4.3.2. Vertailumittaukset TTY:n laboratoriossa

Koska Helvarin lämpöstabiilisten ongelmien epäiltiin vääristävän jännitemittarin näyttämää lukemaa läpilyöntitilanteessa, pelkän tyhjäkäyntimittauksen ei katsottu olevan riittävä laitteen toiminnan ja mittaustulosten oikeellisuuden selvittämiseksi. Tämän vuoksi suoritettiin vertailumittaukset Tampereen teknillisen yliopiston suurjännitelaboratoriossa. Vertailumittaukset tehtiin 5-6.9.2017 TTY:n kalibroidulla testijärjestelmällä. Elektrodeina käytettiin Terichem Tervakoski Oy:n omia elektrodeja ja näytteinä samoista eristä otettuja papereita, joilla aiemmin oli tehty testejä Finerolla ja Helvarilla. Näytekappaleita oli AC-testeissä kaikkiaan 90, 15 näytettä jokaista paperilaatua kohden.

TTY:n laboratoriossa käytettyyn AC-mittauksiin käytettävään testijärjestelmään kuuluvat seuraavat komponentit: Elgarin SW 5250A säädettävä jännitelähde, jolla kontrolloidaan jänniterampin nousua, jännitteennostomuuntaja, 200 k Ω virranrajoitusvastus R_e , T&M Research Productsin matalainduktanssinen virranmittausvastus R_m , jonka resis-

tanssi on $1,033 \Omega$, North Star High Voltage PVM-suurjännitemittapää (HVP), jonka jakosuhte on 2000:1 sekä 12-bittinen Lecroy HRO- 66Zi-oskilloskooppi. Jännitelähteenä käytetyn Elgarin toiminta perustuu tehoelektroniikkaan, ja se vastaa funktionaalisesti vanhojen läpilyöntitestilaitteiden säätömuuntajaa. Testijärjestelmän piirikaavio on kuvassa 12. Muuttuja i_n tarkoittaa näytteen läpi kulkevaa virtaa, u_i kyseisen virran mitausvastukseen aiheuttamaa jännitettä ja muuttuja u_n näytteen yli olevaa jännitettä, joka on skaalattu mittapään jakosuhteella.



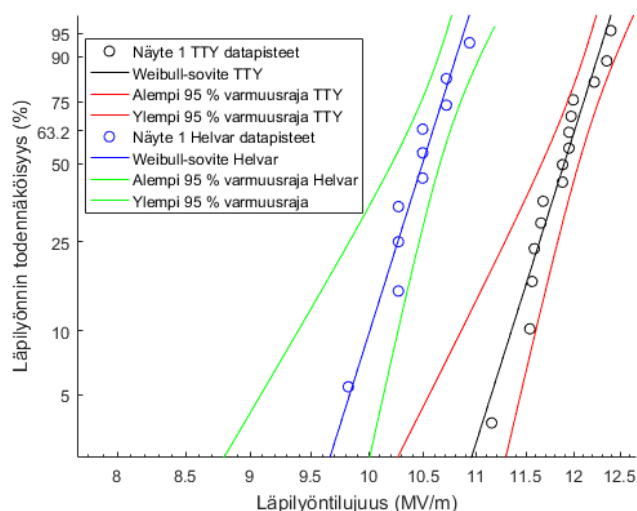
Kuva 12. TTY:n AC-testausjärjestelmän piirimalli

Papereiden mittaussarjoista saatiin seuraavat keskiarvot läpilyöntijännitteille. Paperit on järjestetty ja numeroitu niiden läpilyöntijännitteen mukaiseen järjestykseen pienimmästä suurimpaan. Järjestys ei ole sama papereiden paksuuksien tai absoluuttisten läpilyöntilujuuksien kanssa. Kalibroinnissa määritelty korjauskerroin on otettu huomioon ilmoituksissa Helvarin mittaustuloksissa. Täydelliset taulukot mittauksista ovat liitteen A taulukoissa 1 ja 2.

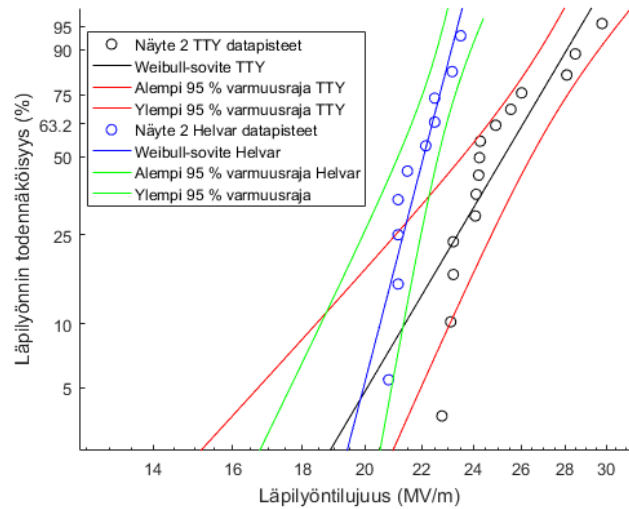
Taulukko 1. Tärkeimmät tulokset TTY:n läpilyöntimittauksista

Paperinäytteen no.	1	2	3	4	5	6
Näytteen paksuus (μm)	44,2	29,7	80,5	151,8	194,0	241,5
Läpilyöntijännitteen keskiarvo Helvar (kV)	0,468	0,654	0,843	1,245	1,416	1,69
Läpilyöntijännitteen keskiarvo TTY (kV)	0,524	0,745	0,906	1,19	1,292	1,663
Läpilyöntijännitteen keskihajonta TTY (kV)	0,009	0,058	0,044	0,074	0,099	0,081
Keskim. läpilyöntilujuus TTY (MV/m)	11,85	25,09	11,26	7,84	6,66	6,89
Ero Helvar-TTY(%)	-10,69	-12,21	-6,95	4,62	9,60	1,62

TTY:n mittaustuloksia verrattiin Helvarilla samoista paperieristä otettujen näytteiden mittaustuloksiin Weibull-varmuusraja-analyysin avulla. Varmuusrajafunktiot määritettiin Matlab-ohjelmistolla. Seuraavaksi paperinäytteet on käyty yksitellen läpi ja varmuusrajakuvaajia on analysoitu. Järjestys on sama kuin edellisessä taulukossa.

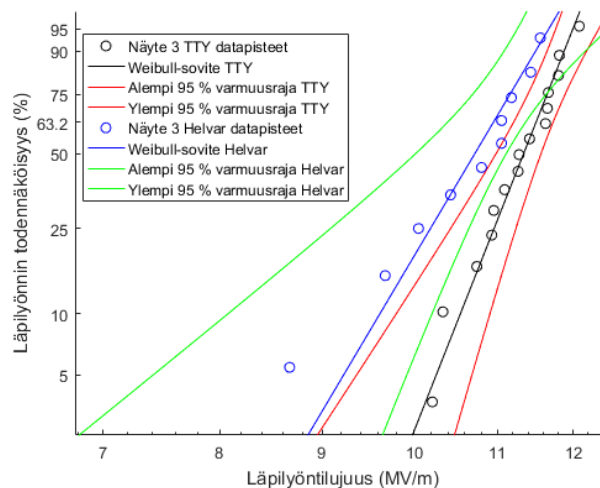
**Kuva 13.** Paperinäytteen 1 (paksuus 44,2 μm , läpilyöntijännite 0,5 kV) Weibull-sovitteet ja varmuusrajat TTY:n mittauksissa ja Helvarilla.

Pienimmän läpilyöntijännitteen omaavalla paperilla läpilyöntijännitteet olivat Helvarilla huomattavasti alhaisemmat kuin TTY:n mittauksissa. Weibull-sovitteiden kulmakertoimet ovat hyvin lähellä toisiaan, joten hajonta on molemmilla mittareilla samaa luokkaa ja eroavaisuudet johtuvat lähes yksinomaan jakaumien odotusarvojen eli α -parametrien eroista. Koska varmuusmarginaalit eivät leikkaa missään pisteessä, erot mittaustuloksissa eri laitteilla ovat yksiselitteisesti tilastollisesti merkitseviä 95 % varmuusmarginaalia käytettäessä.



Kuva 14. Paperinäytteen 2 (paksuus 29,7 μm , läpilyöntijännite 0,75 kV) Weibull-sovitteet ja varmuusrajat TTY:llä ja Helvarilla testatuista otoksista.

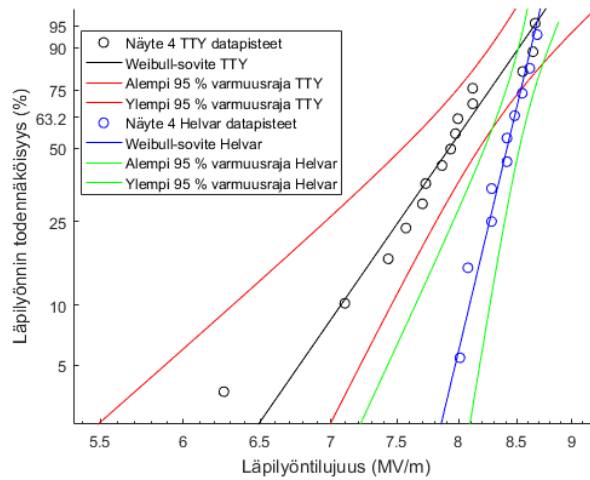
Paperinäytteellä no. 2 on huomattava ero jakaumien hajonnassa. Tämä johtaa siihen, että läpilyöntijännitteet ovat jakauman alapäässä lähellä toisiaan, mutta suurilla todennäköisyyksillä erot ovat suuria. Mittaustulosten keskiarvoista laskettu suhteellinen ero Helvariin verrattuna oli tällä paperilla tutkituista paperilaaduista suurin, noin 14 %. Suurimmalla osalla todennäköisyysvälistä erot ovat tilastollisesti merkitseviä, mutta alhaisen läpilyöntitodennäköisyyden (5 % tai 10 %) persentiileillä merkitsevyyssehto ei täyty. Sovitteen ennustamat tulokset ovat itse asiassa hyvin lähellä toisiaan näillä persentiileillä.



Kuva 15. Paperinäytteen no. 3 (paksuus 80,5 μm , läpilyöntijännite 0,9 kV) Weibull-sovitteet ja varmuusrajat TTY:llä ja Helvarilla testatuista otoksista.

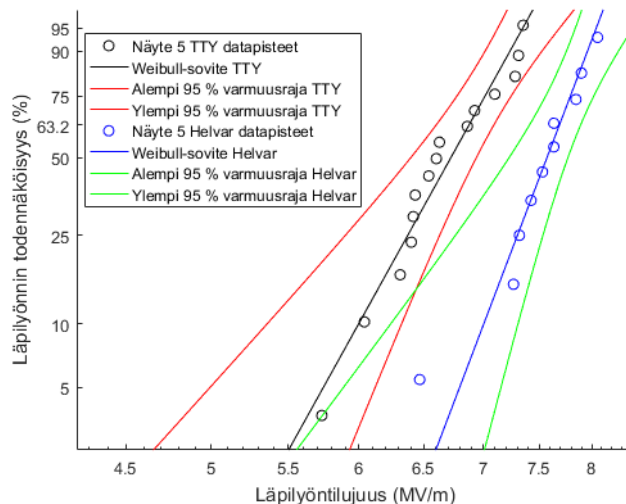
Paperilla no. 3 Helvarin ja TTY:n testijärjestelmän tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan niin keskiarvojen kuin hajonnankin osalta. Pienillä todennäköisyyksillä tulokset eroavat

enemmän, mutta varmuusmarginaalit pysyvät silti toistensa sisällä. Erot eivät siis ole tilastollisesti merkitseviä.



Kuva 16. Paperinäytteen no. 4 (paksuus $151,8 \mu\text{m}$, läpilyöntijännite $1,1 \text{ kV}$) Weibull-sovitteet ja varmuusrajat TTY:llä ja Helvarilla testatuista otoksista.

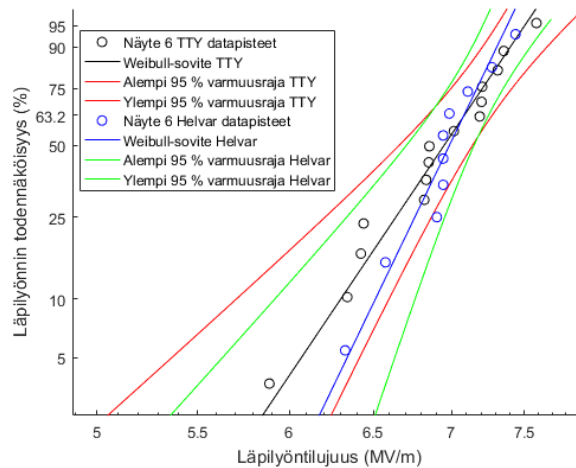
Paperilla no. 4 sekä datajoukon keskiarvo että hajonta eroavat toisistaan jonkin verran. Varmuusrajamarginaalit leikkaavat toisensa jakauman yläpäässä, mutta tämä alue ei ole olennainen materiaalin läpilyöntilujuutta määritettäessä. Erot jakaumissa voidaan todeta siten tilastollisesti merkitseviksi.



Kuva 17. Paperinäytteen no. 5 (paksuus $194,0 \mu\text{m}$, läpilyöntijännite $1,3 \text{ kV}$) Weibull-sovitteet ja varmuusrajat TTY:llä ja Helvarilla testatuista otoksista.

Paperinäytteellä no. 5 Weibull-sovitteiden kulmakertoimet ovat melko lähellä toisiaan, mutta läpilyöntijännitteiden suuruuksissa on eroa. Koska hajonta on kummassakin otoksessa melko pientä, varmuusmarginaalit jäävät kapeiksi eivätkä leikkaa toisiaan, paitsi alhaisilla todennäköisyyksillä. Tilanne on sama kuin paperin 2 tapauksessa: vaikka tilas-

tolliset erot ovat huomattavia, matalien todennäköisyyksien persentiilejä tutkittaessa jakaumien tulokset ovat lähempänä toisiaan. Jakaumien yhtenevyys on tässä tapauksessa huomattavasti lievempää kuin paperilla 2.



Kuva 18. Paperinäytteen no. 6 (paksuus 243,4 μm , läpilyöntijännite 1,6 kV) Weibull-sovitteet ja varmuusrajat TTY:llä ja Helvarilla testatuista otoksista.

Paperinäytteellä no. 6 sekä sovitteet että varmuusrajat ovat hyvin lähellä toisiaan. Hajonta kasvaa hieman alemmilla todennäköisyyksillä, mutta varmuusrajafunktiot pysyvät toistensa marginaalien sisällä koko ajan. Erot eivät siis ole tilastollisesti merkitseviä. Tämä on linjassa sen kanssa, että datajoukkojen aritmeettisilla keskiarvoilla on hyvin vähän eroa, vähiten kaikista vertailuista datajoukkopareista.

TTY:n mittausten tulosten perusteella Helvarin skaalauskerroin on merkittävästi epälineaarinen. Se antaa melko tarkkaan samoja arvoja lähellä 1 kV jännitettä. Tätä pienemmillä jännitteillä sen antamat läpilyöntijännitteen arvot ovat säännönmukaisesti liian pieniä, ja tätä suuremmilla jännitteillä liian suuria. Poikkeuksena on kaikkein paksuin näyte, jossa tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan testattujen otosten perusteella. Otokset olivat suhteellisen pieniä, joten tämä poikkeavuus voi hyvin olla selitettävissä tilastollisella vaihtelulla sekä mittarin toiminnassa että papereiden läpilyöntilujuuksissa. Bitscopen tehtyjen vertailumittausten tulokset ovat samansuuntaisia kuin TTY:n mittausten.

4.3.3 Helvarin tyhjäkäyntimittaus ja skaaluskertoimen määrittäminen

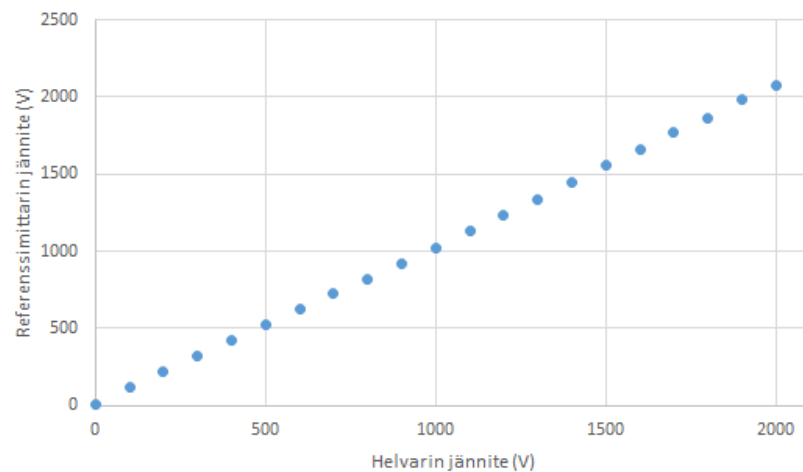
TTY:n mittaustulosten perusteella päätettiin tutkia tarkemmin Helvar-laitteen skaaluskertoimen lineaarisuutta. Tutkimusmenetelmänä käytettiin tyhjäkäyntimittausta, jossa elektrodien välillä olevaa jännitettä mitattiin yleismittarilla. Tyhjäkäyntimittaus tehtiin kalibroidulla Fluke 179 -yleismittarilla. Nollajännitteen tutkimisessa käytettiin lisäksi oskilloskooppia.

Havaittiin, että Helvarilla esiintyy tehollisarvoltaan noin 10 V nollajännite, kun säätömuuntajan liukukosketin ja jännitemittarin lukema ovat nollassa. Tämä vaihteli ± 2 V

ollen suurempi sen jälkeen, kun jännite on ollut päällä verrattuna tilanteeseen, jossa laite käynnistetään. Syyksi nolasta poikkeavalle jännitteelle arveltiin jännitehäviötä TNC-jakelujärjestelmässä sekä hajainduktanssia muuntajassa, joka aiheuttaa nolasta poikkeavan jännitteen toisioon, vaikka säätömuuntajan liukukosketin on nollassa.

Skaalauskerroimen määrittämismittaus tehtiin Fluke 179 –yleismittarilla ja Fluke 80 K-40 suurjännitemittapäällä. Jännite mitattiin välillä 0-2000 V sadan voltin välein siten, että Helvarin jännite säädettiin mittarin lukutarkkuuden rajoissa tutkittavaan jännitearvoon, ja jännite luettiin samanaikaisesti yleismittarilla. Mittaustulokset löytyvät liitteen A taulukosta 3.

Jännitepareja Helvar-Fluke vastaavat pisteet piirrettiin koordinaatistoon siten, että x-akselilla on mittalaitteen antama lukema ja y-akselilla referenssimittalaitteen antama lukema. Näin muodostetussa koordinaatistossa suoran kulmakerroin vastaa mittausjärjestelmän skaalauskerrointa.

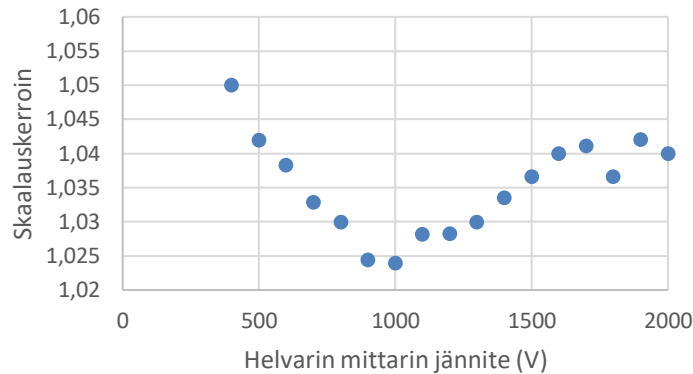


Kuva 19. Kalibroidun referenssimittarin lukema Helvarin mittarin näyttämän jännitteen funktiona

Mittauspisteet asettuivat melko tarkasti suoralle. Koko datajoukon lineaarisen sovitteen kulmakerroin on 1,0337. On kuitenkin erotettavissa kaksi erillistä aluetta. Pienillä, alle 1 kV jännitteillä mittareiden lukemien erotus on lähes vakio, joka on mitattujen pisteiden keskiarvojen perusteella 21,4 V. Tätä suuremmilla arvoilla erotus alkaa kasvaa nopeasti. Vielä suuremmilla, yli 1,6 kV jännitteillä kasvu näyttää pysähtyvän ja mittalaitteiden tuloksen erotus kasvaa likimain samassa suhteessa kuin jännite. Skaalauskerroimen näkökulmasta tämä tarkoittaa sitä, että se pienenee noin 1 kV asti, kasvaa sen jälkeen jonkin aikaa ja saturoituu sen jälkeen likimain vakioarvoon. Skaalauskerroimen vaihteluväli on kuitenkin läpilyöntitestilaitteen käyttöalueella pieni, minimin ollessa 1,02 ja maksimin 1,05.

Vertailumittauksessa on jonkin verran epävarmuustekijöitä. Fluken epätarkkuus on 1,0 % \pm 3 digitaalinäytön numeroa. Helvarin jännitteen asettaminen juuri oikeaan arvoon

on epätarkkaa, koska minimaalinenkin säätömuuntajan säätöpyörän kiertäminen muuttaa jännitettä vähintään 5 V.



Kuva 20. Helvarin skaalauskerroin mittarin näyttämän jännitteen funktiona

Trendi on samansuuntainen TTY:n vertailumittauksen erojen kanssa, mutta erot ovat huomattavasti pienempiä, ja niiden suuruusluokka on sellainen, että ne todennäköisesti hukkuvat mitattujen näytteiden hajontoihin. Skaalauskertoimen korkeammat arvot 1,7 kV kohdalla selittävät osittain pienemmän eron paksummalla näytteellä TTY:n mittauksissa. Todennäköinen syy skaalauskertoimen kasvulle suurilla jännitteillä on vastusten lämpenemisestä aiheutuva vastusarvon kasvu, joka pienentää mittausvastuksen läpi kulkevaa virtaa.

4.4 Chroma-laitteen tutkimus ja käyttöönottotestaus

Chroma 19032-P läpilyöntitestauslaitteen hankkimista harkittiin, koska se täytti uudelta laitteelta vaaditut ominaisuudet: Laitteessa on automaattinen jännitteen nosto, ja jännitteen nostonopeutta ja muita testitapahtuman parametreja voidaan säätää. Laitteessa on automaattinen läpilyönnin tunnistusmekanismi, joka ilmoittaa merkkiäänänsä avulla läpilyönnin tapahtumisesta ja tallentaa läpilyöntituloksen. Mekanismi reagoi pysyvän tilan oikosulkuvirtaan. Laite soveltuu sekä AC:llä että DC:llä tehtäviin testeihin. Laitteella on mahdollista mitata lisäksi maadoitusimpedansseja, mikä ei ole relevanttia rutiinikäytössä, mutta mitä voidaan mahdollisesti hyödyntää tulevaisuudessa satunnaisesti.

Testaus Chromalla tapahtuu seuraavasti: Laitteeseen asennetaan testijärjestely, jossa valitaan testissä käytettävä jännitemuoto, testityyppi (ramppitesti vai vakiojännitetesti), virran kynnyksarvo, jonka ylittymisen laite tulkitsee läpilyönniksi, maksimijännite ja aika, jossa jännite nousee nolasta maksimijännitteeseen. Ennen testin suorittamista asetetaan haluttu testijärjestely, jos parametreja halutaan muuttaa aiemmasta. Testi aloitetaan painamalla ”start”-nappia. Kun läpilyönti tapahtuu, laitteessa alkaa kuulua hälytysääni. Tällöin testi lopetetaan ”stop”-napista, jolloin hälytysääni lakkaa. Läpilyöntijännite jää näkyviin laitteen näytölle ja nollaantuu vasta, kun uutta testiä aloitetaan. Helvarilla käytetty testauskaappi soveltuu myös Chroman testeihin.

Chroman tuotetun jännitteen tarkkuus on laitteen datalehden mukaan $\pm 2\%$ asetetusta arvosta $\pm 0,1\%$ laitteen koko jännitealueesta, joka tarkoittaa 5 V. Varsinaisen jännitemittauksen epävarmuus on $\pm 1\%$ luetusta arvosta $\pm 0,1\%$ koko jännitealueesta. [26]

Ennen Chroman hankkimista laite oli lyhyen ajan testattavana. Laitteella testattiin joitakin paperinäyteitä ja tuloksia verrattiin TTY:n tuloksiin ja Helvarilla mitattujen näyttöjen tuloksiin samoista paperieristä. Bitscopen ja Chroman vertailumittaus suoritettiin siten, että oskilloskooppi oli kytketty Chroman testipiiriin ja läpilyöntijännite mitattiin yhtäaikaaisesti kahdella laitteella. Tällä menetelmällä pystytään poissulkemaan materiaalin ominaisuuksiin perustuvan hajonnan vaikutus. Keskiarvot ovat taulukossa 2 ja yksittäiset testitulokset liitteen A taulukoissa 4-6.

Taulukko 2. Keskiarvot näytesarjojen läpilyöntijännitteistä Chromalla, Bitscopella ja Helvarilla

Paperinäytteen no.	1	2	3	4	5	6
Paksuus (μm)	65,6	77,6	53,4	123,0	154,0	188,6
Keskiarvo Chroma (kV)	0,665	0,757	0,780	0,915	1,067	1,281
Keskiarvo Bitscope (kV)	0,714	0,799	0,827	0,970	1,108	1,339
Ero Chroma-Bitscope (%)	-6,82	-5,31	-5,77	-5,71	-3,72	-4,34
Keskiarvo Helvar (kV)	0,64	0,76	0,76	0,97	1,14	1,41
Ero Chroma-Helvar (%)	3,89	-0,06	3,13	-5,61	-6,62	-9,42

Havaittiin, että Chroma antaa kauttaaltaan hieman pienempiä jännitteen arvoja kuin Bitscope. Yhtä aikaa samasta läpilyöntitapahtumasta mitattaessa Chroma/Bitscope – suhteen vaihtelu oli hyvin pientä ja suurin osa kyseisen suhdeluvun arvoista mahtui välille 0,93-0,97. Koska Bitscopen oli havaittu antavan hieman suurempia tuloksia kuin TTY:n mittaukset, laitteen todellinen virhe on todennäköisesti pienempi kuin edellä mainittu - (4-7) %. Mitattavista papereista ainoastaan yksi, no. 6, oli samasta erästä kuin TTY:n mittauksissa (TTY:n näyte 5), joten suoraa vertailua ei voitu tehdä kuin tämän osalta. Tuolla näytteellä keskiarvojen suhde oli 0,9916. 60 mitatussa läpilyönnissä oli yhteensä ainoastaan kaksi selkeästi 4-7 % haarukasta eroavaa tulosta. Suuremmilla jännitteillä Chroman ja Bitscopen välinen ero pääasiassa pieneni, kun taas Chroman ja Helvarin ero kasvoi. Katsottiin, että tulokset olivat riittävän lähellä aikaisempia tuloksia, ja Chroman ja Helvarin tulosten välinen vaihtelu oli samansuuntaista kuin TTY:n ja Helvarin tulosten välillä. Siten Chroman katsottiin soveltuvan Helvarin korvaajaksi ja se päätettiin ostaa.

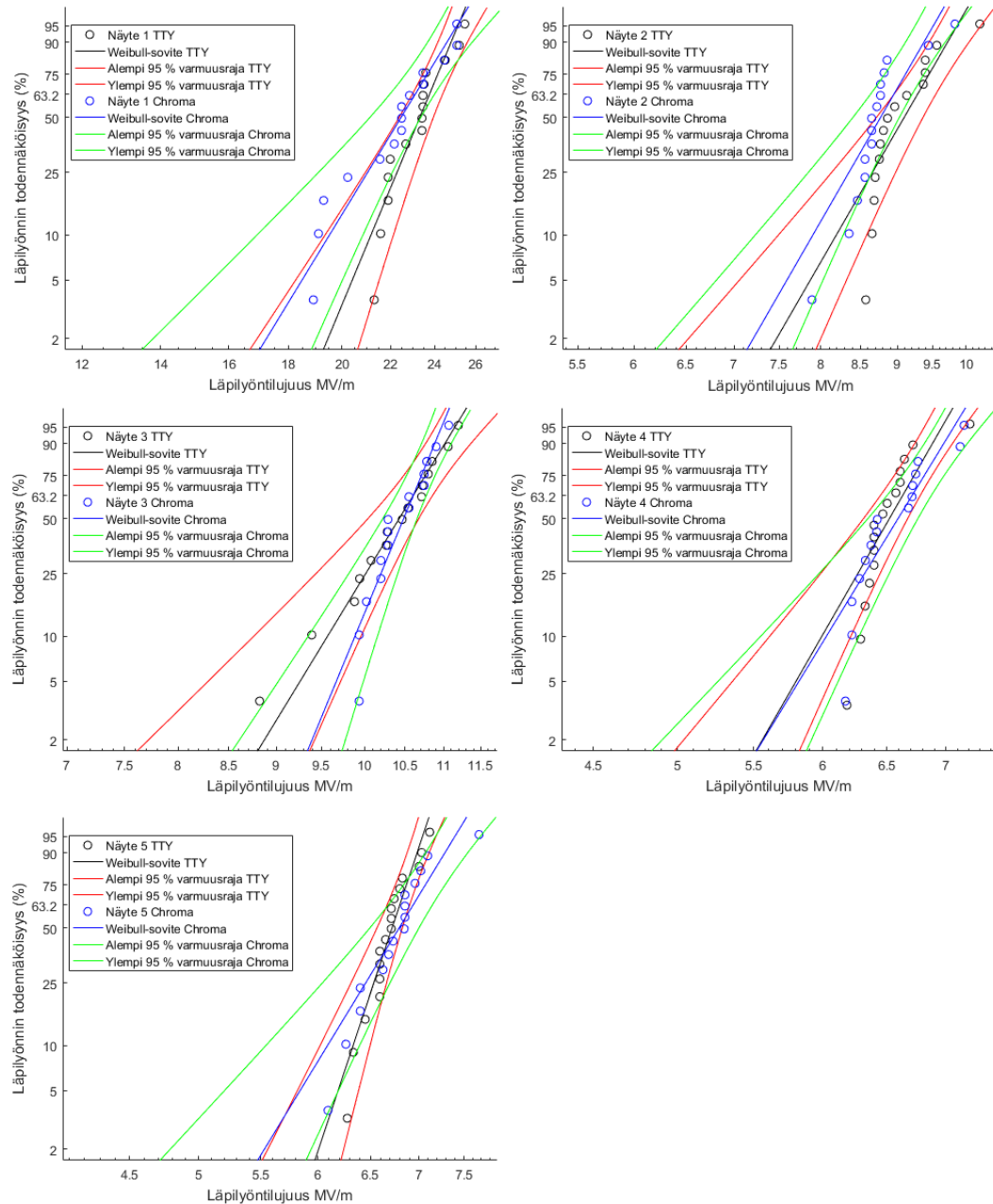
Uudet vertailumittaukset tehtiin TTY:llä 11.4. luvussa 4.2 kuvatulla laitteistolla. Ne suoritettiin, koska alkuperäisten TTY:n mittauksen paperilaatuja ei ollut enää riittävästi jäljellä Chroma-testausta varten. Oskilloskoopin triggerin raja-arvona käytettiin virta-arvoa 2 A ja jännitteen nousunopeutena kaikissa tapauksissa 100 V/s. 5 eri paperia, joiden läpilyöntijännitteet ovat välillä 0,6 kV – 1,6 kV testattiin siten, että jokaisesta pape-

rista otettiin 15 läpilyöntitestistä. Kuten aiemmassa TTY:n vertailumittauksessa, tuloksia verrattiin Matlabin varmuusraja-analyysin avulla Chromalla samoista eristä otetuista papereista tehtyihin testisarjoihin. Chroman vertailusarjoissa nousunopeutena käytettiin samaa 100 V/s. Virtatriggeriä ei voitu laittaa täysin samaksi, koska mittareiden toiminta on erilainen: Chroma mittaa pysyvän tilan oikosulkuvirtaa, joka on huomattavasti pienempi kuin transienttivirta läpilyöntihetkellä. Triggerin arvona käytettiin 50 mA, joka on oikosulkuvirran arvoksi melko suuri ja laite ei silloin reagoi osittaispurkauksiin. Testisarjojen keskiarvot ja hajonnat on esitetty taulukossa 3 ja yksittäisten testisarjojen tulokset liitteen A taulukoissa 7 ja 8.

Taulukko 3. *Chroma-TTY –vertailumittauksen 11.4 keskeisimmät tulokset*

Paperinäytteen no.	1	2	3	4	5
Paksuus (μm)	31,0	101,4	114,4	199,0	243,4
Läpilyöntijännitteen keskiarvo Chroma (kV)	0,688	0,885	1,194	1,304	1,645
Läpilyöntijännitteen keskiarvo TTY (kV)	0,718	0,918	1,183	1,296	1,630
Keskihajonta TTY (kV)	0,039	0,046	0,074	0,049	0,059
Läpilyöntilujuus TTY (MV/m)	23,151	9,054	10,338	6,512	6,695
Ero Chroma-TTY (%)	-4,106	-3,565	0,929	0,615	0,918

Kaikissa papereiden testaussarjojen vertailupareissa keskiarvojen erotus oli suurimmillaankin alle 5 %, mikä on IEC 60243 -standardin mukaan suurin hyväksyttävä arvo jännitemittarin virheelle [14]. Lisäksi Weibull-varmuusraja-analyysin 95 % varmuusmarginaalit leikkasivat kriittisellä todennäköisyysalueella kaikissa vertailuissa testisarjoissa. Täten Chroman katsottiin olevan kelvollinen kuivien papereiden AC-testaukseen.



Kuva 21. Matlabilla piirretty Weibull- varmuusraja-kuvaajat 11.4. vertailumittauksista

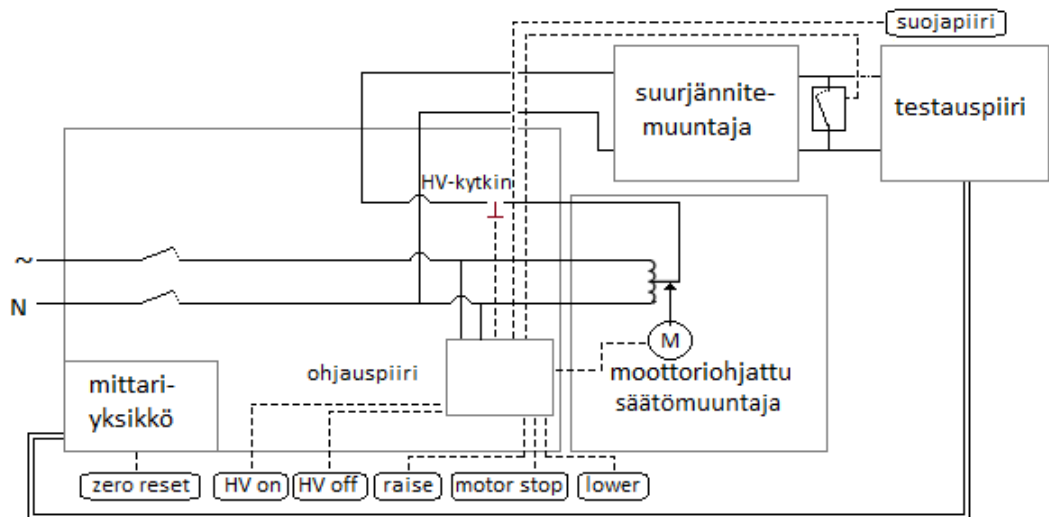
Chroman virallinen käyttöönottotestaus tehtiin 3.5.2018. Siinä mitattiin jännitettä tyhjäkäynnissä Fluke 179 –yleismittarilla ja Fluke 80 K-40 suurjännitemittapäällä. Jännite mitattiin välillä 0-2,0 kV 200 voltin välein ja välillä 2,0 - 5,0 kV 1,0 kV välein. Laitteen testauskaapin oven avaamiseen reagoivan turvakytkimen todettiin toimivan moitteettomasti. Laitteen näytön todettiin näyttävän melko tarkkaan samaa jännitettä kuin referenssimittarina käytetty Fluke 179, korjauskertoimen ollessa 0,993, kun mitta-alueella 0,6-2,0 kV olevat datapisteet huomioitiin. Mittaustulokset ovat liitteen A taulukossa 9. Päätettiin, että Chromalla ei toistaiseksi käytetä lainkaan korjauskerrointa mittausten yhteydessä. Varmuusrajat kuvassa 21 on laskettu ilman korjauskerrointa.

5. FERRANTI-LAITTEEN KEHITTÄMINEN

Toinen diplomityöhön liittyvä käytännön ongelma koskee öljyimpregnoitujen papereiden ja laminaattien läpilyöntitestaukseen käytettävää Ferranti-laitetta. Alun perin tarkoitus oli ainoastaan parannella nykyistä laitetta. Tutkimuksen aikana havaittiin, että olisi useita syitä korvata koko laite tulevaisuudessa modernimmalla järjestelmällä, eikä tämän vuoksi suuria investointeja vaativia parannuksia ole mielekästä tehdä ilman selkeää taloudellista hyötyä.

5.1 Laitteen toiminta

Ferranti on öljyimpregnoitujen paperi- ja laminaattinäytteiden AC- ja DC-läpilyöntimittauksiin soveltuva laitteisto. Se koostuu ohjaus- ja mittausyksiköstä, joka sisältää laitteen pääohjauspiirin sekä mittariyksikön, moottoriohjatusta säätömuuntajasta, sekä testauskaapista, jonka yhteydessä on suurjännitemuuntaja, kontaktori, tasasuuntauspiiri, virranrajoitusvastus ja kaapin ovien avaamiseen reagoiva suojapiiri. Ohjaus- ja mittausyksikön toiminta perustuu sähkömekaanisiin releisiin.



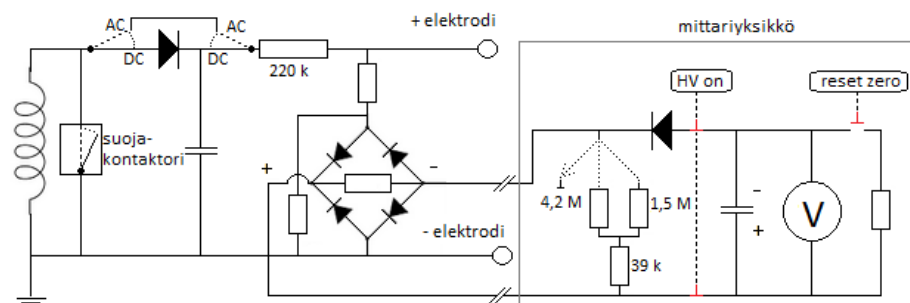
Kuva 22. Lohkokaavio Ferrantin funktionaalisista yksiköistä. Kaavioon on merkitty jännitteensyöttöpiiri kytkimiseen sekä tärkeimmät ohjaussignaalit katkoviivalla.

Laitteen jännitemittari sijaitsee ohjaus- ja mittausyksikössä. DC:llä laitteen maksimijännite on 50 kV ja AC:llä RMS-maksimijännite on 35 kV ($50 \text{ kV}/\sqrt{2}$). Jännitealueen alaraja on määritelty viisarimittarin näkyvän alueen alarajasta kullakin jännitealueella. Laitteessa on kolme jännitealuetta, 4-10 kV, 8-25 kV sekä 17-50 kV. Käytettävä jännitealue valitaan vivusta kääntämällä. Jännitealueen valinta vaikuttaa mittariyksikössä si-

ten, että resistiivisiä haaroja kytkeytyy jännitemittarin rinnalle pitäen mittarin näyttämän jännitteen samassa skaalassa jännitealueesta riippumatta. Jännitealueen valinta ei vaikuta säätömuuntajan jänniteennostonopeuteen. Suurjännitteen arvo välittyy mittarille jännitteenjakajan ja kokoaaltotasasuuntaussillan kautta. Jännitettä näyttävä viisarimittari antaa vaihtojännitteellä huippuarvon, koska mittarille menevä jännite on tasasuunnattu. Mittariyksikössä on lisäksi maxhold-piiri, joten viisari jää osoittamaan huippuarvoa jännitteen pudotessa nolleen.

Jännitteen nousunopeus määritetään säätämällä säätömuuntajaa ohjaavan moottorin pyörimisnopeutta kierrettävän säätöpyörän avulla. Moottorin tuottama teho siirtää säätömuuntajan liukukosketinta tasaisella nopeudella.

Suurjännitemuuntajan nimellisteho on 2,5 kVA ja muuntosuhde $2 \cdot 220 \text{ V}/35\,000 \text{ V}$. Virranrajoitusvastuksena käytetään vesivastusta, jonka resistanssi on riippuvainen jännitteestä. 20 kV jännitteellä sen arvoksi on mitattu 220 k Ω . Laitteen pääkytkin, jota kutsutaan myös HV-kytkimeksi, sijaitsee ohjausyksikön sisällä. Kytkimen ollessa ON-tilassa syöttöjännite on kytketty suurjännitemuuntajaan ja OFF-tilassa muuntajassa ei ole jännitettä. Laitteessa on lisäksi turvallisuussyistä Benedict Jäger K85A22 –kontaktori, joka oikosulkee muuntajan navat pääkytkimen ollessa OFF-tilassa. Kontaktorin tila määräytyy suoraan pääkytkimen tilan mukaan. Laitteistossa on puoliaaltotasasuuntaukseen käytetyt diodi ja kondensaattori, jotka kytketään manuaalisesti suurjännitemuuntajan ja mittauspiirin väliin DC-testauksessa.



Kuva 23. Ferrantin testaus- ja mittaripiirin kaavio DC-mittauksissa. AC:llä mitattaessa tasasuuntausdiodi ja kondensaattori on kytketty irti piiristä ja muuntajan jännitteinen puoli on kytketty suoran virranrajoitusvastukseen.

Testauskaappi on kooltaan 106 x 106 x 73 cm ja se toimii myös vetokaappina läpilyönissä syntyvien kaasujen takia. Mittaukset suoritetaan pääsääntöisesti dodekyylibentseenillä täytetyssä kupariastiassa (mitat 23,5 cm x 16 cm x 5 cm). Testauskaapin ovissa on turvakytinjärjestelmä siten, että oven avaaminen jännitteen ollessa päällä katkaisee laitteen ohjauspiirin ja siten siirtää pääkytkinreleen OFF-tilaan, mikä katkaisee jännitteen suurjännitepuolelta. Alaelektrodina toimii paperinäytteitä mitattaessa astian pohjalle asetettu metallilevy ja laminaatteja mitattaessa halkaisijaltaan 100 mm messinkielektrodi. Yläelektrodina käytetään paperitestauksessa halkaisijaltaan 25 mm messinkielekt-

rodia ja laminaattitestauksessa ruostumattomasta teräksestä valmistettua pohjan reunasta pyöristettyä lieriöelektrodia, jonka pohjan tasaisen osan halkaisija on 50 mm.

Testiä aloitettaessa painetaan "HV on"-nappia, joka kytkee pääkytkinreleen käämiin virran. Rele siirtyy ON-tilaan, mikä kytkee verkkojännitteen suurjännitemuuntajan ensiöön ohjausyksikön ja säätömuuntajan kautta. Kun rele on siirtynyt ON-tilaan, sen käämiin kytkeytyy virtatie toisesta kohdasta, jolloin se jää on-tilaan, kun "HV on" -nappi vapautetaan.

Tämän jälkeen painetaan "raise" -nappia, jolloin laitteessa oleva sähkömoottori alkaa pyöriä ja säätömuuntajan ulostulon jännite kasvaa tasaisesti. Tämä jännite nostetaan suurjännitetasoon mittauskaapin yhteydessä olevalla muuntajalla. Tasajännite muodostetaan puoliaaltotasasuuntauksella suurjännitteisestä vaihtojännitteestä.

Laitteessa ei ole automaattista läpilyönnin tunnistusta, vaan läpilyöntihetki on havaittava, kuten Helvarissa, jännitemittarin viisarin liikkeestä. Läpilyönnin tapahtuessa viisari pysähtyy läpilyöntijännitteen kohdalle. Jännite katkaistaan läpilyönnin jälkeen suurjännitepuolelta painamalla "HV off"-nappia. Tällöin pääkytkinreleen käämin ohjausvirta katkeaa, jolloin se siirtyy OFF-tilaan ja muuntajalle vievän syöttöpiirin virtatie katkeaa. Tämä siirtymä aktivoi kontaktorin, joka siirtyy OFF-tilaan oikosulkien suurjännitemuuntajan navat. Lisäksi se aktivoi säätömuuntajan "lower"-toiminnon, joka siirtää sen liukukoskettimen nolnaan. Jännitemittari nollataan purkamalla maxhold-piirin kondensaattori vastuksen kautta painamalla "zero reset" -nappia.

"HV off" -napin vapauttaminen ei palauta suurjännitepuolen jännitettä päälle, koska pääkytkinreleen siirtyminen on katkaissut virtatien ohjauspiiristä toisesta kohdasta. Pääkytkinrele voidaan palauttaa ON-tilaan ainoastaan painamalla "HV on" -nappia.

5.2 Kehittämiskohteet

Ferrantin yhtenä ongelmana on läpilyöntiä seuraavan automaattisen jännitteen katkaisun puuttuminen, jolloin jännitteen poislaukaisu "HV off" -napin avulla on riippuvainen mittaaajan reaktioajasta. Jännitteen poiskatkaisun viivästyminen rasittaa elektrodeja ja johtaa niiden nopeaan kulumiseen. Laitteessa on mahdollinen vaaratilanne oikosulun tapahduttua ja sen jäädessä huomaamatta. Tällöin jännite ei katkea, koska etuvastuksen rajoittama oikosulkuvirta on liian pieni tehtaan sähkönjakelujärjestelmän sulakkeiden toimimiselle. Tämä voi johtaa laitteen rikkoutumiseen tai tulipaloon.

Toinen ongelmallinen asia laitteessa on huomattavan voimakkaat osittaispurkauksien aiheuttamat äänet, jotka alkavat säännöllisesti kuulua jännitteen noustessa 15 kV yläpuolelle ja voimistuvat jännitteen kasvaessa edelleen. Äänten syyksi oli epäilty ilman asianmukaista läpivientieristintä toteutettua suurjännitejohdon läpivientiiä testauskaapin takaseinän kohdalla. Lisäksi eräät muut komponentit, erityisesti mittauspiirin jännitteen-

jakajan ylävastus oli havaittu äänilähteeksi. Säännöllisten hälyäänten ongelmana on se, että ne haittaavat vikatilanteiden, kuten oikosulun havaitsemista. Lisäksi osittaispurkaukset aiheuttavat räsistystä komponentteihin, mikä pitkällä aikavälillä todennäköisesti vaurioittaa niitä.

Ferrantilla mitattaessa on havaittu läpilyöntien osuvan huomattavan usein elektrodien reunojen läheisyyteen, erityisesti vaihtojännitteellä. Tämä viittaisi sähkökentän tihtymisiin, joiden on epäilty johtuvan virheellisestä elektrodien muotoilusta ja ympäröivän metalliastian vaikutuksista. Tosin teorian mukaan metalliastioiden ei pitäisi vääristää elektrodien välistä sähkökenttää, koska niiden etäisyys on useita dekadeja suurempi kuin näytteen paksuus. Metalliastioiden on epäilty vääristävän mittaustuloksia myös niistä öljyyn liukenevien hiukkasten takia.

Laitteen viisarimittarissa on havaittu epämääräistä käyttäytymistä. Sen on havaittu putoavan hieman läpilyönnin tapahduttua ennen asettumista maxhold-piirin säilyttämään vakioarvoon. Lisäksi siinä on havaittu ajoittain selittämätöntä virheikäyttäytymistä: joskus viisari on jatkanut nousuaan läpilyönnin jälkeen ja erityisesti kesäisin kostealla säällä viisari on alkanut pudota hitaasti tilanteessa, jossa sen pitäisi jäädä osoittamaan läpilyöntijännitettä läpilyönnin jälkeen. Mittarin kalibroinnissa on havaittu samanlaista kalibrointikertojen välistä skaalauskerroimen vaihtelua kuin Helvarissa.

5.3 Ferrantiin liittyvä tutkimus

Ferrantin toimintaa tutkittiin tämän diplomityön puitteissa pintapuolisesti. Erityisesti kiinnitettiin huomiota edellä mainittuihin ongelmiin, kuten viisarimittarin käyttäytymiseen.

Ferrantin jännitemuotoja läpilyönnin aikana sekä tyhjäkäynnissä tutkittiin oskilloskoopin avulla. Käytettiin TTY:n laboratoriosta lainattuja LeCroy LT364 oskilloskooppia ja North Star –suurjännitemittapäätä. Mittauspiiri muodostettiin saman periaatteen mukaan kuin TTY:n vertailumittauksessa. Virranmittausvastuksena käytettiin nimellisarvoltaan $10\ \Omega$ (tarkka arvo $9,9\ \Omega$) vastusta. Ohessa on oskilloskoopilla mitatut tulokset ja referensseinä aiemmin laitteella samoista laminaattityypeistä otetut testisarjat. Osa oskilloskoopin testisarjoista on vajaita, koska osa testeistä epäonnistui virran kynnysarvon määrittämisessä ilmenneiden ongelmien takia. Tarkemmat testitulokset ovat liitteen A taulukossa 10.

Taulukko 4. Tulokset vertailumittauksista, jotka tehtiin LeCroy-oskilloskoopilla ja North Star -mittapöydällä

Näytteen no.	1	2	3	4	5	6
Testityyppi	AC	AC	AC	AC	DC	DC
Paksuus(μm)	94	119	185	156	94	125
Keskiarvo Ferranti (kV)	9,6	11,5	13,7	15,2	31	34,3
Näytteiden määrä	7	4	9	5	10	10
Keskiarvo Lecroy (kV)	10,78	12,37	14,63	15,13	28,81	35,47
Keskihajonta Lecroy (kV)	0,81	0,14	0,88	0,36	2,26	2,50
Läpilyöntilujuus (MV/m)	114,6	103,4	79,08	97,00	306,5	283,7
Ero Lecroy-Ferranti (%)	12,25	7,60	6,78	-0,45	-7,05	3,41

Oskilloskoopilla saadut läpilyöntijännitteiden arvot olivat pääosin hieman suurempia kuin Ferrantin oman mittarin jännitearvot. Kuitenkaan systemaattista kerrointa, jolla tulokset eroaisivat, ei löytynyt, ja erot voivat johtua myös pienestä otoksen koosta. Testitulosten suurien erojen takia tutkittiin myös laminaatin läpilyöntilujuuden hajontaa tarkemmin testaamalla yhteensä 40 näytettä samasta laminaattilaadusta 10 mittauksen sarjoina. Havaittiin, että erot sarjojen välillä oli huomattavia, suurimmillaan yli 10 %, mikä voisi selittää pitkälti suuret erot oskilloskoopin ja Ferrantin mittarin välillä.

Havaittiin, että läpilyöntihetkellä tapahtuu jännitteessä hyvin nopea transientti, jonka aikana jännite nousee noin kolminkertaiseksi jatkuvan tilan jännitteeseen verrattuna. Transientin jälkeen jännite putoaa DC:llä hyvin nopeasti nolnaan ja siinä esiintyy piikkejä molempiin polariteetteihin melko tasaisesti, mutta ne ovat paljon matalampia. AC:llä jännite putoaa hyvin lähelle nolaa parin verkkojakson kuluessa. Hyvin pieni läpilyöntin jälkeinen jäännösjännite viittaa johtavan purkaukskanavan ja pysyvän oikosulun syntyyn.

Maxhold-piirin toimintaa tutkittiin sekä tyhjäkäynnissä, että läpilyöntitestauksessa. Mittarin osoitin putosi keskimäärin puoli mittarin asteikon lukuväliä ennen vakioarvoon asettumista sen jälkeen, kun jännite oli poistettu päältä. Tämä tarkoittaa noin 2 % pudotusta, jos jännite on lähellä mittariskaalan yläpäättä. Se on suhteellisen vähän eikä aiheuta huomattavaa virhettä. Jännitteen nousun pysäyttämiseksi ”motor stop” -napin avulla on kuitenkin huomattava viive: nappia on painettava noin kaksi mittarin asteikon lukuväliä aikaisemmin, jos jännite halutaan pysäyttää tiettyyn arvoon. Maxhold-piirin todettiin säilyttävän huippujännitteen myös tilanteissa, joissa jännite katkaistaan ennen läpilyöntiä tai lasketaan hitaasti nolnaan ”lower”-napin avulla.

Läpilyöntijännitteen riippuvuutta läpilyöntikohdan sijaintiin elektrodin reunan suhteen tutkittiin jonkin verran. Hypoteesina oli, että heikommat läpilyöntijännitteet johtuisivat liukupurkauksista reunan läheisyydessä, koska sähkökentän tiheys öljyn täyttämässä näytteen ja yläelektrodin välisessä kiilassa on hieman suurempi kuin näytteessä. Rutii-

nimittausten yhteydessä tehty läpilyöntireikien sijainnin seuranta, joka kattoi yli 100 läpilyöntiä, ei kuitenkaan osoittanut tällaista riippuvuutta läpilyöntijännitteen ja läpilyöntikohdan sijainnin välillä.

5.4 Mahdollisuudet nykyisen laitteen kehittämiseksi

5.4.1 Automaattisen jännitteen poiskytkennän suunnittelu

Ferranti-laitteeseen on mahdollista kehittää läpilyöntiin reagoiva automaattinen suurjännitteen poislaukaisu. Tämä parantaa turvallisuutta ja vähentää elektrodeihin kohdistuvaa räsytystä läpilyönnin aikana, mikä on aikaisemmin johtanut huomattavaan elektrodien kulumiseen.

Laitteistossa on tällä hetkellä testauskaapin ovien avaamiseen perustuva jännitteen turvakatkaisujärjestelmä. Laitteessa on suojapiiri, jossa testauskaapin ovet sekä testauskaapin taakse muuntajatilaa vievä ovi toimivat katkaisijoina. Jos yksikin ovi avataan suurjännitteen ollessa päällä, tämä katkaisee ohjauspirin, jolloin pääkytkinrele siirtyy OFF-tilaan. Ajatuksena on kehittää samantyyppinen järjestelmä, joka reagoisi läpilyöntiin.

Jännitteen poiskytkentä on yksinkertaisinta toteuttaa digitaalisen ylivirtareleen avulla. Lisäksi tarvitaan mittamuuntaja, joka havaitsee läpilyönnistä seuraavan pysyvän tilan oikosulkuvirran. Mittamuuntaja kannattaa sijoittaa muuntajan syöttöjohtoon ensiöpuolelle kahdesta syystä. Virrat ovat ensiöpuolella suurempia, joten muuntajan mittaustarkkuus on parempi, ja lisäksi sen sijainti testauskaapin takana ei häiritse testausta.

Virtareleeseen on säädettävissä virran arvo, jolla tämä katkaisee virran kontrollipiiristä. Kun virta katkeaa kontrollipiiristä, Ferrantin pääkytkinrele siirtyy off-tilaan katkaisten jännitteen suurjännitepuolelta. Modernit virtareleet perustuvat digitaaliseen logiikkaan, ja niissä on virran kynnysarvon säätömahdollisuus. Niihin on kytkettävissä latching-ominaisuus, jolloin OFF-tila jää päälle, vaikka virta putoaisikin alle kynnysvirran arvon. Latching-toiminnon käyttäminen ei kuitenkaan ole tarpeellista, koska pääkytkinrele ei palaudu takaisin ON-tilaan ilman ”HV on” -napin painamista.

Ferrantin jatkuvan tilan oikosulkuvirraksi mitattiin muuntajan ensiöpuolella 3-4 A. Suurin virta ennen läpilyöntiä oli noin 300 mA, joten näiden välinen ero on riittävän suuri kynnysvirtareleen luotettavalle toiminnalle. Virranmittaukseen riittää siten 5 A mittamuuntaja.

Virtarelevaihtoehdoksi esitettiin Carlo Gavazzin DUA01-relettä saman valmistajan M5-virranmittausmuuntajan kanssa. Laitteen reagointiaika läpilyöntiin on maksimissaan 100 ms, mikä on nopeampi kuin manuaalinen poislaukaisuaika. Rele voidaan kytkeä samaan suojapiiriin ovien kanssa, koska Ferrantin sähköpiirustuksen mukaan ovipiirin katkeamisella ja ”HV on” -napin painamisella on sama vaikutus laitteen pääkytkinre-

leeseen, jolloin laitteen ohjausyksikön toiminnan ei pitäisi häiriintyä virrankatkaisureleen kytkemisestä. Tällöin ohjauspiirin ja turvalaukaisujärjestelmän rajapintaa ei tarvitse muokata.

Laitteen toiminta muuttuisi automaattisen virrankatkaisun myötä siten, että ”HV on” nappia ei tarvitse painaa rutiinitestauksen yhteydessä. Nappi jäisi kuitenkin laitteeseen hätäpysäytysnapiksi siltä varalta, että virtarele menee epäkuntoon tai testi halutaan keskeyttää ennen läpilyöntiä.

5.4.2. Jännitemittauksen uusiminen

Merkittävä uudistus tulevaisuudessa olisi jännitemittarin korvaaminen modernilla laitteella. Syitä tähän on yleiset viisarimittarien ongelmat, kuten huono lukemataarkkuus ja alttius sähkömagneettisille häiriöille. Tuloksissa on havaittu huomattavaa, suurimmillaan 10 % eroa oskilloskoopilla tehtyihin testeihin verrattuna. Ilmankosteuden on todettu aiheuttavan jännitteen hidasta alenemista maxhold-piirissä. Myös jännitealueen valintaan käytetty vastusjärjestelmä on altis ilmastollisista olosuhteista aiheutuville stabiiliusongelmille. Kaksi kertaa vuodessa tehtävä kalibrointi ei välttämättä anna luotettavaa arvoa laitteen skaalauskerroimelle sen ajautumisesta johtuen. Skaalauskerroimessa havaitut vaihtelut määräraikaskalibrointien välillä ovat olleet useita prosentteja. Motiivina uuden mittarin hankkimiselle on myös läpilyöntitulosten automaattinen tallentaminen, joka Terichem Tervakoski Oy:ssä on ollut suunnitteilla.

Jännitemittauksen uusimiselle on kaksi päävaihtoehtoa. Yksinkertaisempi vaihtoehto perustuu yleismittareiden huippujännitteen tallennusominaisuuteen. Periaatteessa yleismittari kytkettäisiin Ferrantin jännitteenjakajan pienjännitepuolelle, ja joka testin yhteydessä asetettaisiin se tallentamaan huippujännitteen arvon. Menetelmän etuna olisi helppo asennus, joka ei vaatisi muutoksia laitteeseen ja mittarin suhteellisen edullinen hinta. Menetelmä olisi laboratoriotyöntekijöille helppokäyttöinen, eikä vaatisi erityistä perehdyttämistä.

Yleismittarimenetelmän suurimpana haasteena on löytää mittari, jossa on sopiva tallennusalgoritmi huippujännitteen mittaamiseen. Mittarit, jotka ilmoittavat yksittäisiä tallennustuloksia huippujännitteinä, ja joiden näytteenottotaajuus on suuri, havaitsevat läpilyöntihetkellä esiintyvän transientin ja ilmoittavat sen huippuarvon virheellisesti läpilyöntijännitteinä. Useimmat halvemmat mittarit tallentavat huippujännitteen arvoja hyvin harvakseltaan, vain muutamia kertoja sekunnissa, jolloin tallennushetken osuminen lähelle läpilyöntihetkeä on satunnaista ja mittarin tallentamat arvot ovat lähes aina liian pieniä. Mittarit, jotka määrittävät huippujännitteen integroimalla pidemmän aikajakson yli useiden yksittäisten tallennettujen jännitearvojen pohjalta, ovat parempia tähän käyttötarkoitukseen. Vaihtojännitteellä puolikas verkkojakso (10 ms) olisi sopiva integroimisväli, jolloin mittari pystyisi helposti laskemaan myös RMS-arvon. Liian pitkällä integroimisvälillä tuloksen epätarkkuus kasvaa ja liian lyhyellä transientti todennäköi-

semmin vääristää laskettavaa keskiarvoa. Korkeataajuisten jännitekomponenttien suodatuksen omaavan mittarin käyttäminen poistaa liian lyhyen integrointivälin ongelman. Testipiirin ja näytteen ominaisuuksista johtuva transienttien kestoajan vaihtelu vaikeuttaa sellaisen integrointiajan ja näytteenottotaajuuden löytämistä, joka sopisi mahdollisimman monenlaisiin testaustapauksiin.

Toinen jännitteenmittausmenetelmä perustuu tietokoneohjelmistoon, johon mittausdata lähetetään joko yleismittarin GPIB-kytkennän avulla tai mittauskortin välityksellä. Läpilyöntijännite määritetään erillisellä ohjelmalla, joka tulkitsee halutun jännitteen siihen koodatun algoritmin avulla. Läpilyönnin tunnistuksen määritelmänä voidaan käyttää esimerkiksi jännitteen putoamista noltaan tai jännitteen suurta negatiivista muutosnopeutta. Tulokset pystyttäisiin tallentamaan suoraan tietokoneelle, jolloin manuaalisista mittauspöytäkirjoista voitaisiin luopua.

Menetelmän haasteena on ohjelman ylläpito ja muokkaaminen, johon tarvitaan melko syvällistä ohjelmoinnin osaamista ja syvällistä ymmärrystä läpilyönti-ilmiön teoriasta. Lisäkuluja tulisi läpilyöntitestaukseen kiinnitettävästä tietokoneesta ja mittausohjelmiston lisenssimaksuista. Mittauskorttipohjainen tallennus vaatisi uuden jännitteenjakajan, koska nykyisen jännitteenjakajan alapuolen jännitteet ovat liian suuria mittauskorteille. Vaihtoehto on kuitenkin yleismittarivaihtoehtoa parempi, ja samaa ohjelmarunkoa olisi mahdollista käyttää senkin jälkeen, kun laitteisto korvataan uudella muilta osin.

Nykyisen kaltaisessa testauksessa Ferrantin mittaustarkkuus ei kuitenkaan ole kriittinen, koska eristeiden asiakkaille ilmoitettavissa läpilyöntilujuuden arvoissa käytetään varmuusmarginaaleja, jotka ovat suurempia kuin mittarin vaihtelu referenssijärjestelmään nähden. Tämän takia jännitemittarin uusimista ei katsota kovin kiireelliseksi toimenpiteeksi. Tarkemman jännitemittauksen käyttö voisi tosin mahdollistaa hieman pienempien varmuusmarginaalien käytön ja siten lisätä yrityksen kilpailukykyä. Tämän toteaminen vaatisi kuitenkin lisätutkimusta siitä, missä määrin laminaatin ominaisuudet ja missä määrin mittalaitteen epävarmuus vaikuttavat läpilyöntilujuuden hajontaan.

Mittalaitteen osuutta tulosten hajontaan voidaan tutkia menetelmällä, jossa läpilyöntijännite luetaan yhtäaikaaisesti Ferrantin mittarista ja referenssimittarista, joka on käytännössä oskilloskooppi, ja verrata samasta läpilyönnistä eri mittarilla saatuja jännitearvoja. Hajonnan materiaalista aiheutuvaa osuutta voidaan taas tutkia testaamalla kohtuullisen suuri otos samasta materiaalista kalibroidulla referenssimittalaitteella. Jos materiaalista johtuva hajonta on huomattavan suuri, mittarin uusimiselle ei ole taloudellisia perusteita, koska asiakkaille ilmoitettavat varmuusrajat on joka tapauksessa materiaalin hajonnan takia pidettävä suurina. Laajemman tyhjäkäyntimittauskalibroinnin tekeminen Ferrantille (vähintään 10 jännitearvoa/jännitealue) on myös suositeltavaa skaalauskerroimen lineaarisuuden selvittämiseksi.

5.4.3. Muut parannusehdotukset

Merkittävin osittaispurkauksia vähentävä toimenpide olisi läpivientieristimen lisääminen testauskaapin ja muuntajatilan väliseen seinään. Tämä vähentäisi kipinöintiä suurjännitejohdon ja seinän välisessä ilmvälissä. Lisäksi jännitteenjakajan yläpuolen vastus todettiin huomattavaksi äänilähteeksi, joten sen korvaaminen samansuuruisella modernimmalla vastuksella olisi suositeltavaa.

Toinen pieni parannus olisi metallisten näytteiden säilytysastioiden korvaaminen muovisilla. Tällöin vaaratekijöitä lisäävä sähkö- ja magneettikenttien aiheuttama astioiden varautuminen ja lämpeneminen poistuisi, eikä metalliastioista liukenisi öljyyn hiukkasia, jotka voisivat vääristää sen permittiviteettiä tai lisätä sen johtavuutta ja siten vääristää mittaustuloksia.

5.5 Suunnitelma Ferrantin korvaavalle laitteistolle

On joitakin syitä, joiden takia Ferranti pitäisi uusia kokonaan tulevaisuudessa. Laitteen johtojen kiinnikkeet ovat paikoitellen huonossa kunnossa, minkä vuoksi uusien komponenttien kytkeminen laitteeseen saattaa vaurioittaa sitä pysyvästi, ja vaikutuksia on vaikea ennustaa. Laitteen dokumentaatio on puutteellista ja vaikeuttaa laitteen huoltamista. Laitteen mennessä epäkuntoon sen korjaaminen olisi erityisen hankalaa vanhojen osien kanssa yhteensopivien komponenttien huonon saatavuuden takia edellä mainittujen syiden lisäksi. Sähkömekaanisilla releillä on huomattava reagointiaika, ja ne aiheuttavat huomattavia transienteja käynnistys- ja sammutustilanteessa.

Yleisesti ottaen uusi laitteisto kannattaisi rakentaa tai rakennuttaa modulaarisena järjestelmänä, eli osat hankitaan erikseen ja niiden kytkennät suunnitellaan ja toteutetaan itse. Menetelmän etuna laitevalmistajalta kokonaisuutena tilattuun järjestelmään nähden on lähtökohtaisesti halvemmän hinnan lisäksi se, että järjestelmän dokumentointi ja huolto on helpompaa, sekä siihen on helpompi tehdä muutoksia tarpeen tullen. Yksittäinen hajonnut osa voidaan korvata uudella tarvitsematta muuttaa järjestelmän muita osia. Myös joitakin nykyisen järjestelmän osia, kuten suurjännitemuuntajaa ja virranrajoitusvastusta on mahdollista käyttää uudessa järjestelmässä.

Uuden modulaarisen järjestelmän tärkeimmät osat ovat ohjattava jännitelähde, muuntaja, jännitteenjakaja ja mittauskortti. Lisäksi tarvitaan sähkö- ja datakaapeleita osien välille, turvalaitteiden releitä ja merkkivaloja, sekä tietokoneohjelma testausjärjestelmän toiminnallisuuden koodaamiseen sekä testien ajamiseen.

Mittauskortti on tietokoneen korttipaikkaan kytkettävä komponentti, joka vastaanottaa analogiset jännite- ja virtasignaalit ja muuntaa ne digitaalisiksi raakadataksi varsinaista mittausohjelmistoa varten. Kalliimmat ja monimutkaisemmat mittauskortit sisältävät myös muita funktioita, kuten signaalin suodatusta tai Fourier-muunnoksia. Mittauskortit

käyttävät yleensä tietokoneen PCI-porttia, tai jotain sen kehittyneempää versiota, kuten PCI Express [27]. Mittauskorttien näytteenottotaajuus vaihtelee, mutta useimmissa malleissa halvimpia lukuun ottamatta se on vähintään 100 kS/s. Useaa mittauskanavaa käytettäessä nimellinen näytteenottotaajuus on jaettava kanavien lukumäärällä, eli 2 kanavan tapauksessa se olisi 50 kS/s [28]. Tämä on riittävä läpilyöntiä edeltävän RMS-jännitteen määrittämiseen, mutta läpilyöntitransientin tunnistamiseen se ei välttämättä riitä. Erillistä virranmittausta ei välttämättä tarvita, koska digitaalisella datatyökalulla läpilyönti voidaan tunnistaa jännitteen putoamisen perusteella samasta datajoukosta kuin itse läpilyöntijännite. Näytteenottotaajuus 100 kS/s riittää todennäköisemmin läpilyöntitransientin havaitsemiseen, mutta varmempaa olisi käyttää vähintään 200 kS/s näytteenottotaajuuden omaavaa korttia.

Ohjattavalle jännitelähteelle on kaksi päävaihtoehtoa. Ensimmäinen on perinteiseen säätömuuntajaan perustuva järjestelmä, jonka ohjaus on koodattu tietokoneohjelmalla. Esimerkki tällaisesta järjestelmästä on lähteessä [29], jossa ohjauslogiikka on tehty äärellisen automaatin periaatteella ja logiikan toteuttamiseen on käytetty Arduino-piirilevypohjaa. Toinen vaihtoehto on pulssinleveysmodulaatioon (PWM) perustuva järjestelmä. Yksinkertaisessa muodossaan siinä säädetään jännitteen amplitudia avaamalla ja sulkemalla kytkimiä ohjaussignaalien mukaan, jolloin ulostuloon muodostuvan jännitteen suuruus ja muoto ovat riippuvaisia kytkimien auki- ja kiinnioloaikojen suhteesta. Pulssinleveysmodulaatio toimii perusmuodossaan tasajännitteellä, mutta valmiissa jännitelähteissä on sisäänrakennettu tasa- ja vaihtosuuntaus. Tällaisia ohjattavia jännitelähteitä ovat esimerkiksi Elgar SW 5250 ja Kikusuin PRC-sarjan laitteet. Myös Chromalla on tällaisia ohjattava jännitelähteitä, 61500-sarjassa, joiden maksimiteho on laitteesta riippuen välillä 500-4000 VA [30]. Tällaisissa laitteissa on usein myös monimutkaisempia ominaisuuksia, kuten automaattinen virrankatkaisu kynnyksarvon ylityttyä. Tehoelektroniikkaan perustuva laite on kalliimpi kuin säätömuuntaja, mutta siinä on ohjaus valmiina, eikä laitteistolähteistä ohjelmointia tarvitse tehdä itse. Tuotetun jännitteen laatu, erityisesti PWM:n kytkentätapahtumista aiheutuvat kytkentätransienttien suodatus, tulee tarkastaa ennen tehoelektroniikkapohjaisen laitteen käyttöönottoa ja varmistaa, ettei tehoelektroniikkalaitteilla ole vaikutusta testauksen tuloksiin.

Jännitteen nostamisella suurjännitetasoon DC:llä on kaksi vaihtoehtoa. Toinen on täsmälleen sama kuin Ferrantissa, eli käytetään AC-muuntajaa ja tasasuuntaus tapahtuu suurjännitetasossa. Tämä vaihtoehto on yhteensopiva Elgarin tai muun AC-jännitelähteen kanssa. Tasasuuntaukseen on olemassa kehittyneempiä transistoreihin perustuvia menetelmiä, mutta yksinkertainen puolialtotasasuuntaus käy hyvin tähän tarkoitukseen, koska jännitteen epätasaisuutta aiheuttava kuorma on hyvin pieni, jolloin tuotetun tasajännitteen rippeli jää pieneksi [1]. Etuna menetelmässä on yhteinen jännitelähde ja muuntaja molemmille jännitemuodoille. Ferrantin nykyistä muuntajaa on mahdollista käyttää, jos se on vielä toimintakunnossa laitteen hajotessa. Tasasuuntauskomponenttien suuri jännitteenkestovaatimus sekä niiden kytkeminen manuaalisesti testaus-

tilojen vaihdon välillä on haittapuolena tässä menetelmässä. Kauko-ohjattavien kytkinten jännitteenkesto ei yleensä riitä kymmenien kilovolttien jännitteisiin ja siihen soveltuvat kytkimet ovat hyvin kalliita.

Toinen vaihtoehto on käyttää erillistä vahvistavaa tasajännitelähdettä, jolloin erillistä tasasuuntauspiiriä ei tarvita. Tällaisia on esimerkiksi Spellmann SL 1200 ja Glassman High Voltage Inc:in ET- ja KR-sarjojen laitteet. Järjestelmään tarvitaan suurjännitepuolelle kontaktori, joka kytkee joko AC- tai DC-lähteen testipiiriin. Tarvitaan tosin vain yksi kytkin, kun tasasuuntauspiirin tapauksessa tarvitaan kaksi.

Laitteistoon tarvitaan kiinteä jännitteenjakaja, jonka jakosuhteen on oltava sellainen, että sen mittauskorttiin menevä jännite on korkeintaan 10 V, joka on sisäänmeno-jännitteen maksimi useimmilla mittauskorteilla. Koska suurimmat mitattavat jännitteet ovat luokkaa 40 kV, tavanomainen jakosuhteeltaan 1000:1 tai 2000:1 jännitteenjakaja ei riitä, vaan tarvitaan jakosuhteeltaan noin 5000:1 oleva jännitteenjakaja.

Laitteen ohjaus ja datan lukeminen tapahtuvat mittausdatan käsittelyyn erikoistuneella tietokoneohjelmalla. Tällainen on esimerkiksi National Instrumentsin LabView. Ohjelmointi LabViewissa on mahdollista tehdä graafisesti tilakaavioiden avulla, joten syvälistä ohjelmointikielten osaamista ei tarvita [31]. On myös mahdollista importoida jollain tunnetuimmista ohjelmointikielistä, kuten C++, Python, Java, tai Matlabilla, kirjoitettu koodi ohjelmistoon [31]. Ohjelmaan koodataan algoritmi, joka tunnistaa läpilyönnin juoksevan jännite- ja virtadatan perusteella ja se voi perustua suureiden huippuarvoihin, mutta myös muutoksiin du/dt ja di/dt . Korkeataajuisia transientteja pystytään digitaalisesti suodattamaan ilman, että mittausjärjestelmään syntyy jännitehäviöitä analogisista suotimista.

Laitteistoon tarvitaan lisäksi turvapiiri, joka katkaise jännitteen oikosulkutilanteessa, sekä silloin, kun testauskaapin ovi avataan. Perusmekanismi turvapiirille voi olla hyvin samanlainen kuin aikaisemmissa laitteissa. Tosin suojapiirissä oleva ohjausjännite voi hyvin olla huomattavasti verkkojännitettä pienemmällä tasolla ja suojapiirin tila (auki/kiinni) voidaan lähettää digitaalisesti ohjausjärjestelmään.

6. ELEKTRODIEN OPTIMAALISEN MUODON TUTKIMINEN

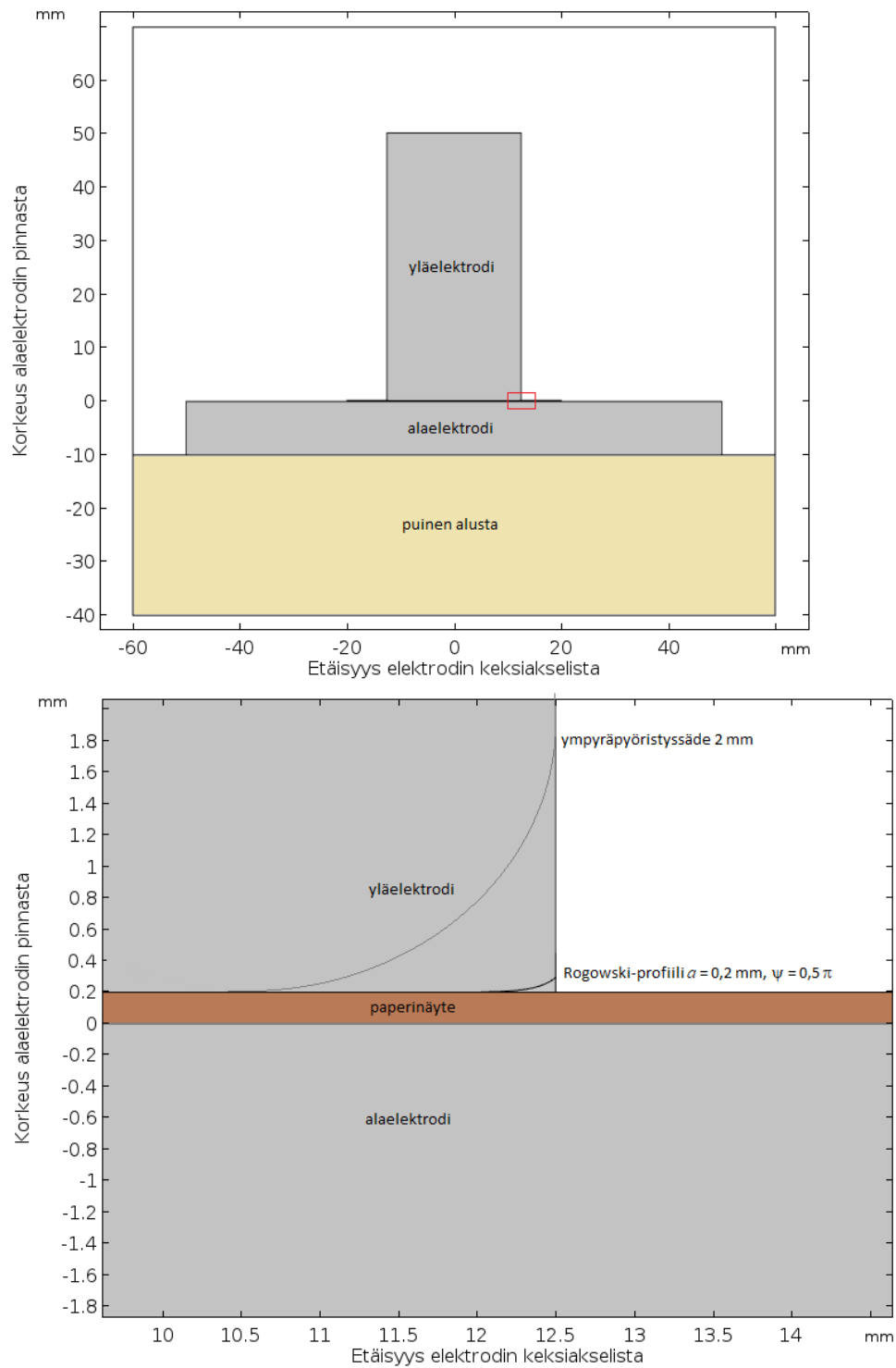
Tässä luvussa tutkitaan, miten yläelektrodin pohja tulisi muotoilla, jotta sähkökentän voimakkuus näytteessä olisi mahdollisimman tasainen. Käytetyimmät elektrodien pohjan muodot käydään läpi, mutta pääpaino on Rogowskin yhtälöihin perustuvilla malleilla. Lyhyesti käsitellään myös materiaalien ja näytteen paksuuden vaikutusta sähkökentän jakaumaan. Läpilyöntien elektrodeihin aiheuttamia kulumia kuvataan profilometrillä, ja niiden vaikutuksia sähkökenttäjakaumiin pohditaan lyhyesti.

6.1 Sähkökenttien simuloinnit eri elektrodimuodoilla

6.1.1 Simuloitava elektrodimalli ja yleiset parametrit

Elektrodien pohjan pyöristykseen ja sähkökentän jakaumaan eri vaihtoehtoissa liittyvät simuloinnit tehtiin Comsol Multiphysics –sovelluksella (versio 5.3). Elektrodirakenteen symmetriasta z -akselin suhteen johtuen simuloinnit tehtiin kaksiulotteisena. Pohjan muotoina käytettiin tasopohjaista, ympyräsäteellä pohjasärmästä pyöristettyä sekä erilaisia Rogowskin yhtälöiden avulla määriteltyjä profileja.

Elektrodien koot valittiin Tervakosken Helvar-laitteessa käytettyjen elektrodien mukaan. Yläelektrodin halkaisijaksi valittiin 25 mm ja alaelektrodin halkaisijaksi 100 mm. Yhdessä tapauksessa simuloitiin rakennetta, jossa elektrodit ovat halkaisijaltaan yhtä suuria. Näytteen paksuudeksi valittiin lähes kaikissa simuloinneissa 200 μm . Näyte valittiin mahdollisimman paksuksi, jotta kenttäjakaumat olisi helppoa nähdä kuvassa, kuitenkin niiden näytepaksuuksien rajoissa, joita Terichem Tervakoski Oy:ssä on testattu. Joitain simulointeja tehtiin vertailun vuoksi 100 μm näytepaksuudella. Jännitteenä elektrodien välillä on käytetty arvoa 1,0 kV, jolloin homogeeniseksi sähkökentäksi elektrodivälissä tulee 5 MV/m. Elektrodimateriaaliksi valittiin ruostumaton teräs (1018-teräs), koska sitä yleisesti pidetään parempana ja tulevaisuudessa yleisempänä materiaalina.



Kuva 24. Käytetty elektrodimalli simuloinneissa. Suurennetut simulointikuvat ja Excel-analyysissä käytetyt datapisteet sijoittuvat punaisella merkitylle alueelle, joka näkyy suurennettuna alemmassa kuvassa.

Simulointien tarkoituksena on antaa pintapuolinen kuva elektrodin pohjan muotoiluun liittyvistä parametreista, jotka vaikuttavat sähkökentän tihentymiin, eikä tulosten numeroarvoja ole luotettavaa sellaisenaan käyttää. Huomattavaa on, että simuloinneissa elektrodit ja näytteet ovat ideaalisen sileitä. Todellisuudessa näytteissä on jonkin verran epä-

tasaisuuksia, mikä aiheuttaa satojen nanometrien tai mikrometrien kokoisia ilmataskuja rajapinnoille. Lisäksi paperilaatujen permittiviteeteissä on eroja, ja näytteisiin kertyy avaruusvarausta, mitä simulaatio-ohjelma ei ota huomioon. Ohjelman laskentaverkon tarkkuuteen liittyvien rajoitusten takia osa simuloinneista jouduttiin tekemään pienemmällä alueella, mikä aiheuttaa epävarmuutta tuloksiin, joskin virheen pitäisi olla merkityksettömän pieni, koska pienempikin simulaatioalue oli huomattavasti suurempi kuin tutkittava alue.

Comsol Multiphysics –ohjelma laskee Electrostatics-moodissa sähkökentän arvon x - ja y -koordinaatit erikseen. Sähkökentän itseisarvo saadaan kaavan

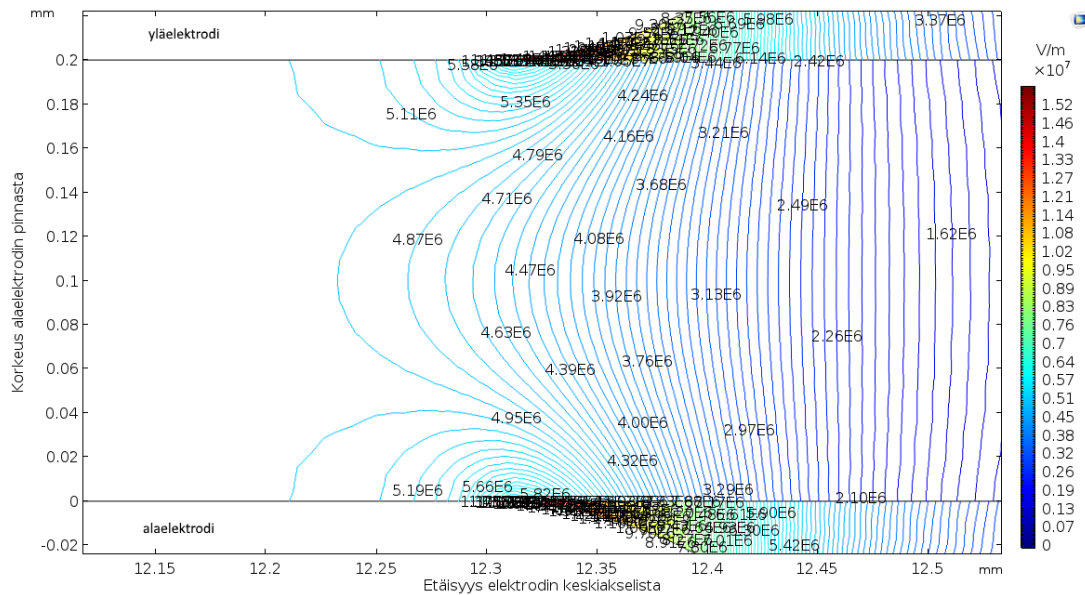
$$|E| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (6.1)$$

mukaan. Simulointikuvissa piirretään korkeuskäyräkuvaaja E :n funktiolle. Ohjelma laskee suureiden arvot mallin rakentamisen yhteydessä määritellyissä pisteissä ja piirtää korkeuskäyrät suorina viivoina pisteiden välille. Comsolin datapisteiden määrä on rajoitettu ja tarkimmillakin asetuksilla koko elektrodimalli koostuu noin 22 800 datapisteestä. Ohjelma valitsee datapisteet epätasaisesti siten, että ne keskittyvät alueille, jossa tutkittavan suureen muutokset ovat suuria ja antavat siten mahdollisimman paljon tietoa rajatulla datamäärällä.

Sähkökentän voimakkuuksia tutkittiin myös tallentamalla datapisteiden arvoja x -akselin suuntaisilla suorilla. Käytettiin suoria, jotka ovat 0,01 mm ($y = 0,19$) ja 0,03 mm ($y = 0,17$) etäisyydellä yläelektrodin ja näytteen rajapinnasta. x -koordinaatit, joiden väliltä datapisteitä kerättiin, olivat 10 mm ja 12,5 mm, mutta lopullisia kuvaajia rajattiin myöhemmin siten, että merkityksellisimmät alueet näkyivät tarkasti. Datapisteiden määrä suorilla oli muutamia satoja ja vaihteli sen mukaan, miten tiheä laskentaverkko oli suoran kohdalla.

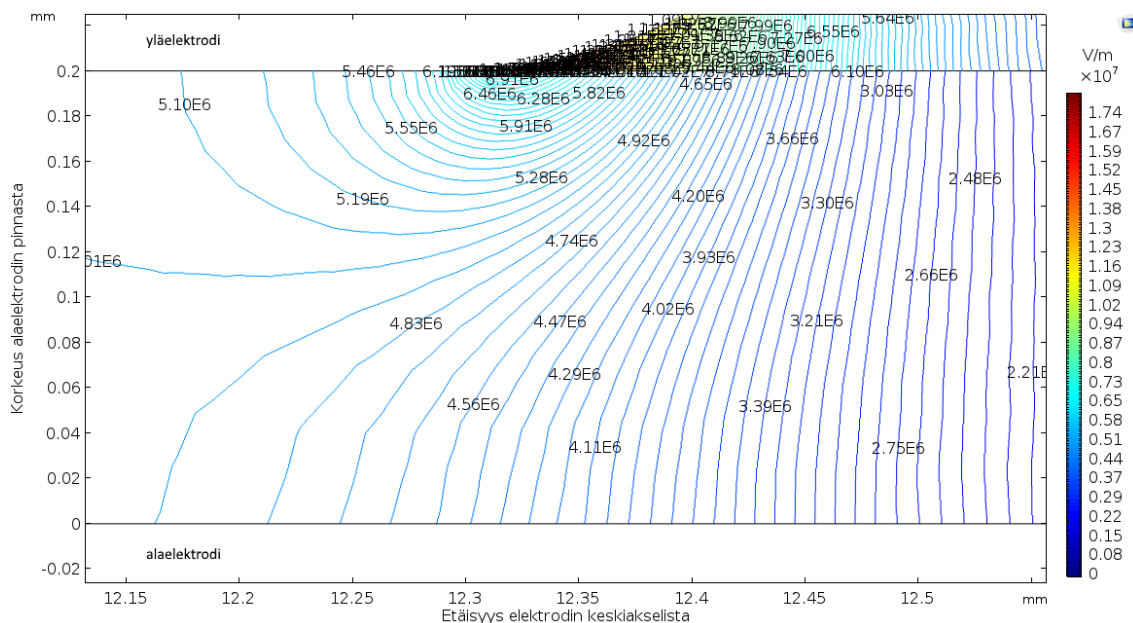
6.1.2 Tasopohjainen elektrodi

Koska simuloitaessa suurta aluetta tasopohjaisten elektronien tapauksessa laskentaverkko muodostuisi hyvin epätarkaksi, simuloinnit tehtiin pienemmälle alueelle, jonka koko on x -suunnassa 6 mm ja y -suunnassa 10 mm. Koska todellisuudessa kulmat eivät ole ideaalisen teräviä, käytettiin tasopohjaisissakin elektrodeissa minimaalista 0,2 mm ympyräpyöristystä. Ensimmäisessä simuloinnissa tutkitaan sähkökenttää halkaisijaltaan yhtäsuurten (25 mm) elektrodien tapauksissa ja toisessa tapauksessa, jossa alaelektrodi on sen verran suurempi, ettei sen reunan luoma tihentymä vaikuta yläelektrodin reunan luomaan tihentymään. Simulointitulokset ovat kuvissa 25 ja 26.



Kuva 25. Sähkökentän voimakkuus yhtäsuurilla elektrodeilla näytteessä elektrodin reunan läheisyydessä

Yhtäsuurilla minimaalisesti pyöristetyillä elektrodeilla elektrodien reunan tuntumaan syntyy näytteen molemmille puolille sähkökentän tihentymä, jossa kentänvoimakkuus on suurimmillaan noin 5,9 MV/m, kun se homogeenisessa kentässä on 5,0 MV/m. Sähkökenttä on maksimissaan noin 20 % suurempi tihentymässä. Sähkökentän voimakkuus laskee siirryttäessä paperin keskiosaa kohti, ja 30 μm etäisyydellä reunasta se on vielä noin 4 % suurempi.



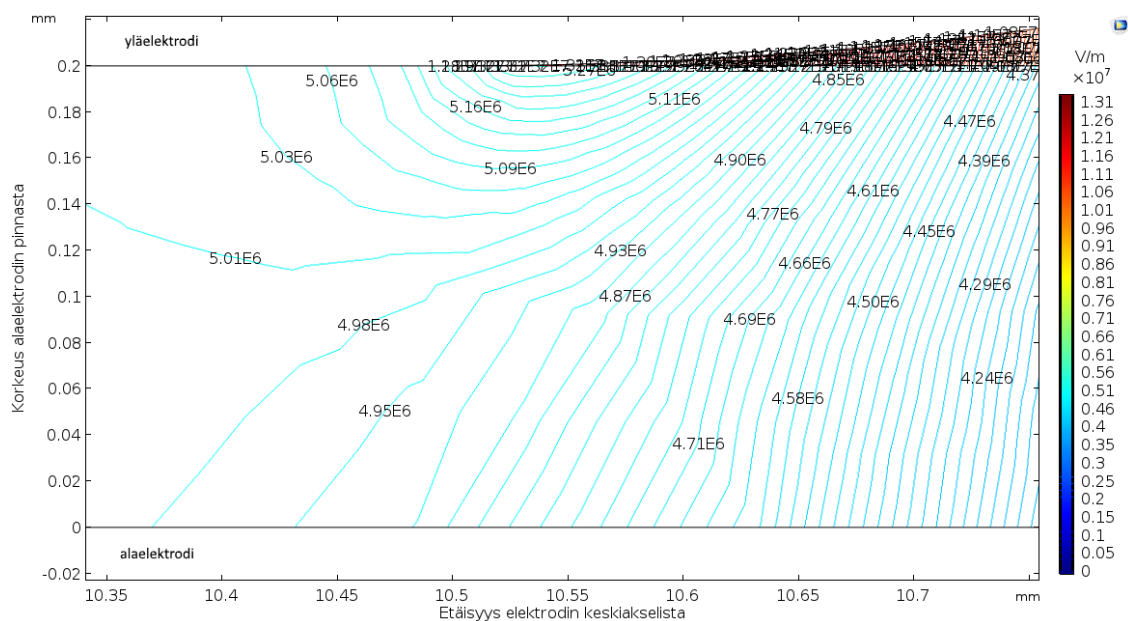
Kuva 26. Sähkökentän voimakkuus lähes tasopohjaisilla erisuurilla elektrodeilla

Leveämmän alaelektrodin tapauksessa sähkökentän tihentymä syntyy näytteeseen ainoastaan kapeamman yläelektrodin puolelle. Kenttä on tihentymän ytimessä noin 7

MV/m, mikä on noin 40 % suurempi elektrodiväliä vastaavaan homogeeniseen kenttään nähden. Tihentymä on myös laajempi ulottuen sekä syvemmälle eristeeseen että etäämmälle yläelektrodin reunasta. 5 % homogeenisesta kentästä poikkeavia arvoja esiintyy noin 60 μm päässä elektrodin reunasta. Tilanne on siis huonompi yhtä suuriin elektrodeihin verrattuna. Havainto tukee kirjassa [9] esitettyä teoriaa.

6.1.3 Ympyräpyörästetty elektrodi

Seuraavaksi tutkitaan yläelektrodin pohjan ympyräsymmetristä pyöristämistä reunojen läheisyydessä selkeästi erottuvalla pyöristysäteellä. Pyöristysäteenä r käytettiin simuloinnissa arvoa 2 mm.



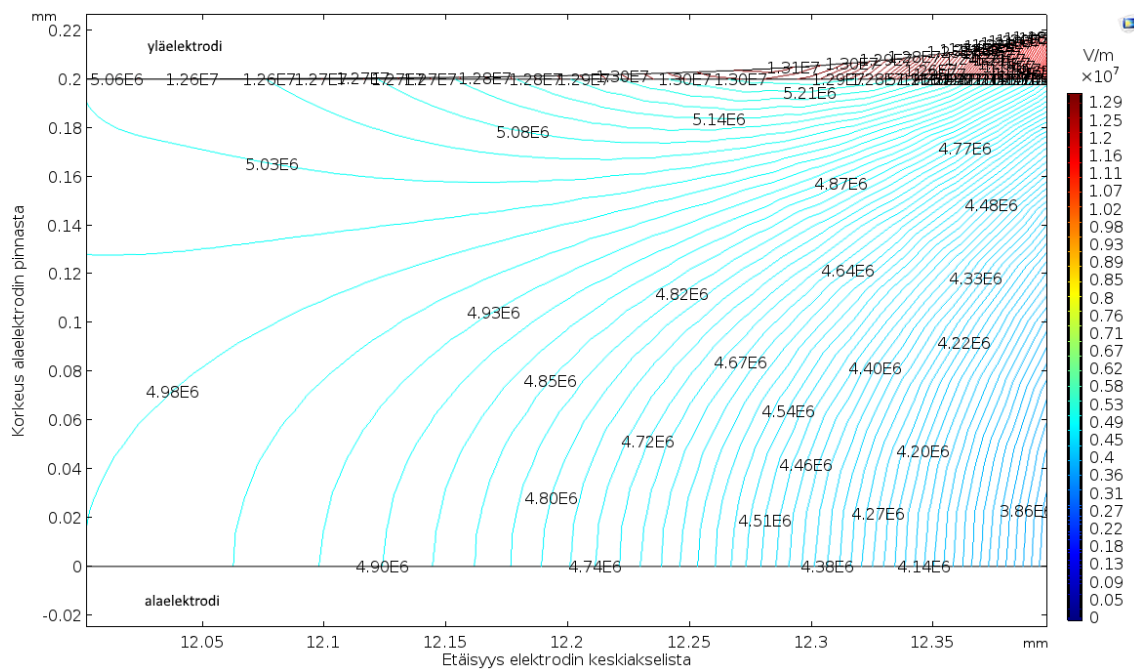
Kuva 27. Sähkökentän voimakkuus ympyräpyörästetyillä ($r=2$ mm) elektrodeilla

Kuvasta havaitaan, että ympyräpyörästys pienentää huomattavasti kentäntihentymän maksimin suuruutta, sen ollessa suurimmillaankin vain noin 5,25 MV/m eli 5 % suurempi kuin homogeenisessa kentässä. Huomattavaa on, että tihentymä sijaitsee kohdassa, jossa elektrodin pyöristyminen alkaa, tässä tapauksessa 2 mm päässä yläelektrodin reunasta. Ympyräpyörästetyssä elektrodissa onkin ongelmana, että pyöristysäteen ollessa liian suuri yläelektrodin ja näytteen kosketuspinta-ala pienenee oleellisesti, jolloin pinta-alavaikutuksella alkaa olla merkitystä. Standardikokoisen pohjan aikaansaamiseksi elektrodi on tehtävä leveämmäksi, mihin kuluu enemmän metallia, ja mikä lisää kustannuksia. Lisäksi hyvin voimakas sähkökenttä elektrodin ja näytteen välisessä kiilassa johtaa todennäköisesti liukupurkauksien syntymiseen. Ympyräpyörästystä kokeiltiin myös 1 mm pyöristysäteellä, mutta tämä johti edellistä huonompaan tulokseen kentänvoimakkuuden ollessa maksimissaan noin 5,5 MV/m ja kentäntihentymän ulottuessa

syvemmälle näytteeseen siten, että 40 μm etäisyydellä näytteen pinnasta esiintyi luokkaa 5,13 MV/m olevia arvoja.

6.1.4. Yksinkertaistettu Rogowski-malli

Seuraavaksi simuloidaan Rogowski-mallin mukaan pyöristetyillä elektrodeilla. Karakteristisena etäisyytenä a käytetään oletusarvoisesti elektrodivälin etäisyyttä 0,2 mm ja muotoparametrina lukua $\frac{\pi}{2}$, jolloin yhtälöt supistuvat yksinkertaistetuksi Rogowski-malliksi. Rogowski-yhtälöiden pohjalta piirretään parametrisoitu käyrä, jolla rajataan pois yläelektrodin nurkka ja täytetään tila ilmalla.



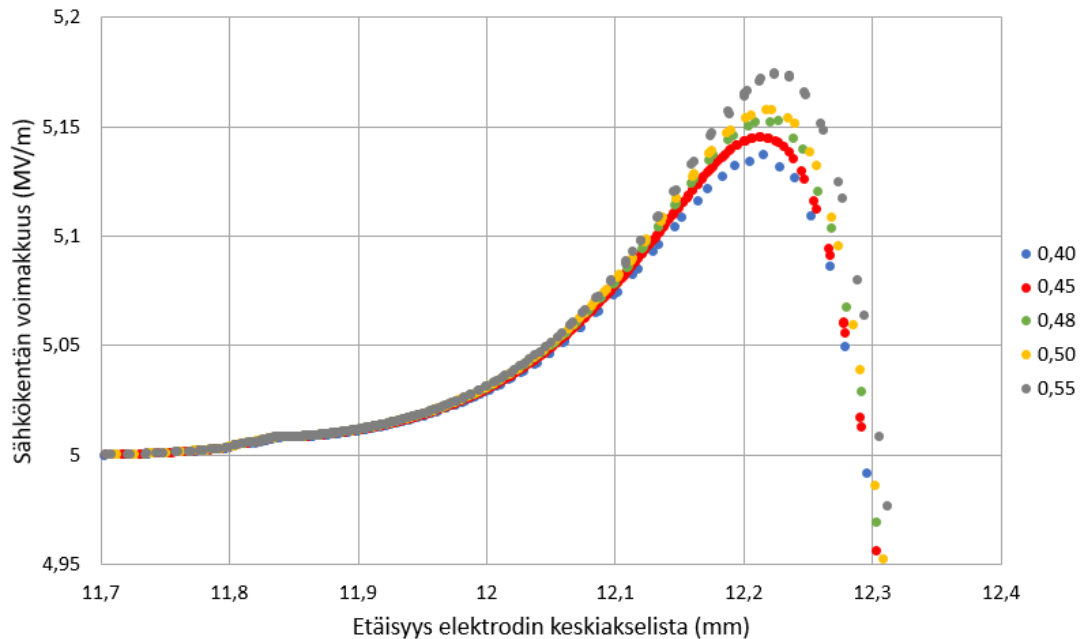
Kuva 28. Sähkökentän voimakkuus Rogowski-mallin mukaan pyöristetyillä elektrodeilla, kun Rogowski-parametrit ovat $a=0,2$ mm ja $\psi=\pi/2$

Kuvasta havaitaan, että sähkökenttäjakauma ei näillä parametrin arvoilla juurikaan parane ympyräpyöristettyyn muotoiluun nähden. Sähkökentäntihentymän kentänvoimakkuus nousee suurimmillaan yli 5,24 MV/m lukemaan. Ympyräpyöristettyyn verrattuna tulos on siinä mielessä parempi, että kentäntihentymän syvyys näytteen pinnasta on hieman pienempi.

6.1.5. Muotoparametrin ψ vaikutus

Simuloitaessa eri Rogowski-käyrän muotoparametrin ψ arvoilla havaitaan, että arvoilla $\psi < \pi/2$ käyrä kaartuu oikealle eksponenttifunktion käyrästä parametrin Φ kasvaessa. Arvoilla $\psi > 0,5\pi$ käyrä kaartuu vasemmalle ja jossain vaiheessa x -koordinaatti alkaa pienentyä Φ :n kasvaessa. Sähkökenttää simuloitiin useilla ψ :n arvoilla välillä $0,4\pi - 0,55\pi$ ja tutkittiin sähkökentän voimakkuutta datapisteissä suoralla, joka oli 10 μm päässä näytteen ja yläelektrodin rajapinnasta. Karakteristisena etäisyytenä käytetty 0,2

mm ei ole optimaalinen, mutta sitä käytettiin, koska sillä tihentymät ovat suurempia ja erot näkyvät paremmin. Tulokset ovat seuraavassa kuvaajassa.



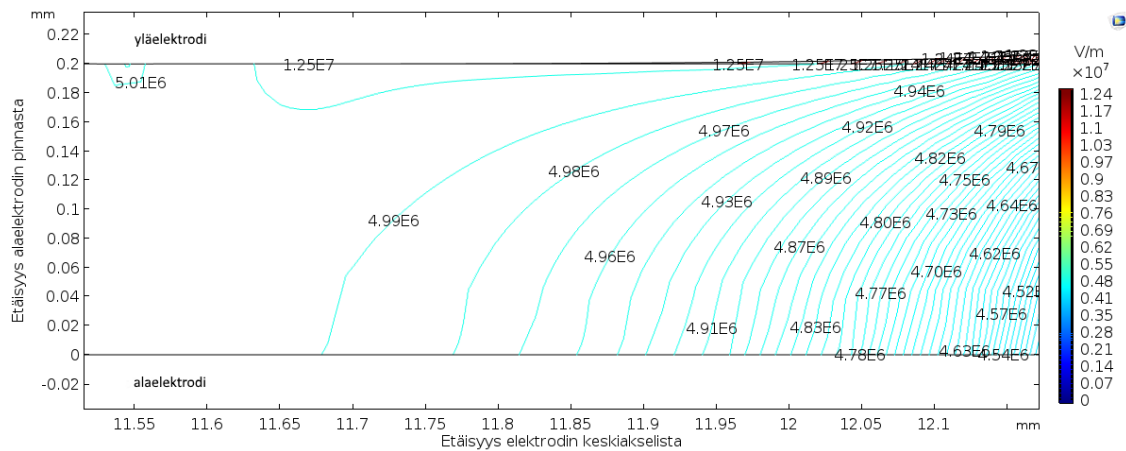
Kuva 29. Sähkökentän voimakkuus näytteessä 10 μm päässä näytteen ja elektrodin rajapinnasta eri ψ :n arvoilla ($x \cdot \pi$)

Simuloinneista havaittiin, että sähkökentän tihentymän maksimi kasvaa ψ :n arvon kasvaessa. Hyvin pienillä ψ :n arvoilla, jolloin tilanne alkaa lähestyä pyöristämätöntä elektrodia ongelmaksi muodostuu yläelektrodin reunan kohdalle syntyvä tihentymä. Tällöin yläelektrodin pyöristys ei nouse y-suunnassa kovin kauaksi näytteen pinnasta, ja elektrodin terävän särmän aiheuttama sähkökentän tihentymä ulottuu näytteeseen asti. Tämä ongelma alkaa näkyä vasta $\psi < 0,1\pi$ olevilla arvoilla. Terävää kulmaa ympäröivään ilmaan syntyy kuitenkin huomattava tihentymä jo paljon suuremmilla ψ :n arvoilla. Todellisuudessa terävää kulmaa voidaan pyöristää lisäämällä käyrään ympyräpyöristetty osio, mutta Comsol-ohjelmassa se oli hankala toteuttaa, joten yhdistelmäprofiilin simulointia ei tehty.

6.1.6 Karakteristisen välimatkan a ja näytteen paksuuden vaikutus

Kun karakteristista välimatkaa a kasvatetaan, kaareutuvan osan alkamiskohtaa on siirrettävä kohti elektrodin keskiakselia, jotta profiili kaareutuisi tarpeeksi kauaksi näytteen pinnasta elektrodin reunaan mennessä. Käytettäessä arvoa $a = 0,3$ mm, sähkökentän tihentymä siirtyy 11,5-11,6 mm päähän elektrodin keskiakselista, kun se a :n ollessa 0,2 mm oli 12,2-12,3 mm kohdalla. Arvolla $a = 0,3$ tehdyissä simuloinneissa sähkökentän tihentymän maksimi pieneni huomattavasti ollen vain noin 5,03 MV/m ja ulottuvan hyvin pienelle alueelle, kuten kuvasta 30 näkyy. Tihentymän maksimissa ei ollut juuri eroa arvojen $a = 0,3$ ja $a = 0,4$ välillä. Suuremmalla arvolla profiilin erkanemiskohta tasopohjasta ja tihentymän sijainti siirtyivät lähemmäksi elektrodin keskiakselia. Karakte-

ristisen välimatkan muutos on analoginen ympyräpyörityksen pyörityssäteen muuttamiselle ja vaikutus sähkökentän tihentymisiin on samansuuntainen.



Kuva 30. Sähkökentän voimakkuus Rogowski-muotoillussa elektrodissa, kun $a = 0,3$ ja $\psi = 0,5 \pi$.

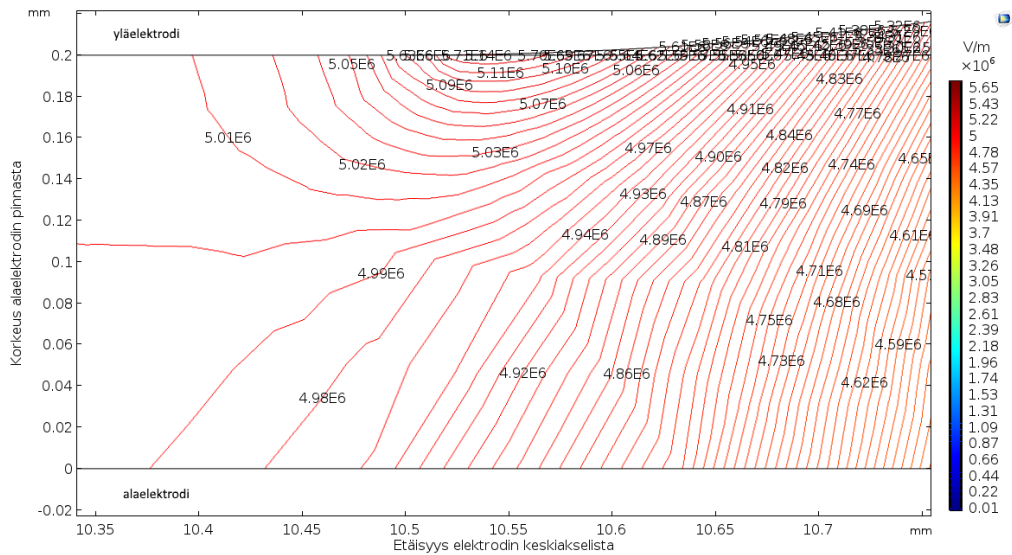
Kun näytteen paksuutta pienennetään, sähkökentän tihentymän arvo pienenee, mikäli karakteristinen etäisyys a pysyy samana. Karakteristisen etäisyyden ja näytteen paksuuden suhde näyttää olevan määräävä tekijä sähkökenttäjakauman kannalta. Tilanne siis paranee näytteen paksuuden pienentyessä, jos samaa elektrodia käytetään eripaksuisilla näytteillä. Tämän takia elektrodit on suunniteltava suurimpien käytettävien näytepaksuuksien perusteella.

6.1.7. Öljy läpilyöntiympäristönä

Simuloitiin tapausta, jossa orgaanista öljyä käytettiin läpilyöntiympäristönä ilman sijaan. Terichem Tervakoski Oy:ssä käytetyn dodekyylibentseenin suhteellinen permittiviteetti on normaalilämpötilassa likimain 2,25 [20]. Tätä arvoa käytettiin simuloinneissa.

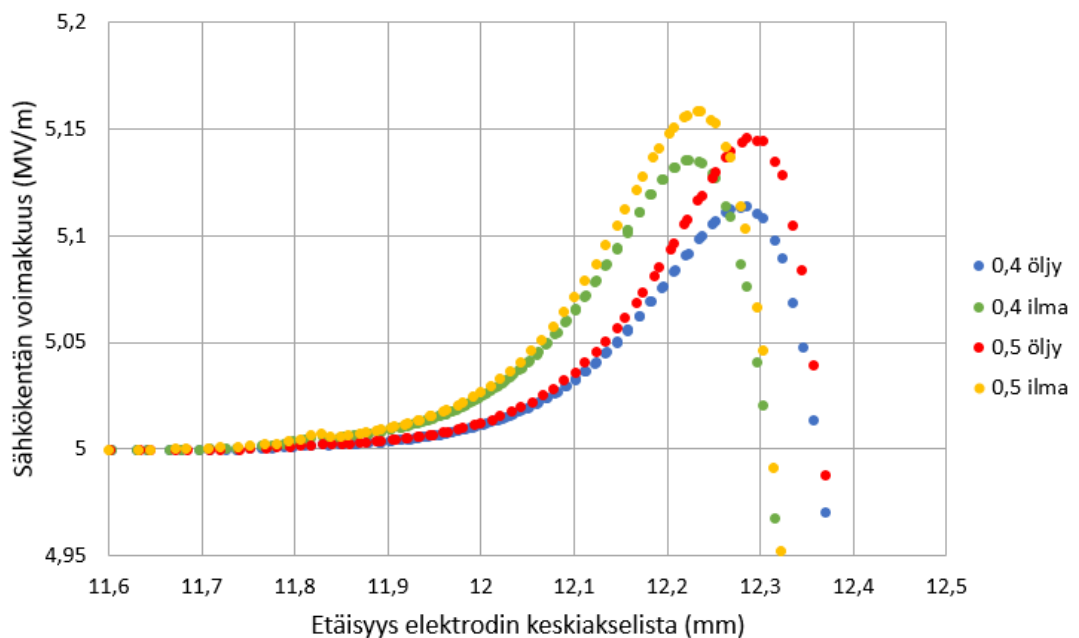
Simuloinneissa todettiin, että tasopohjaisella elektrodilla öljyn käyttö ei juurikaan paranna sähkökenttäjakaumaa. Tihentymän maksimin suuruus on edelleen noin 6,0 MV/m.

Ympyräpyörityksellä elektrodilla öljyn vaikutus oli merkittävä: se vähensi sähkökentän maksimin arvoon 5,13 MV/m aikaisemmasta 5,20 MV/m:stä. Tämä näkyy kuvassa 31. Lisäksi kentänvoimakkuus pyörityksen elektrodin ja näytteen välisessä kiilassa oli vain hieman suurempi kuin näytteessä, suurimmillaan 5,70 MV/m. Ilmassa vastaava kentänvoimakkuus oli 13 MV/m, eli 2,6-kertainen näytteen kentänvoimakkuuteen. Kiilan kentänvoimakkuuden pieneneminen vähentää oleellisesti liukupurkausten ja valokaarien riskiä.



Kuva 31. Sähkökenttäjakauma ympyräpyöristetyllä elektrodilla, kun ympäröivänä aineena on dodekylibentseeni

Rogowski-elektrodeilla öljyn vaikutukset ilmaan verrattuna ovat samansuuntaisia. 10 μm etäisyydellä näytteen ja elektrodin rajapinnasta olevien datapisteiden suurin kentänvoimakkuuden arvo ψ :n arvolla $0,4\pi$ on ilmatestauksessa 5,13 MV/m ja öljytestauksessa 5,11 MV/m, kuten seuraavasta kuvasta näkee. Sähkökentäntihentymän pieneneminen elektrodin ja näytteen välisessä kiilassa on tässä tapauksessa samansuuntaista kuin ympyräpyöristetyllä elektrodilla kentänvoimakkuuksien ollessa siellä noin 6,0 MV/m.



Kuva 32. Vertailu sähkökentän voimakkuudesta 10 μm päässä elektrodin ja näytteen rajapinnasta ilma- ja öljymittausten välillä ψ :n arvoilla $x\pi$.

Huomattavaa on myös, että kentäntihentymän maksimi esiintyy öljyssä lähempänä elektrodin reunaa noin 0,05 mm verran, vaikka pyöristyskäyrän parametrit ovat samoja.

Simulointia kokeiltiin myös ψ :n arvolla $0,5\pi$. Tulokset olivat samansuuntaisia huippuarvojen eron ollessa vielä pienempi.

6.1.8 Johtopäätökset

Yleisesti voidaan tehdä johtopäätös, että elektrodien pyöristysprofiilin kriittiset kohdat ovat alue, jossa profiili alkaa erkaantua tasopohjasta sekä pyöristysprofiilin ja yläelektroodin reunan leikkauspisteen y-koordinaatti. Mitä jyrkemmin profiili kaareutuu tasopohjasta, sitä suurempi kentäntihentymä syntyy. Toisaalta, jos pohja kaareutuu hyvin vähän tai ei lainkaan, terävän kulman aiheuttama kentäntihentymä ulottuu näytteeseen asti. Tämän takia tasopohjaisia elektrodeja ei suositella käytettäväksi läpilyöntitesteissä.

Karakteristisen etäisyyden a tai ympyräpyöristyksen pyöristysäteen kasvattaminen pienentää kentäntihentymän suuruutta. Kuitenkin niiden suuruudelle muodostuu yläraja siitä, että parametrin kasvaessa pohja alkaa kaareutua lähempänä keskiakselia, jolloin elektrodin efektiivinen kosketuspinta-ala pienenee elektrodin halkaisijan suhteen. Tällöin saman pohjan pinta-alan aikaansaamiseksi elektrodin halkaisijaa on kasvatettava, mikä lisää valmistuskustannuksia ja elektrodin painoa. Rogowski- profiili ontässä suhteessa ympyräpyöristettyä profiilia parempi, koska samanlaisen kentäntihentymäkompensoinnin aikaansaamiseksi Rogowski-profiilista on poistettava huomattavasti pienempi osa yläelektrodin nurkasta. Hyvin loivasti kaareutuvilla elektrodeilla pohjan alaa on lisäksi vaikea määritellä. Kentäntihentymän suuruus on lähes merkityksetön karakteristisen etäisyyden ollessa vähintään 1,5 kertaa paperinäytteen paksuus. Muotoparametri ψ :n pieneneminen vähentää kentäntihentymän voimakkuutta, ja ihanteellinen arvo sille on noin $0,4\pi$, jos Rogowski- ja ympyräpyöristysosuuksista koostuvaa sekaprofiilia ei ole mahdollista tehdä. Rutiinimittausten mittaustarkkuudella muotoparametrin muutoksen merkitys kentänjakaumaan on kuitenkin olematon. Öljyn käyttö pienentää jonkin verran kentäntihentymän suuruutta näytteessä, mutta suurempi merkitys sillä on elektrodin ja näytteen välisen kiilan kentäntihentymän lieventämisessä ja siten liukupurkauksen estämisessä.

6.2 Elektrodien kulumisen tutkimus

Elektrodien pintoja tutkittiin optisella Wyko NT9100 profilometrillä TTY:n laboratoriossa. Kuvantamisessa käytettiin VSI (vertical scanning interferometry) -metodia. Menetelmä perustuu näytteen pinnasta heijastuvien ja referenssitietä kulkevien valonsäteiden kohdatessa syntyvään optiseen interferenssikuvioon, jonka perusteella valon kulkemamatka ja siten näytteen pinnankorkeus voidaan laskea [32].

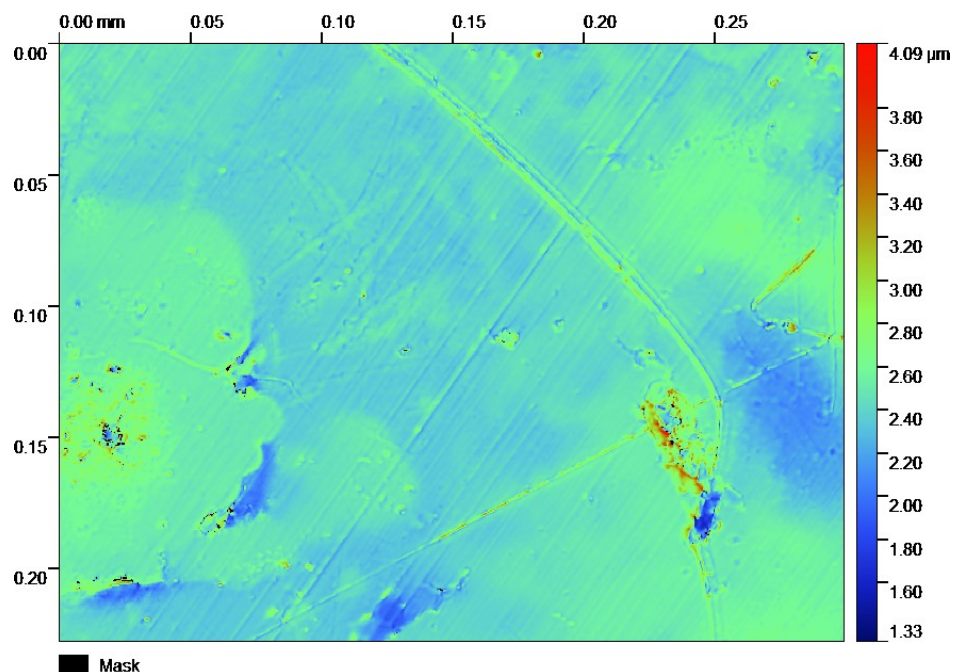
Tutkittavia elektrodeja olivat Helvarin ylä- ja alaelektrodi, sekä kaksi suurempaa Ferantille tarkoitettua yläelektrodia, joista toinen on ruostumatonta terästä ja toinen messinkiä. Profilometrimittauksissa käytettiin kolmea eri objektiivia, joiden nimelliset suu-

rennussuhteet olivat 2,5x, 5x ja 20x. Kuvattavan alan suuruus oli näissä vastaavasti 2,442 mm x 1,858 mm, 1,210 mm x 0,922 mm ja 299,3 μm x 225,7 μm .

Laitteisto ei yleensä pysty määrittämään jokaisen tutkittavan alueen pikselin korkeutta tarkasti kohdissa, joissa pinnan korkeusgradientti on suuri tai korkeusvaihtelut ovat suurempia kuin mittauksen konfiguraatiossa määritetty korkeusvaihtelu. Tällöin määrittämättömät kuvapisteen näkyvät mallinnuksissa ns. maskina, joka on eri värinen. Gwyddion-kuvankäsittelyohjelmalla, jota datan analysoinnissa käytettiin, pystytään interpoloimaan maskialueen datapisteiden korkeuksia Laplace-yhtälöiden avulla. Interpoloinnin epävarmuus on kuitenkin suuri, joten sen antaman tietoon on suhtauduttava varauksellisesti. Tässä työssä interpolointia ei käytetty. Gwyddionilla on myös tasoitettu elektrodin keskimääräinen pinta vaakatasoon, kun se todellisuudessa oli usein muutamia asteita vinossa.

Kuvissa on käytetty spektristä väriskaalaa, jossa, punaiset pisteet ovat korkeimmalla ja siniset matalimmalla. Mustat pisteet ovat määrittämättömiä alueita.

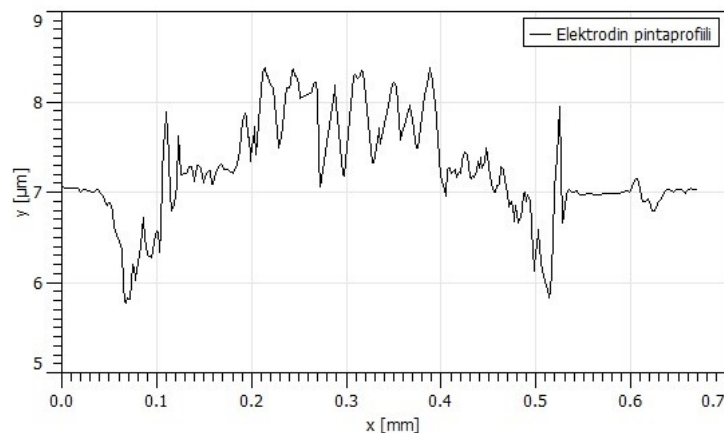
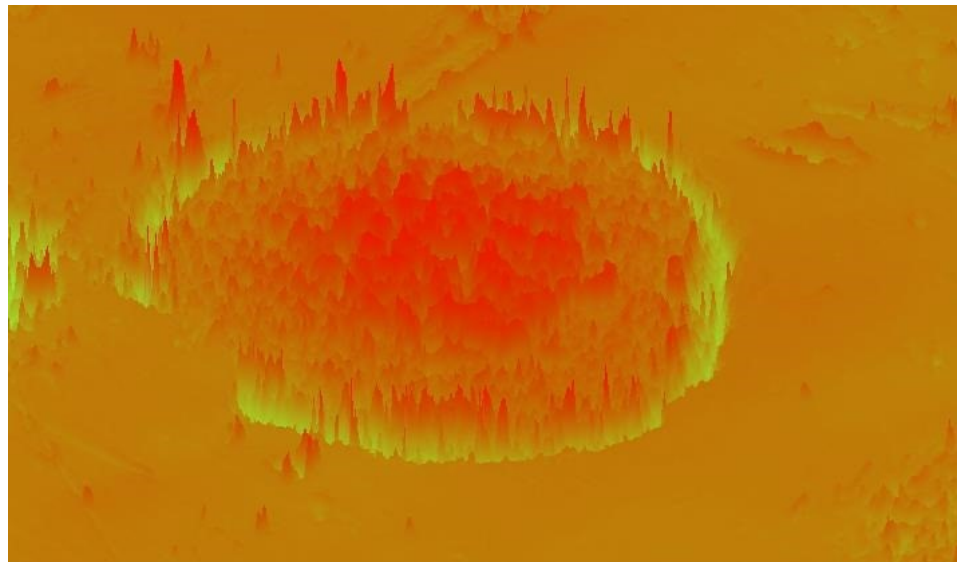
Elektrodien hiomajälki on pääosin hyvin tasaista korkeusvaihteluiden ollessa alle mikrometrin luokkaa. Paikoitellen elektrodin pinnassa esiintyy syvempiä uria tai kapeita kohoumia, joiden huiput voivat olla 1,5-2 μm laskennallista keskitasoa ylempänä tai alempana, kuten kuvassa 33 viistosti ylhäältä keskeltä oikealle kulkeva ura. 100 mm alaelektrodissa oli yksi huomattavan syvä kaksoisura, jonka syvyys elektrodin pinnan tasosta oli noin 8 μm . Tämä näkyy liitteen B kuvassa 3.



Kuva 33. Hiomajälkeä 25 mm yläelektrodissa

Läpilyöntien muodostamien kraatterien profiili vaihtelee hyvin paljon profilometrikuvien perusteella. 2,5 mm yläelektrodissa se näyttää olevan useimmiten sellainen, että

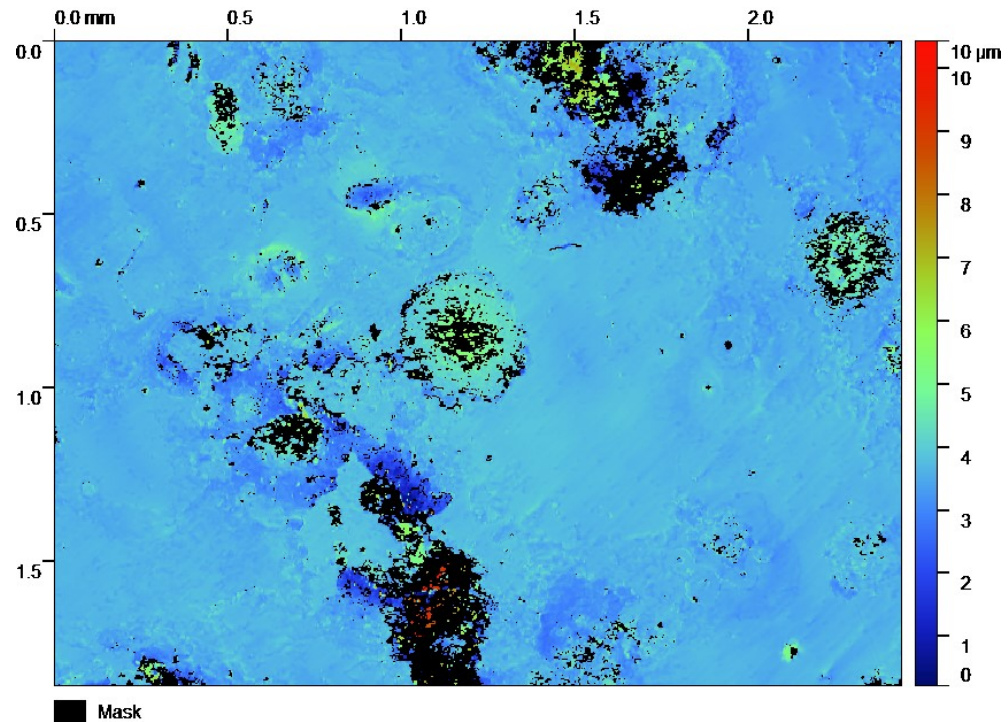
keskikohta on koholla ja sen ympärillä oli rengas, joka on elektrodin pintaa matalammalla. Renkaan syvyys on noin $1\text{--}1,5\text{ }\mu\text{m}$ ja keskikohdan korkeus suurimmillaan $1,5\text{ }\mu\text{m}$ elektrodin pinnan tasosta eli noin $2,5\text{ }\mu\text{m}$ renkaan pohjalta (liitteen B kuva 1). Koholla oleva alue johtuu todennäköisesti siitä, että läpilyönnin aiheuttama lämpö sulattaa hetkellisesti metallia, joka jäähmettyy uudelleen epätasaiseen muotoon, ja metallin tilavuus kasvaa hieman sen jäähmettyessä uudelleen kiderakennemuutosten takia. Esimerkki tällaisesta kraatterista ja sen pintaprofiili on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 34. Tyypillinen läpilyöntijäljen muoto 25 mm yläelektrodissa ja pintaprofiili saman läpilyöntijäljen poikkileikkauksesta

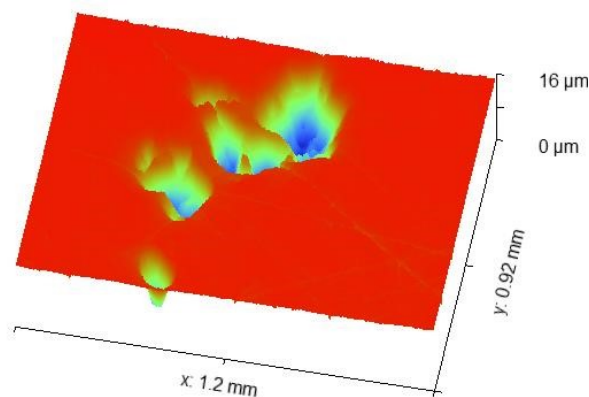
Pintaprofiili ei ole täsmälleen samanlainen jokaisessa poikkileikkauksessa, mutta trendi, että keskellä on korkeampi kohta ja reunoilla matalampi kohta, esiintyy jokaisessa mallinnetussa poikkileikkauksessa. Korkeuserot pysyvät myös saman tasoisina, vaikka pieniä eroja esiintyy. Elektrodissa esiintyy myös epäsäännöllisemmän muotoisia jälkiä, jotka ovat muutamien mikrometrien syvyisiä. Nämä kuopat keskittyvät pienemmälle alueelle ja ovat profiililtaan jyrkempiä. Näiden läheisyydessä on myös jyrkkäreunaisia kohoumia. Todennäköisesti nämä ovat syntyneet erityyppisistä läpilyönneistä, jotka ovat tapahtuneet suuremmalla jännitteellä. Vastaavanlaisia jälkiä löytyy enemmän ala-

elektrodista ja teräselektrodista. Näiden kohdalle tai välittömään läheisyyteen on syntynyt kraatterimaisia läpilyöntijälkiä, kuten seuraavassa kuvassa näkyy.



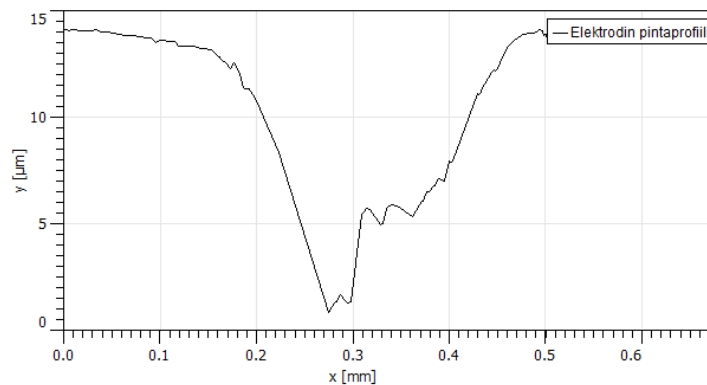
Kuva 35. Laajempi alue 25 mm elektrodin pinnasta. Ylhäällä ja alhaalla syvempiä kuoppia ja korkeampia kohoumia, keskellä normaalimpia läpilyöntijälkiä. Suurten korkeusgradienttien takia kuvaan on jäänyt paljon määrittämättömiä alueita.

100 mm alaelektrodin DC-puolella läpilyöntijälki on useimmiten kuoppamainen ja sen syvyys on huomattavasti suurempi, monissa kuvatuissa tapauksissa $10\ \mu\text{m}$ - $13\ \mu\text{m}$. Kuoppa jakautuu usein kahteen tai useampaan piikkimäiseen syvään kohtaan, joiden välissä on korkeampaa, mutta silti perustason alapuolella olevaa aluetta. Esimerkki tällaisesta kuopasta on kuvassa 36. Vastaava raakadatakuvaa on liitteen B kuva 5. Kuopat ovat yli $10\ \mu\text{m}$ syviä ja keskellä oleva kohouma esiintyy vain keskimmäisessä kuopassa. Kuvasta näkee myös, että läpilyöntijäljet sijaitsevat hyvin lähellä toisiaan ja kaksi niistä on hiontaurien kohdalla.



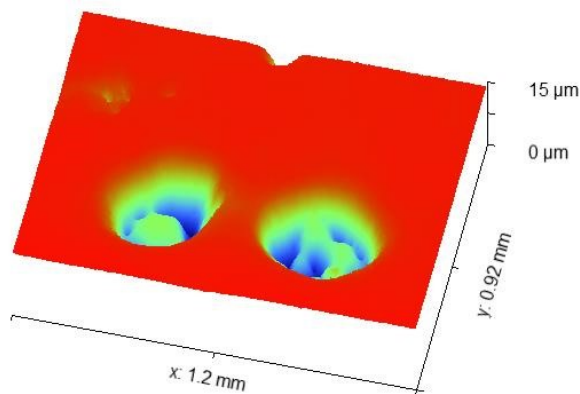
Kuva 36. 3D-malli messinkisen alaelektrodin DC-puolen läpilyöntijäljistä

Myös kohoumia esiintyy, kuten liitteen B kuvassa 2, jossa on silmämääräisesti 2 samantyyppistä jälkeä, joista toinen on syvä kuoppa ja toinen kohouma/matala kuoppa). Samoin on liitteen B kuvassa 3. Useita läpilyöntijälkiä on syntynyt liitteen kuvassa 3 näkyvän syvän uran välittömään läheisyyteen. Tyypillistä on myös, että läpilyöntijälkiä esiintyy pareittain tai useamman läpilyöntijäljen ryhmissä (liitteen B kuvat 4 ja 5). Seuraavassa kuvassa on eräs kuoppaprofiili 100 mm elektrodin läpilyöntijäljestä. Tämä ei ole kuitenkaan niin yleispätevä profiilimalli kuin kraatterin tapauksessa, sillä profiilit vaihtelevat suuresti myös samassa kuopassa sen mukaan, mistä kulmasta poikkileikkauksen ottaa.



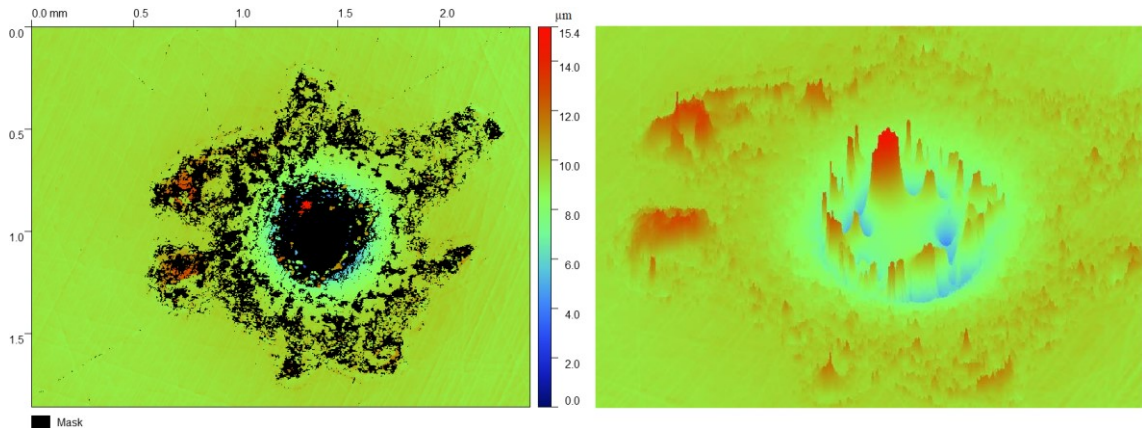
Kuva 37. Pintaprofiili erään syvemmän kuopan poikkileikkauksesta 100 mm elektrodin DC-puolelta

Messinkisen alaelektrodin AC-puolella läpilyöntijäljet olivat säännönmukaisesti pienempiä ja niiden profiili muistutti enemmän yläelektrodin läpilyöntijälkiä ollen enemmän ympyräsymmetrisiä ja keskeltä koholla reunoihin verrattuna. Jäljet olivat kuitenkin syvempiä, jolloin kohouman huippukin oli perustason alapuolella ja reunat ulottuivat 10-14 μm syvyyteen perustasosta. Esimerkki tällaisesta läpilyönnistä on kuvassa 38. Tällä elektrodin puolella esiintyi myös vähemmän symmetrisiä jälkiä, sekä huomattavasti matalampia kuoppia (liitteen B kuva 6). Elektrodien puolien eroavaisuus johtuu todennäköisesti siitä, DC:llä läpilyöntijännitteet ovat suurempia.



Kuva 38. Tyypilliset läpilyöntijäljet alaelektrodin toisella puolella, jota on käytetty AC-läpilyönteihin

Teräselektrodissa läpilyöntijäljet ovat pääosin kuoppamaisia, ja joissakin on kuopan ympärillä ja keskellä kohoumaa. Syvyys vaihtelee 5 μm ja 10 μm välillä painottuen jälkimmäiseen. Teräselektrodien läpilyöntijälkien syvyys johtuu todennäköisesti siitä, että vaikka teräs on messinkiä kovempaa, tutkittuja teräselektrodeja on käytetty paljon suurempien jännitteiden läpilyönneissä kuin messinkielektrodeja. Esimerkki teräselektrodin läpilyöntijäljestä on kuvassa 39.



Kuva 39. *Läpilyönti 50 mm teräselektrodissa, profilometrikuva vasemmalla ja 3D-malli oikealla. Elektroodin profiilissa on paljon jyrkkiä reunoja, minkä vuoksi kuvaan on jäänyt huomattavan paljon tuntemattomia pisteitä.*

Syvemmissä läpilyöntijäljissä ei ole juurikaan ympyräsymmetrisyyttä, minkä vuoksi yksittäisellä poikkileikkauksella ei ole juurikaan edustavuutta kokonaisuuden kannalta. Lisäksi tuntemattomien pisteiden suuri osuus tekee pintaprofiilianalyysistä epätarkan. 3D-kuvasta voi nähdä sen verran, että korkean keskikohdan lisäksi sen ympärillä on ympyrämuotoinen korkeampi kehä, ja tämän sisä- ja ulkopuolella matalampia alueita.

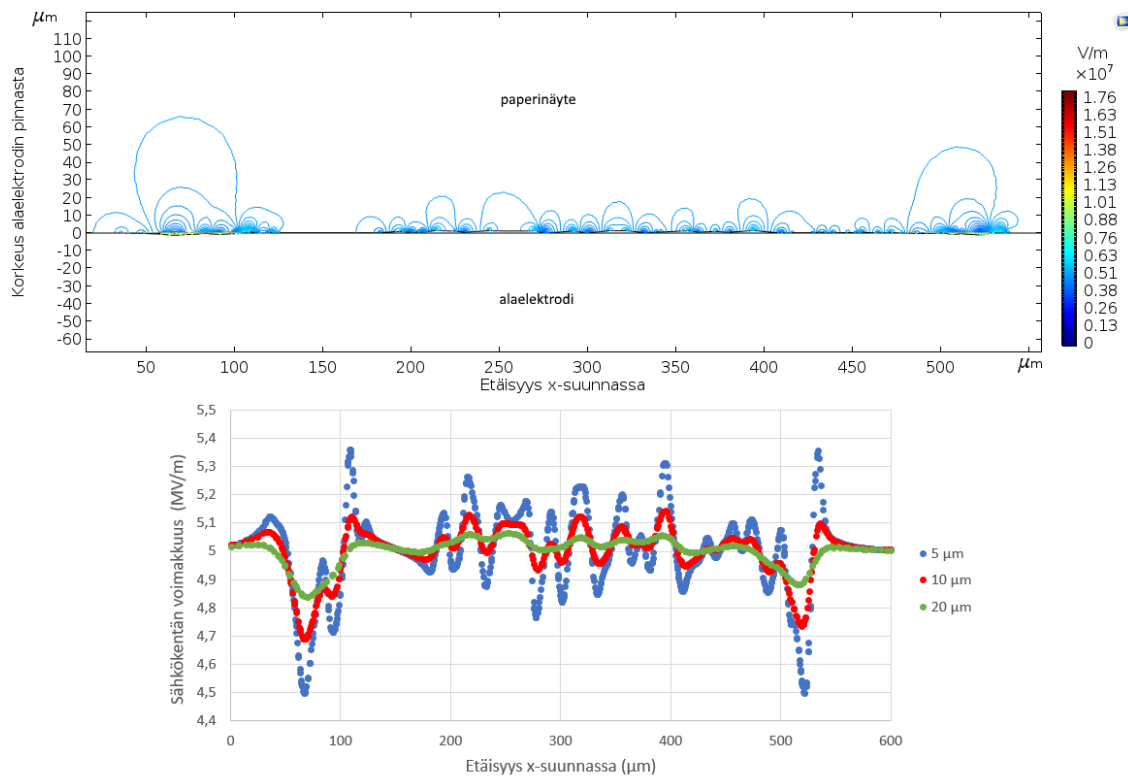
Hiomajälki on teräselektrodissa hieman karkeampaa ja yli mikrometrin perustasosta poikkeavia kohtia esiintyy hiomaurissa (liitteen B kuva 7). Tämä ei kuitenkaan ole säännöllistä, myös tasaisempia alueita löytyy, kuten liitteen B kuvassa 8.

Toinen tutkittu messinkielektrodi oli hiomajäljeltään huomattavasti epätasaisempaa vaihteluiden ollessa useita mikrometrejä ilman läpilyöntijälkiä. Elektroodin hiomista ei ollut viimeistely eikä sitä ollut käytetty vielä läpilyöntitesteissä. Elektrodiin tehdyn läpilyönnin profiili oli reunoista 4-5 μm koholla perustasosta ja keskeltä kuopalla. Kuoppa oli hyvin matala verrattuna muiden elektrodien kuin messinkisen yläelektrodin kuoppiin.

Yleisinä havaintoina profilometrikuvista voidaan todeta, että läpilyöntijäljet ovat epä-säännöllisiä, eivätkä noudata tiettyä kaavaa, vaikka joitakin tyyppisiä jäljille voidaan erotella. Läpilyönnit esiintyvät usein pareittain, joten näyttää olevan suurempi todennäköisyys, että uusi läpilyönti syntyy olemassa olevan läpilyöntijäljen viereen. Samoin hiomaurat ja muut kuopat lisäävät läpilyönnin todennäköisyyttä tapahtua niiden läheisyydessä. Teorian mukaan näin pitäisikin olla, koska elektrodin ja näytteen rajapinnan epä-

tasaisuus aiheuttaa paikallisia sähkökentän tihentymiä ja lisää siten läpilyönnin riskiä. Toinen havainto oli, että alaelektrodiin näyttää syntyvän syvempiä jälkiä kuin samasta materiaalista tehtyyn yläelektrodiin, myös käytettäessä samaa jännitemuotoa. Kuvien pienen määrän takia selkeää johtopäätöstä tämän trendin olemassaolosta ei pysty tekemään.

Edellä havaitun syvyisten kuoppien vaikutusta sähkökenttajakautaan tutkittiin myös simuloimalla tilannetta Comsol Multiphysics –ohjelmalla. Kuoppaprofiilit approksimoitiin monikulmiotyökalun avulla Gwyddionista importoidun kuvatiedoston päälle, joten menetelmä tuotti hieman virhettä, erityisesti terävien kulmien takia. Approksimaatioon käytettiin kraatterimaisen profiilin (kuva 34) tapauksessa noin 100 viivaa ja syvemmän kuopan tapauksessa riitti 29. Pienempi määrä johtui siitä, että jo syvemmän reiän Gwyddion-mallinnuksessa oli puuttuvien datapisteiden takia approksimoitu tunnettujen pisteiden välisiä alueita suorilla viivoilla. Sähkökentän tiheydet eri etäisyyksillä näytteen pinnasta on esitetty kuvissa 40 ja 41.

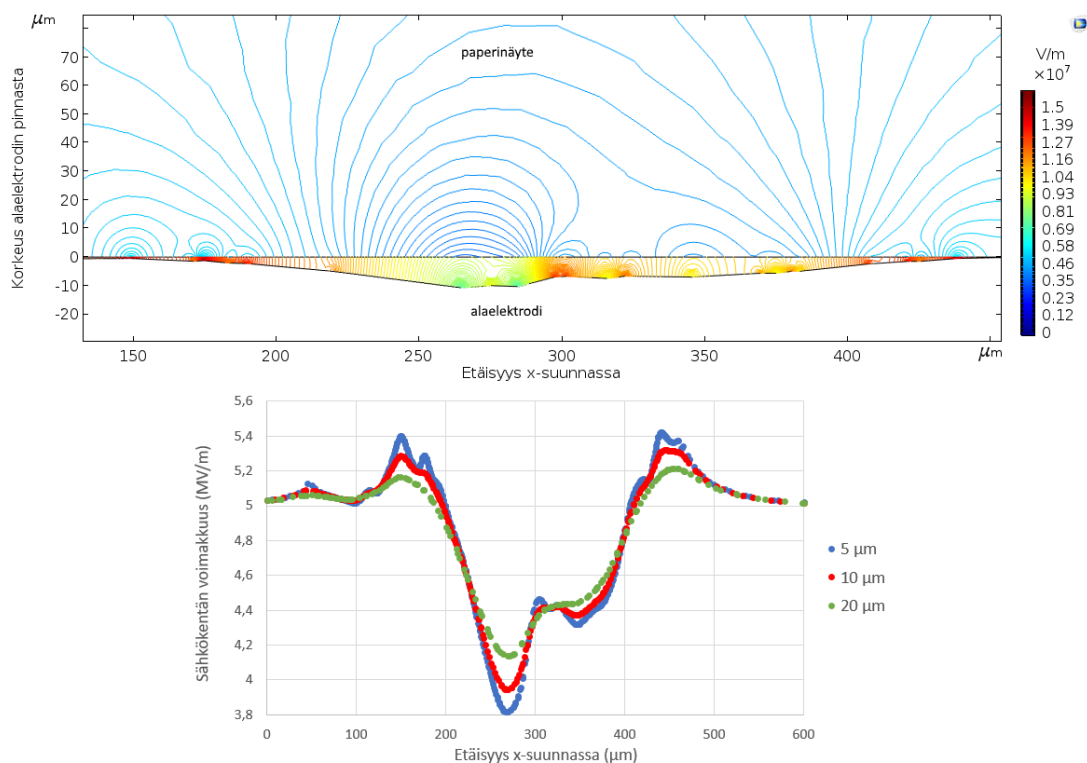


Kuva 40. Sähkökentän tiheys näytteessä kraatterimaisen korkeuseroiltaan $\pm 1,5 \mu\text{m}$ läpilyöntijäljen kohdalla. Ylhäällä korkeuskäyräkuvana ja alhaalla datapisteiden avulla määriteltynä eri etäisyyksillä näytteen ja elektrodin rajapinnasta.

Yleisenä trendinä havaitaan, että sähkökentäntihentymää esiintyy kuopan reunojen kohdalla, mutta kuopan keskellä sähkökentän voimakkuus on paljon pienempi kuin keskimäärin näytteessä. Kuopan syvyys ei merkittävästi vaikuta tihentymän maksimin suuruuteen, mutta syvemmillä kuopilla tihentymä ulottui kauemmaksi näytteestä. Tihentymähuiput olivat syvemmässä näytteessä loivempia ulottuen laajemmalle alueelle, eivät-

kä piikkimäisiä kuten kraatterikuopassa. Matalamman kuopan kohdalla sähkökentän voimakkuuden maksimit $10\ \mu\text{m}$ päässä näytteen pinnasta ovat samaa luokkaa tai hieman pienempiä kuin Rogowski-muotoillun ($a = l$) elektrodin reunan lähellä. Niillä ei siten pitäisi juuri olla vaikutusta läpilyöntilujuuteen. Syvän kuopan kohdalla $10\ \mu\text{m}$ sähkökenttämaksimien erotukset perustasosta ovat noin kaksinkertaisia edelliseen verrattuna, joten niillä on jossain määrin vaikutusta.

Kymmenen mikrometrin syvyisillä kuopilla lisäksi kuoppaan muodostuu ilmatasku, jossa kentänvoimakkuudet kasvavat suurimmillaan lähes $15\ \text{MV/m}$ lukemiin. Tämä aiheuttaa hyvin todennäköisesti osittaispurkauksia ilmataskussa. Tosin ilmataskun ollessa näytteen ja toisen elektrodin ympäröimä, ylilyönnin mahdollisuutta ei varsinaisesti ole. Profilometrikuvista näkyi, että toisen läpilyöntikohdan välittömään läheisyyteen osuneet läpilyönnit olivat tyypillisiä syville läpilyöntikuopille matalampien läpilyöntijälkien ollessa jakautuneita tasaisemmin elektrodin pinnalle. Simulointi tuki myös käsitystä, että kuopan syvyyden kasvaessa tihentymän laajuus sekä x - että y -suunnassa kasvaa ja tihentymän maksimi sijaitsee juuri kuopan reunan ulkopuolella. Simulointi tehtiin paksulle $200\ \mu\text{m}$ suuruiselle näytteelle. Ohuempien näytteiden tapauksessa kuoppien vaikutus läpilujuuteen kasvaa, mutta trendi, että kuopan syvyys lisää kentäntihentymää, pätee myös niille.



Kuva 41. Sähkökentän tiheys näytteessä noin $13\ \mu\text{m}$ syvän läpilyöntijäljen kohdalla. Ylhäällä korkeuskäyräkuvana ja alhaalla datapisteiden avulla määriteltynä eri etäisyyksillä näytteen ja elektrodin rajapinnasta.

Juuri hiotun ja 8 kk käytössä olleen elektrodin aiheuttamaa eroa läpilyöntilujuuksiin testattiin kuivilla papereilla kahdella 15 testin sarjalla. Tulokset ovat liitteen A taulukossa 11. Merkittävää eroa tulosten välillä ei havaittu vaihteluiden ollessa toisella paperilaadulla +1,6 % ja toisella paperilaadulla -0,3 %. Käytetty otos oli hyvin pieni, mutta hiotun elektrodin vaikutuksen arvioinnin luotettavuus heikkenee, mitä enemmän läpilyöntejä siihen tehdään. Lisäksi kaikkein ohuimpia papereita, joilla elektrodien kolhiintumisen vaikutus on suurin, ei testattu. Olisi suositeltavaa testata lisää vertailumittauksia elektrodien hiomisen yhteydessä eri paksuisilla näytteillä ja tilastoida mittaustulokset, jotta elektrodin kunnon riippuvuus läpilyöntilujuuteen voitaisiin todeta luotettavammin.

7. YHTEENVETO

Tämä diplomityö käsitteli aluksi läpilyönti-ilmiöön liittyvää yleistä teoriaa kiinteiden eristeiden näkökulmasta. Keskeisimpiä asioita olivat perustelut siitä, miksi elektrodien koko ja jännitteen nousunopeus vaikuttavat läpilyöntijännitteeseen ja tekevät välttämättömiksi standardikokoisten elektrodien ja standardin mukaisten ramppitesteissä käytettävien jännitteen nousunopeuksien määrittämisen. Läpilyönnin tilastollista luonnetta ja Weibull-jakaumaan pohjautuvaa tilastollista analyysia käsiteltiin. Hajonnan suuruuden todettiin olevan tärkeää keskiarvojen lisäksi ilmoitettaessa materiaalin läpilyöntilujuutta, koska eristeiden käytön näkökulmasta jännitelujuudet, joilla läpilyönti tapahtuu hyvin pienellä todennäköisyydellä ovat merkityksellisempiä kuin jännitelujuus, jolla läpilyönti tapahtuu esimerkiksi 50 % todennäköisyydellä.

Läpilyönnin testaustekniikkaa tarkasteltiin testauspiirin eri osien, kuten mittalaitteiden, elektrodien ja parasiittisten komponenttien näkökulmasta. Läpilyönnin havaitsemisessa keskeisintä on pysyvän tilan ja transienttisuureiden erottaminen, mikä vaatii mittareilta sopivaa taajuusvastetta ja näytteenottotaajuutta. Pysyvän tilan oikosulkuvirta havaittiin parhaaksi indikaattoriksi läpilyönnistä, mutta hyvin suuren näytteenottotaajuuden omaavilla mittalaitteilla myös läpilyönnin aikainen jännitetransientti on toimiva ratkaisu. Johdinten asettelusta johtuvat hajaimpedanssit ja maasilmukat todettiin yleisiksi häiriöiksi testipiireissä. Niiden vähentämiseksi testipiirin johtimet on yleisesti pidettävä mahdollisimman lyhyinä ja erityisesti kalibrointimittaukset tulisi tehdä ilman ylimääräisiä johtoja, jos vain mahdollista. Maasilmukoiden poistamiseksi paikallinen potentiaalintasaus ja aktiivisten mittapäiden käyttö ovat parhaita ratkaisuja. Aktiivisia mittapäitä tulisi käyttää aina virranmittausvastuksen avulla tehtävässä virranmittauksessa sekä keluvan jännitteen mittauksessa. Suurien jännitteiden mittauksessa voidaan käyttää passiivimittapäitä, jos mittalaitteet on asianmukaisesti maadoitettu, eikä kosketusjännitteiden vaaraa ole.

Diplomityön aikana Helvar korvattiin Chroma 19032 –laitteella kuivien paperinäytteiden AC-läpilyöntitestauslaitteena. Laite täytti mittaussandardien vaatimukset ja tulosten erot referenssijärjestelmään olivat 95 % varmuusmarginaalien rajoissa. Referenssimittauksia TTY:n suurjännitelaboratoriossa ja Weibull-varmuusmarginaalianalyysia TTY:n ja Tervakosken läpilyöntitestilaitteiden testitulosten välillä käytettiin pääasiallisena menetelmänä laitteiden pätevyyden arvioimiseen. Huomattiin, että keskiarvojen erotus ei aina anna oikeaa kuvaa jakaumien tilastollisesta merkitsevyydestä, jos kriittinen alue on hyvin pienten tai suurten todennäköisyyksien persentiileillä, kuten läpilyöntitestauksessa yleensä on.

Impregnoitujen näytteiden testaukseen tarkoitetun Ferranti-laitteen toimintaa testattiin oskilloskooppimittausten avulla. Mittaustuloksissa havaittiin jonkin verran eroavaisuutta laitteen omaan mittariin nähden. Oletettua riippuvuutta läpilyönnin osumisen elektrodin reunan lähelle ja läpilyöntijännitteen suuruuden välillä ei pystytty toteamaan mitausdatan perusteella. Laitteeseen suunniteltiin automaattinen läpilyönnin poislaukaisu, mutta sitä ei ajanpuutteen takia ehditty toteuttaa diplomityön tekoaikana. Laitteen jännitemittauksen uusimista pohdittiin jännitemittarissa ilmenneiden epäselvyyksien ja puutteen takia. Tietokonepohjainen mittausdatan käsittely todettiin yleismittaria paremmaksi vaihtoehdoksi. Toimenpiteisiin ei kuitenkaan ryhdytty, koska Ferrantin katsottiin toimivan rutiinimittauksiin riittävällä mittaustarkkuudella, testauksen olevan standardien mukaista, eikä uusimisen taloudellista hyötyä pystytty toteamaan ilman tarkempaa tutkimusta laminaattimateriaalin ominaisuuksien osuudesta mittaustulosten hajonnassa. Täten laitetta voidaan nykyisellään käyttää niin kauan kuin se toimii. Koko laitteiston uusimisvaihtoehtoja kartoitettiin laitteen hajoamisen varalta. Päävaihtoehtoiksi uudelle laitteistolle esitettiin ohjattavasta AC-jännitelähteestä, suurjännitemuuntajasta ja tassa-suuntauspiiristä koostuvaa järjestelmää sekä ratkaisua, jossa on erilliset AC- ja DC-lähteet, jotka vuorotellen kytketään samaan testauspiiriin. Kumpikin järjestelmä vaatii lisäksi suurjännitepuolella operoivia kytkinkomponentteja.

Elektrodien muotoilun suhteen parhaaksi havaittiin Rogowski-malli, jossa karakteristinen etäisyys a on 1,5-2 kertaa näytteen paksuus ja kaareutumisparametrin ψ arvo on noin $0,4 \pi$. Erot kaareutumisparametriltaan erilaisten Rogowski-profiilien välillä olivat kuitenkin pieniä, ja mikä tahansa profiili, jossa $a \geq l$ on huomattavasti parempi kuin tasopohjainen pyöristämätön elektrodiprofiili. Läpilyöntien elektrodeihin synnyttämien kuoppien vaikutus kentäntihentymiin havaittiin merkittäväksi syvempien kuoppien tapauksessa, mutta 1-2 μm syvyisten kuoppien vaikutus oli samaa luokkaa kuin 2 mm säteellä ympyräpyöristetyillä tai Rogowski-pyöristetyillä profiililla, jossa karakteristinen etäisyys on yhtä suuri kuin näytteen paksuus. AC- ja DC-testeissä kuten myös muissa testityypeissä, joiden välillä läpilyöntijännitteen suuruusluokka vaihtelee huomattavasti, pitäisi siis ehdottomasti käyttää eri elektrodeja. Tällöin syvempikuoppaisia elektrodeja ei esiintyisi testeissä, jossa läpilyöntijännitteet ovat pienempiä ja elektrodin epätasaisuudella olisi merkittävämpää vaikutusta läpilyöntilujuuteen. Hiotun ja 8 kk käytössä olleen AC-elektrodin välillä ei läpilyöntituloksissa havaittu merkittävää eroa. Täten noin vuosi on lähtökohtaisesti kelvollinen elektrodien hiomisväli, jos ne eivät kulu tai kolhiinnu normaalikäytöstä poikkeavalla tavalla. Lisätutkimukset elektrodien kulumisen vaikutuksesta läpilyöntilujuuteen olisivat suositeltavia.

Laitteiden korvausprojektien yhteydessä havaittiin läpilyönnin testaustekniikassa tapahtuneen huomattavia muutoksia viimeisen 40 vuoden aikana. Digitaalisten komponenttien käyttöönotto on poistanut monia analogisista komponenteista aiheutuneita virhekijöitä. Tulokset pystytään tallentamaan yksiselitteisesti, eikä tarvitse enää käyttää epätarkkoja viisarimittareita, jotka ovat lisäksi häiriöherkkiä ympäristötekijöille, kuten kos-

teudelle ja sähkömagneettisille häiriöille. Samoin aiemmat analogiset maxhold-piirit ovat olleet häiriöherkkiä. Läpilyönnin tunnistaminen pystytään tekemään analysoimalla jälkikäteen mittauksessa saatua jännite- ja virtadataa, eikä tarvitse turvautua mitaajan nopeaa reaktiokykyä vaativaan mittarin jännitelukeman putoamisen tarkkailuun tai teettelisesti epäluotettaviin äänihavaintoihin. Mahdollisuus kytkeä jännite pois lähes välittömästi läpilyönnin jälkeen säästää huomattavasti elektrodeja kulumiselta ja lisäksi poistaa testaukseen liittyviä turvallisuusriskejä.

Uusi tekniikka on tuonut mukanaan myös joitakin haasteita. Mittareiden taajuuskaistan kasvaessa ne tunnistavat mittauksen kannalta epäolennaiset nopeat transientit herkemmin ja siten esimerkiksi tallentavat jännitteen maksimiarvoksi transienttipiikin huippuarvon sitä edeltäneen jännitearvon sijaan, jollei niihin ole ohjelmoitu monimutkaisempaa huippujännitteen tunnistusta. Uusilla laitteilla läpilyöntijännitteen tunnistusalgoritmin suunnitteluun onkin kiinnitettävä enemmän huomiota, ja tämän toimivuus tulee tarkistaa huolellisesti käyttönoton yhteydessä. Haittapuolena on myös uusien laitteiden logiikkapiirien monimutkaisuus, minkä takia niiden rakenteen ja toimintamekanismien ymmärtäminen sekä niissä esiintyvien vikojen tunnistaminen ja korjaaminen vaativat enemmän tietoteknistä osaamista kuin vanhoissa laitteissa. Huolto ja vikojen korjaus joudutaan siksi usein ulkoistamaan, mikä lisää kustannuksia, ja voi johtaa huomattavan pitkiin testauslaitteiden käyttökatkoihin. Mittalaitteiden huollon ja korjauksen keskittyminen siihen erikostuneille toimijoille on kuitenkin nykyään yleistynyt trendi, johon yritysten on syytä varautua esimerkiksi kahdentamalla tärkeimmät testausjärjestelmät tai sopimalla etukäteen kriittisimpien mittausten teettämisestä muualla testijärjestelmän huollon tai korjauksen aikana.

Laitteiden ohjelmoitavuus on parantunut viime vuosikymmenen aikana, ja käyttäjille on tullut saataville tietokonesovelluksia, joilla testausjärjestelmien logiikka pystytään ohjelmoimaan yksinkertaisilla logiikkarakenteilla laitteistoläheisen ohjelmoinnin sijaan. Myös useimmissa yleismittareissa ja oskilloskoopeissa on kytkentämahdollisuus tietokoneeseen, joten niiden tulodataa voidaan siirtää suoraan esimerkiksi Matlabiin tai Exceliin. Tämän seurauksia testausjärjestelmien itsenäinen kokoaminen modulaarisesti on tullut helpommaksi, ja se on mahdollista tehdä kytkemällä yhteen tehdasvalmisteisia laitteita ja ohjaamalla niitä keskitetysti tietokoneohjelmiston avulla.

LÄHTEET

- [1] W. Hauschild, E. Lemke, High-voltage test and measuring techniques, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [2] J.R. Reitz, R.W. Christy, F.J. Milford, Foundations of electromagnetic theory, 4. painos, Addison-Wesley, Reading, Mass. [u.a.], 1993.
- [3] T.W. Dakin, Conduction and polarization mechanisms and trends in dielectric, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 22, Iss. 5, 2006, s. 11-28.
- [4] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen, V. Palva, Suurjännitetekniikka, 2. painos, Otatieta Oy, Helsinki, 2003.
- [5] A. Kuchler, High voltage engineering, Springer, 2018.
- [6] E. Kuffel, J. Kuffel, W. Zaengl, High voltage engineering, 2. painos, Newnes, Oxford [u.a.], 2001.
- [7] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen, V. Palva, Suurjännitetekniikka, 4. painos, Otatieta Gaudeamus Oy, Helsinki, 2015.
- [8] S.T. Li, Y.W. Zhu, D.M. Min, G. Chen, Space Charge Modulated Electrical Breakdown, Scientific Reports, Vol. 6, 2016, artikkelin no. 32588.
- [9] R. Bartnikas, Engineering dielectrics vol. 2A: Electrical properties of solid insulating materials: Molecular structure and electrical behavior, American Soc. for Testing and Materials, Philadelphia, 1983.
- [10] N.G. Trinh, Electrode Design for Testing in Uniform Field Gaps, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, Iss. 3, 1980, s. 1235-1242.
- [11] R. Bartnikas, Engineering dielectrics vol 2B: Electrical properties of solid insulating materials: measurement techniques, American Soc. for Testing and Materials, Philadelphia, Pa, 1983.
- [12] Electric strength of insulating materials - Test methods - Part 2: Additional requirements for tests using direct voltage, IEC 60243-2, International Electrotechnical Commission, 2013.
- [13] C. Zhou, G. Chen, Space charge and AC electrical breakdown strength in polyethylene, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, Iss. 1, 2017, s. 559-566.

- [14] Electric strength of insulating materials - Test methods - Part 1: Tests at power frequencies, IEC 60243-1, International Electrotechnical Commission, 2013.
- [15] R.A. Schlitz, K. Yoon, L.A. Fredin, Y. Ha, M.A. Ratner, T.J. Marks, L.J. Lauhon, Weibull Analysis of Dielectric Breakdown in a Self-Assembled Nanodielectric for Organic Transistors, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 1, Iss. 22, 2010, s. 3292-3297.
- [16] High voltage test techniques - part 2: Measuring systems, IEC 60060-2, International Electrotechnical Commission, 2010.
- [17] G.S. Puneekar, G. Thejovathi, N.K. Kishor, Simulation study of Borda's profile & parallel plane electrode to assess electric field uniformity, 8th International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, s. 371-374.
- [18] Y. Zhu, D. Min, S. Li, Space charge modulated electrical breakdown of oil impregnated paper under AC-DC combined voltages in frequencies of 50~600 Hz, 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), s. 441-444.
- [19] Q. Yang, Y. Jin, W. Sima, M. Liu, Effect of the electrode material on the breakdown voltage and space charge distribution of propylene carbonate under impulse voltage, *AIP Advances*, Vol. 6, Iss. 4, 2016, s. 8.
- [20] I.L. Hosier, J.E.A. Koilraj, A.S. Vaughan, Effect of aging on the physical, chemical and dielectric properties of dodecylbenzene, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 23, Iss. 6, 2016, s. 3389-3396.
- [21] J. Miao, M. Dong, M. Ren, X. Wu, L. Shen, H. Wang, Effect of nanoparticle polarization on relative permittivity of transformer oil-based nanofluids, *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, Iss. 20, 2013, s. 204103.
- [22] I. Hickman, *Oscilloscopes*, 5. painos, Newnes, Oxford [u.a.], 2001.
- [23] Tiainen, E. (ed.), D1-2012 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista, 21. painos, STUL ry, 2012
- [24] J.Y. Chang, Choose The Best Passive And Active Oscilloscope Probes For Your Tasks, *Electronic design*, 2011 Saatavissa (viitattu 10.5.2018.): <http://www.electronicdesign.com/test-amp-measurement/choose-best-passive-and-active-oscilloscope-probes-your-tasks>,
- [25] Sähköturvallisuuslaki, 2016. Saatavissa (viitattu 16.3.2018): http://www.who.int/peh-emf/project/mapnatreps/nznrl_emfbooklet2008.pdf.
- [26] A.I. Chroma, *Chroma Electric Safety Analyzer19032 User's Manual*, 2017.
- [27] Elkome Systems Oy. Mittaus- ja I/O -kortit, Saatavissa (viitattu 4.5.2018): <https://shop.elkome.com/fi/mittauslaitteet/mittaus-ja-io-kortit.html>.

[28] Advantech Oy, PCI 1711U/UL Datasheet. Saatavissa (viitattu 4.5.2018): http://advdownload.advantech.com/productfile/PIS/PCI-1711/Product%20-%20Datasheet/PCI-1711U_UL20170609231819.PDF.

[29] K. Akinci, S. Yener, A Variable AC Power Source Based on the Arduino Platform Using Finite State Machines, ISITES 2015 Conference, 2015.

[30] Chroma Oy, Low Power Programmable AC Source with Transients – 61500. Saatavissa (viitattu 7.5.2018): <https://www.chromausa.com/product/low-power-programmable-ac-source-61500>.

[31] National Instruments, What is LabVIEW, Saatavissa (viitattu 4.5.2018): <http://www.ni.com/fi-fi/shop/labview.html>.

[32] I. Pignatelli, A. Kumar, K. Shah, M. Balonis, M. Bauchy, B. Wu, G. Sant, Vertical scanning interferometry: A new method to quantify re-/de-mineralization dynamics of dental enamel, Dental Materials, Vol. 32, Iss. 10, 2016, s. e261.

LIITE A: TAULUKOITA TESTITULOKSISTA

Taulukko A1. TTY:n läpilyöntitestitulokset 5-6.9.2017

Paperinäytteen no.		1	2	3	4	5	6
Paksuus (µm)		44,2	29,7	80,5	151,8	194,0	241,5
Testitulokset	1	0,516	0,740	0,865	1,169	1,418	1,739
	2	0,530	0,773	0,832	1,173	1,331	1,655
	3	0,540	0,689	0,938	1,315	1,245	1,555
	4	0,525	0,719	0,882	1,213	1,343	1,740
	5	0,511	0,834	0,893	1,149	1,112	1,654
	6	0,525	0,689	0,936	1,078	1,248	1,551
	7	0,512	0,846	0,907	1,312	1,172	1,776
	8	0,529	0,686	0,973	1,298	1,269	1,694
	9	0,515	0,716	0,939	1,193	1,426	1,647
	10	0,528	0,759	0,950	1,232	1,286	1,766
	11	0,528	0,721	0,822	1,232	1,412	1,531
	12	0,493	0,676	0,919	1,210	1,225	1,422
	13	0,546	0,885	0,880	1,204	1,377	1,736
	14	0,548	0,715	0,908	1,128	1,242	1,650
	15	0,510	0,720	0,951	0,950	1,281	1,832
Keskiarvo (kV)		0,524	0,745	0,906	1,190	1,292	1,663
Keskihajonta (kV)		0,009	0,058	0,044	0,074	0,099	0,081
Läpilyöntilujuus (MV/m)		11,85	25,09	11,26	7,84	6,66	6,89
Keskihajonta (MV/m)		0,211	1,957	0,541	0,486	0,513	0,334

Taulukko A2. *Helvar-TTY vertailumittaustulokset Helvarilla, korjauskerroin huomioitu*

Paperinäytteen no.		1	2	3	4	5	6
Mittaus-pvm.		21.8.	29.8.	23.8.	4.9.	29.8.	29.8.
Paksuus (µm)		44,8	29,8	79,6	148,6	188,6	243,4
Testitulokset	1	0,44	0,70	0,86	1,27	1,37	1,81
	2	0,48	0,64	0,89	1,20	1,48	1,68
	3	0,48	0,67	0,92	1,28	1,40	1,77
	4	0,49	0,67	0,91	1,25	1,52	1,60
	5	0,46	0,69	0,88	1,29	1,42	1,73
	6	0,46	0,66	0,83	1,23	1,44	1,69
	7	0,47	0,63	0,69	1,19	1,44	1,69
	8	0,47	0,63	0,80	1,25	1,38	1,54
	9	0,46	0,62	0,88	1,23	1,49	1,70
	10	0,47	0,63	0,77	1,26	1,22	1,69
Keskiarvo (kV)		0,47	0,65	0,84	1,25	1,42	1,69
Keskihajonta (kV)		0,01	0,03	0,07	0,03	0,08	0,08
Läpilyöntilujuus (MV/m)		10,4	21,9	10,6	8,38	7,51	6,94
Keskihajonta (MV/m)		0,31	0,94	0,90	0,22	0,45	0,32

Taulukko A3. *Helvarin tyhjäkäyntimittauksen 3.4.2018 tulokset*

Helvarin mittari (V)	Fluke + 80K-40 mittapää (V)	korjauskerroin
0	9,3	
100	118	1,180
200	219	1,095
300	320	1,067
400	420	1,050
500	521	1,042
600	623	1,038
700	723	1,033
800	824	1,030
900	922	1,024
1000	1024	1,024
1100	1131	1,028
1200	1234	1,028
1300	1339	1,030
1400	1447	1,034
1500	1555	1,037
1600	1664	1,040
1700	1770	1,041
1800	1866	1,037
1900	1980	1,042
2000	2080	1,040
2250	2321	1,032
2500	2615	1,046

Taulukko A4. Chroma-Bitscope/Helvar –vertailumittauksen tulokset Chromalla

Paperinäytteen no.		1	2	3	4	5	6
Paksuus (µm)		65,6	77,6	53,4	123,0	154,0	188,6
Testitulokset	1	0,657	0,798	0,757	0,956	1,076	1,335
	2	0,697	0,777	0,893	0,916	1,080	1,296
	3	0,678	0,737	0,798	0,891	1,076	1,235
	4	0,678	0,722	0,722	0,891	1,050	1,335
	5	0,657	0,758	0,777	0,900	1,015	1,235
	6	0,709	0,739	0,757	0,936	1,055	1,251
	7	0,636	0,722	0,739	0,875	1,055	1,316
	8	0,653	0,798	0,798	0,891	1,126	1,235
	9	0,653	0,757	0,758	0,956	1,055	1,277
	10	0,636	0,758	0,797	0,936	1,080	1,296
Keskiarvo (kV)		0,665	0,757	0,780	0,915	1,067	1,281
Keskihajonta (kV)		0,024	0,028	0,047	0,029	0,029	0,041
Läpilyöntilujuus (MV/m)		10,14	9,750	14,60	7,437	6,927	6,793
Keskihajonta (MV/m)		0,373	0,358	0,889	0,239	0,186	0,215

Taulukko A5. Chroma-Bitscope/Helvar –vertailumittauksen tulokset Bitscopella

Paperinäytteen no.		1	2	3	4	5	6
Paksuus (µm)		65,6	77,6	53,4	123,0	154,0	188,6
Testitulokset	1	0,707	0,820	0,799	1,025	1,124	1,414
	2	0,735	0,820	0,933	0,969	1,089	1,322
	3	0,728	0,792	0,849	0,926	1,160	1,301
	4	0,728	0,757	0,778	0,948	1,110	1,400
	5	0,700	0,799	0,820	0,962	1,075	1,308
	6	0,757	0,792	0,806	0,976	0,976	1,322
	7	0,679	0,764	0,785	0,933	1,110	1,393
	8	0,721	0,849	0,856	0,955	1,188	1,322
	9	0,700	0,792	0,806	1,011	1,124	1,230
	10	0,686	0,806	0,841	0,997	1,124	1,379
Keskiarvo (kV)		0,714	0,799	0,827	0,970	1,108	1,339
Keskihajonta (kV)		0,024	0,027	0,046	0,033	0,057	0,057
Läpilyöntilujuus (MV/m)		10,89	10,30	15,49	7,887	7,195	7,101
Keskihajonta (MV/m)		0,366	0,349	0,854	0,265	0,367	0,301
Ero Chroma-Bitscope (%)		-6,820	-5,310	-5,767	-5,705	-3,722	-4,343

Taulukko A6. *Chroma-Bitscope/Helvar vertailumittauksen mittaustulokset Helvarilla
(virallisista mittauskorteista, korjauskerroin huomioitu)*

Paperinäytteen no.		1	2	3	4	5	6
Mittaus-pvm.		10.11.	10.11.	10.11.	17.11.	1.9.	1.9.
Paksuus (µm)		65,6	77,6	53,4	123,0	154,0	188,6
Testitulokset	1	0,61	0,78	0,76	0,99	1,23	1,37
	2	0,64	0,71	0,78	0,86	1,10	1,48
	3	0,65	0,74	0,78	0,87	1,21	1,40
	4	0,62	0,79	0,72	1,01	1,18	1,52
	5	0,64	0,72	0,75	1,06	1,20	1,42
	6	0,63	0,75	0,77	1,02	1,14	1,44
	7	0,64	0,78	0,76	0,97	1,12	1,44
	8	0,67	0,76	0,75	0,98	1,05	1,38
	9	0,64	0,76	0,72	0,96	1,14	1,49
	10	0,66	0,80	0,79	0,99	1,05	1,22
Keskiarvo (kV)		0,64	0,76	0,76	0,97	1,14	1,41
Keskihajonta (kV)		0,02	0,03	0,02	0,06	0,06	0,09
Läpilyöntilujuus (MV/m)		9,76	9,76	14,16	7,88	7,42	7,50
Keskihajonta (MV/m)		0,28	0,36	0,41	0,50	0,40	0,45
Ero Chroma-Helvar (%)		3,89	-0,06	3,13	-5,61	-6,62	-9,42

Taulukko A7. Chroma-TTY-vertailumittauksen 4.5.2018 tulokset TTY:llä

Paperinäytteen no.		1	2	3	4	5
Paksuus (µm)		31,0	101,4	114,4	199,0	243,4
Testitulokset	1	0,781	0,887	1,197	1,230	1,655
	2	0,679	0,878	1,235	1,287	1,633
	3	0,727	0,899	1,281	1,336	1,732
	4	0,703	0,926	1,241	1,294	1,704
	5	0,728	0,889	1,138	1,435	1,541
	6	0,679	0,880	1,074	1,266	1,605
	7	0,725	0,969	1,009	1,273	1,711
	8	0,789	0,869	1,176	1,273	1,662
	9	0,759	0,950	1,206	1,315	1,619
	10	0,725	0,952	1,175	1,322	1,605
	11	0,731	0,909	1,225	1,273	1,633
	12	0,669	0,882	1,227	1,252	1,605
	13	0,682	0,893	1,272	1,259	1,570
	14	0,660	0,952	1,153	1,308	1,640
	15	0,727	1,036	1,131	1,315	1,527
Keskiarvo (kV)		0,718	0,918	1,183	1,296	1,630
Keskihajonta (kV)		0,039	0,046	0,074	0,049	0,059
Läpilyöntilujuus (MV/m)		23,15	9,054	10,34	6,512	6,695
Keskihajonta (MV/m)		1,27	0,45	0,64	0,24	0,24

Taulukko A8. Chroma-TTY –vertailumittauksen tulokset Chromalla, mitattu 12.4.2018 ja 16.4.2018

Paperinäytteen no.		1	2	3	4	5
Mittaus-pvm.		12.4.-18	12.4.-18	16.4.-18	12.4.-18	16.4.-18
Paksuus (µm)		31,0	101,4	114,4	199,0	243,4
Testitulokset	1	0,777	0,898	1,229	1,418	1,727
	2	0,598	0,894	1,266	1,259	1,627
	3	0,668	0,858	1,177	1,336	1,868
	4	0,727	0,868	1,229	1,345	1,638
	5	0,627	0,997	1,167	1,329	1,668
	6	0,727	0,847	1,147	1,268	1,666
	7	0,592	0,889	1,207	1,338	1,558
	8	0,777	0,889	1,137	1,341	1,668
	9	0,586	0,877	1,177	1,250	1,709
	10	0,697	0,877	1,137	1,228	1,524
	11	0,697	0,800	1,207	1,278	1,558
	12	0,697	0,877	1,247	1,425	1,694
	13	0,687	0,868	1,233	1,228	1,483
	14	0,708	0,957	1,177	1,238	1,668
	15	0,758	0,884	1,167	1,277	1,613
Keskiarvo (kV)		0,688	0,885	1,194	1,304	1,645
Keskihajonta (kV)		0,063	0,045	0,041	0,064	0,094
Läpilyöntilujuus (MV/m)		22,20	8,731	10,43	6,552	6,757
Keskihajonta (MV/m)		2,045	0,442	0,357	0,321	0,384
Ero Chroma-TTY (%)		-4,106	-3,565	0,929	0,615	0,918

Taulukko A9. Chroman käyttöönottotestauksen 3.5.2018 kalibrointimittauksen tulokset

Referenssimittalaitteen lukema (kV)	Chroman lukema (kV)	Korjauskerroin
210	200	1,048
410	401	1,022
604	601	1,004
796	800	0,994
1004	1001	1,003
1192	1200	0,993
1390	1401	0,992
1588	1601	0,992
1763	1802	0,978
1975	2000	0,988
2953	3003	0,983
3948	4001	0,987
4908	5003	0,981

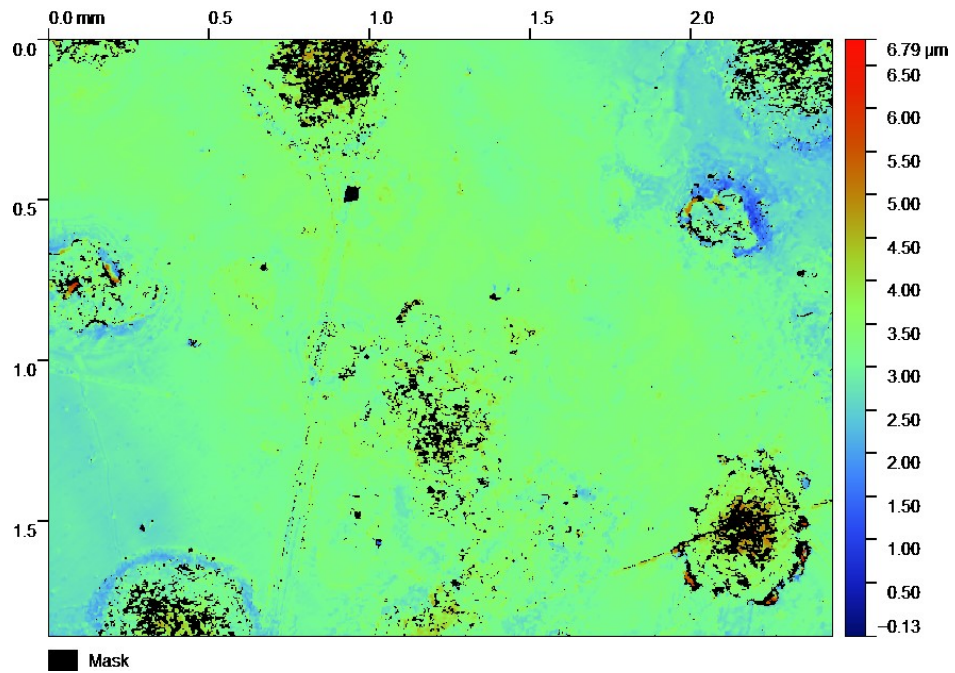
Taulukko A10. Tulokset Ferrantin oskilloskooppimittauksesta LeCroylla 25.1.2018

Näytteen no.		1	2	3	4	5	6
Testityyppi		AC	AC	AC	AC	DC	DC
Paksuus (µm)		94	119	185	156	94	125
Testitulokset	1	10,61	12,30	13,86	14,85	28,44	33,76
	2	11,16	12,30	14,57	14,99	30,04	33,76
	3	10,96	12,59	14,71	14,85	29,96	31,56
	4	12,02	12,30	13,72	15,27	28,12	39,66
	5	11,16		16,55	15,70	26,26	38,12
	6	9,86		15,13		32,18	37,18
	7	9,67		14,28		30,94	35,94
	8			14,99		29,38	36,88
	9			13,86		28,44	33,44
	10					24,38	34,38
Keskiarvo (kV)		10,78	12,37	14,63	15,13	28,81	35,47
Keskihajonta (kV)		0,81	0,14	0,88	0,36	2,26	2,50
Läpilyöntilujuus (MV/m)		114,6	104,0	79,08	97,00	306,5	283,7
Keskihajonta (MV/m)		8,65	1,19	4,76	2,31	24,03	19,98

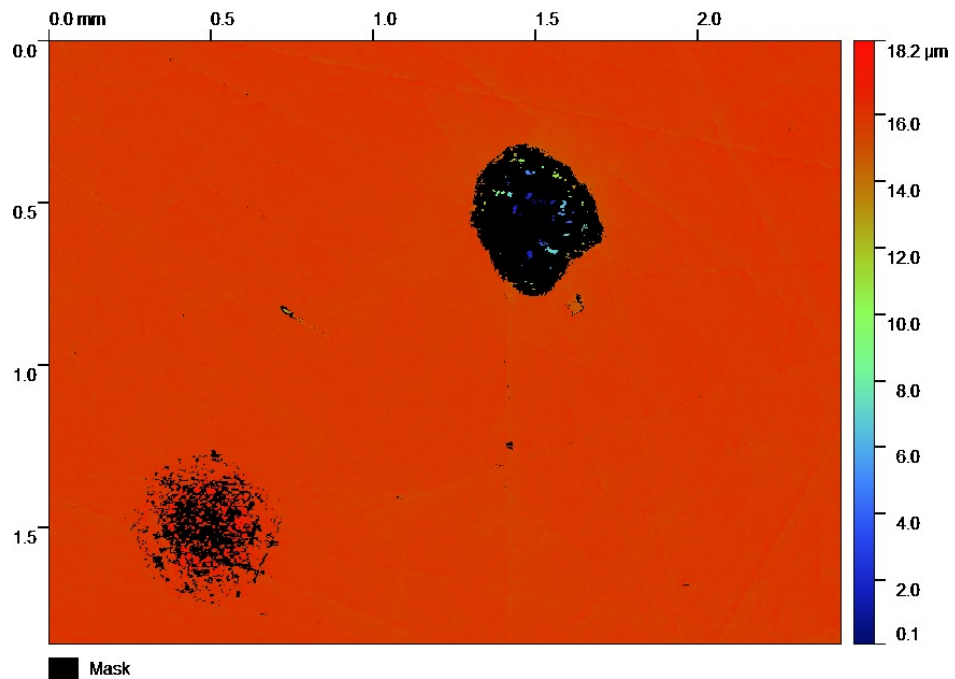
Taulukko A11. Tulokset vertailumittauksesta kuluneen ja juuri hiottun elektrodin välillä Chromalla. Kuluneen elektrodin referenssiarvo on sama kuin taulukossa A8.

		Kulunut elektrodi		Hiottu elektrodi	
Paperinäytteen no.		1	2	1	2
Mittaus-pvm		12.4.	12.4.	22.5.	22.5.
Paksuus (µm)		101,4	199,0	101,4	199,0
Testitulokset (kV)	1	0,898	1,418	0,835	1,359
	2	0,894	1,259	0,955	1,322
	3	0,858	1,336	0,896	1,250
	4	0,868	1,345	0,936	1,306
	5	0,997	1,329	0,835	1,388
	6	0,847	1,268	0,877	1,268
	7	0,889	1,338	0,882	1,336
	8	0,889	1,341	0,926	1,327
	9	0,877	1,250	0,966	1,217
	10	0,877	1,228	0,976	1,256
	11	0,800	1,278	0,837	1,254
	12	0,877	1,425	0,936	1,259
	13	0,868	1,228	0,907	1,266
	14	0,957	1,238	0,875	1,327
	15	0,884	1,277	0,856	1,346
Keskiarvo (kV)		0,885	1,304	0,900	1,299
Keskihajonta (kV)		0,045	0,064	0,048	0,049
Läpilyöntilujuus (MV/m)		8,731	6,552	8,872	6,526
Ero kuluneeseen elektrodiin (%)				1,619	-0,394

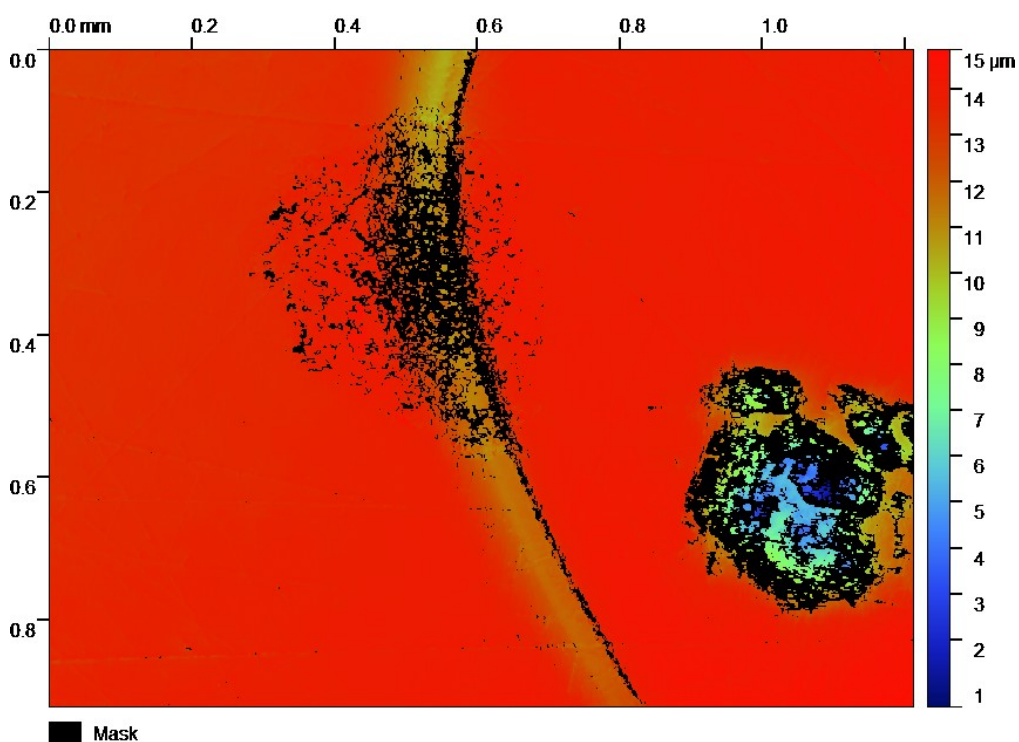
LIITE B: PROFILOMETRIKUVIA ELEKTRODEISTA



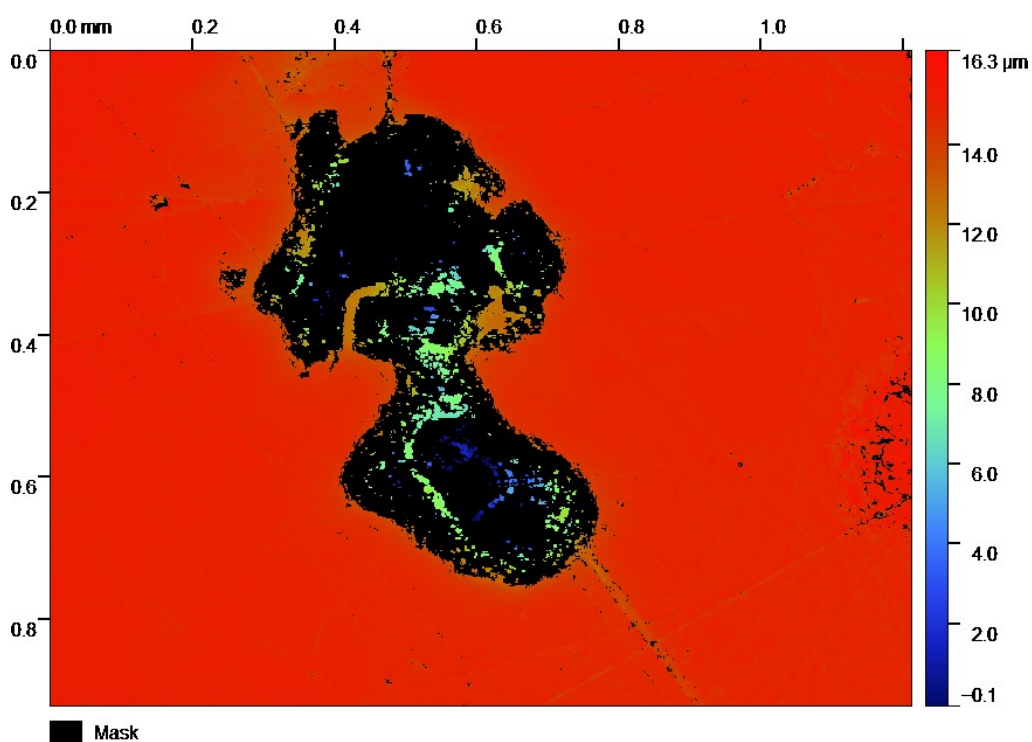
Kuva B1. 25 mm elektrodin pintaa, jossa näkyy useita kraattereimaisia läpilyöntijälkiä.



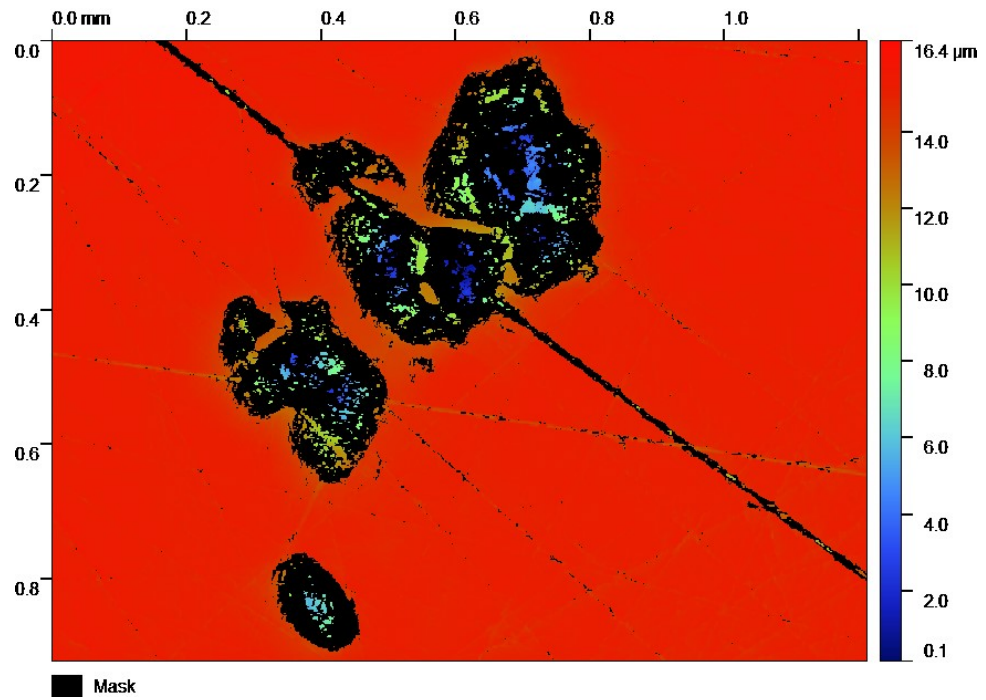
Kuva B2. Kohouma (vasemmalla alhaalla) ja kuoppamainen läpilyöntijälki (oikealla ylhäällä) 100 mm alaelektrodin DC-puolella



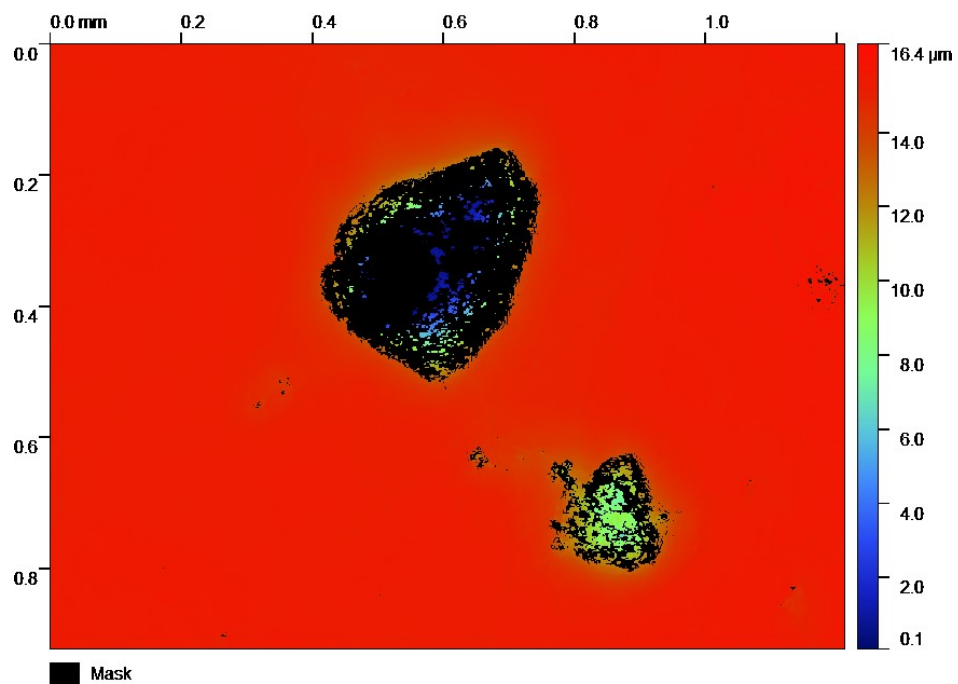
Kuva B3. Kohouma ja kuoppamainen läpilyöntijälki 10 mm alaelektrodin DC-puolella, kuvassa näkyy myös tekstissä mainittu useita mikrometrejä syvä ura, johon vasemmanpuoleinen läpilyönti on osunut.



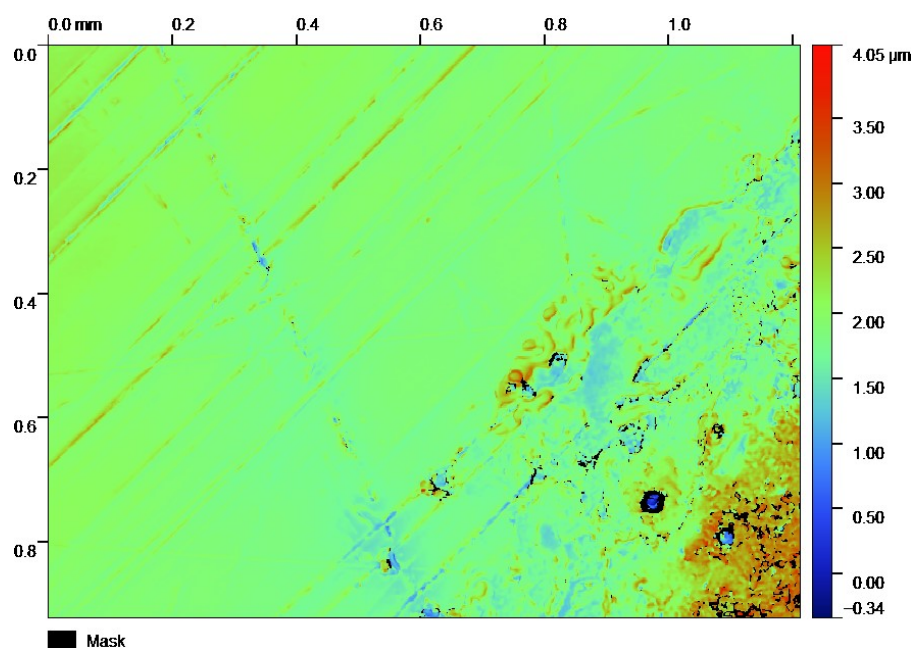
Kuva B4. Kaksi vierekkäistä läpilyöntijälkeä 100 mm alaelektrodin DC-puolella. Läpilyöntijälkien kohdalla näkyy myös hiontauria.



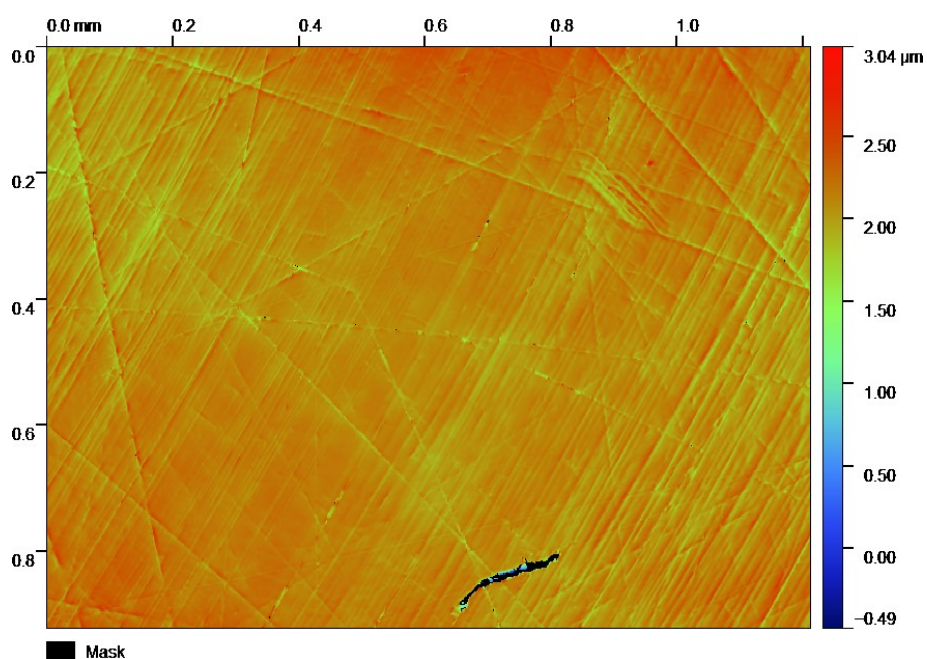
Kuva B5. Lähekkäin olevia läpilyöntijälkiä 100 mm alaelektroodin DC-puolella. 3D-malli samasta kuvasta on luvussa 6 esitetty kuvassa 37.



Kuva B6. Vähemmän ympyräsymmetrinen ja matalampi läpilyöntijälki 100 mm alaelektroodin AC-puolella



Kuva B7. 50 mm teräselektrodin hiomajälkeä, jossa näkyy selkeitä yli mikrometrin korkeisia kohoumia



Kuva B8. Hiomajälkeä 50 mm teräselektrodissa. Tässä korkeusvaihtelu on pienempää ja urien suunnat vaihtelevat.