

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

AKUSTINEN OSITTAISPURKAUS- MITTAUS

Lian ja kosteuden vaikutus eristysongelman ultraääniemissioon

TEKIJÄ Veijo Malinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Veijo Malinen			
Työn nimi Akustinen osittaispurkausmittaus: Lian ja kosteuden vaikutus eristysongelman ultraääniemissioon			
Päiväys	30.5.2022	Sivumäärä/Liitteet	71/0
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Paikallis-Sähkö Oy			
Tiivistelmä			
<p>Akustisen osittaispurkausmittauksen etuna on ollut ongelmakohtien varhainen paikantaminen keski- ja suurjännitelaitteistoissa, sekä mittauksen verrattain helppo ja edullinen toteutus. Toisaalta puutteena on ollut ongelman vakavuuden määrittämisen ja vian kehittymisen ennustamisen vaikeus, sillä ympäristön olosuhteet vaikuttavat osittaispurkausten aktiviteettiin voimakkaasti ja mittauksista ei voida kalibroida osoittamaan osittaispurkauksen varausta. Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli auttaa arvioimaan lian ja kosteuden vaikutusta eristerakenteen toimivuuteen ja akustisessa mittauksessa saatuihin tuloksiin. Työn tilaajana toimi Paikallis-Sähkö Oy</p> <p>Työtä varten selvitettiin osittaispurkauksiin ja jännitelujuuteen liittyviä perusteita ja käsitteitä, sekä niiden mittaamiseen tarkoitettuja laitteistoja. Työ toteutettiin testaamalla käytöstä poistetun keskijännitekuormaerottimen eristimiä Savonia-ammattikorkeakoulun suurjännitelaboratorioon rakennetussa sääkaapissa. Eristimiä testattiin mittaamalla eristysvastusta, polarisaatioindeksiä ja dielektristä absorptiokerrointa tasajännitteellä, sekä osittaispurkausten aiheuttamia pulsseja ilmateitse ultraäänimittarilla. Testejä toistettiin eristimien pinnat likaisena ja puhdistettuna erilaisissa ilmankosteuksissa.</p> <p>Laboratoriomittauksissa kävi ilmi, että lialla ja kosteudella on merkittävä yhteisvaikutus eristimen jännitelujuuteen ja eristimen pinnalla tapahtuvien osittaispurkausten akustiseen emissioon. Samalla selvisi, että kovin kuivassa il-massa tehdyssä akustisessa mittauksessa voi jäädä huomaamatta merkittäviä eristysongelmia. Toisaalta kuivassa ilmassa tehty pienikin äänihavainto voi indikoida vakavasta ongelmasta kosteammissa olosuhteissa.</p>			
Avainsanat Akustinen osittaispurkausmittaus, eristin, osittaispurkaus, ultraäänimittaus			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author Veijo Malinen	
Title of Thesis Acoustic Method Partial Discharge Measurement: Influence of Dirt and Moisture to Ultrasound Emission of HV Insulation Problem	
Date May 30, 2022	Pages/Appendices 71/0
Client Organisation Paikallis-Sähkö Oy	
Abstract <p>While searching and pointing partial discharges by acoustic measurement methods in medium and high voltage systems has been relatively easy, the disadvantage of the acoustic methods has been the difficulty of determining the stage of deterioration of insulation. Predictability of possible insulation failure in some other environmental conditions has been difficult, too. These disadvantages are caused by a fact that apparent charge of the partial discharge can-not be determined by acoustic methods. The purpose of this thesis was to increase knowledge and understanding about the effect of dirt and moisture on insulation deterioration. The thesis was commissioned by Paikallis-Sähkö Oy.</p> <p>Basic theory of electric discharges, insulation deterioration and insulation condition management were studied to achieve the target. The laboratory tests were implemented by measuring insulation resistance and the airborne acoustic emission of insulators of an Air Switch-disconnector under different levels of voltage, humidity and dirt.</p> <p>The laboratory tests showed that an increased humidity and dirt level on insulation could be very harmful by reducing insulation resistance and increasing partial discharge activity. High risk insulation deterioration could remain unnoticed when conducting acoustic measurements in low humidity conditions. On the other hand, a tiny little acoustic emission could predict a severe insulation problem in higher humidity.</p>	
Keywords Acoustic emission PD measurement, Insulator, Partial Discharge, Ultrasound measurement	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
1.1	Työn tarpeellisuus ja tarkoitus	6
1.2	Lyhenteet ja määritelmät	7
1.3	Työn tilaaja ja yhteistyökumppanit	7
2	SÄHKÖKENTTÄ JA SÄHKÖVUO	8
3	ERISTE SÄHKÖKENTÄSSÄ	10
3.1	Eriste tasasähkökentässä	10
3.2	Eriste vaihtosähkökentässä	11
3.3	Eristeen polarisoituminen	11
3.4	Häviöt eristeessä	11
4	OSITTAISPURKAUKSET	13
4.1	Koronapurkaukset	15
4.2	Pintapurkaukset	16
4.3	Sisäiset purkaukset	18
4.4	Osittaispurkausten kehittyminen haitalliseksi	19
5	ÄÄNI JA AKUSTIIKKA	20
5.1	Ääniaallot ja niiden ominaisuudet	20
5.2	Taajuus ja resonanssi	22
5.3	Äänisignaalin käsittely	22
6	ERISTEIDEN VANHENEMINEN JA KUNNONVALVONTA	24
6.1	Eristysvastuksen mittaaminen	25
6.2	Polarisaatioindeksin ja dielektrisen absorptiosuhteen mittaaminen	27
6.3	Osittaispurkausmittaukset	28
6.4	Akustiset osittaispurkausmittaukset	29
7	AKUSTISET MITTALAITTEET	32
8	PURKAUSTYYPPIEN TUNNISTAMINEN ULTRAÄÄNIEMISSIOSTA	35
8.1	Osittaispurkauksen sormenjälki	36
8.2	Esimerkki: pistemäinen negatiivinen elektrodi lähellä positiivista elektrodia	37
9	LABORATORIO- JA MITTALAITTEISTO	39
9.1	Suurjännitelaitteisto	39
9.2	Sääkaappi ja kytkennät	40

9.3	Toimintakokeet	43
9.3.1	Sääkaapin toimintakoe	43
9.3.2	Jännitteen kytkentäkoe.....	44
9.3.3	Akustisten häiriöiden koe	46
9.4	Mittalaitteet	48
9.4.1	Ultraäänimittari UP 10000	48
9.4.2	Eristystesteri KEW 3128.....	49
9.5	Tutkittava erotin	50
9.5.1	Erottimen käyttöhistoria	50
9.5.2	Erottimen kunto laboratoriomittausten alkaessa	52
9.5.3	Erottimen puhdistaminen	54
10	LABORATORIOMITTAUKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI	55
10.1	Mittausten eteneminen.....	55
10.2	Tasajännitekokeiden tulokset.....	56
10.2.1	Eristysvastus.....	57
10.2.2	Polarisaatioindeksi ja dielektrinen absorptiokerroin	60
10.3	Akustisen ultraäänimittauksen tulokset.....	61
10.3.1	Eristimen 2 mittaustulokset vaihejännitteellä.....	62
10.3.2	Eristimen 2 mittaustulokset pääjännitteellä	65
10.3.3	Purkauksen intensiteetin vaihtelu	67
10.3.4	Purkauksen havainnointi korvakuulolla.....	67
10.4	Yhteenveto mittaustuloksista	68
11	YHTEENVETO	69
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	70

1 JOHDANTO

Osittaispurkaukset ovat suurjännitetekniikan merkittävä ja laajasti tutkittu osa-alue ja mittaustekniikka sen ympärillä kehitetään jatkuvasti. Yksi tapa havaita näitä keski- ja suurjännitelaitteistoille haitallisia purkauksia on purkausten aiheuttaman ääniemission mittaaminen ultraäänitaajuuksilla. Suomalaisia tutkimuksia tai kirjallisuutta aiheesta on julkaistu vielä suhteellisen vähän. Aiheesta löydetty tutkimukset ja selvitykset ovat käsitelleet kattavasti itse osittaispurkauksia ja purkausten sähköisten suureiden mittauksia, mutta niissä ei ole juurikaan käsitelty purkaustyyppien tunnistamista tai vakavuuden määrittämistä ääniemission perusteella.

Sähköverkkojen kunnossapidossa akustista mittaustapaa on tyypillisesti käytetty lähinnä mahdollisten ongelmakohtien seulomiseen suuresta laitejoukosta jatkotutkimuksia varten. Tämän työn ensisijaisena tavoitteena oli selvittää, voidaanko akustisella osittaispurkausmittauksen tuloksista päätellä myös eristysongelman vakavuutta.

Tavoitteen saavuttamiseksi selvitettiin kokein lian ja ilmankosteuden vaikutusta eristimen eristyskykyyn ja akustiseen emissioon, sekä tarkasteltiin näiden välistä korrelaatiota. Kokeita varten rakennettiin sääkaapin prototyyppi, jonka sisällä ilman suhteellista kosteutta pystyttiin säätämään ympäröivän huoneilman kosteudesta aina kastepisteeseen saakka.

1.1 Työn tarpeellisuus ja tarkoitus

Paikallis-Sähkö Oy:ssa akustisia osittaispurkausmittauksia on tehty vuodesta 2009 alkaen. Tämän reilun kymmenen vuoden aikana mittaustekniikan osaajien kouluttaminen ja perehdyttäminen on osoittautunut työlääksi ja aikaa vieväksi prosessiksi erityisesti ääninäytteiden analysoinnin ja tulkinnan osalta ja työhön kaivattiinkin selkeämpää ohjeistusta, sekä koostettua teoretietoa. Kentällä tehtyjen mittausten ongelmana on ollut myös purkausaktiiviteetin voimakas riippuvuus ympäristön olosuhteista, minkä vuoksi ongelman vakavuutta ja kehittymistä on ollut vaikea määrittää ja ennustaa.

Alkuperäisenä tarkoituksena oli verrata akustisen mittauksen tuloksia standardisoidun osittaispurkausmittauksen tuloksiin. Valitettavasti mittalaitteiston komponenttien toimituksessa tuli aikatauluongelmia, eikä tarvittavia antureita ehditty saada riittävän ajoissa, joten tämä osio jouduttiin siirtämään tulevaisuuden haasteeksi. Vertailevana menetelmänä eristimien kuntoa mitattiin eristysvastus- ja polarisaatioindeksimittauksilla, joilla pystyttiin arvioimaan eristyskyvyn muutokset karkealla tasolla.

Jakelulaitteistojen haltijoiden tarpeiden selvittämiseksi ja työn sisällön määrittämiseksi pyydettiin kommentteja Loiste Sähköverkko Oy:n kunnossapitopäällikkö Eetu Niskaselta sekä Kuopion Sähköverkko Oy:n huoltoinsinööri Janne Kaukoselta. Kommenteissa nousi esille tiedon tarve ympäröivien olosuhteiden vaikutuksesta eristysrakenteiden toimivuuteen.

1.2 Lyhenteet ja määritelmät

DAR = Dielectric Absorption Ratio, Dielektrinen absorptiokerroin

KJ = keskijännite

PD = Partial Discharge, osittaispurkaus

PI = Polarization Index, polarisaatioindeksi

RH = Relative Humidity, suhteellinen kosteus. Ilman kosteuspitoisuus tarkastelulämpötilassa verrattuna ilman maksimikosteussisältöön

SJ = suurjännite

HFCT = High Frequency Current Transformer, suurtaajuusvirtamuuntaja

1.3 Työn tilaaja ja yhteistyökumppanit

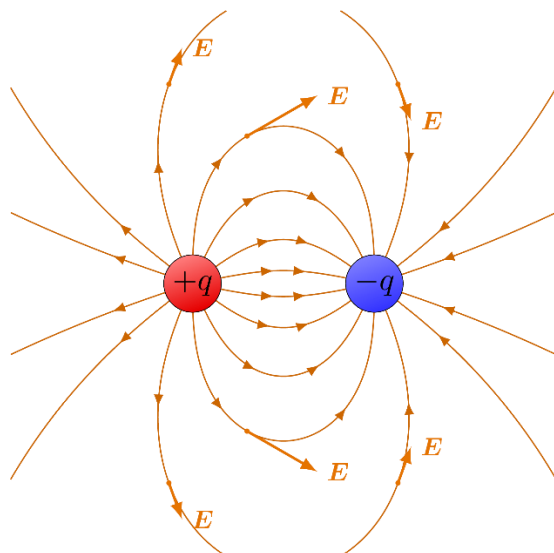
Työn tilaajana toimi Paikallis-Sähkö Oy, joka on yli 60 vuotta toiminut sähkö-, tele-, automaatio- ja turvaurakointiliike. Yhtiön palveluksessa on tytäryhtiöt mukaan lukien noin 150 henkilöä, toimipisteitä on kymmenellä paikkakunnalla ja päätoimipaikkana on Kajaani. Paikallis-Sähkö on osa valtakunnallista QMG-talotekniikkakonsernia.

Työtä varten saatiin Loiste Sähköverkko Oy:lta (nyk. Kajave Oy) tutkittavaksi 20 kV puistomuuntamon kuormaerotin, joka oli poistettu käytöstä maasulusta johtuneen vaurioitumisen vuoksi. Efficient Network Partners Oy:n Kuopion toimipisteeltä saatiin työtä varten asianmukaisesti rakennettu suurjännitejohdin kaapelipäätteineen. Sääkaapin aihio saatiin käyttöön Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriosta, loput laitteet ja tarvikkeet hankittiin työn tilaajan toimesta ja ne lahjoitettiin työn päätyttyä Savoniale mahdollista jatkokäyttöä varten.

2 SÄHKÖKENTTÄ JA SÄHKÖVUO

Kaikki sähköisesti varautuneet kappaleet luovat ympärilleen sähkökentän. Sähkökenttää kuvataan positiivisesta negatiiviseen kappaleeseen kulkevien kenttäviivojen avulla. Kuvan 1 mukaisesti kappaleen välittömässä läheisyydessä kentän suunta on kohtisuoraan kappaleen pinnan kanssa.

(Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015) (Tammertekniikka, 2015)

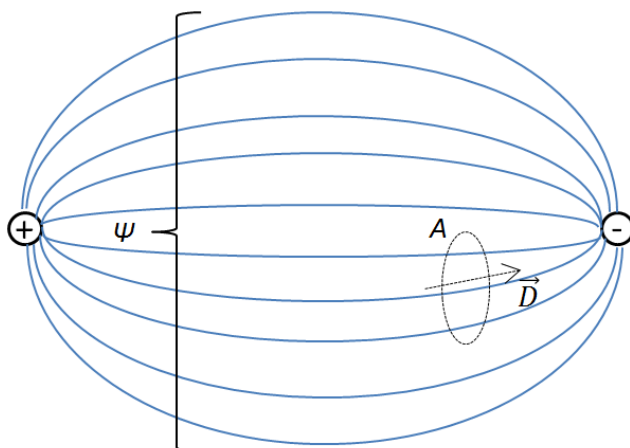


Kuva 1. Kahden pistevarauksen aiheuttama sähkökenttä (Neutelings, 2022).

Sähkökentän \vec{E} [$\frac{N}{As} = \frac{N}{C} = \frac{V}{m}$] vaikuttaessa varaukseen q syntyy voima \vec{F} . Yleisesti sähkökentän yksikönä käytetään voltia/metri.

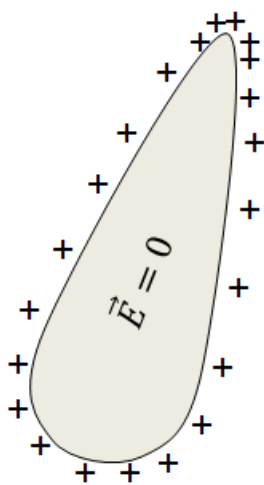
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (1)$$

Kenttäviivoilla voidaan kuvata myös sähkövuota Ψ [As] mikä on varautuneesta kappaleesta lähtevien voalkioiden summa. Sähkökentän voimakkuutta tiettyä pinta-alaa A kohti kuvataan sähkövuon tiheydellä \vec{D} [$\frac{As}{m^2}$] (kuva 2).



Kuva 2. Sähkövuo ja sähkövuon tiheys (Muokattu kuva; Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015, s. 23)

Johteen sisällä sähkökentän voimakkuus on nolla ja kaikki varaus on johteen pinnalla. Pallon muotoisen kappaleen pinnan varauskate on tasainen, kun taas ulokkeiden kohdalla varauskate muuttuu suhteessa pinnan kaarevuussäteeseen, niin että varaus on suurin pienimmän kaarevuussäteen kohdalla (kuva 3).



Kuva 3. Pinnan varauskate suhteessa pinnan kaarevuussäteeseen (Muokattu kuva; Tammertekniikka, 2015, s. 117)

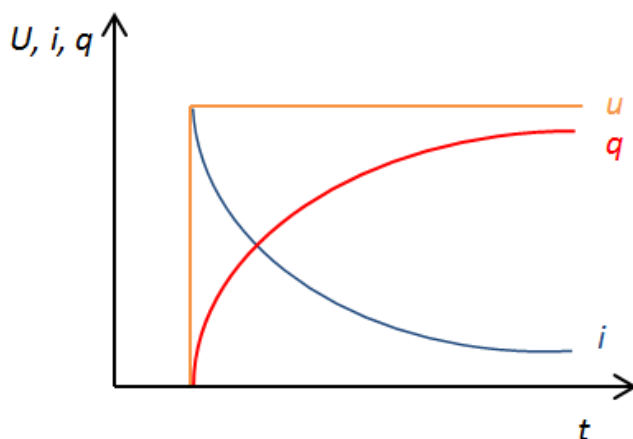
3 ERISTE SÄHKÖKENTÄSSÄ

Ideaalinen eriste on täysin johtamaton rakenne, jonka läpi ei kulje lainkaan vuotovirtaa. Eristeen ollessa myös täysin homogeeninen voidaan eristeessä vaikuttavia sähkökentän vaikutuksia laskea staattiselle sähkökentälle pätevillä yhtälöillä. Käytännön eristysrakenteet kuitenkin poikkeavat ideaalisesta ja niissä esiintyy avaruus- ja pintavarauksia. Lisäksi tasajännitteellä vuotovirran osuus on aina huomioitava. Sähköisten rasitusten jakaantuminen eristysrakenteessa käyttäytyy eri tavoin tasa- ja vaihtosähkökentissä. Molemmissa tapauksissa eristimessä tai sen pinnalla olevat epäpuhtaudet vaikuttavat jänniterasituksen jakautumiseen. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

3.1 Eriste tasasähkökentässä

Tasasähkökentässä jänniterasitus jakaantuu rakenteessa käytettyjen eristinmateriaalien resistiivisyyksien mukaisesti. Täysin homogeenisessa eristimessä varaustiheys ja eristeessä vallitseva sähkökenttä ovat vakiot. Käytännön eristin ei kuitenkaan ole homogeeninen, joten osaan eristimestä voi kohdistua suurempi rasitus.

Kuvassa 4 on esitetty eristimen käyttäytyminen, kun siihen kytketään askelmainen tasajännite u . Kytkehetkellä syntyy eristeen läpi kulkeva varausvirta i . Kytkehetkellä eristeen pinnoille alkaa myös syntymään varaus q . Tasapainotilassa vuotovirta ja eristimen pinnoilla vaikuttava varaus ovat vakioita. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)



Kuva 4. Eriste tasasähkökentässä (Muokattu kuva; Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015, s. 57)

Eristimien kunnon määrittämiseen perinteisesti käytetyt mittaukset tehdään usein tasajännitteellä, joten edellä kuvattu eristeen käyttäytyminen on tärkeää tiedostaa tuloksia arvioitaessa. Tässä työssä eristeille tehtiin mittauksia tasajännitteellä, mutta muutoin keskityttiin purkausilmiöiden havaitsemiseen ja tunnistamiseen vaihtosähköverkossa, joten eristeen käyttäytymiseen tasasähkökentässä vaikuttavia muita tekijöitä ei käsitellä tarkemmin.

3.2 Eriste vaihtosähkökentässä

Vaihtosähkökentässä eristerakenteen jänniterasituksen jakautuminen riippuu käytettyjen aineiden permittiiviteetistä ϵ . Mitä suurempi on permittiiviteetti, sitä pienempi sähkökentän voimakkuus aineeseen vaikuttaa tietyllä sähkövuon tiheydellä.

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \Rightarrow \vec{E} &= \frac{\vec{D}}{\epsilon}\end{aligned}\quad (2)$$

Suhteellinen permittiivisyys ϵ_r kertoo materiaalin permittiivisyyden suhteessa tyhjän permittiivisyyteen $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}\quad (3)$$

Suhteellinen permittiivisyys voidaan myös ilmaista $\epsilon_r = 1 + \chi_e$, missä χ_e tarkoittaa tyhjästä poikkeavaa susceptibiliteettia, eli polarisoituvuutta sähkökentässä.

Ilman suhteellinen permittiivisyys on likimain 1,0006 ja yleisesti käytetyillä eristemateriaaleilla luokkaa 2...7. Koska pienemmän permittiiviteetin omaavaan aineeseen kohdistuu suurempi sähkökentän rasitus, myös siihen jääneet ilmvälit tai epäpuhtaudet ovat erittäin haitallisia ja voivat aiheuttaa osittaispurkauksia. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

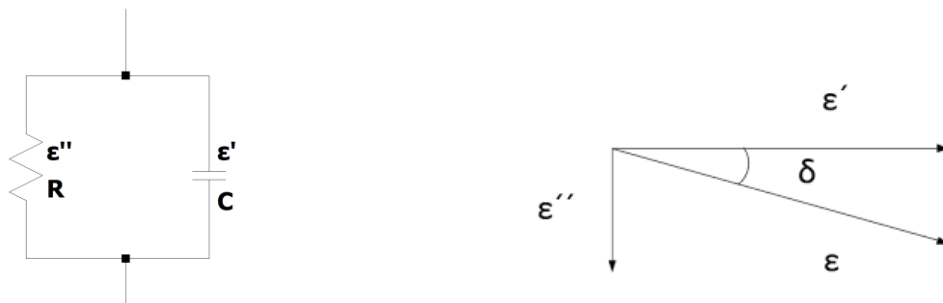
3.3 Eristeen polarisoituminen

Polarisoitumisella tarkoitetaan atomien ja molekyylien kääntymistä normaalitilan asennostaan, kun sähkökentän voima vetää niiden negatiivisia ja positiivisia osia vastakkaisiin suuntiin. Polarisoitumista tapahtuu eristävissä aineissa, joissa positiiviset ja negatiiviset varauksen kuljettajat eivät pääse liikkumaan vapaasti toisin kuin johteissa, vaan ainoastaan muuttavat asentoaan hieman. Vaihtosähkökentässä ilmiö aiheuttaa eristeessä kitkaa ja siten lämpenemistä atomien ja molekyylien kääntyillessä edes takaisin. Polarisaation vaikutus näkyy varausvirtana, kun eristeeseen tuodaan jännite. Vastaavasti varaus alkaa myös purkautua syöttävän jännitteen mennessä nolnaan. Polarisaatio saa siis eristeen käyttäytymään kuten kondensaattori ja polarisaatio tarkoittaa myös eristeen kykyä varastoida varausta. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

3.4 Häviöt eristeessä

Käytännön eristeessä on aina jonkin verran vuotovirtaa ja häviöitä. Tasasähkökentässä häviöitä aiheuttaa johtavuus, mikä kasvaa lämpötilan ja kentänvoimakkuuden kasvaessa. Vaihtosähkökentässä kääntyilevän polarisaation aiheuttamaa häviötä sanotaan dielektriseksi häviöksi (dielectric loss) ja polarisoituminen onkin merkittävin tehohäviöiden aiheuttaja suurjännitteisissä vaihtosähköverkoissa. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Eristysrakennetta voidaan kuvata rinnankytketyillä resistanssilla R (johtavuudella) ja kapasitanssilla C (polarisaatiolla), joiden mukaan määräytyy kompleksinen permittiivisyys ε ja häviökulma δ (loss angle).



Kuva 5. Eristimen sijaiskytkentä ja kompleksinen permittiivisyys (Muokattu kuva; Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015, s. 54)

Kuvan 5 sijaiskytkennässä kapasitanssi edustaa polarisaatiota ja resistanssi johtavuutta. Permittiivisyys on näiden kompleksinen summa ja kertoo, kuinka paljon eriste poikkeaa ideaalisesta.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon \angle \delta \quad (4)$$

Hyvän eristeen johtavuus on merkityksetön polarisaatioon verrattuna, jolloin häviökulma δ voidaan ilmaista myös

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \approx \frac{\varepsilon''}{\varepsilon} \quad (5)$$

missä $\tan \delta$ tarkoittaa häviökerrointa (Loss Factor tai Dielectric Dissipation Factor). Suurentunut häviökerroin tarkoittaa heikentyntä eristintä. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

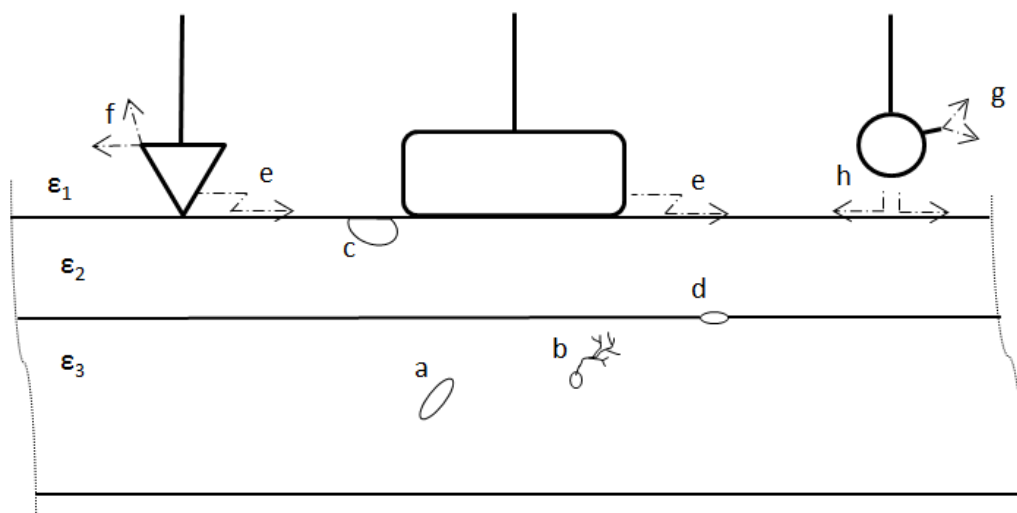
Johtavuuden osuus voi nousta merkittäväksi esimerkiksi epäpuhtauksien tai kosteuden vaikutuksesta, jolloin kaavassa 5 mainittu likiarvoistus ei enää päde. Joka tapauksessa kaavoista voidaan tulkitä, että suuri kapasitanssi suhteessa heikkoon eristysvastukseen aiheuttaa suuren häviökertoimen.

4 OSITTAISPURKAUKSET

Osittaispurkaus (Partial Discharge, PD) syntyy tilanteessa, missä sähkökentän voimakkuus ylittää eristeen sähkölujuuden paikallisesti mutta ei koko eristeen matkalta. Paikallisen poikkeaman aiheuttaa yleensä epäpuhtaus, ilmakupla, tai poikkeava muoto eristeessä tai sen rajapinnalla. Purkaus kehittyy ajan saatossa sähköpuuksi ja aiheuttaa läpi- tai ylilyönnin. Purkauksia esiintyy kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä eristeissä, joskin toiset materiaalit sietävät purkauksia paremmin kuin toiset. Esimerkiksi posliini sietää osittaispurkauksia hyvin, kun taas muovieristeille purkaukset ovat merkittävien läpilyöntimekanismin aiheuttaja (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015). Purkausten haitallisuutta arvioitaessa on hyödyllistä tuntea eristysrakenne ja materiaalit, sekä tutkittavan kohteen mittaushistoria.

Sähköiset purkaukset jaetaan tuhoaviin ja ei-tuhoaviin purkauksiin. Tuhoavissa purkauksissa syntyy jatkuvan johtavuuden tila, mikä lopulta johtaa läpilyöntiin. Osittaispurkaukset itsessään ovat yleensä melko harmittomia, mutta myös niiden aiheuttamat pitkäaikaiset rasiotukset voivat johtaa sähköpuun syntymiseen ja eristeen täydelliseen läpilyöntiin. (Giussani, 2014)

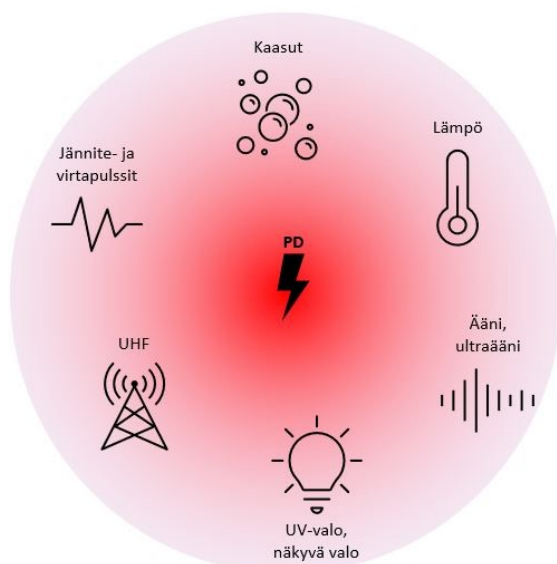
Osittaispurkauksia syntyy niin tasa-, vaihto- kuin syöksyjännitteillä ja ne jaetaan eristeiden sisäisiin purkauksiin, pintapurkauksiin eristeen pinnalla, sekä koronapurkauksiin johtimen pinnalla. Purkaukset ovat vahingollisimpia vaihtojännitteellä, koska ne yleensä toistuvat joka jaksolla. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)



Kuva 6. Tyypillisiä osittaispurkausten esiintymispaikkoja eristeessä. a) Ontelo eristeessä. b) Ontelosta muodostunut sähköpuu. c) Ontelo eristeen ja elektrodin rajapinnalla. d) Ontelo eristeiden rajapinnalla. e) Pintapurkaus elektrodin reuna-alueella. f) Koronapurkaus teräväreunaisessa elektrodissa g) Koronapurkaus muuten tasaisen elektrodin särmässä. h) Pintapurkaus sarjaeristyksessä elektrodin läheisyydessä. (Muokattu kuva; Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015, s. 80-81)

Kiinteät eristeet eivät ole palautuvia kuten kaasueristeet, vaan purkaukskanavan edetessä purkaus syytty aina vain pienemmällä jännitteellä. Purkaukskanavia voi syntyä eristeen sisälle tai pinnoille. Nestemäisissä eristeissä purkaukset aiheuttavat kemiallisia yhdisteitä ja eristyskyvyn heikkenemistä. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Selvyyden vuoksi mainittakoon, että ulkomaisessa kirjallisuudessa koronalla (Corona, External PD) tarkoitetaan usein osittaispurkauksia. Vastaavasti osittaispurkauksella voidaan tarkoittaa koronapurkausta. Akustisten osittaispurkausmittausten kannalta oleellinen ilmiö ovat myös vapaassa potentiaalissa kelluvat johtavat tai osittain johtavat esineet (Floating Object, Floating Electrode). Erityisesti ulkomaisissa lähteissä näistäkin puhutaan usein osittaispurkausten alatyypinä, vaikkeivat ne itsessään olekaan varsinaisia purkauksia. Tarkoitettu ilmiö selviää yleensä asiayhteydestä, ja ilman asiayhteyden tuntemista irrallinen teksti tai lainaus voi olla harhaanjohtava.



Kuva 7. Osittaispurkauksessa vapautuvia energiamuotoja (Malinen, 2022)

Osittaispurkauksissa syntyy jännite- ja virtapulssien lisäksi lämpöä, radiotaajuista säteilyä, UV-säteilyä, kaasuja, näkyvää valoa ja ääntä (kuva 7), joista kolme viimeistä ovat osin myös ihmisen aistittavissa. Osittaispurkausten aiheuttama ääniemissio kuullaan ilmaitse voimakkaimpana noin 40 kHz ultraäänitaajuudella, kun taas radiotaajuiset häiriöt esiintyvät korkeammilla UHF-taajuuksilla. Myös purkausten synnyttämät virta- ja jännitepulssit esiintyvät ultraääniemissiota suuremmilla taajuuksilla. Osittaispurkausten tunnistamiseen ja/tai paikantamiseen on kehitetty kaikkiin näihin energiamuotoihin perustuvia mittaustapoja. (Giussani, 2014) (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Osittaispurkausten suuruutta ja haitallisuutta arvioidaan näennäisvarauksen q [pC] avulla. Lisäksi voidaan mitata pulssijonojen muotoa ja toistuvuutta (Pattern), syyttymis- ja sammumisjännitteitä ja jännite-, sekä virtapulseja (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015). Näennäisvarausta tai jännite- ja virta-arvoja ei voida mitata tai määrittää akustisesti, joten niitä ei käsitellä tarkemmin tässä yhteydessä.

4.1 Koronapurkaukset

Koronapurkauksella tarkoitetaan elektrodin pinnalla kaasussa tai nesteessä tapahtuvaa purkausta. Esimerkiksi voimajohdoilla koronapurkaukset ovat yleisiä erityisesti huonolla säällä. Koronapurkauksessa ilman jännitelujuus ylittyy paikallisesti. Koronapurkaus syttyy Trichel-pulssina vaihtojännitteen negatiivisella puolijaksolla ja purkausten voimakkuus eri jaksojen välillä on keskenään hyvin samanlainen. Jännitteen kasvaessa purkausten määrä puolijaksoilla lisääntyy ja niitä syttyy myös positiivisella puolijaksolla, missä ne ovat tavallisesti suurempia ja epäsäännöllisempiä. Purkausten määrän kasvaessa tarpeeksi syttyy näkyvä hohtopurkaus (kuva 8), mikä on jopa satojen mikroampeereiden suuruinen tasavirta. Jännitettä edelleen suurennettaessa syttyy erittäin nopeita ja kerrostuvia streamer-pulsseja, joita kerrostuessaan sanotaan huisku- tai streamerpurkauksiksi. Yksittäisen pulsin nousuaika on vain noin 0,5 μ s. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)



Kuva 8. Näkyvä hohtopurkaus 20 kV kuormaerottimen tukieristimen ympärillä (Paikallis-Sähkö Oy)

Edellä kuvatussa koronailmiöiden kehittämisessä purkausten määrä kasvaa ja luonne muuttuu jännitteen kasvaessa. Kyse on eristeen sähkölujuuden paikallisesta ylittymisestä vallitsevassa sähkökentässä, joten jännitteen kasvua seuraavat ilmiöt pätevät vastaavasti myös eristeen heiketessä ja jännitteen pysyessä vakiona. Tämä vastaa paremmin tilannetta normaaleissa käyttöolosuhteissa, missä jännitteen tehollisarvo pysyy suhteellisen tasaisena, mutta eristeen kunto voi olla heikentynyt. Sama pätee myös muihin osittaispurkaustyyppihin.

Purkausmuodot ovat riippuvaisia elektrodien ja eristeiden rakenteesta, sekä jännitteen suuruudesta ja napaisuudesta. Ilman jännitelujuus paranee ilmankosteuden noustessa, jolloin myös koronapurkausten määrä vähenee. Kastepisteessä, kun kosteus alkaa tiivistyä pisaroiksi, vaikutus on päinvastainen. Koronapurkaukset ovat varsin yleisiä esimerkiksi voimajohdoilla. Rakenteellisen poikkeaman seurauksena jatkuvasti ilmenevä korona voi johtaa pintapurkauksiin ja kemiallisten reaktioiden vuoksi erityisesti hiilipitoisten eristemateriaalien rappeutumiseen.

(Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

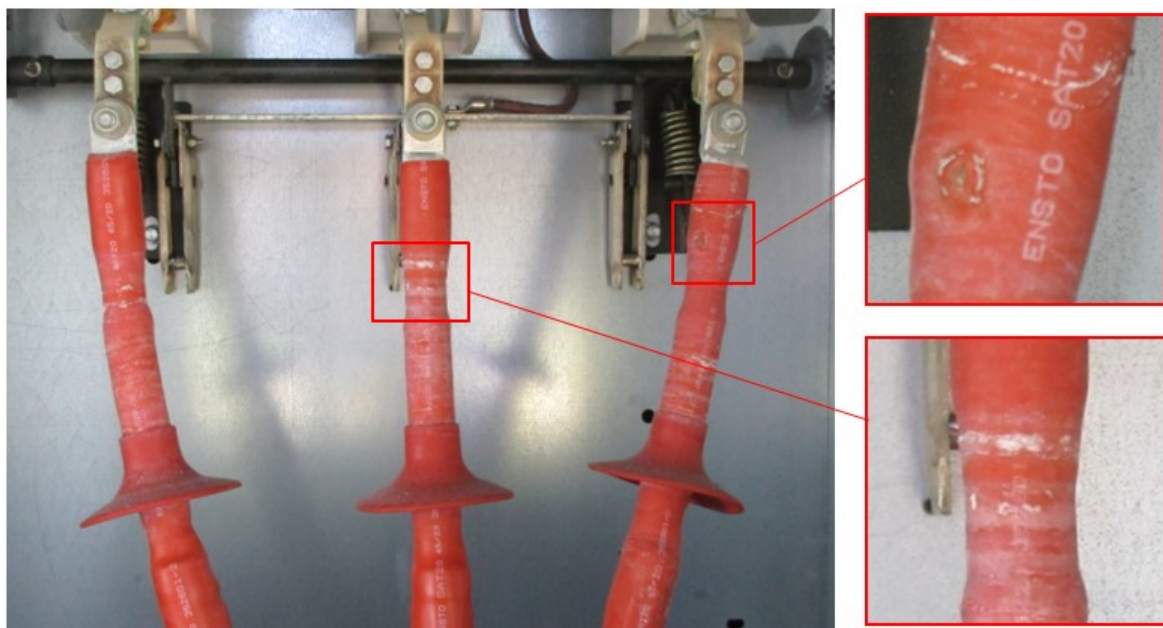
Kunnossapidon kannalta oleellista on, että korona voidaan erottaa luotettavasti muista haitallisemmista purkaustyypeistä. Koronapurkaukset tapahtuvat lähellä puolijaksojen huippuja ja purkausten amplitudi pysyy suhteellisen tasaisena jaksosta toiseen. Koronapurkaus voi aiheuttaa voimistuessaan ja ajan kanssa myös eristettä tuhoavia pintavirtoja, joten koronapurkausten kehittymisen vaiheet on hyvä pystyä tunnistamaan.

4.2 Pintapurkaukset

Pintapurkauksia syntyy tyypillisesti ilman ja kiinteän eristeen rajapinnalla, kun eristeen pinnalla vaikuttaa pinnan suuntainen voimakas sähkökenttä. Ilman permittiivisyys on kiinteiden eristeiden permittiivisyyttä heikompi, joten kiinteän eristeen pinnalla vaikuttava sähkökenttä voi ylittää ilman sähkölujuuden, vaikkei kiinteän eristeen itsensä sähkölujuus vielä ylittyisi. Tällöin kiinteän eristeen ja ilman rajapinnalla syttyy osittaispurkauksia, joita kutsutaan pintapurkauksiksi. Sähkökenttä taipuu herkästi pinnan suuntaiseksi eristeiden rajapinnoilla. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Pintapurkauksiin vaikuttavat myös kosteus ja epäpuhtaudet. Kosteissa olosuhteissa ja pienillä kuormavirroilla eristeen pinnalle voi muodostua ohut johtava vesikalvo, mikä aiheuttaa pintapurkauksia. Purkauksissa syntyvä lämpö kuivattaa eristeen pintaa. Koska purkaukset eivät ole tasaisia joka puolella eristettä, pinnalle alkaa syntyä kuivempia ja kosteampia saarekkeita. Kuivemman alueen kohdalla purkausten intensiteetti kasvaa ja alkaa esiintyä kuivan alueen yli hyppääviä kipinöitä. Näissä kohdissa syntyy yhä enemmän purkausten aiheuttamia epäpuhtauksia, jotka taas parantavat johtavuutta ja purkaus voimistuu entisestään. Orgaanisten materiaalien kohdalla tapahtuu myös hiiltymistä. Kun purkauksia ja kuivia vyöhykkeitä on ajallisesti ja paikallisesti riittävä määrä, ylilyönti on mahdollinen jopa normaalilla käyttöjännitteellä. Pintavirtoja voidaan ehkäistä huomioimalla olosuhteet ja materiaalit. Myös eristimen muotoilulla ja pintamatkalla (tai ryömintämatkalla, creepage distance) on merkitystä. Pintamatkaa voidaan lisätä esimerkiksi laipparakenteella. (Sikorski & Ziomek, 2012) (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Edellä kuvatun tapahtumaketjun kaltaiset jäljet ovat nähtävillä kuvan 9 kaapelipääteissä. Päätteet ovat puistomuuntamosta, missä tuuletus on ollut puutteellista ja kuormitus vähäistä. Päätteet ovat kauttaaltaan hapettumien peitossa ja lämpöisempänä käyneisiin kohtiin on muodostunut valkoisia renkaita. Oikeanpuoleisen päätteen yläosassa näkyy myös kraatterin muotoinen arpi, jonka aiheuttaja ei pystytä varmuudella sanomaan. Kenties eristeen pinnan läheisyydessä on ollut ontelo tai epäpuhtaus. Kyseiset päätteet on vaihdettu, mutta niitä ei koskaan tutkittu tarkemmin, joten myöskään eristeen sisäisten purkausten tai asennusvaiheessa tulleen vaurion mahdollisuutta ei voida kokonaan sulkea pois. Purkaukset olivat jo selvästi kuultavissa ilman mittalaitteita ja otsonin tuoksu muuntamossa oli voimakas. Kuvassa 10 kaapelipäätteen kuivan alueen yli hyppää kipinä, mutta pinnalla ei ole vielä nähtävissä mainittavia jälkiä.



Kuva 9. Pintapurkausten aiheuttamia jälkiä 20 kV kaapelipäätteiden pinnoilla (Paikallis-Sähkö Oy)



Kuva 10. Pintavirran synnyttämiä kipinöitä kuvattuna 20 kV kaapelipäätteen pinnalla (Paikallis-Sähkö Oy)

Jännitteen kasvaessa - tai eristeen heiketessä - pintapurkaus voi kehittyä voimakkaaksi ja erittäin haitalliseksi liukupurkaukseksi erityisesti kaapelipäätteissä ja läpivientieristimissä, sekä muissa vastaavissa rakenteissa, missä myös pintaa vastaan kohdistuu voimakas kohtisuora sähkökentän komponentti. Liukupurkauksessa purkauskanava ionisoituu ja muuttaa sähkökentän jakaumaa. Purkaus johtaa helposti koko eristysrakenteen ylilyöntiin. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Pintapurkaus tuhoaa eristettä, joten sen tunnistaminen ja erottaminen koronapurkauksesta on kunnossapidon kannalta tärkeää. Pintapurkausten luonne on satunnaisempi kuin koronapurkauksilla ja amplitudi poikkeaa positiivisen ja negatiivisen puolijakson välillä voimakkaammin. Pintapurkausten

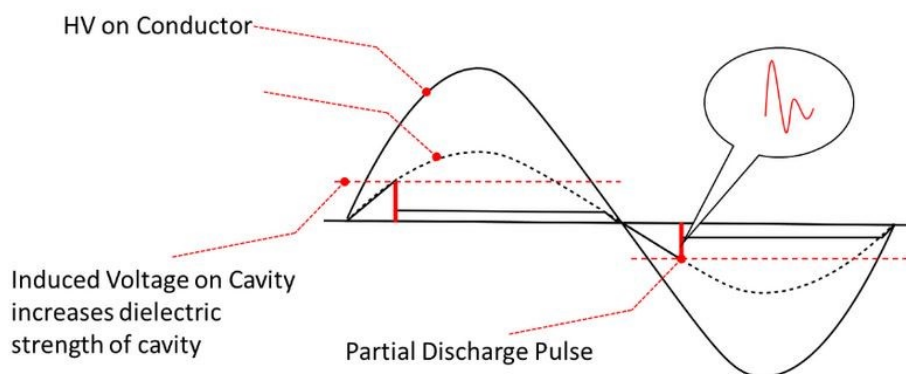
kehittyessä haitallisemmaksi niiden luonne muuttuu yhä satunnaisemmaksi ja yksittäisten purkausten amplitudi voimistuu.

4.3 Sisäiset purkaukset

Eristeiden sisäiset osittaispurkaukset alkavat tyypillisesti eristeessä olevista onteloista tai nesteessä olevista kaasukuplista. Ontelo täyttyy eristettä ympäröivästä kaasusta ja koska kaasun permittiivisyys on yleensä kiinteän eristeen permittiivisyyttä pienempi, ontelon tai kuplan sähkölujuus voi ylittyä paikallisesti. Toistuvien purkausten aikaansaama ionipommitus aiheuttaa eroosiota ontelon seinämiin ja lopulta siitä alkaa kasvaa sähköpuu. Sisäisiä purkauksia esiintyy eniten jännitteen nollakohtien molemmin puolin, kun jännitteen muutosnopeus on suurimmillaan.

(Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Ontelon yli vaikuttava jännite (Induced Voltage on Cavity) kasvaa kuvan 11 mukaisesti vaihejännitteen (HV on Conductor) mukana permittiivisyyksien suhteessa. Kun jännite ylittää ontelon syttymisjännitteen, varaus purkautuu pulseina eri energiamuotoina (Partial Discharge Pulse). Tapahtumia voi olla puolijaksolla useita. (Rugged Monitoring, 2020)



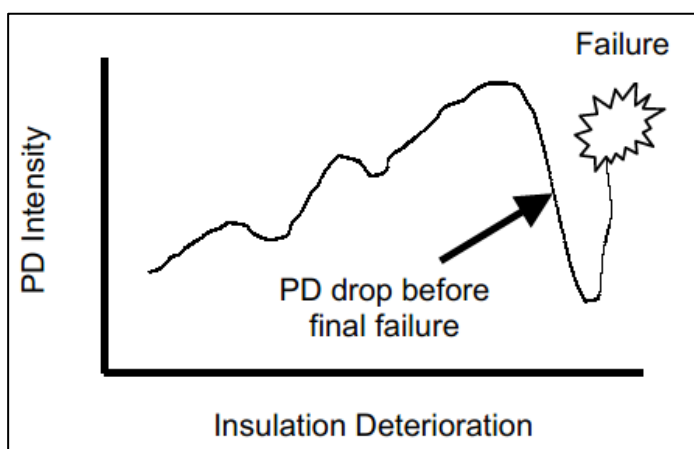
Kuva 11. Osittaispurkauksen syttyminen ontelossa (Rugged Monitoring, 2020)

Eristeen sisäiset purkaukset eivät aiheuta ilmaitse mitattavissa olevaa akustista emissiota, ellei purkaus tapahdu pinnan välittömässä läheisyydessä. Sisäisten purkausten mittaamiseen soveltuvat paremmin sähköisten suureiden mittaamiseen perustuvat menetelmät.

Sisäisten purkausten erottaminen pintapurkauksista on oleellista, mikäli käytetään mittalaitetta, joka pystyy havaitsemaan molemmat purkaustyytit. Merkittävämpänä erona on sisäisten purkausten sijoittuminen yleensä jännitteen nollakohtien läheisyyteen, kun taas pintapurkaukset sijoittuvat jännitteen huippujen läheisyyteen. Pelkästään akustisesti ilmaitse mitattaessa erottelu ei ole tarpeen, sillä ilmaitse kuultavissa oleva purkaus on käytännössä aina pinnalla tapahtuva purkaus.

4.4 Osittaispurkausten kehittyminen haitalliseksi

Lievät osittaispurkaukset eivät itsessään ole kovin haitallisia. Kuitenkin niiden sivuvaikutukset aiheuttavat pidemmällä aikavälillä eristeeseen hapettumia, eroosiota ja orgaanisissa materiaaleissa myös hiiltymistä. Purkauskanavan suurentuessa resistiivinen komponentti pienenee ja lopulta purkauskanaava kehittyy jatkuvan johtavuuden tilaan. Esimerkiksi sähköpuihin kertyvä hiili on puolijohde, mikä pienentää eristeen resistiivistä komponenttia. Kuvan 12 mukaisesti osittaispurkausten määrä ja voimakkuus (PD Intensity) kasvaa eristeen heikentyessä (Insulation Deterioration), kunnes resistiivinen komponentti on riittävän pieni ja osittaispurkaukset muuttuvat jatkuvaksi virraksi. Tällöin osittaispurkausten intensiteetti tipahtaa ja ollaan lähellä eristeen täydellistä pettämistä. (Paoletti & Golubev, 1999)



Kuva 12. Osittaispurkausten intensiteetti eristeen heiketessä (Paoletti & Golubev, 1999)

Osittaispurkausten kehittyminen eristeissä tapahtuu pääpiirteissään samalla tavalla kuin muidenkin sähkölaitevikojen, eli yleensä ne alkavat lievinä ja pahenevat kiihtyvällä vauhdilla ennen lopullista tuhoutumistaan. Poikkeuksena tähän on edellä esitetty PD-intensiteetin putoaminen ennen läpilyöntiä, mikä on tärkeää tiedostaa purkausmittausten tuloksia tulkittaessa.

Alussa osittaispurkaukset aiheuttavat eristeen suhteellisen hidasta rappeutumista, mutta jossain kohtaa yksittäisistä onteloista alkaa muodostua sähköpuita, joiden kehittyminen on nopeampaa. Sähköpuut voivat johtaa läpilyöntiin hyvin lyhyessäkin ajassa. Osittaispurkausten alkamisesta läpi-, tai ylilyöntiin johtava aika ja osittaispurkausten haitalliseksi luokiteltava määrä ovat hyvin vaikeasti määritettävissä. Toisaalta ei ole myöskään voitu osoittaa, että vähäinäkään määrä osittaispurkauksia ei olisi haitallista. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

5 ÄÄNI JA AKUSTIIKKA

Akustisen osittaispurkauksmittauksen onnistumisen kannalta on oleellista ymmärtää akustiikan ja signaalinkäsittelyn perusteet, sillä epäonnistunut mittausjärjestely voi tehdä ääninäytteestä käyttökelvottoman ja huonosti valittu signaalinkäsittelyn parametointi voi piilottaa etsittävät ilmiöt.

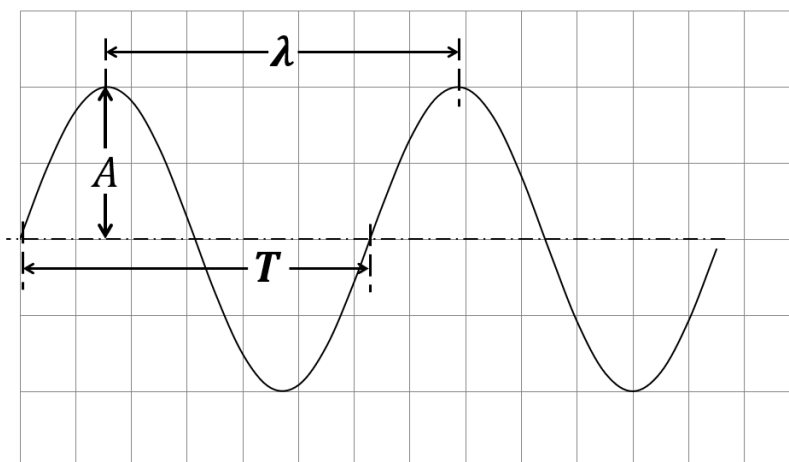
5.1 Ääniaallot ja niiden ominaisuudet

Ääni itsessään on fysikaalinen suure, joka aiheutuu kappaleen värähtelyn aiheuttamasta ilmanpaineen vaihtelusta. Jaksollista värähtelyä kutsutaan myös aaltoliikkeeksi (kuva 13), missä jaksonaika T [s] on kääntäen verrannollinen taajuuteen f , eli

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]} \quad (6)$$

Taajuuden kasvaessa jaksonaika lyhenee ja yhteen aikayksikköön mahtuu enemmän värähtelyjä. Yhden jakson aikana aalto kulkee aallonpituuden λ [m] matkan. Aallon nopeus v on taajuuden ja aallonpituuden tulo.

$$v = f\lambda \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (7)$$



Kuva 13. Ideaalinen ääniaalto (Malinen, 2022)

Äänet voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri alueeseen matalimmasta korkeimpaan; infraäänit 0...20 Hz, kuuloalue 20 Hz...20 kHz ja ultraäänit 20 kHz yläpuolella.

Äänenpaineen yksikkö on Pascal [Pa] ja se ilmoittaa aallon aiheuttaman paineen poikkeaman väliaineen staattisesta paineesta. Koska kuultavan äänenpaineen vaihteluväli on laaja, $2 \cdot 10^{-5} \dots 50$ Pa, äänenpaineen taso on järkevämpää ilmoittaa logaritmisella asteikolla desibeleinä. Myös ihmisen kuulo toimii logaritmisesti alueella noin 0...130 dB. Logaritmisen äänenpaineen taso L_p saadaan vertaamalla tehollista äänenpainetta p kuulokynnyksen paineeseen $p_0 = 2,0 \mu\text{Pa}$. (Karjalainen, 2000) (Tammertekniikka, 2015)

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \text{ [dB]} \quad (8)$$

Äänen intensiteetti I kertoo kuinka paljon tehoa P virtaa pinta-alan A läpi, eli

$$I = \frac{P}{A} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]. \quad (9)$$

Äänenpaineen taso voidaan ilmoittaa myös suhteessa kuulokynnyksen intensiteettiin $I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$.

$$L_p = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ [dB]} \quad (10)$$

Pistemäisen äänilähteen tuottaman pallomaisen aallon intensiteetti on käänteisesti verrannollinen etäisyyden neliöön, eli etäisyyden kaksinkertaistuksessa intensiteetti laskee neljännekseen.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \quad (11)$$

Aallon osuessa epäjatkuvuuspisteeseen osa siitä absorboituu aineeseen, osa menee läpi ja osa heijastuu pois riippuen aineen ominaisuuksista. Suljetussa tilassa heijastumisen merkitys korostuu. Äänialto tarvitsee edetäkseen väliaineen. Kiinteissä aineissa eteneminen on nopeampaa. Nopeus ilmassa on noin 340 m/s, kun taas raudassa ja alumiinissa noin 5000 m/s. (Karjalainen, 2000)

Tietoa etenemisnopeudesta ja voimakkuudesta voidaan joissakin sovelluksissa hyödyntää äänilähteen paikantamiseen myös suljetuissa rakenteissa, kuten kaapeleissa tai muuntajissa. Akustisissa osittaispurkausmittauksissa ääniaaltojen etenemistavat ja vaimeneminen on joka tapauksessa hyvä tiedostaa, vaikka kyseessä olisikin vain yhden anturin sovellus ilman kulkuaikeiden laskentaa.

Puhdasta ääntä kutsutaan nimellä äänes ja sitä voidaan käsitellä kuvan 13 mukaisena jaksollisena ja puhtaana sinimuotoisena aaltona. Käytännössä puhdasta ääntä ei kuitenkaan esiinny, vaan ääni on aina eri voimakkuuksisten osataajuuksien summa. Jaksollisten äänien yhteydessä perustaajuuden f_0 ohessa esiintyy myös perustaajuuden harmonisia monikertoja nf_0 . Käytännössä osääneksiä esiintyy myös mielivaltaisilla taajuuksilla. Lisäksi esiintyy myös kohinanomaisia jaksottomia ääniä, joilla ei ole toistuvuutta. (Karjalainen, 2000)

Myös äänienergian pätee energian häviämättömyyden laki. Se voi muuttua useiden ilmiöiden kautta toiseksi energiamuodoksi, mutta sitä ei voi syntyä tai hävitä itsestään. Ääni voi esimerkiksi vaimentua häviöissä muuttamalla lämmöksi, tai myös vahvistua resonanssi-ilmiön liike-energian myötä (Karjalainen, 2000).

5.2 Taajuus ja resonanssi

Jokaisella kappaleella on yksi tai useampi sille ominainen värähtelytaajuus, jolla se värähtelee kaikin helpoiten. Ulkopuolelta vaikuttava ominaistajuuteen osuva ääni saa kappaleen värähtelemään voimakkaasti, mitä sanotaan resonanssiksi. Sähköiset purkaukset eivät johdu kappaleen värähtelystä, mutta resonanssitajuutta hyödynnetään akustisissa mittalaitteissa, kuten ultraäänimittareissa, säätämällä vastaanottimen ominaistajuus (tai keskitaajuus) äänilähteen taajuuteen sopivaksi. Tällöin mitattava ääni saadaan kuulumaan voimakkaampana, eli vastaanottimen herkkyys paranee. Mekaanisissa sovelluksissa ja rakenteissa resonanssi-ilmiöstä voi olla myös haittaa, sillä se voi rikkoa laitteita tai nostaa äänenpaineen vaaralliselle tasolle. (Äänipää, 2020) (UE Systems Inc.) (Karjalainen, 2000)

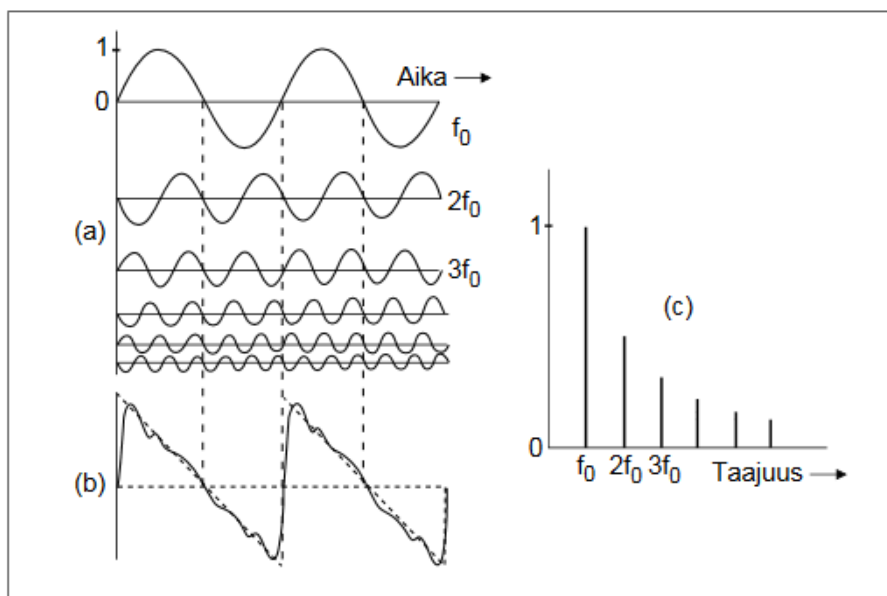
Kitkan aiheuttama ääniemissio sisältää käytännössä aina ultraäänikomponentin. Mekaanisissa sovelluksissa ultraääni on havaittavissa kuultavaa ääntä aiemmin, joten se antaa enemmän aikaa kunnossapitotöille. (UE Systems Inc.)

Sähköpurkauksissa ääni syntyy ei-mekaanisten ilmiöiden seurauksena, mutta kokemusperäisesti voidaan sanoa, että niissäkin ultraääni on havaittavissa kuuloalueen ääniä aiemmin.

5.3 Äänisignaalin käsittely

Äänisignaali on analoginen, eli sen amplitudi vaihtelee ajan funktiona. Fourier'n sarjakehitelmällä (kaava 12) osääneketset tietyllä ajanhetkellä voidaan erottaa mistä tahansa signaalifunktiosta ja esittää spektrinä, mistä selviää osasignaalien voimakkuudet taajuuden funktiona.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (12)$$

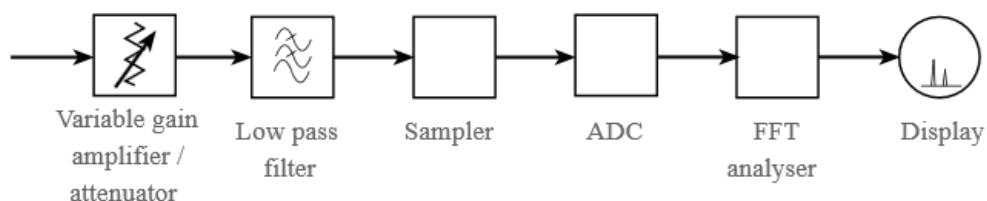


Kuva 14. Kolmioaallon syntyminen osakomponenteista ja taajuusspektri (Karjalainen, 2000)

Kuvassa 14 kolmioaalto (b) on muodostettu perusaallosta f_0 ja sen viidestä harmonisesta komponentista (a). Taajuusspektri (c) havainnollistaa komponenttien taajuudet ja voimakkuudet.

Usein signaalinkäsittelyssä hyödynnetään kehittyneempää diskreettiä FFT-muunnosta (nopea Fourier muunnos, Fast Fourier Transform), missä signaalia näytteistetään äärelliseltä ajanjaksolta. Lisäksi näytettä voidaan ikkunoita, eli painottaa ajan funktiona. Mitä vähemmän otetaan näytteitä, tai mitä pidempää ikkunaa käytetään, sitä huonommin nopeat muutokset kuvantuvat (Karjalainen, 2000). Toisaalta pidempää ikkunaa käytettäessä signaalin toistuvuus nähdään paremmin, mistä voi olla apua osittaispurkausten tunnistamisessa. Yksi ratkaisu tähän on kerrosta lyhyempiä ikkunoita päällekkäin, jolloin toistuvuus saadaan paremmin esille nopeiden muutosten katoamatta.

Kuvassa 15 on esitetty FFT-analysaattorin periaatteellinen lohkokaavio. Sisään tuleva analoginen signaali vahvistetaan ja suodatetaan, minkä jälkeen signaalista otetaan riittävä määrä näytteitä ja muutetaan analogisesta digitaaliseen muotoon. Digitaaliselle signaalille tehdään FFT-analyysi ja tuloksesta muodostetaan spektrinäyttö. (Poole, ei pvm)



Kuva 15. FFT-analysaattorin lohkokaavio (Poole, ei pvm)

6 ERISTEIDEN VANHENEMINEN JA KUNNONVALVONTA

Eristeiden vanhenemisen ja osittaispurkausten havainnointiin on kehitetty runsaasti erilaisia menetelmiä. Usein ne perustuvat epäsuorien suureiden, kuten polarisaatioindeksin, eristysresistanssin, tai osittaispurkausmittausten tulkintaan. Epäsuorille mittauksille on yhteistä, ettei mitattavan suureen yhteys eristyksen kuntoon ole yksiselitteinen, vaan tulokset vaativat tuekseen kokemus- ja tutkimusperäistä tietoa, jonka perusteella eristyksen tilasta voidaan antaa arvio (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015).







Menetelmät voidaan jakaa kahteen pääryhmään: tuhoaviin ja ei-tuhoaviin. Tuhoavissa menetelmissä testaus päättyy usein eristerakenteen pettämiseen, joten menetelmiä ei voida soveltaa käyttönote-
tuissa tai -otettavissa laitteistoissa. Käyttöpaikalla tehtäviä ei-tuhoavia mittauksia tehdään käyttöön-
ottojen ja korjaustöiden yhteydessä varmistamaan asennuksen turvallinen käyttökunto ja häiriöttö-
myys. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Käyttöpaikoilla tehdään myös kunnonvalvontamittauksia. Kunnonvalvontamittaukset voidaan taas jakaa kahteen pääryhmään, online- ja offline-mittauksiin. Online-mittaukset tehdään ilman käyttö-
keskeytystä, kun taas offline-mittaukset vaativat käyttökeskeytyksen lisäksi yleensä muutoksia kyt-
kentöihin.

Polarisaation ja dielektristen häviöiden aikaansaama lämpeneminen on merkityksellistä myös eristei-
den kunnonvalvonnan näkökulmasta, sillä kaikki eristeet muuttuvat vanhetessaan. Pitkäkestoinen
lämpötilan kasvu lyhentää eristeen käyttöikää merkittävästi, esimerkiksi muuntajan öljypaperieristyk-
sen käyttöikä laskee puoleen lämpötilan noustessa 6 °C. Yleistys toimii tietyllä lämpötila-alueella.
Myös mekaaniset, sähköiset, kemialliset, sekä käyttöympäristön rasitukset ovat merkittävässä roo-
lissa eristyksen käyttöiän kannalta. Rasitukset voivat aiheuttaa materiaaliin mikroskooppisen pieniä
halkeamia tai onteloita, joissa sittemmin alkaa syntyä osittaispurkauksia.
(Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Erityisesti muovieristeiden kohdalla sähkölujuutta tarkastellaan pitkä- ja lyhytkestoisen jännitelujuu-
den avulla. Käytännön sovelluksissa pitkäaikainen sähkölujuus on merkitsevämpi, sillä se voi olla
huomattavasti matalampi kuin lyhytkestoinen jännitelujuus. Osittaispurkaukset ovat yleisimpien
muovieristeiden pitkäkestoisen jännitelujuuden kannalta merkittävin läpilyöntimekanismi.
(Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Taulukko 1. PD-mittausten ja perinteisten menetelmien tulosten vertailu erilaisissa eristysvaurioissa (Paoletti & Golubev, 1999)

Insulation Model	Insulation Condition	Megger Test	Polarization Index Test	High-Pot Test	Partial Discharge Testing
	Good	High	Good	Linear leakage current vs. voltage is minimal	Unmeasurable partial discharge activity
	Marginal	Fair	Fair	Linear leakage current vs. voltage is stable	Minimal discharge activity, balanced both positive and negative discharges
	Dry but insulation delaminated	False Fair Result	False Fair value	False linear leakage current vs. voltage	Partial discharges observed, therefore accurately showing insulation problems which are missed by traditional tests
	Poor - Cleaning or Overhaul Required	Low	Poor	High leakage current. May be required to limited test voltage.	High positive polarity discharges indicate probable surface tracking
	Unacceptable - Major Repair or Rewind Required			Potential failure during testing	High negative polarity discharges indicates internal voids near the copper conductor.
	Near-Failure condition - PD arcing as caused carbon tracking	Very low	Very low	High leakage current and probable failure during testing	Minimal partial discharge activity. Partial discharge arcing as progressed to the point where permanent damage (tracking) as occurred.

Taulukossa 1 on vertailtu perinteisillä testausmenetelmillä ja PD-mittauksilla tyypillisesti saatavia tuloksia erilaisissa eristevauriotilanteissa. Hyväkuntoisella eristimellä kaikkien mittaustapojen tulokset ovat hyviä. PD-aktiiviteetti kasvaa eristevaurion pahentuessa, kunnes vuotovirta on kasvanut riittävän suureksi ja ollaan lähellä eristeen pettämistä, jolloin PD-aktiiviteetti taas laskee. Eristysvastus, polarisaatioindeksi ja jännitelujuus heikkenevät koko ajan eristevaurion pahentuessa.

6.1 Eristysvastuksen mittaaminen

Tasajännitteellä tehtävä eristysvastusmittaus on vanhin eristeen kunnon määrittämiseen kehitetty mittausta. Sillä saatavat tulokset ovat hyvin karkeita, eikä eristeelle haitallisia osittaispurkauksia voida havaita. Tuloksista voidaan päätellä lähinnä eristeen vakava heikkeneminen tai vaurioituminen. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

Eristysvastus on voimakkaasti lämpötilariippuvainen. Lämpötilan noustessa 10 °C eristysvastus laskee lähes puoleen. Lämpötilan vaikutus täytyy huomioida tuloksia arvioitaessa ja suhteuttaa tulokset käyttöolosuhteisiin. Mittaustuloksia tulisi vertailla aiempiin, tai vastaavien kappaleiden tuloksiin. Vanhan nyrkkisäännön mukaan eristysvastuksen tulisi olla vähintään 1 MΩ + 1 MΩ/kV (EC&M, 1996). Yksinkertaistus ei kuitenkaan ota kantaa lämpötilaan, eikä mitattavan kohteen kokoon tai pituuteen. Amerikkalainen kansallinen standardi ANSI/NETA MTS 2011: Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems määrittää eristysvastukselle tarkempia ohjeita, jotka on esitetty taulukoissa 2 ja 3.

Taulukko 2. Standardin ANSI/NETA MTS 2011 suosittelemat eristysvastuksen minimiarvot (NETA, 2011)

Nominal Rating of Equipment (Volts)	Minimum Test Voltage (DC)	Recommended Minimum Insulation Resistance (Megohms)
250	500	25
600	1,000	100
1,000	1,000	100
2,500	1,000	500
5,000	2,500	1,000
8,000	2,500	2,000
15,000	2,500	5,000
25,000	5,000	20,000
34,500 and above	15,000	100,000

Taulukko 3. Standardin ANSI/NETA MTS 2011 mukaiset korjauskertoimet eristysvastuksen lämpötilakorjaukseen + 20 °C vastaavaksi (NETA, 2011)

Temperature		Multiplier	
° C	° F	Apparatus Containing Oil Immersed Insulation	Apparatus Containing Solid Insulation
-10	14	0.125	0.25
-5	23	0.180	0.32
0	32	0.25	0.40
5	41	0.36	0.50
10	50	0.50	0.63
15	59	0.75	0.81
20	68	1.00	1.00
25	77	1.40	1.25
30	86	1.98	1.58
35	95	2.80	2.00
40	104	3.95	2.50
45	113	5.60	3.15
50	122	7.85	3.98
55	131	11.20	5.00
60	140	15.85	6.30
65	149	22.40	7.90
70	158	31.75	10.00
75	167	44.70	12.60
80	176	63.50	15.80
85	185	89.789	20.00
90	194	127.00	25.20
95	203	180.00	31.60
100	212	254.00	40.00
105	221	359.15	50.40
110	230	509.00	63.20

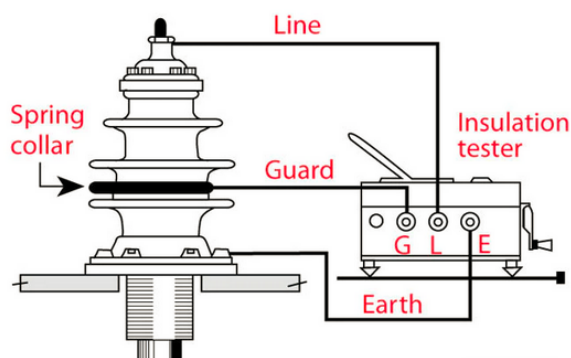
Edellä mainitulla, Suomessakin usein kuullulla nyrkkisäännöllä laskettuna eristysvastuksen tulisi siis 20 kV nimellisjännitteellä olla 21 M Ω , kun taas standardin ANSI/NETA MTS 2011 mukaan 25 kV nimellisjännitteellä eristysvastuksen tulisi 20 °C lämpötilassa ja 5 kV koejännitteellä mitattuna olla 20 G Ω , ellei valmistaja ole muuta määrittänyt. Ero on peräti tuhatkertainen.

Johtojen ja johtimien osalta amerikkalaisen standardin minimiarvoja tulkitaan 1000 jalan matkalle sovitettuna. Annetut raja-arvot pätevät pituuden ollessa 1000 jalkaa. Tuhat jalkaa vastaa noin 300 metriä, joten metriseen järjestelmään sovitetun arvon R_l saa laskemalla

$$R_l \approx R_{l\text{ meas}} * \frac{l}{300\text{ m}} \quad (13)$$

missä $R_{l\text{ meas}}$ on mitattu eristysvastus ja l on mitattavan johdon pituus metreinä.

Yksittäistä eristintä mitattaessa pintavirtojen osuus on yleensä mahdollista suodattaa mittaustuloksista pois, jotta saadaan selville itse eristimen kunto (EC&M, 1996). Toisaalta erityisesti kosteissa ja likaisissa olosuhteissa pintavirtojen on havaittu aiheuttavan hapettumia eristeen pinnoille (esimerkkinä kuva 9) ja lopulta vaurioittavan itse eristemateriaalia. Tämän jälkeen myös eristeen pinnan ollessa kuiva voi esiintyä merkittävä määrä eristettä rappeuttavia pintavirtoja. Näin ollen pintavirran suodattaminen mittaustuloksista ei aina ole tarkoituksenmukaista.



Kuva 16. Mittauskytkentä, kun läpivientieristimen pintavirrat halutaan suodattaa pois kokonaistuloksesta (EC&M, 1996)

Suomessa sovellettava suurjännitesähköasennuksia koskeva standardi SFS-6001:2018 ei määritä eristysvastuksen mittaamiselle koejännitettä, kestoa, tai tulosten raja-arvoja. Vakiintuneen käytännön mukaan mittaus tehdään yleensä 5 kV jännitteellä minuutin ajan, ellei laitevalmistajan ohjeessa sanota toisin. Oleellista onkin valita jokin vakioitu tapa tulosten keskinäisen vertailun helpottamiseksi.

6.2 Polarisaatioindeksin ja dielektrisen absorptiosuhteen mittaaminen

Tasajännitteellä suuri varausvirta ja eristysvastuksen lämpötilariippuvuus häiritsevät eristysvastusmittausta. Varausvirta aiheutuu eristeille ominaisesta polarisaatiosta, jonka aiheuttamaa kapasitiivista varausvirtaa kutsutaan tässä yhteydessä dielektriseksi absorptioksi. Lämpötilamuutoksista ja kosteudesta aiheutuvien häiriöiden pienentämiseksi on kehitetty polarisaatioindeksin (PI) ja dielektrisen absorptiosuhteen (DAR) mittaus. Mittauksissa verrataan eristysvastuksen arvoja ajan suhteen, siten että jälkimmäinen arvo jaetaan ensimmäisellä arvolla. Koska lämpötila ja kosteus vaikuttavat eristysvastukseen likimain samalla tavalla koko mittauksen ajan, absorptiota kuvaavat suhdeluvut kertovat eristeen kunnosta enemmän kuin itse eristysvastuksen arvo.

(Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015) (Paoletti & Golubev, 1999) (EC&M, 1996)

PI saadaan jakamalla kymmenen minuutin kohdalta mitatun eristysvastuksen arvo yhden minuutin kohdalta mitatulla. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää 3 minuutin ja 30 sekunnin kohdalta mitattuja arvoja. Mitä korkeampi suhdeluku saadaan, sitä paremmassa kunnossa eristin on. Jotta eristimen voidaan sanoa olevan hyvässä kunnossa, 10 minuutin tuloksen pitäisi olla vähintään kaksinkertainen yhden minuutin tulokseen verrattuna, eli polarisaatioindeksin tulisi olla 2,0 tai enemmän. (EC&M, 1996) (Kyoritsu Electrical Instruments Works, Ltd)

Myös DAR lasketaan eristysvastuksen arvoista ajan suhteen, jakamalla myöhempi arvo aikaisemalla. Mittaustapa on käytännössä sama kuin PI-mittauksessa, mutta arvot otetaan ylös mittauksen alkupäästä 30 ja 60 sekunnin kohdalta. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää arvoja 15 ja 30 sekunnin kohdalta. (EC&M, 1996) (Kyoritsu Electrical Instruments Works, Ltd)

Taulukko 4. Dielektrisen absorptiosuhteen ja polarisaatioindeksin tulosten tulkinta EC&M-sivuston ja Kyoritsu KEW3128 käyttöohjeen taulukoita mukaillen (EC&M, 1996) (Kyoritsu Electrical Instruments Works, Ltd)

Eristyksen kunto	DAR	PI
Huono	-	< 1
Kyseenalainen	1...1,25	1...2
Hyvä	1,4...1,6	2...4
Erinomainen	> 1,6	> 4

Taulukon 4 arvoja tulee käsitellä suuntaa antavina ja suhteutettuna aiempiin tuloksiin. Polarisaatioindeksin arvot välillä 1...2 ovat hyväksyttäviä mitattavan kohteen ollessa vain lievästi kapasitiivinen (EC&M, 1996). Kapasitiivisuuden vaikutuksesta on kerrottu tarkemmin luvussa 3.

On huomioitava, etteivät tasajännitekokeet sovellu PEX-eristeisten kaapeleiden mittaamiseen, sillä eristeen polarisoitumisen seurauksena epähomogeenisuuspisteisiin voi jäädä paikallisia varauksia jopa kuukausien ajaksi. Nämä paikalliset varaukset voivat myöhemmin johtaa eristeen vaurioitumiseen käyttöjännitteellä. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

6.3 Osittaispurkausmittaukset

Osittaispurkausten mittaamiseen on kehitetty useita standardisoituja sähköisiä menetelmiä. Tällaisia ovat offline-mittauksista esimerkiksi HVCC (High Voltage Coupling Capacitor), VLF (Very Low Frequency) ja DAC (Damping Alternative Current) -osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaukset. Online-mittauksista yleistymässä on HFCT (High Frequency Current Transformer) -mittaus. Standardi EN 60270 määrittää mittaus- ja kalibrointitavat, joiden mukaisesti pystytään määrittämään osittaispurkausten voimakkuus näennäisvarauksen avulla. Näennäisvaraus ilmoitetaan picocoloumbeina [pC].

Standardisoimattomilla mittauksilla näennäisvarausta ei pystytä määrittämään. Näin ollen myöskään osittaispurkauksen voimakkuutta ei pystytä määrittämään, vaan vakavuuden määrittämisen tulee perustua kokemusperäiseen tietoon. Tällaisia ovat esimerkiksi akustiset (Acoustic Emission, AE),

transienttimaajännite (Transient Earth Voltage, TEV) ja radiotaajuus (Ultra High Frequency, UHF) -mittaukset, jotka ovat Online-mittauksia.

Standardisoiduilla menetelmillä osittaispurkauksista saadaan tarkinta tietoa, mutta mittausjärjestelyt ovat yleensä liian hankalia säännölliseen seurantaan. Vastaavasti standardisoimattomilla menetelmillä saadaan nopeasti ja edullisesti vertailudataa, mutta ongelman vakavuuden määrittäminen on hankalampaa.

Testausmenetelmiä on paljon ja niillä kaikilla on erityiset soveltuvuusalueensa. Yhtä testausmenetelmää ei voida soveltaa laitteiston kaikkiin osiin, eikä välttämättä edes yksittäisen osan kattavaan testaamiseen. Teknistaloudellisesti parhaat menetelmät tulisi valita laitteen ominaisuuksien ja tyyppillisten ongelmakohteiden perusteella.

6.4 Akustiset osittaispurkausmittaukset

Osittaispurkausten akustinen havainnointi perustuu purkausten sisältämän energian osittaiseen muuttumiseen aineen tai kaasun värähtelyksi ja siten ultraäänialloiksi. Pintapurkausten aiheuttama ultraäänimissio kuullaan alueella 20...110 kHz. Sisäisten purkausten ja kiinteissä aineissa kulkeutuvien äänien taajuus on korkeampi, aina muutamaan sataan kilohertsiin saakka. Anturivalinnassa onkin yleensä tehtävä jonkinlainen kompromissi taajuuskaistan ja herkkyuden välillä. Kapeampi taajuuskaista mahdollistaa paremman herkkyuden tietyn ilmiön havaitsemiseen, mutta voi samalla rajata muita ilmiöitä pois. (Sikorski & Ziomek, 2012)

Kiinteän eristeen sisäisessä pallon muotoisessa ontelossa tapahtuvan osittaispurkauksen taajuus on muutamista kilohertseistä mutamiin kymmeneen kilohertzeihin. Taajuus kasvaa ontelon läpimitan kasvaessa. (Czaszejko & Sookun, 2014)

On huomionarvoista, että PD on jännitteeseen ja aineen jännitelujuuteen sidonnainen ilmiö. Näin ollen mittauksessa ei tarvitse huomioida mitattavan kohteen kuormitusta, kuten esimerkiksi lämpökuvauksessa. Kuormituksen vaihtelu voi tosin aiheuttaa ääniemission muutoksia resonanssin muodossa ja jännitteen vaihtelun seurauksena.

Aikatasossa tarkasteltuna mitattujen äänialtojen muodostaman kuvion pitäisi vastata sähköisen purkauksen kuviota, kunhan mittausnopeus ja herkkyys ovat riittävät. Etenkin voimakkaista pintapurkauksista syntyy ääntä myös ihmisen kuuloalueella, mutta se ei ole ennakoivan kunnossapidon kannalta riittävä tieto, sillä vikaantuminen on tässä vaiheessa todennäköisesti jo liian pitkällä taloudellista korjaamista ajatellen. Pelkällä kuulohavainnolla tai kuuloalueen ääntä analysoimalla voidaan vielä estää purkauslähteen totaalinen vaurioituminen ja käyttökatko, mutta korjaustoimenpiteille jäävä aikaikkuna saattaa jäädä hyvinkin lyhyeksi.

Ultraäänimittausta on yleisesti pidetty nimenomaan pinnalla tapahtuvien purkausten, sekä GIS-laitoksissa ja suurissa muuntajissa tapahtuvien purkausten paikantavana menetelmänä.

(Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015) (Sikorski & Ziomek, 2012)

Kohteissa, joihin on suora näköyhteys avoimessa ilmatilassa, ääniemissioon perustuva paikantaminen on verrattain helppoa yksinkertaisellakin laitteistolla. Tällaisia ovat esimerkiksi ilmalinjat, sähköasemien kytkinkentät ja avattavat kojeistot. Kontaktiin perustuvilla antureilla äänilähteen karkea paikantaminen on mahdollista myös suljetun rakenteen sisältä, kuten suljetusta kojeistosta tai muuntajasta. Riittävän tarkka tulosten analysoitavuus mahdollistaa myös purkaustyyppien erottelun purkauksen muotoon, toistuvuuteen ja vaihesidonnaisuuteen perustuen. Nämä muodostavat kullekin purkaukselle tyypillisen kuvion (pattern, fingerprint, sormenjälki).

Akustisen emission mittaukset ovat online-mittauksia, eli mittaukset suoritetaan verkon normaalissa käyttötilanteessa ilman käyttökatoa. Tuloksia voidaan analysoida hetkellisarvona referenssiin perustuen, hetkellisarvojen trendiä seuraamalla, tai jatkuvana valvontana. Mittaus voi tapahtua ilmateitse tai suoraan rakenteesta jännitteisten osien suojaetäisyydet huomioiden.

Akustisella mittauksella ei voida määrittää osittaispurkauksen näennäisvarausta, joten hetkellisarvon mittaaminen ilman tunnettua referenssiä ei välttämättä ole kovinkaan mielekästä. Referenssinä voi toimia aiempi mittaus samasta kohteesta, vastaavien laitteiden tulokset muualla tehdyistä mittauksista, tai vertailu mittaushetkellä muihin vastaaviin kohteisiin. Jälkimmäistä pystyy hyödyntämään erityisesti sähköasemilla ja laajoissa kojeistoissa, missä keskenään vastaavia laitteita on useita lähekkäin. Tällöin myös ympäristön olosuhteet laitteiden välillä ovat käytännössä samat, joten vertailukelpoisuus on parempi kuin aiemmin toisenlaisissa olosuhteissa tehdyillä mittauksilla.

Kertaluontoisella mittauksella voidaan tietyissä tapauksissa saada kelvollisia tuloksia, tai ainakin lisätutkimusten tarve selville. Tämä pätee erityisesti laitteisiin, joista ei lähtökohtaisesti pitäisi kuulua minkäänlaisia purkaus- tai resonanssiääniä. Tällaisia ovat esimerkiksi kiinteistömuuntamoiden kojeistot ja kaasueristeiset kojeistot, joiden ominaisääniemission pitäisi ultraäänitaajuuksilla olla käytännössä nollassa, eli mikä tahansa ääni indikoi poikkeamasta. Kertaluonteinen mittaus toimii auttavasti ongelmia seulovana mittauksena myös muuntajille, joista pitäisi kuulua vain niille ominainen verkko- taajuuksinen hurina. Muuntajan rakenteellinen monimutkaisuus ja äänen vaimeneminen rakenteissa asettavat kuitenkin suuret vaatimukset mittalaitteiston suorituskyvylle ja onkin mahdollista, ettei alkanutta vikaantumista havaita muuntajan uumenista.

Suljetuissa rakenteissa vikapaikan tarkka selvittäminen akustisella mittalaitteella ei käytännössä ole mahdollista ilman useita samanaikaisesti mittaavia antureita, kehittyneitä ääniaaltojen kulkuaikojen laskentaa, rakenteen tarkkaa tuntemusta ja aiempaa kokemusta tutkittavan laitteen ominaisuuksista ja vikaantumismekanismeista. Vikapaikkaa voidaan kuitenkin karkeasti haarukoida yhdelläkin anturilla äänenpaineen tasoa useista mittapisteistä seuraamalla.

Mitattavasta kohteesta riippumatta ongelman tarkempi tutkiminen ja tulkinta vaativat usein tuekseen muita toimenpiteitä ja mittaustekniikoita. Poikkeuksena ovat suhteellisen yleiset korona- ja pintavirtapurkaukset, joiden paikantaminen ja tunnistaminen riittävän luotettavasti on yleensä mahdollista pelkästään akustisesti ilmaitse mitattuna.

Käytännössä on todettu, että käytön aikaisen akustisen osittaispurkausmittauksen etuna on tiettyjen ongelma-kohtien varhainen havainnointi, paikannettavuus, sekä mittausten edullinen toteutus. Toisaalta puutteena on ongelman vakavuuden määrittämisen ja vian kehittymisen ennustamisen vaikeus, sekä huono herkkyys eristeen sisäisten ontelopurkausten havainnointiin. Koska mittausta ei pystytä kalibroimaan vastaamaan sähköisiä suureita, standardeissa annettuja suosituksia tai raja-arvoja purkausten maksimivoimakkuuksille ei voida sellaisenaan soveltaa. Erityyppisille purkauksille ominaiset käyttäytymismallit ovat teorian tasolla tiedossa, mutta siltikin ääninäytteiden tulkinta on suhteellisen vaikeaa purkausten tilastollisesta luonteesta, häiriöäänistä, ympäröivien olosuhteiden vaikutuksesta ja tietolähteiden hajanaisuudesta johtuen. Tulosten luotettava analysointi onkin yleensä itse mittaamista hankalampaa.

Standardissa EN-60270 on määritetty vaatimuksia osittaispurkausten mittaustavoille, mittalaitteille ja niiden kalibroinnille (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2001). Standardin mukaisilla sähköisillä mittaustavoilla saadaan akustisiin menetelmiin verrattuna tarkempaa ja käyttökelpoisempaa tietoa erityisesti purkausten voimakkuudesta. Kuitenkin näiden mittaustapojen puutteena on ollut mittausten hankalahko ja verrattain kallis toteuttaminen, sillä mittaaminen käyttötilanteessa ei useinkaan ole mahdollisia, mikä osaltaan on rajoittanut mittausten yleistymistä.

7 AKUSTISET MITTALAITTEET

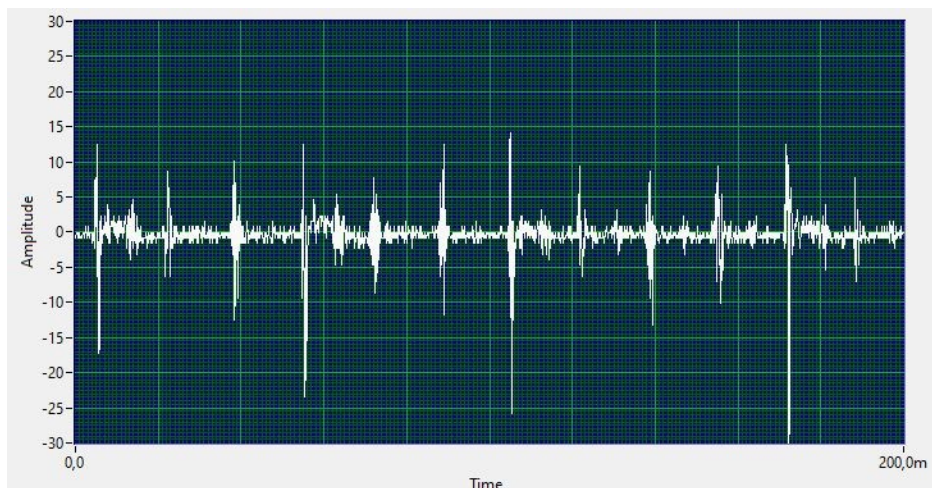
Markkinoilla on akustisia mittalaitteita niin kertaluontoiseen testaukseen kuin jatkuvaan valvontaan. Jatkuvan valvonnan laitteissa on yleensä kytkettynä useita antureita samanaikaisesti ja tulosten analysointi tapahtuu automatisoidusti, nykyään myös pilvessä internetin välityksellä. Tässä työssä käsitellään vain mukana kuljetettavien ja kädessä pidettävien laitteiden ominaisuuksia, joilla mittaus suoritetaan yhtä, tai korkeintaan muutamaa erilaista anturia käyttäen. Työssä esitettyjen yleistysten tai tulkintojen ei tule olettaa pätevän jatkuvaan seurantaan tarkoitettuihin mittalaitteistoihin.

Osittaispurkausten aiheuttamien äänipulssien mittaamiseen soveltuvat laitteet mittaavat äänenpainetta ultraäänialueella, eli taajuuksilla 20 kilohertzistä ylöspäin. Laite vahvistaa piezosähköiseltä anturilta saadun signaalin ja muuttaa äänen ihmisen kuuloalueelle sopivaksi. Tyypillisesti kannettava mittalaitte on varustettu kuulokkeilla ja näytöllä, joista käyttäjä seuraa äänisignaalia ja seuloo mahdollisia ongelmakohtia. Hyvät kuulokkeet myös vaimentavat ympäristön melua ja näin auttavat poikkeamien havaitsemisessa. Laite mittaa jotakin rajattua taajuuskaistaa, jonka sisään myös äänilähteen ominaistajuuden pitäisi osua. Paras herkkyys saavutetaan, kun mittaavan anturin ominaistajuus, eli keskitaajuus, on sama äänilähteen taajuuden kanssa. Taajuuskaistan leventäminen huonontaa herkkyyttä.

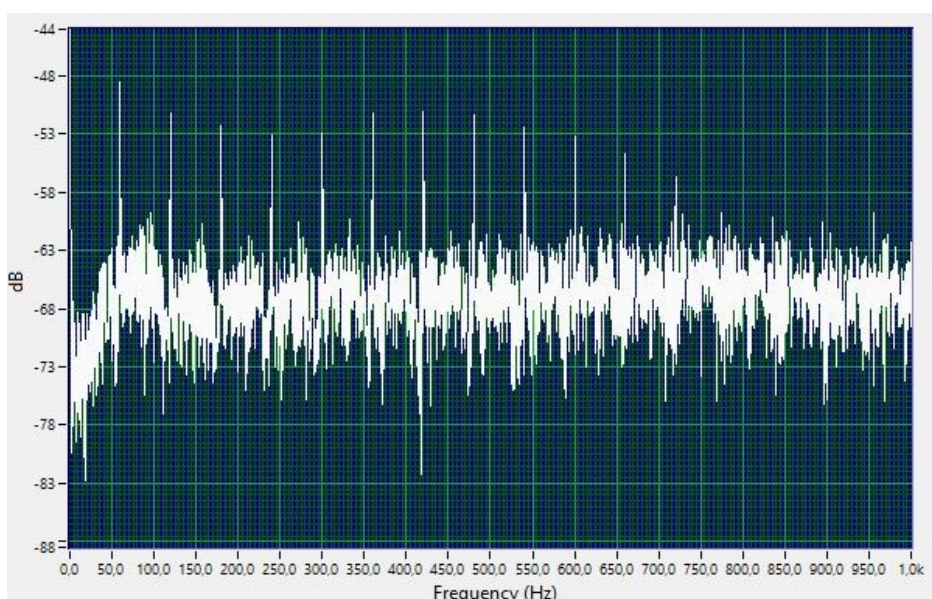
Sähkölaitteistoissa esiintyvät osittaispurkaukset ovat luonteeltaan satunnaisia, mutta vaihtosähkökentässä kuitenkin sidoksissa verkon taajuuteen ja harmonisia taajuuksia voi esiintyä runsaasti. Purkauksia voi tapahtua useita yhden siniaallon puolijakson aikana ja ne voivat toistua jaksosta toiseen lähes samalla tavalla. Noteerattavia transientteja voi olla yksittäisiä, tai jopa tuhansia sekunnissa, joten ilmiöt ovat ihmisen aisteille liian nopeita eroteltavaksi. Käytännössä mittalaitteelta vaaditaan siis riittävää erottelukykyä, sekä mahdollisuutta datan tallentamiseen ja analysoimiseen, taikka automaattista tulosten analysointia.

Automaattinen analysointi perustuu yleensä äänen voimakkuuden ja pulssien määrän laskentaan ja vertailuun suureen tilastojoukkoon, tai muuten ennalta määritettyihin parametreihin. Vertailussa yleisiä parametreja ovat vaihekulmasidonnaisuus ja purkausten määrä jaksoa kohti ($n/cykle$).

Käyttäjän itse tekemä analyysi tapahtuu tutkimalla äänisignaalia sekä aika-, että taajuustasossa. Molemmat tasot ovat hyödyllisiä purkauksen luonteen selvittämiseksi. Signaalista tutkitaan taustakohinasta tai ominaisäänestä poikkeavien transienttien esiintymistiheyttä, taajuussidonnaisuutta, vaihesidonnaisuutta ja amplitudin muutoksia.



Kuva 17. Pidemmästä ääninäytteestä rajattu otos aikatasossa



Kuva 18. Sama ääninäyte kuin kuvassa 17, mutta taajuustasossa esitettynä

Kuvissa 17 ja 18 nähdään esimerkki akustisen mittalaitteen mittaustulosten esitystavoista. Molemmat kuvat ovat rajattu UE Spectralyzer -ohjelmistolla samasta 60 Hz verkossa mitatun koronapurkauksen ääninäytteestä. Taajuustason FFT-analyysi vastaa aikatasossa tapahtuvia purkauksia. Purkaus toistuu aikatasossa kerran tai kaksi jakson (noin 16,7 ms) aikana, mikä näkyy taajuustasossa piikkinä 60 Hz verkkotaajuudella ja sen monikertoina.

Markkinoilla olevien mittalaitteiden mittaustulosten näyttämässä vaikuttaa olevan suuria eroja. Jotkut laitteet antavat desibelilukeman, eikä juuri muuta tietoa. Osa laitteista antaa kattavan datan numeerisessa ja/tai visuaalisessa muodossa ilman mitään tulkintoja, minkä jälkeen analysointi on käyttäjän osaamisen ja ymmärryksen varassa. On myös laitteita, jotka antavat mittauksen yhteydessä helposti ymmärrettävän analyysin mitattavan kohteen kunnosta muutaman portaan asteikolla, ilman että käyttäjä pääsee dataan sen tarkemmin käsiksi. Jotkut laitteet näyttävät havaitsemansa purkauksen vaihesidonnaisuuden niin sanotussa PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) -kuvassa, mistä selviää purkauksen sijoittuminen, voimakkuus ja määrä suhteessa jännitteen vaihekulmaan. Joillakin mittalaitteilla ääninäytteen ajoittaminen siniaallon vaihekulmaan ei taas onnistu lainkaan.

Sopivan mittalaitteen valinnassa tuleekin huomioida mitattavan kohteen lisäksi mittauksen tavoite; haetaanko tarkempaa tietoa purkaustyyppistä ja sen aiheuttajasta, vai seulotaanko mahdollisia ongelmakohtia jatkotutkimuksia varten.

Osittaispurkausilmiöiden aiheuttamien äänien mittaamisen kannalta on oleellista, että mittalaite on riittävän herkkä, toimii riittävällä taajuuskaistalla, sekä on varustettu tarvittavilla antureilla, jotta mitaaminen onnistuu erilaisissa tilanteissa ja laitteistoissa. Lisäksi signaalin liiallisen laskostumisen välttämiseksi erottelukyvyn, tai näytteenottotaajuuden, on oltava riittävä. Käytännössä sähkölaitteistojen mittaamisen tulee onnistua niin ilmateitse, kuin myös suljetun kojeen kotelosta kosketusanturilla. Ilmateitse mitattaessa anturin hyvä suunnattavuus parantaa vikapaikan määrittämisen tarkkuutta merkittävästi ja samalla rajaa viereisistä äänilähteistä signaaliin summautuvia häiriöitä. Mitattavat ilmiöt itsessään, sekä äänen kulkeutumistapa vaikuttavat äänen taajuuteen, joten taajuuskaistan tulisi olla riittävän laaja ja keskitaajuuden säädettävissä.

Viime vuosina markkinoille on tullut mittalaitteita, jotka pystyvät ultraäänen lisäksi mittaamaan myös sähköisiä suureita, kuten maajännitepulsseja (TEV, Transient Earth Voltage) ja suurtaajuisia virtapulsseja (HFCT, High Frequency Current Transformer). Jännite- ja virtapulssit esiintyvät äänipulsseja huomattavasti suuremmilla taajuuksilla, mikä taas asettaa mittalaitteille omat vaatimuksensa.

8 PURKAUSTYYPPIEN TUNNISTAMINEN ULTRAÄÄNIEMISSIOSTA

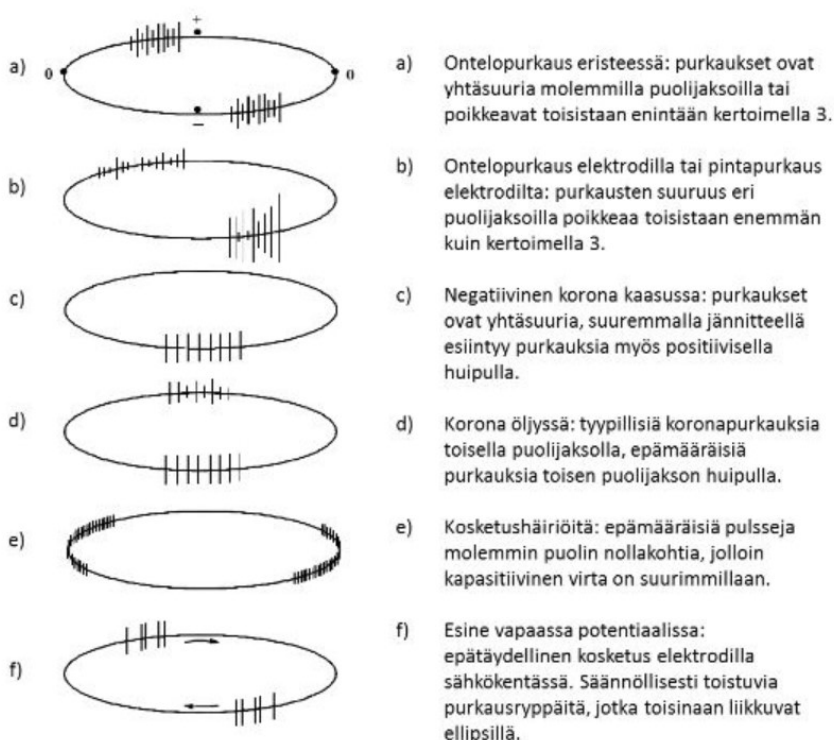
Kun ääntä käsitellään signaalina, osäänesten summautumiseen pätevät käytännössä samat matemaattiset säännöt kuin sinimuotoiseen vaihtosähkösignaaliin kaikkine häiriöineen. Käytännön sovelluksissa on tärkeää tiedostaa, että mitattu signaali ei koskaan ole puhdasta ääntä mitattavasta lähteestä. Jo itse äänilähteen signaali sisältää osääneksiä ja lisäksi mittaussignaaliin summautuu muista lähteistä ja heijastuksista tulevia osääneksiä erilaisissa vaihekulmissa. Esimerkiksi tässä työssä käsitelty erotin aiheutti alkuperäisellä käyttöpaikallaan puistomuuntamon kennossa ääniemissiota useista eri lähteistä; kolmelta eri vaiheelta, useista eristimistä, eristimen alapuolella olleista kaapelipääteistä ja vieläpä heijastuksina kennon metallipinnoilta. Lisäksi yhdessä eristimessä voi olla useita yksittäisiä purkauspisteitä, joiden äänet summautuvat signaaliin. Äänisignaali on siis aina enemmän tai vähemmän häiriöinen ja siitä pyritään seulomaan esiin oleelliset seikat. Seulonnassa auttaa signaalin tarkasteleminen niin aika-, kuin taajuustasossa. Jos tuloksia ei pystytä analysoimaan aika- ja taajuustasossa, eikä jännitteen vaihekulmasta saada tietoa, purkaustyyppien tunnistaminen toisistaan on käytännössä mahdotonta.

Automaattiseen osittaispurkausten tunnistamiseen on kehitetty viime vuosikymmeninä runsaasti erilaisia matemaattisia algoritmeja. Useimmat niistä on kehitetty yksittäisen PD-lähteen tunnistamiseen. Käytännön sovelluksissa tunnistamisen pitäisi onnistua useista samanaikaisista ja kerrostuneista PD-lähteistä, mikä vaikeuttaa tunnistamista. (Hamed, 2016)

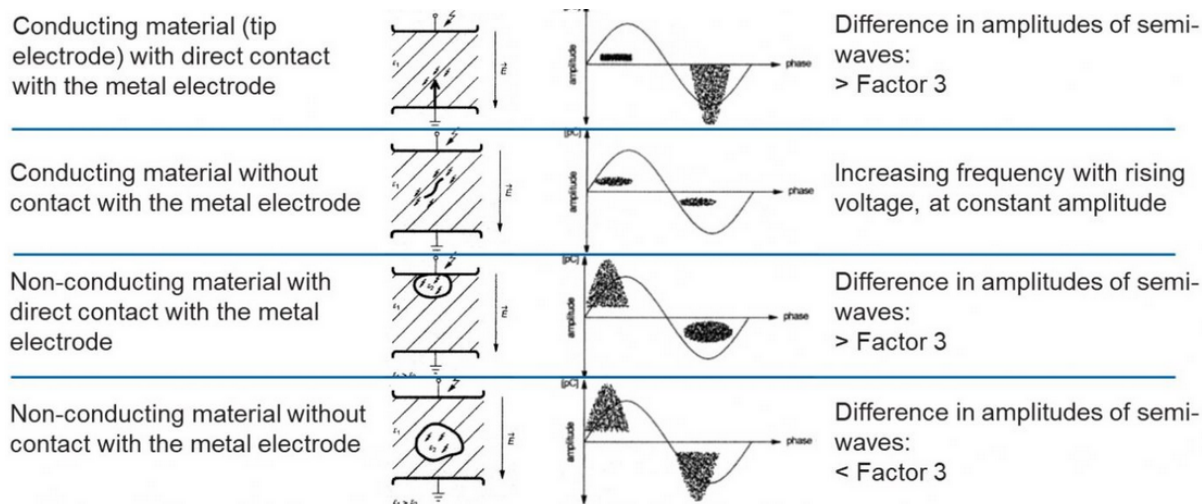
Tulkinnassa ja tulosten luotettavuudessa on huomioitava, että itse äänen voimakkuus on vahvasti väliaineesta ja etäisyydestä riippuvainen. Täten voimakkuus on helpposta luotavuudestaan huolimatta helposti harhaan johtava ja usein jopa vähiten merkityksellinen tieto. Äänenpaineen perusteella voidaan tehdä luotettavia tulkintoja vain referensseihin perustuen ja toistettavissa tilanteissa, tai jos olosuhteiden vaikutus pystytään matemaattisesti skaalaamaan määritellyjä normaaliolosuhteita vastaavaksi. Äänen voimakkuutta voidaan kuitenkin verrata suhteellisesti yksittäisen äänisignaalin sisällä, mikä on tärkeä osa tulosten analysointia.

8.1 Osittaispurkauksen sormenjälki

Kuvissa 19 ja 20 on esitetty erilaisten purkauksen aiheuttamia kuvioita jännitteen vaihekulmaan sidottuna. Kuvien esitystapa poikkeaa toisistaan, mutta merkitys on sama. Molemmissa vertaillaan purkauksen amplitudia suhteessa jännitteen vaihekulmaan. Kun ääntä tarkastellaan aikatasossa, akustisessa mittauksessa muodostuva kuvio vastaa karkeasti kuvissa esitettyjä. Käytännön eristysrakenteiden monimuotoisuus ja äänten summautuminen useista lähteistä kuitenkin hankaloittaa vertailua.



Kuva 19. Osittaispurkauksen sormenjälkiä vaihekulman funktiona (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2015)

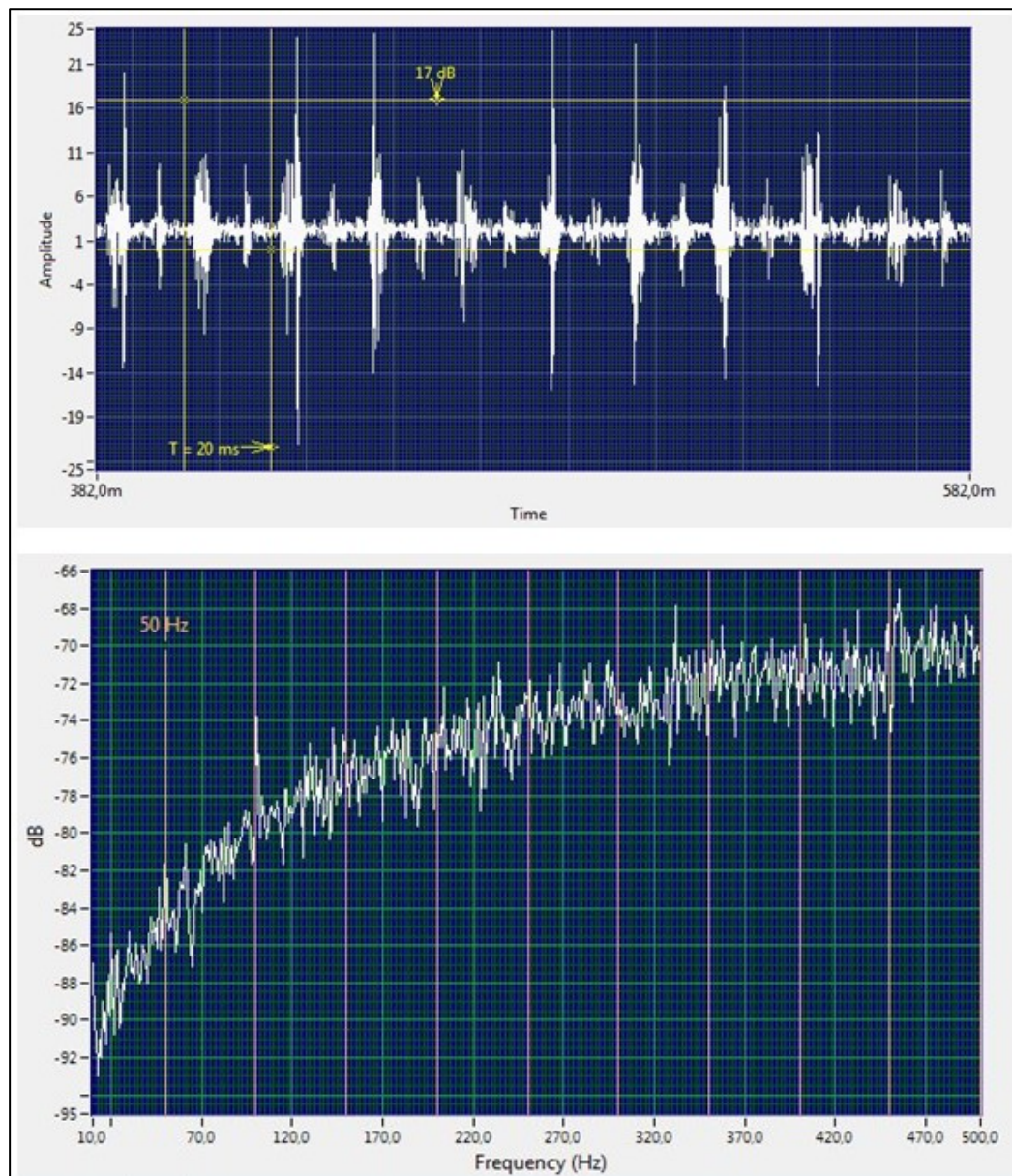


Kuva 20. Osittaispurkauksen sormenjälkiä vaihekulman funktiona (Fuhr, 2005)

Akustisesti mitattaessa purkaukselle tyypillisen kuvion muodostumiseen vaikuttaa vahvasti myös käytetyn anturin taajuuskaista ja herkkyys (Sikorski & Ziomek, 2012), joten mittauksessa käytetyn anturityypin dokumentointi on tärkeää tulevaa vertailua ajatellen. Vastaavasti tietyn laitteen akustista trendiä seurattaessa on tärkeää toistaa mittaukset aina vastaavalla ja kalibroidulla mittalaitteekoonpanolla.

8.2 Esimerkki: pistemäinen negatiivinen elektrodi lähellä positiivista elektrodia

Esimerkki negatiivisesta elektrodista liian lähellä positiivista elektrodia syntyi laboratoriomittausten koekäyttövaiheessa, kun maadoitusjohdin oli asennettu liian likelle vaihejohtinta (luku 9.3.3, kuva 30) aiheuttaen haitallisen koronapurkauksen ja/tai pintapurkauksen. Jos jännitteistä johdinta ajatellaan sivusta katsottaessa tasona, tilanne vastaa myös kuvan 20 ensimmäistä tilannetta, missä maan potentiaalissa oleva elektrodi työntyy pistemäisesti liian lähelle positiivista elektrodia. Kyseisessä tilanteessa tallennettu ultraääniääninäyte on esitetty aikatasossa kuvassa 21 a, mistä nähdään, kuinka purkaus on selvästi voimakkaampi joka toisella puolijaksolla. Jakson aika $T = 20$ ms on esitetty keltaisilla pystykursoreilla, joista vasemmanpuoleinen edustaa oletettua nollakohtaa siniaallon nousevalla reunalla, eli jännitteen kulmaa 0° . Vaakakursorilla on osoitettu mittalaitteen näyttämä keskiarvoistettu äänenvoimakkuus 17 dB. Näytteestä on havaittavissa myös purkauksen tilastollinen luonne, sillä signaalissa ei ole kahta keskenään identtistä jaksoa. Välillä näytteen voisi tulkita molemmilla puolijaksoilla esiintyväksi koronaksi (kun amplitudin kerroin < 3), mutta välillä taas pintapurkaukseksi (kun amplitudin kerroin > 3). Vain yhtä satunnaisesti valittua jakson aikaa tarkastelemalla voitaisiin tehdä vaillinainen tulkinta purkauksen haitallisuudesta. Tämän vuoksi on tärkeää seurata myös kuvion toistuvuutta. Kuvan 21 b taajuustasossa näkyvä piikki 100 Hz taajuudella vastaa myös jokaisella puolijaksolla suhteellisen toistuvasti esiintyviin purkauksiin, mutta piikki ei ole kovin voimakas, eikä sillä ole harmonisia kerrannaisia. Myöskään tähän perustuen kyseessä ei ole puhdas koronapurkaus.



Kuva 21 a ja b. Ultraääninäyte aika- ja taajuustasoissa; liian lähellä positiivista elektrodiä oleva negatiivinen elektrodi aiheuttaa korona- ja pintapurkauksia

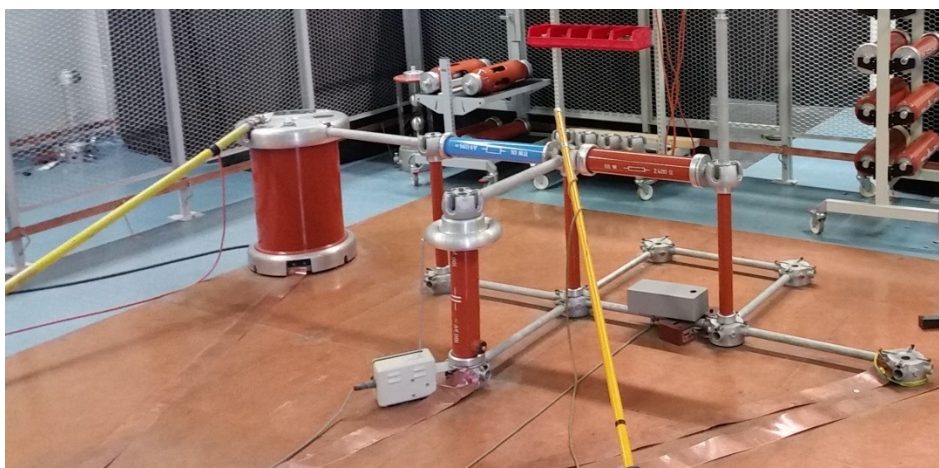
Vaihekulmaa ei tunneta, joten pelkästään purkauksen kuviota tulkitsemalla kyseessä voisi olla myös ontelopurkaus eristeen sisällä, tarkasteluhetkestä riippuen joko lähellä vaihejohtinta, tai keskellä eristintä. Kuitenkin, koska ääni oli melko voimakas ja mitattu ilmateitse, eristeen sisäinen ontelopurkaus voidaan sulkea pois.

9 LABORATORIO- JA MITTALAITTEISTO

9.1 Suurjännitelaitteisto

Mittaukset tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun suurjännitelaboratoriossa, missä oli riittävät tilat ja mahdollisuus tehdä kokeita riittävän suurilla jännitteillä osittaispurkausten aikaan saamiseksi. Laboratorion laitteistolla koejännite pystytään nostamaan jopa yli 100 kilovoltin, joskin tässä työssä jännite nostettiin enimmillään vain muutamaan kymmeneen kilovolttiin.

Laitteisto on asennettu suoja-aidalla rajatulle alueelle kuparilevyn päälle ja kaikki johtavat osat on maadoitettu tukevasti samaan potentiaaliin. Ohjauspulpetti syöttää ensiöjännitteen suurjännitegeneraattorille, jonka muuntosuhde on $0,22 \text{ kV}/100 \text{ kV} \approx 1/455$. Toisiojännite syötetään eteenpäin sarjassa olevien $10 \text{ M}\Omega$ ja $2400 \text{ k}\Omega$ suojavastusten läpi, joilla toisiopiirin virtaa rajoitetaan enimmillään noin 10 milliampeeriin, ettei laitteisto vaurioidu tai polta ensiöpiirin ylivirtasuojia edes toistuvissa yli- tai läpilyönneissä.



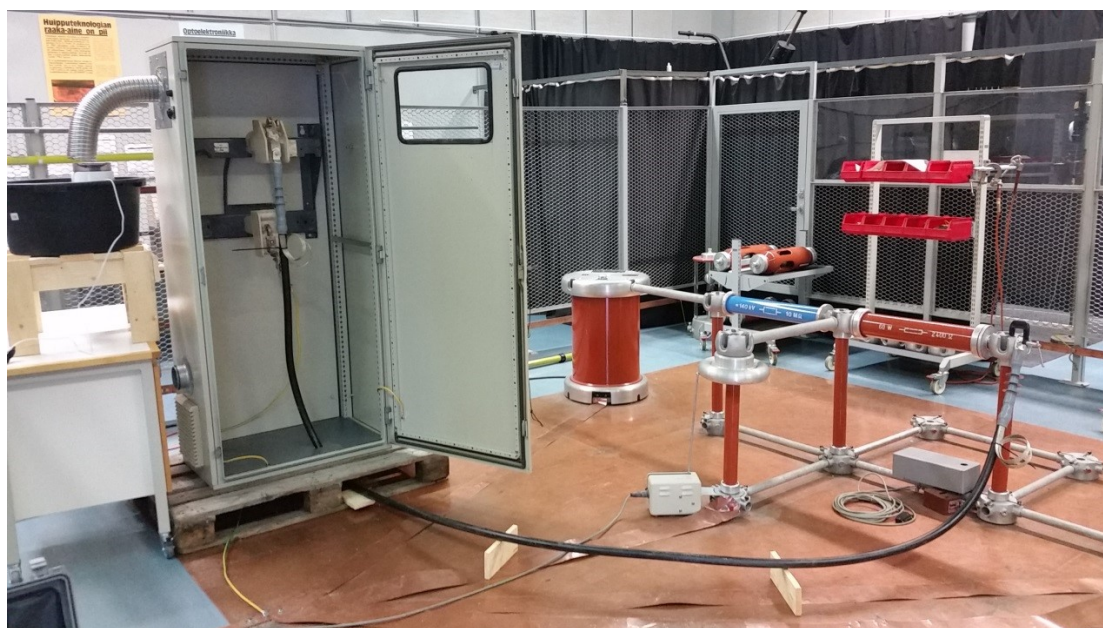
Kuva 22. Suurjännitelaitteiston komponentit



Kuva 23. Suurjännitelaitteiston ohjauspulpetti

Kuvassa 22 näkyy vasemmalta lukien suurjännitegeneraattori, sininen 10 M Ω ja ruskea 2400 k Ω suo-
javastus. Etualalla näkyy toisiojännitteen mittauskomponentit, joskaan mittaus ei ollut toimintakun-
nossa. Mittaus jätettiin kuitenkin fyysisesti paikalleen, sillä siihen sisältyy automaattisesti toimiva
maadoitusviiksi, joka maadoittaa jännitteiset osat, kun piirin ensiojännite katkaistaan. Keltaiset sau-
vat ovat maadoitussauvoja, joita käytetään työmaadoituksen tekemiseen.

9.2 Sääkaappi ja kytkennät



Kuva 24. Suurjännitelaitteisto, sääkaappi ja kytkennät

Mittauksia varten rakennettiin kaappi, jonka sisätilan kosteutta voidaan säätää vallitsevasta huoneil-
man kosteudesta aina kastepisteeseen saakka. Tarkoitukseen saatiin koulun kalustosta IP55 kote-
loitu laitekaappi, mitoiltaan 1800 x 800 x 500 mm. Kaappi oli korkeudeltaan riittävä, mutta asetti
leveydeltään ja syvyydeltään rajoitteita. Erotin ei leveyden puolesta mahtunut kaappiin sellaisenaan,
joten ensin sen käyttömekanismi oli purettava pois. Riittävien suojaetäisyyksien saavuttamiseksi jän-
nitteisten ja maadoitettujen osien välille erotin oli vielä purettava osiin ja mittaukset suoritettava
eristin kerrallaan. Tästä ei toisaalta ollut mittauksen kannalta haittaa, sillä mahdollisten purkausläh-
teiden rajaamiseksi eristimet oli joka tapauksessa parempi mitata yksitellen ja toisaalta laboratorion
suurjännitelaitteistokin mahdollisti vain yksivaiheisen kytkennän. Viereisten vaiheiden sähkökenttien
vaikutus jäi kuitenkin tällä järjestelyllä pois, mikä ei täysin vastaa todellista käyttötilannetta.

HFCT-mittauksia ajatellen kaapista haluttiin olevan vain yksi maadoitusreitti, joten kaappi nostettiin
kuivan kuormalavan päälle - mikä toimi siis eristeenä - ja rungosta kytkettiin maadoitusjohdin labo-
ratorion lattian kuparilevyyn. HFCT-anturia ei kuitenkaan saatu ajoissa ja mittaukset jäivät niiltä osin
tekemättä.

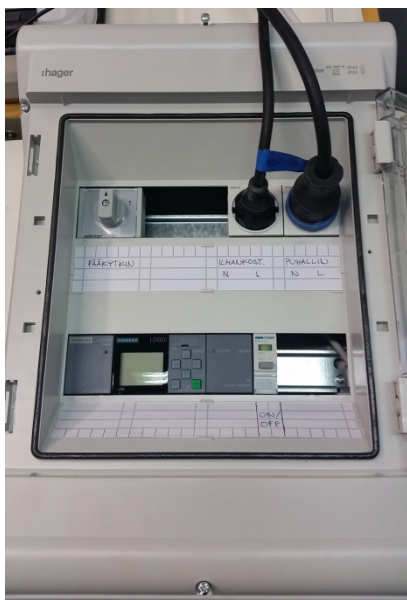
Ultraäänilähteiden minimoimiseksi ilmankostuttimeksi oli alun perin tarkoitus valita höyrystävä malli,
mutta sen aiheuttama ilman lämpötilan nousu olisi vaikeuttanut kastepisteen saavuttamista. Tämän

vuoksi päädyttiin kuitenkin lopulta ultraäänikostuttimeen, jonka puhaltama ilma on viileää. Mittaus-ten suorittamisen ajaksi kaapin ovi oli joka tapauksessa avattava, joten myös kostutin päätettiin kyt-keä siksi aikaa pois päältä ja ylimääräiseltä ultraääniemissiolta vältyttiin. Ilman maksimi kosteussi-sältö 20 °C lämpötilassa on noin 17.3 g/m³ (Sisäilmayhdistys ry, ei pvm) ja kaapin sisätilavuus on noin 0,7 m³, joten täysin tiiviiksi suljettuna kastepisteen saavuttamiseksi tarvittaisiin vain noin 12,1 g vettä. Kaappia ei kuitenkaan haluttu tiivistää täysin, vaan ilman annettiin kiertää ja vaihtua jonkin verran, jotta se vastaisi paremmin todellista käyttöpaikkaa. Lisäksi höyryä ei johdettu kaappiin täysin suljettua kanavaa pitkin, joten sitä vapautui jonkin verran myös ympäröivään huoneilmaan. Todelli-nen vedenkulutus selviäisi siis vasta toimintakokeissa, mutta tavoitteeksi asetettiin vähintään 16 h käyttöaika ilman valvontaa tai veden lisäämistä. Kostuttimen vesitilavuus oli 3,5 litraa ja maksimi höyryn tuotto 300 g/h, joten kapasiteetin osalta sen piti olla varmasti riittävä. Höyryn tuotto oli por-taattomasti säädettävissä. Kostuttimen kapasiteetin puolesta toteutus vaikutti etukäteen arvioituna helpolta, mutta lopulta vasta viides kokoonpanoversio tuotti toivotun tuloksen. Vesivahinkojen vält-tämiseksi kostutin asetettiin suoja-altaaseen.

Jännitteen syöttö suojavastuksilta tutkittavalle eristimelle toteutettiin KJ-johtimella, joka oli varus-tettu ulkokäyttöön tarkoitetuilla päätteillä. Huonosti toteutettu ja runsaasti koronapurkauksia aiheut-tava kytkentä olisi voinut häiritä akustista mittausta liikaa. Päätteiden käsittelyssä oltiin erityisen va-rovaisia, ettei niihin tulisi osittaispurkauksia aiheuttavia vaurioita paikalleen asennuksen ja kytkentä-muutosten aikana.

Alun perin laitteistossa oli mukana myös portaattomasti säädettävä EC-puhallin, jolla kostea ilma johdettiin kanavaa pitkin kaappiin suurjännitealueen ulkopuolelta. Puhaltimen ilmavirta osoittautui säädöstä ja kuristamisesta huolimatta tarpeeseen nähden liian suureksi ja muutamien variaatioiden jälkeen se jätettiin kokonaan pois. Lopulta kostuttimen ollessa riittävän lähellä kaappia sen itse tuot-tama heikko ilmavirtaus riitti hyvin siirtämään kostean ilman kaappiin, eikä ilmavirran aiheuttama kuivattava vaikutus ollut enää merkittävä.

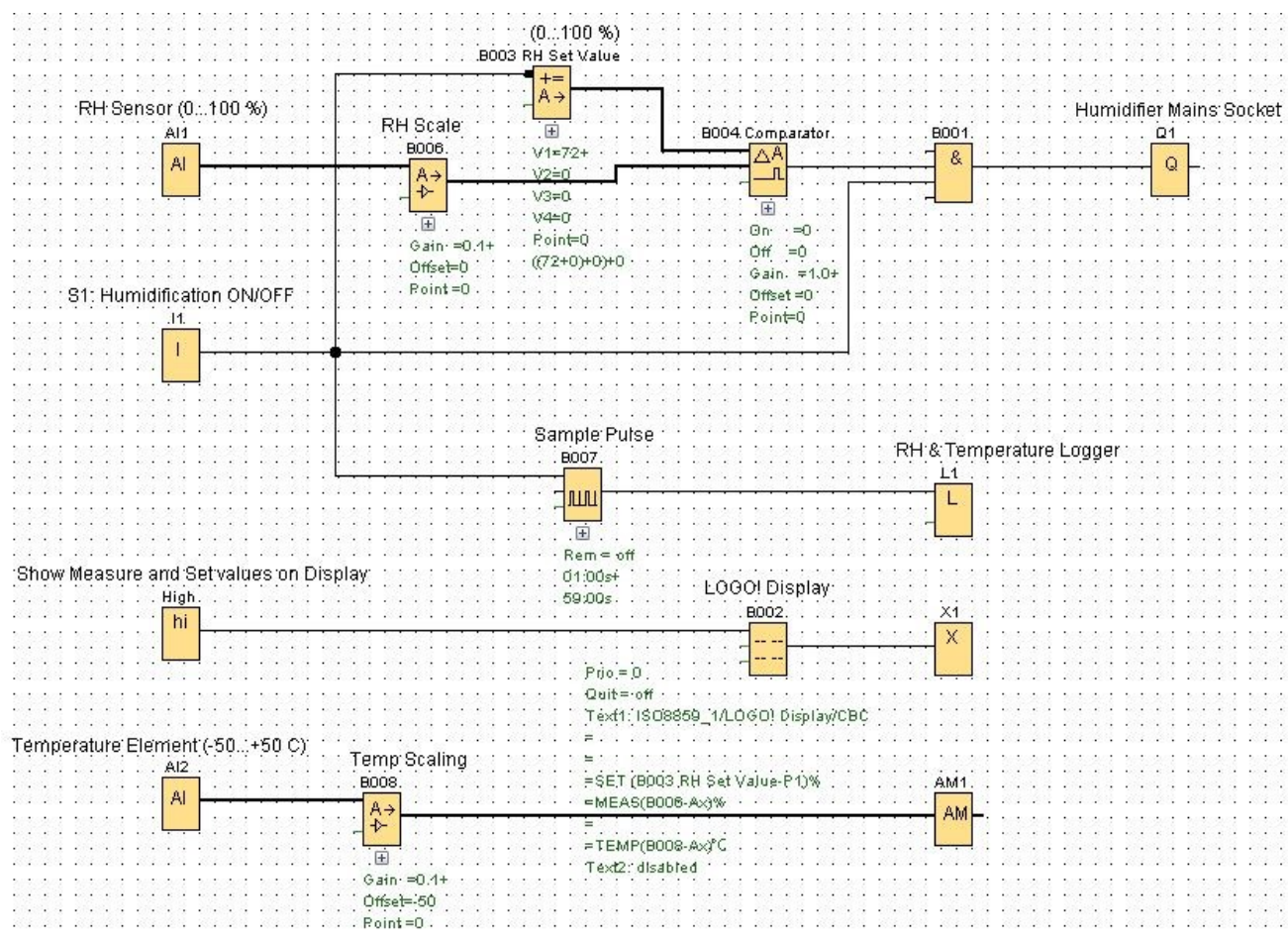
Kostutuksen ohjaamiseksi rakennettiin ohjauskeskus, jonka perustaksi valittiin Siemens LOGO! -oh-jelmoitava logiikka.



Kuva 25. Sääkaapin ohjauskeskus

Sääkaapin toimintaperiaate ja logiikkaohjelma:

- Laitteisto käynnistetään ohjauskeskuksen painokytkimestä S1. Kostutin käynnistyy, mikäli mitattu kosteustaso tulossa AI1 on alle asetusarvon. Kostutin on päällä asetetulla teholla, kunnes haluttu kosteustaso on saavutettu, tai kytkin S1 painetaan asentoon 0. Kostuttimen tehoa voidaan säätää kostuttimen omasta säätimestä.
- Lämpötila mitataan tulosta AI2. Lämpötilalle ei ole säätöä.
- Suhteellisen kosteuden asetusarvo 0...100 % annetaan lohkon B003 (RH Set Value) parametrilla V1 lukuarvona 0...100.
- Lohko B004 (Comparator) vertailee asetus- ja mittausarvoja ja ohjaa kostuttimen lähtöä Q1, edellyttäen että painokytkin S1 on asennossa 1.
- Kostutuksen päällä ollessa asynkronigeneraattori B007 (Sample Pulse) antaa näytteenotto-käskyn minuutin välein, jolloin tallennin L1 (RH % Temperature Logger) kirjaa muistiin mitatun lämpötilan ja kosteuden. Loki on ladattavissa logiikan sisäisestä muistista .cvs -tiedostona.
- Kosteuden asetusarvo ja skaalattu mittausarvo, sekä lämpötilan skaalattu mittausarvo kirjoitetaan logiikan näytölle jatkuvasti. Näytöstä voidaan kuitenkin välillä poistua esimerkiksi uuden asetusarvon syöttämiseksi.
- Kosteuden asetusarvon muutokset tehdään logiikan painikkeilla, tai vaihtoehtoisesti PC:lla Online Test -tilassa.



Kuva 26. Logiikkaohjelman toimintalohkokaavio

Logiikka itsessään toimi tähän tarpeeseen käyttöliittymänä riittävän hyvin, joten PC:ta tarvittiin vain ohjelmointiin ja ohjelman lataamiseksi logiikalle.

9.3 Toimintakokeet

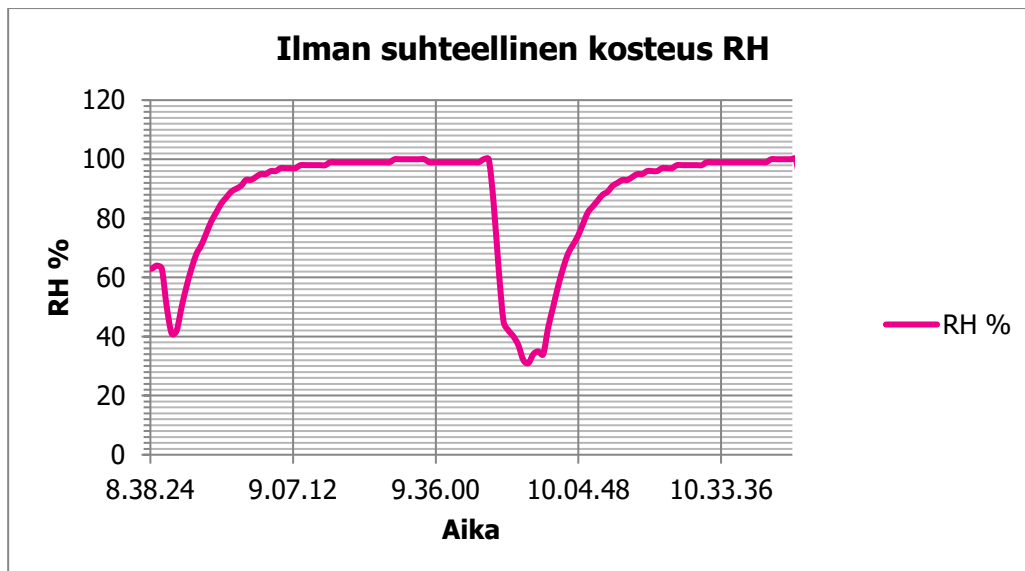
Ennen mittausten aloittamista haluttiin varmistua laitteiston toimivuudesta asetetun kosteuden saavuttamisessa ja ylläpitämisessä, sekä sulkea pois mahdolliset akustista mittausta häiritsevät tekijät. Toimintakokeiden aikana ratkottiin useita merkittäviä ongelmia, sekä tehtiin liuta pienempiä parannuksia.

9.3.1 Sääkaapin toimintakoe

Sääkaapin lopullisen kokoonpanon toimintaa ehdittiin testata parin päivän ajan, samalla kun ratkottiin muun laitteiston toiminnallisia ongelmia. Viimeiset viilaukset koskivat lähinnä logiikan antamaa informaatiota ja kaapissa vaihtuvan ilman määrää.

Kuviossa 1 on esitetty kaapin suhteellinen ilmankosteus noin kahden tunnin ajalta, kun asetusravona oli 100 % ja kaapin ovea avattiin välillä. Tavoiteltu kosteustaso saavutettiin noin 45 minuuttia oven sulkemisesta, minkä jälkeen kosteus pysyi välillä 99...100 %. Pienemmillä asetusravoilla heiluntaa oli

noin ± 2 % asetusravosta, kun kostuttimen teho oli säädetty minimiin. Tehoa suurennettaessa heilunta kasvoi liikaa asetusravon ylittävältä osalta, eli kosteaa ilmaa tuli kaappiin liian suurina annoksina. Kosteuden nousu oli hyvin nopeaa noin 80 % tasoon saakka, minkä jälkeen se hidastui huomattavasti. Kastepiste saavutettiin kuitenkin tarpeeseen nähden riittävän nopeasti noin puolessa tunnissa.



Kuvio 1. Suhteellisen ilmankosteuden trendi noin kahden tunnin ajalta käynnistämisestä asetusravon ollessa 100 %, ovi välillä avattuna

Mittauksen tarkkuutta ei vertailtu muilla mittalaitteilla. Kastepisteen saavuttamisen pystyi kuitenkin toteamaan silmämääräisesti, kun kosteus alkoi tiivistyä pinnoilla vedeksi mittausarvon ollessa 100 %. Tiivistymistä ei silmämääräisesti tarkasteltuna tapahtunut vielä asetusravon ollessa 96 % ja mittausarvon vaihdellessa välillä 95...98 %, joten mittauksen tarkkuuden voitiin todeta olevan tähän tarkoitukseen riittävä. Kosteuslähetin oli uusi ja sille ilmoitettu tarkkuus oli $+25$ °C lämpötilassa ± 2 % rH (alueella 20...80 % rH). Muissa sallituissa olosuhteissa tarkkuus oli ± 3 % rH (Produal Oy, 2016).

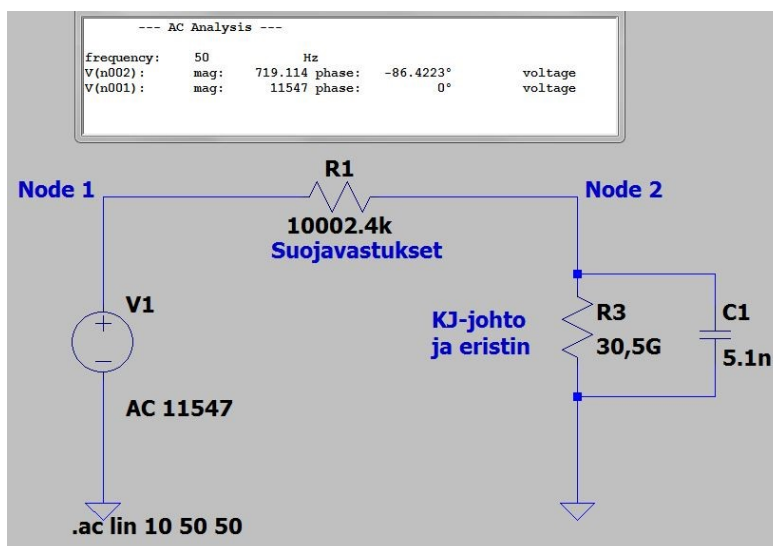
Toimintakokeiden ja hienosäätöjen päätteeksi kostutuksen voitiin todeta toimivan tavoitteiden mukaisesti.

9.3.2 Jännitteen kytkentäkoee

Ennen varsinaisia mittauksia haluttiin varmistaa myös itse suurjännitelaitteiston toimivuus. Jännitteen nostamisessa esiintyikin melkoinen ongelma, kun kytkennän toisiojännitettä ei saatu nousemaan muuntosuhteen mukaisesti. Eristysvaurio olisi ollut todennäköinen syy jännitteen tipahtamiselle, joten koko asennuksen eristysvastus päätettiin vielä mitata. Muovieristeisen johtimen mittaminen DC-jännitteellä ei ollut lähtökohtaisesti hyvä asia, sillä mittaus voi aiheuttaa eristeisiin avaruusvarauksia, jotka taas voivat jatkossa aiheuttaa osittaispurkauksia terveeseenkin eristeeseen. Ongelman selvittämiseksi eristysvastus kuitenkin mitattiin ja sen todettiin olevan kunnossa, mittaus näytti eristysvastukseksi 30,5 G Ω ja kapasitanssiksi 5,1 nF. Mitattu kapasitanssi ei vastaa valmistajan

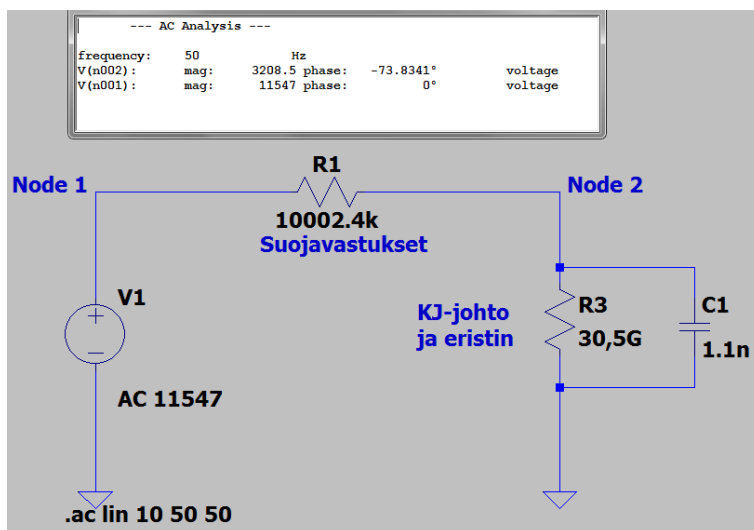
johtimelle ilmoittamaa arvoa, mikä olisi viiden metrin johtimelle 1,1 nF, mutta toisaalta mittauskytkennässä oli mukana myös kaapelipäätteet ja kaappiin asennettu huonokuntoinen eristin, joiden osuutta ei voida sulkea pois. Eristysvastus oli niin suuri, ettei sillä voinut olla mainittavaa vaikutusta jännitteeseen, joten seuraavaksi pohdittiin kapasitanssin ja sitä kautta impedanssin vaikutusta kytkennän jännitteen jakoon, sillä virran rajoittamiseksi piirissä oli mukana myös noin 10 M Ω suojavastukset ja näin ollen kytkennän oikosulkuvirta oli hyvin pieni. Asian selvittämiseksi keskijännitejohtimen maadoitus kytkettiin irti molemmista päistään ja johdin nostettiin irti kuparilattiasta. Tämä auttoi ongelmaan ja jännitettä saatiin taas nostettua normaaliksi.

Kuvassa 27 on esitetty LTspice-ohjelmistolla tehty asennuksen sijaiskytkentä ja jännitteen jaon laskenta, kun johtimen maadoitus on kytketty ja jännitegeneraattori syöttää 20 kV jakeluverkon vaihejännitettä 11,547 kVAC. KJ-johdon, eristimen vastuksen ja kapasitanssin arvot ovat eristysvastusmittauksen tuloksen mukaisia. Mallinnuksen mukaan suojavastuksen jälkeisessä pisteessä Node 2 toisiojännite on vain 719 V.



Kuva 27. Sijaiskytkentä ja jännitteen jako johtimen maadoitus kytkettynä ja mitatuilla eristysvastuksen ja kapasitanssin arvoilla laskettuna

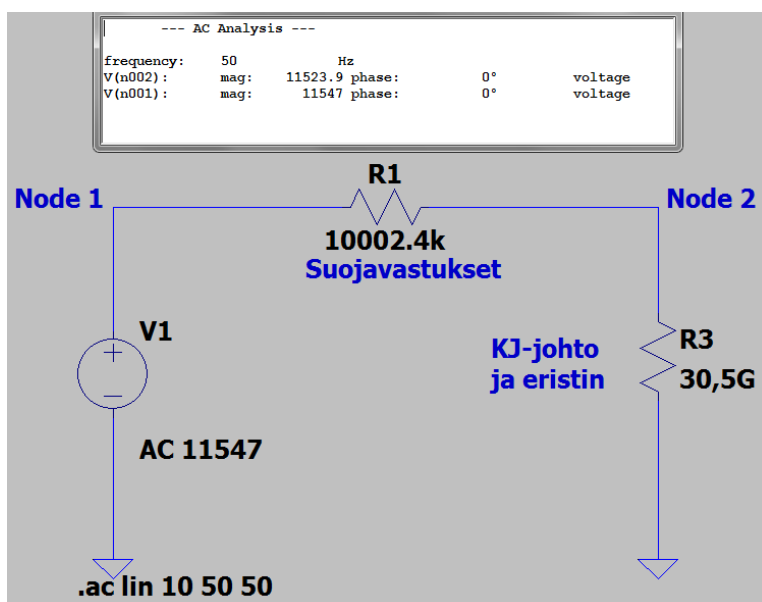
Kuvassa 28 on esitetty kytkentä ja laskentatulokset johtimelle ilmoitetun rinnakkaiskapasitanssin mukaisesti. Näillä arvoilla pisteen Node 2 jännitteeksi saadaan noin 3,2 kV, mikä jää edelleen kauas verkon nimellisestä vaihejännitteestä 11,5 kV.



Kuva 28. Sijaiskytkentä ja jännitteen jako johtimen maadoitus kytkettynä, eristysvastuksen mitatulla arvolla ja johtimen kapasitanssin ilmoitetulla arvolla laskettuna

Molemmissa edellä olevissa mallinuksissa kapasitanssi aiheuttaa myös jännitteen vaihekulman jättämistä, mutta sillä ei ole nyt tehtävien mittauksen kannalta merkitystä.

Kun johtimen maadoitus kytketään irti, johdon rinnakkaiskapasitanssi on käytännössä likimain nolla. Tällöin kuormaksi voidaan olettaa impedanssi, joka on likimain mitatun eristysvastuksen suuruinen. Tilanne on mallinnettu kuvassa 29, missä laskenta osoittaa jännitteen alenemaksi enää 23 V. Nyt jännite tutkittavan eristimen yli oli halutun suuruinen.



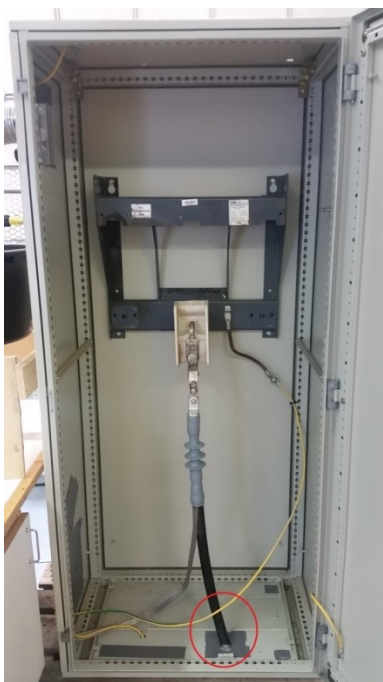
Kuva 29. Sijaiskytkentä ja jännitteen jako johtimen maadoitus irrotettuna ja eristysvastuksen mitatulla arvolla laskettuna

9.3.3 Akustisten häiriöiden koe

Akustisten häiriölähteiden määrittämiseksi laboratoriotila seulottiin kauttaaltaan ilmäteitse ultraäänimittarilla, ettei äänitallenteisiin päätyisi virhetulkintoja aiheuttavia tekijöitä. Tällaisia voisivat olla

muun muassa puhaltimet, tehoelektroniikka ja loisteputkivalaisimet. Lieviksi häiriötekijöiksi todettiin valaistus ja mekaanisesti resonoiva sähkökeskus. Näistä ei kuitenkaan ollut haittaa valitussa mittaus-suunnassa, joten niihin ei ollut tarvetta puuttua. Sen sijaan suurjännitteen kytkemisestä varoittavien merkkivalojen releet aiheuttivat mittausta häiritsevää toistuvaa naksetta ja ne jouduttiin poistamaan käytöstä. Koska ääni toistui jatkuvasti samanlaisena, häiriösignaali olisi periaatteessa voitu huomioida jokaisen äänitteen tulkinnassa, mutta selvyuden vuoksi häiriölähteet päätettiin poistaa kokonaan.

Kun jännite oli lopulta saatu nostettua halutulle tasolle, ongelmia tuotti myös keskijännitejohtimen läpivienti kaappiin, sekä erottimen maadoitusjohdin. Maadoitettuja osia oli liian lähellä jännitteistä johdinta ja ne aiheuttivat voimakkaita koronapurkauksia paikallisten sähkökentän muutosten vuoksi. Vaivaan auttoi kaapin lattian vaihtaminen kokoaan muoviseksi, sekä erottimen rungon maadoitusjohtimen siirtämien kauemmas keskijännitejohtimesta.



Kuva 30. Erottimen maadoitusjohdin ja metallinen lattia ovat liian lähellä KJ-johdinta ja aiheuttavat koronapurkauksia

Purkaus saatiin eliminoitua siirtämällä maadoitusjohdin kaapin takareunaan. Vastaavia tapauksia on havaittu myös kentällä tehdyissä mittauksissa. Maadoitettujen ja jännitteisten johtimien risteilyyn kannattaa siis kiinnittää huomiota asennusvaiheessa.

Toimintakokeessa todettiin myös, että varsinaisten mittausten aikana jännite tullaan nostamaan enintään pääjännitteen tasolle, eli 20 kilovolttiin. Tätä suuremmilla jännitteillä valmiiksi huonokuntoisen eristimen purkaukset kasvoivat todella voimakkaiksi ja olisivat saattaneet johtaa ylilyöntiin, mikä ei olisi ollut tarkoituksenmukaista.

9.4 Mittalaitteet

9.4.1 Ultraäänimittari UP 10000

Akustiset mittaukset tehtiin UE Systems UP 10000 -ultraäänimittalaitteella. Laitteen taajuuskaista on 20...100 kHz ja keskitajuus on säädettävissä koko alueella 1 kHz:n askelin. Mittalaitteen näytteenottotaajuus on 16 kHz ja herkkyys / volyyymi on säädettävissä 1 dB:n portain. Herkkyyden säätäminen sopivaksi on tärkeää ääninäytteen edustavuuden kannalta. Herkkyyden säätö tapahtuu manuaalisesti ja laite ohjaa käyttäjää säätämään herkkyyttä sopivaksi, ettei ääni säröytyisi tai kuuluisi liian vaimeasti. Säröytyminen pilaa ääninäytteen käyttökelpottomaksi. Mittaukset tehtiin ilmateitse käyttäen Long Range Module -anturia, minkä suunnattavuus ja herkkyys soveltuivat mittaukseen parhaiten.



Kuva 31. UP 10000 mittalaite ja varusteet (UE Systems Inc.)

Mittausta voidaan seurata reaaliaikaisesti PC:lla, tai tallentaa teksti- ja äänitiedostoina myöhempää analysointia varten. Seurantaan ja analysointiin tarvitaan UE Spectralyzer -ohjelmisto. Ääninäytteiden ja mitattavien kohteiden ylläpito ja trendiseuranta on mahdollista Ultratrend DMS -ohjelmistolla. (UE Systems Inc.)

Laitteessa ei ole jännitteen vaihekulman tunnistusta ja näin ollen PRPD-kuvan muodostaminen vaatii mittaukselta erikoisjärjestelyjä, kuten verkkotaajuuteen tahdistetun ultraäänigeneraattorin. Laitteen mukana toimitettava ultraäänigeneraattori on tarkoitettu vain mittalaitteen kalibroinnin tarkastamiseen ja vuotojen etsimiseen suljetuista rakenteista, eikä sen äänen taajuus ei vastaa sähköverkon taajuutta, joten sitä ei voida hyödyntää PRPD-kuvan muodostamisessa.

On myös huomioitava, ettei näytteenottotaajuus 16 kHz ole riittävä kaikkien yksittäisten purkausten rekisteröimiseen, jos purkauksia on runsaasti. Taajuus on kuitenkin riittävä esittämään purkausten aiheuttama kuvio ja toistuvuus.

9.4.2 Eristystesteri KEW 3128

Eristyksen kunnan testaukset tehtiin KEW 3128 -eristystesterillä. Laitteella voidaan tehdä eristysvastuksen (RI), polarisaatioindeksin (PI) ja dielektrisen absorptiosuhteen (DAR) mittaukset yhdellä mittauksella 0,5...12 kV DC-jännitteellä. Jännite on säädettävissä esiasetetuin portain ja sitä voidaan myös hienosäätää. Mittaustulokset voidaan tallentaa kuvatiedostona, datatiedostona, tai nauhoittaa koko mittauksen sisältävänä tallenteena. Tallenteesta näkisi myös mittaustuloksen kuvaajan ajan suhteen. Datatiedostot ja nauhoitteet ovat luettavissa KEW Windows -sovelluksella. Datatiedostojen lukemisessa todettiin olevan laitteen ja PC:n välillä yhteysongelmia, joten tulokset päätettiin tallentaa kuvatiedostoina, mikä toimi luotettavasti.

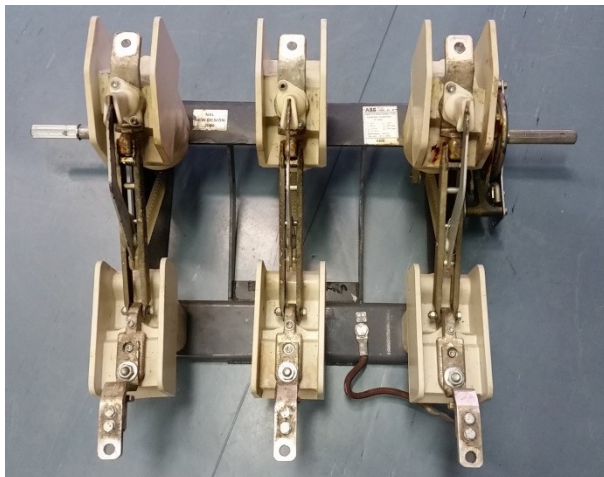
Eristysvastusmittauksen jännite ja kesto ovat käyttäjän määritettävissä ja se voidaan tehdä omana mittauksenaan. Käytännössä kannattaa kuitenkin tehdä PI-mittaus, sillä samalla saadaan tulokset myös IR- ja DAR-mittauksista. Kaikki nämä tulokset perustuvat eristysresistanssiin ajan funktiona. Ennen PI-mittauksen käynnistämistä IR- ja DAR-mittausten parametrit tulee asetella niiden omista valikoistaan.

Suojatoimintoina testeri ilmoittaa vaarallisesta mittausjännitteestä läpi mittauksen kuuluvalla äänimerkillä ja purkaa varauksen automaattisesti mittauksen päätyttyä. Vuotovirran kasvaessa liian suureksi ($> 5 \text{ mA}$) testeri tiputtaa lähdön jännitettä. Esimerkiksi 5 kV jännitteellä mitattaessa jännite tiputetaan 1 kV tasolle ja eristysvastuksen arvona osoitetaan vain, että tulos on alle mittausalueen. (Kyoritsu Electrical Instruments Works, Ltd)



Kuva 32. KEW 3128 eristysvastusmittari

9.5 Tutkittava erotin



Kuva 33. Puistomuuntamosta käytöstä poistettu erotin

Tutkittavaksi laitteeksi saatiin puistomuuntamoissa yleisesti käytetty ABB:n valmistama NAL 24-6 kuormaerotin. Sen pääasiallisia käyttökohteita ovat jakeluverkon muuntajat ja johtolähdöt, sekä teollisuuden moottorilähdöt. Nimellisjännite on 24 kV ja nimellisvirta 630 A. Kuormaerotinta voidaan käyttää myös kuormitusvirtojen katkaisuun, joten lähtöön ei välttämättä tarvita erillistä katkaisijaa. Katkaisu- ja kytkentäkyky riippuu kuorman tyypistä ja tapahtumien määrästä. Syöksyjännitekestoisuudeksi ilmoitetaan 125 kV. Asennus- ja käyttöohjeen mukaan käyttöolosuhteet tulee olla standardin IEC/TS 62271-304:2008 luokan 0 mukaiset, jonka mukaan kondensiota ei normaalisti esiinny useammin kuin kahdesti vuodessa. (ABB Ltd, 2020a) (ABB Ltd, 2020b)

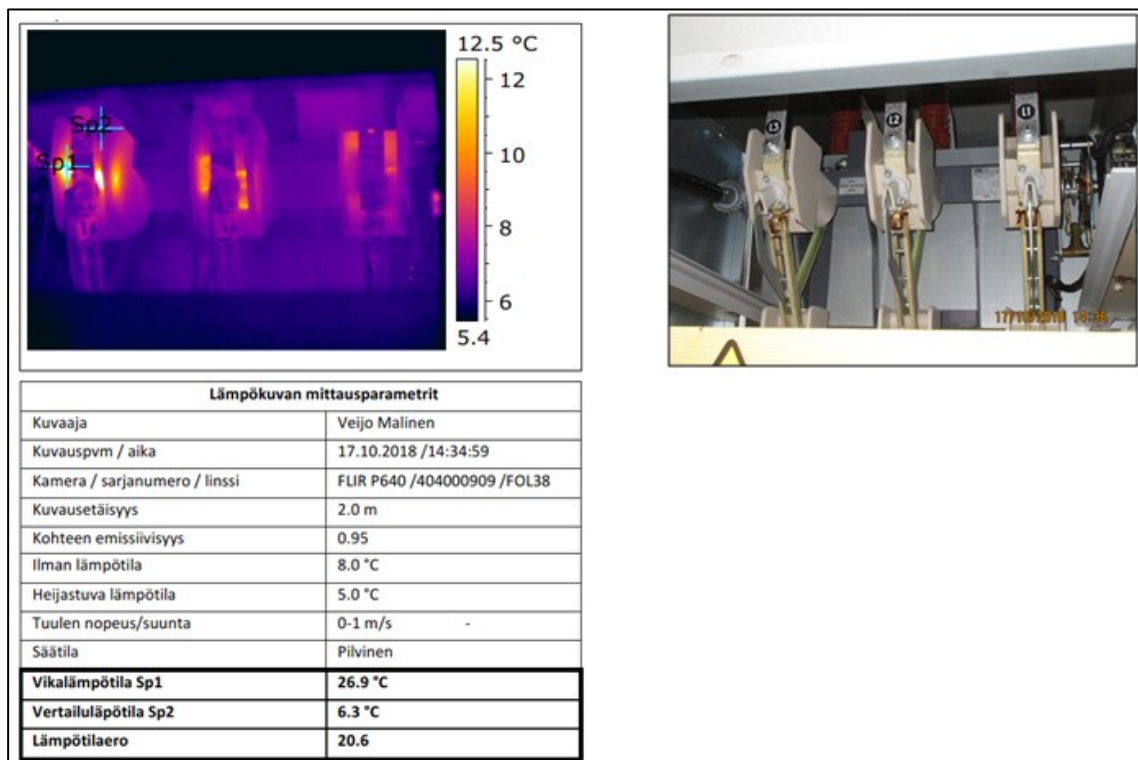
Eristinmateriaalina käytetty lasikuituvahvisteinen polyesteri on seossuhteesta riippuen jonkin verran hygropaattista, eli se absorboi kosteutta itseensä (Araújo;Araújo;Pereira;Ribeiro;& de Melo, 2006).

Kentältä saatujen kokemusten mukaan kyseisessä erotinmallissa on ollut ongelmia suomalaisissa käyttöolosuhteissa, jotka eivät selvästikään aina vastaa käyttöohjeessa määritettyjä ympäristön olosuhteita. Kosteuden absorboituminen eristinmateriaaliin voi johtaa ongelmiin erityisesti pienellä kuormituksella ja huonosti tuulettuvissa tiloissa, kun kuormituksen aiheuttama hukkalämpö tai ilmavirta eivät kuivata eristintä.

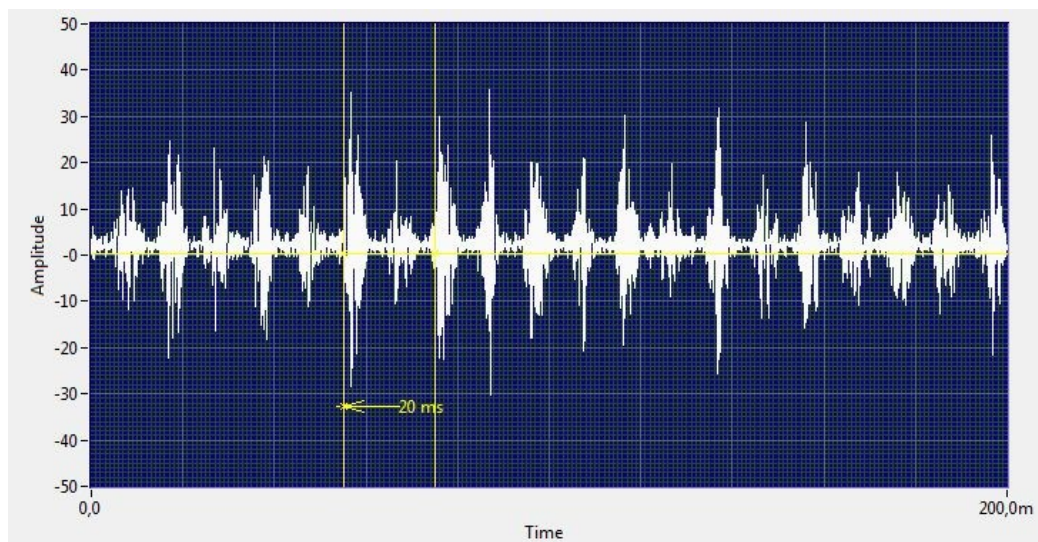
9.5.1 Erottimen käyttöhistoria

Kyseinen erotin oli poistettu käytöstä vaurioitumisen vuoksi loppuvuodesta 2018. Puistomuuntamoon oli tehty käytön aikaisia ultraäänimittauksia ja lämpökuvauksia jo huhtikuussa 2016 ja syyskuussa 2016, jolloin kyseisen erottimen kohdalla ei havaittu poikkeamia. Puistomuuntamossa tehtiin kuitenkin seurantamittauksia muiden huomioiden vuoksi myös 10/2018, jolloin erottimessa havaittiin osittaispurkauksista johtuva voimakas ääniemissio ja lämpenemistä. Tuolloin vikaantuminen oli jo hyvin pitkällä ja erotin päätettiin vaihtaa. Erotinta ei kuitenkaan ehditty vaihtamaan ajoissa ja noin kuukautta myöhemmin erotin vaurioitui toisella johtolähdöllä tapahtuneen maasulun aiheuttaman

kiskoston jännitteennousun seurauksena. Eristinmateriaalin ominaisuudet olivat siis jo osittaispurkausten heikentämät, minkä seurauksena kiskoston jännitteen hetkellinen nousu pääjännitteen tasolle aiheutti yhdessä eristimessä läpi- tai ylilyönnin.

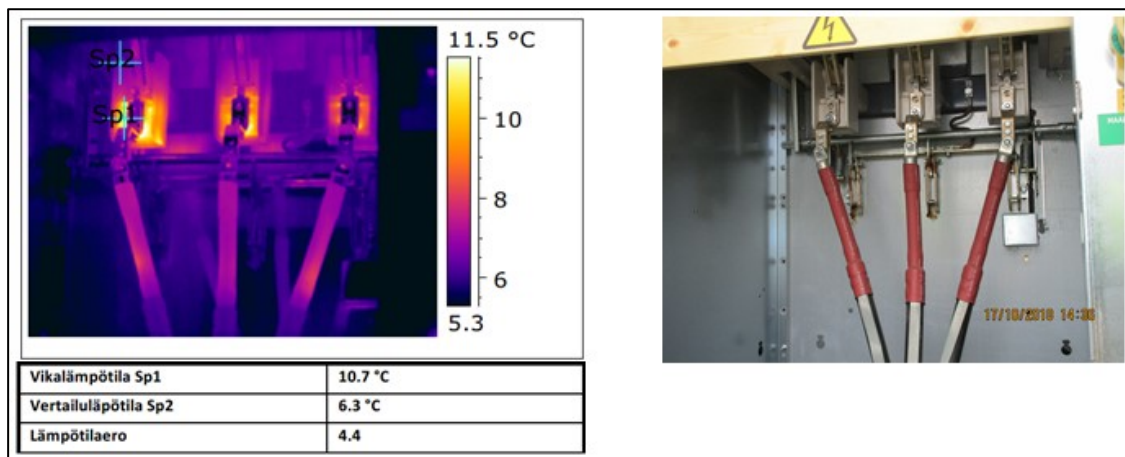


Kuva 34. Mittaustuloksia 17.10.2018, erottimen yläosa (Paikallis-Sähkö Oy)



Ultraääninäytteen mittausparametrit	
Ilman lämpötila °C	8
ilman suhteellinen kosteus %	82
Etäisyys m / Äänen voimakkuus dB	2 m / 39 dB
Anturi / taajuus kHz	LRM / 40 kHz

Kuva 35. Mittaustuloksia 17.10.2018, ultraääninäytteen kuvaaja ja mittausparametrit ylemmän vasemmanpuoleisen eristimen alueelta (Paikallis-Sähkö Oy)



Kuva 36. Mittaustuloksia 17.10.2018, erottimen alaosa ja kaapelipäätteet (Paikallis-Sähkö Oy)

Kuvasta 34 nähdään, että huonoimman eristimen lämpötilaero normaaliin oli kohonnut paikallisesti jo yli 20 °C. Kuvan 35 ultraäänikuvaajasta nähdään, että eristimessä tapahtui runsaasti osittaispurkauksia jokaisella puolijaksolla. Yhden jakson pituus 20 ms on merkitty kuvaan keltaisilla pystykursoireilla. Äänen paineeksi mitattiin 39 dB kahden metrin etäisyydeltä. Ilman suhteellinen kosteus kennossa oli mittaushetkellä 82 %. Kuvasta 36 ilmenee, että sama ongelma vaivaa lievempänä myös erottimen alaosan eristimiä, joissa korkein paikallinen lämpenemä oli reilu neljä astetta. Alaosassaakaan ei huomattu silmin nähtäviä ongelmia. Myös kaapelipäätteissä havaittiin tavallisesta poikkeavaa lievää epätasaista lämpenemistä, mikä voi johtua myös polarisaation aiheuttamista häviöistä, tai kosteuden absorboitumisesta eristeeseen. Päätteiden ulkopinnoilla ei havaittu pintapurkauksia, eikä merkittävää paikallista lämpenemistä.

Tulosten perusteella erottimen vikaantumisen oli jo edennyt vakavaksi, vaikka silmämääräisesti ongelmia ei ollut vielä havaittavissa. Mittaushetken ja vaurioitumisen välillä noin kuukaudessa eristimiin oli jo syntynyt selviä silmin nähtäviä jälkiä pintapurkauksista. Edellisestä mittauksesta oli kulunut kaksi vuotta, jolloin ei vielä huomattu poikkeamia lämpökuvauksessa tai ultraäänimittauksessa. Vikaantumisprosessi on siis ollut suhteellisen nopea.

9.5.2 Erottimen kunto laboratoriomittausten alkaessa

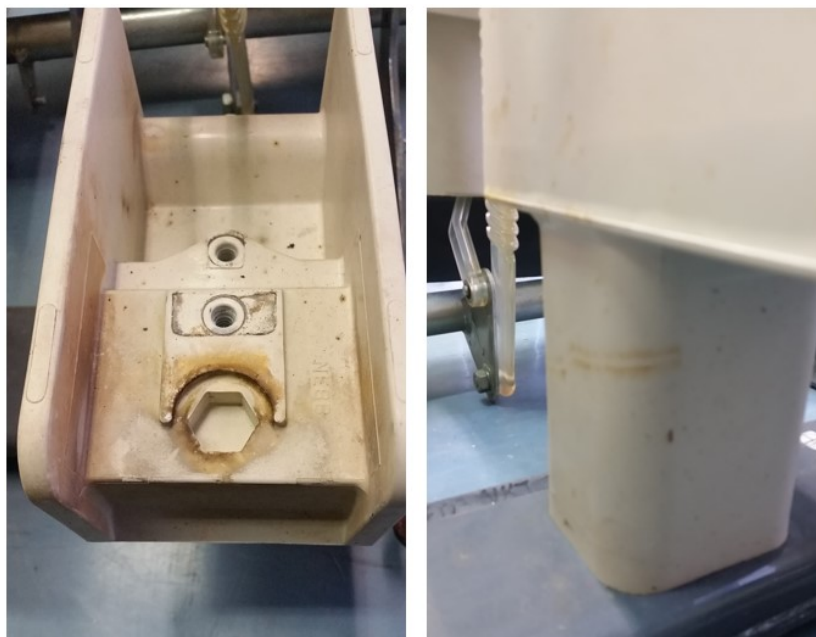
Erotimeissa oli silmämääräisesti tarkasteltuna eriateisissa kunnossa olevia eristimiä, joten se vaikutti soveltuvan hyvin tarkempaan tutkimiseen. Eristimille yksittäin tehdyt eristysvastus- ja polarisaatioindeksimittaukset vahvistivat käsitystä, että eristimien ominaisuuksissa oli myös mitattavissa olevia keskinäisiä eroja. Visuaalisesti tarkasteltuna suurimmat ääripäät olivat ylhäällä vasemmalla ollut läpi-/ylilyönyt eristin (kuva 38) ja alhaalla oikealla ollut eristin (kuva 40), joka näytti edelleen uuden veroiselta. Huonoimmalta näyttäneen eristimen sylinterin sisäpinnoilla oli myös hiiltyneitä sähköpuita. Tämä eristin ei kuitenkaan ollut kuivahkossa huoneilmassa säilytettynä ja mitattuna eristysvastukseltaan huonoin, mikä oli varsin yllättävää. Muut eristimet yhtä lukuun ottamatta olivat keskenään melko vastaavassa kunnossa, ja niissä kaikissa oli pintavirtojen aiheuttamia jälkiä, mutta ei varsinaisia sähköpuita. Palojälkien perusteella erottimen kipinäveitsien välillä oli lisäksi tapahtunut kolmivaiheinen oikosulku.



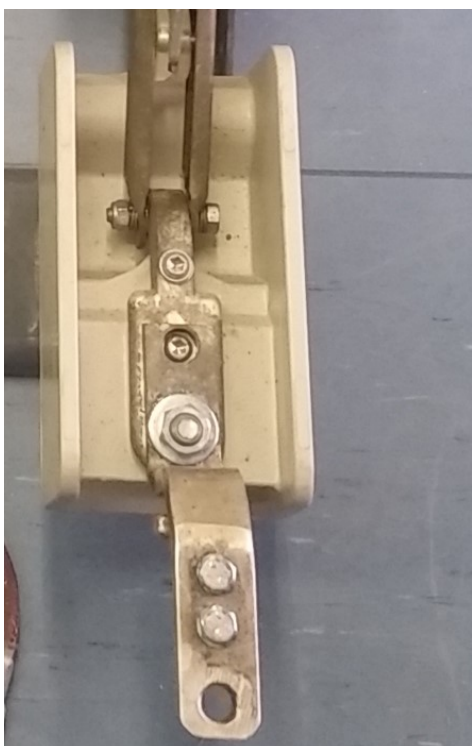
Kuva 37: Erottimen tyyppitiedot. Eristimien pinnoilla näkyy pintapurkausten aiheuttamia jälkiä.



Kuva 38. Vaiheen 1 ylempi eristin purettuna. Eristimen sylinterissä näkyy pintapurkausten jäytämää sähköpuita, sekä läpilyönnin seurauksena tulleita palojälkiä.



Kuva 39. Vaiheen 2 alemmassa eristimessä oli pintapurkausten aiheuttamia värimuutoksia.



Kuva 40. Vaiheen 3 alemmassa eristimessä ei vielä ollut visuaalisesti havaittavia merkkejä pintapurkauksista.

9.5.3 Erottimen puhdistaminen

Valmistajan huolto-ohjeen (ABB Ltd, 2020b) mukaan pinnat täytyy puhdistaa huolellisesti asennuksen ja huoltotoimenpiteiden jälkeen ennen käyttöönottoa. Puhdistaminen tulee tehdä saippuvedellä, eikä mitään alkoholipitoisia aineita tai vahvoja liuottimia saa käyttää. Mikäli erotinta käytetään olosuhteissa, joissa pintavirran vastus voi alentua, eristimet on suositeltavaa kiillottaa Type DC200 Fluid cst -silikonilla. Laboratoriomittausten yhteydessä eristimien pinnat puhdistettiin laimealla saippuvedellä.

10 LABORATORIOMITTAUKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä opinnäytetyössä koekappaleiden eristyskykyä testattiin tasajännitteellä, mitä ei voida käyttää osittaispurkausten mittaamiseen. Osittaispurkauksia mitattiin akustisesti ilmaitse. Valituista mittausten menetelmistä kerrotaan tarkemmin luvuissa 6.2 ja 6.4.

Mittaussuunnitelman mukaisesti tavoitteena oli tehdä eristysvastus-, PI- ja DAR-mittauksia, sekä akustisia ultraäänimittauksia suhteellisen ilmankosteuden ollessa eri tasoilla. Erityisesti kiinnosti kastepisteen vaikutus eristystasoon ja osittaispurkausten intensiteettiin. Huoneilman suhteellinen kosteus oli mittausten aikaan erittäin alhainen, noin 25 prosenttia. Muiksi kosteustasoiksi valittiin 60, 95 ja 100 %.

Akustisissa mittauksissa testijännitteinä käytettiin 20 kV keskijännitejako- ja vaihejännitteitä 11,5 kVAC ja pääjännitteitä 20 kVAC. Samassa muuntopiirissä tapahtuva maasulku nostaa kiskoston vaihejännitteen pääjännitteen tasolle, joten etenkin avojohtoja sisältävissä muuntopiireissä eristimen on kestävä tällaisia ylijännitteitä suhteellisen usein. Tasajännitteellä tehdyissä eristysvastusmittauksissa testausjännitteenä oli 5 kVDC.

10.1 Mittausten eteneminen

Mittausten aluksi kaikille kuudelle erottimesta puretulle eristimelle tehtiin eristysvastus-, PI- ja DAR-mittaukset huoneilmassa. Mittaustulosten ja eristeiden visuaalisen kunnan perusteella valittiin jatkomittauksiin kolme eristintä. Eristin 1 oli erottimen vasemmanpuoleinen ylempi eristin (kuva 38), mikä oli jo selvästi käyttökelvottomassa kunnossa. Eristimeksi 2 valittiin keskimmäisen vaiheen alempi eristin (kuva 39), mikä vaikutti muuten ehjältä, mutta sen pinnoilla oli merkkejä pintavirtojen vaikutuksesta. Varsinaisia sähköpuita ei kuitenkaan ollut havaittavissa. Eristin 3 oli oikeanpuoleisen vaiheen alempi eristin (kuva 40), mikä oli visuaalisesti tarkasteltuna parhaassa kunnossa. Kaikkien eristimien pinnoilla oli selvää likaantumista. Sähköisiä mittauksia tehtiin eristin kerrallaan ja kullekin eristimelle vain yksi mittaus päivässä, jotta eristeeseen jääneen varauksen ja polarisaation vaikutus olisi mahdollisimman vähäinen seuraavassa mittauksessa.

Päivittäisissä mittauksissa mitattiin aluksi R_e , PI ja DAR pintavirtoja suodattamatta. Tämän jälkeen tutkittavaan eristimeen kytkettiin syöttöjohdin ja pidettiin noin tunnin mittainen tauko, jotta kosteus kaapissa ehtii nousta takaisin tavoiteltuun arvoon. Ensimmäisen päivän mittaukset suoritettiin kokonaan huoneilmassa. Tauon jälkeen tehtiin akustinen mittaus 11,5 ja 20 kV jännitetasoilla. Ilmankosteuden tasoa vaihdettaessa haluttu ilmankosteus ehti vaikuttaa noin 20 tunnin ajan ennen seuraavia mittauksia.

Käytössä olleella laitteistolla ei ollut mahdollista järjestää mittauksia täysin tasaisissa kosteusolosuhteissa, vaan kaapin ovea oli välillä avattava mittauskytkentöjen tekemiseksi ja itse mittauksia varten. Suoritettavat toimenpiteet valmisteltiin tarkasti etukäteen, jotta oven avaus pysyi mahdollisimman

lyhyenä ja pinnat eivät ehtineet kuivaa merkittävästi. Mittaukset toistettiin aina samalla tavalla, samassa järjestyksessä ja samaan aikaan vuorokaudesta, jotta ajan vaikutus kosteuden absorboitumisessa eristimateriaaliin pysyisi mahdollisimman vakiona eri mittausten välillä. Ilman lämpötila pysyi mittausten ajan melko tasaisena välillä 20...21 °C.

Pinnalla olevan lian merkityksen selvittämiseksi eristimien mittaukset toistettiin vielä kerran ilman kosteuden ollessa 100 %, niin että pinnat oli puhdistettu. Tämä mittaus tehtiin myös eristimelle 3, joka oli huoneilmassa tehtyjen sähköisten mittausten ja visuaalisen tarkastelun perusteella parhaassa kunnossa. Laboratorio oli käytettävissä vain rajatun ajan ja koelaitteiston käyttöönotossa ilmeni ongelmia, joten eristimelle 3 ei ehditty toistamaan koko mittaussarjaa. Rajallisen ajan säästämiseksi mittauksista jouduttiin jättämään pois eristimen 3 sähköiset mittaukset kosteusprosentteilla 60 ja 95, sekä saman eristimen akustiset mittaukset kaikilla kosteustasoilla.

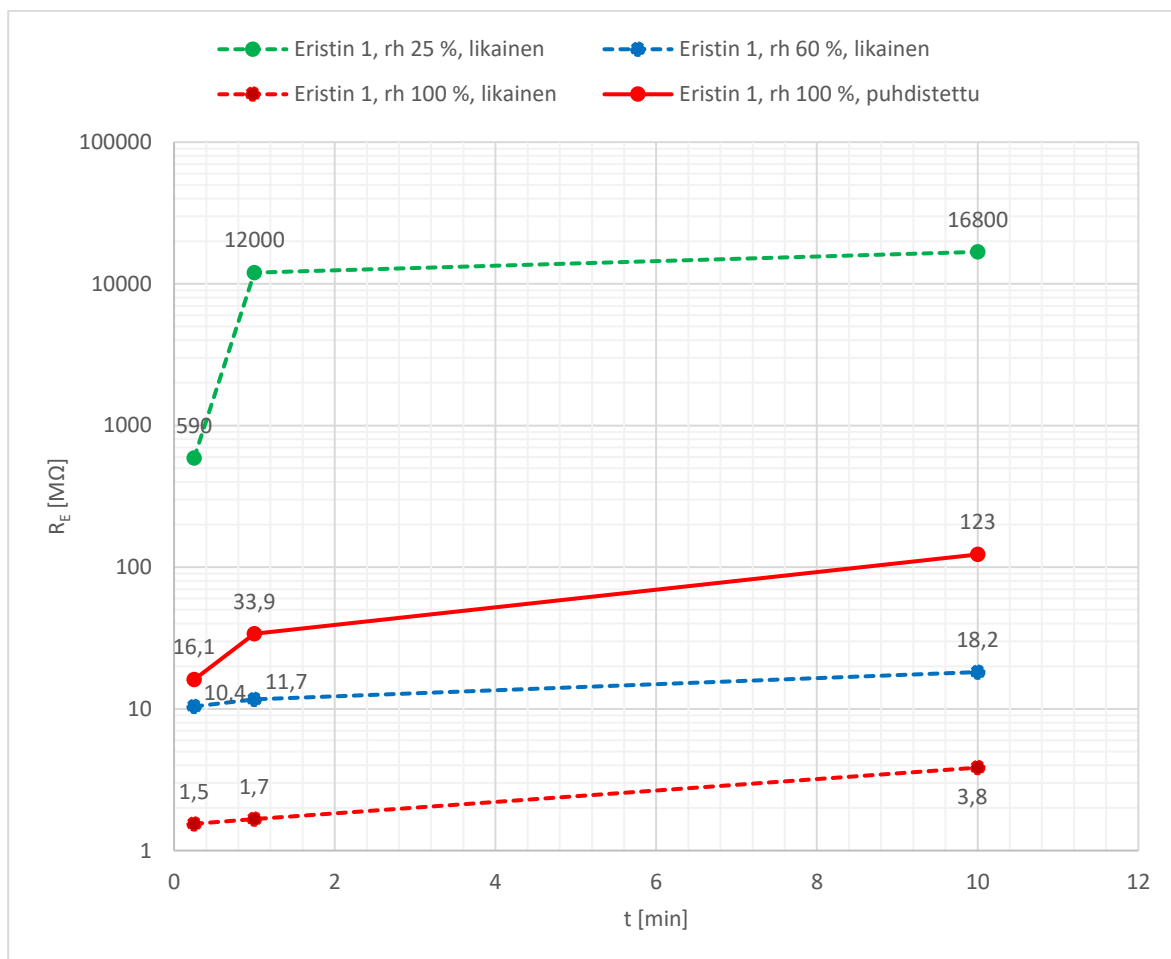
Luvussa 9.3.2 selostetussa toimintakokeessa paljastuneesta jännitteen jakautumisesta oli harmia myös mittausten edetessä, sillä eristimien yli vaikuttanut jännite laski Kirchhoffin jännitelain mukaisesti eristimen eristysvastuksen heiketessä. Luonnollisesti tämä laski voimakkaasti myös osittaispurkausten aktiiviteettia.

10.2 Tasajännitekokeiden tulokset

Kaikki mittaukset tehtiin viiden kilovoltin tasajännitteellä ja kymmenen minuutin mittaisena. Eristysvastuksen osalta kaavioissa on esitetty mittaustulokset eri olosuhteissa 15 sekunnin, yhden minuutin ja kymmenen minuutin kohdalta. Mittalaitteen toimintaperiaate on selostettu tarkemmin luvuissa 6.2 ja 9.4.2. PI- ja DAR-mittausten tuloksia on verrattu taulukon 2 raja-arvoihin.

Tuloksia tulkittaessa tulee huomioida, ettei kuvaajat edusta eristysvastuksen todellista käyttäytymistä arvopisteiden välillä, vaan ne vain havainnollistavat tuloksen suuntaa. Muutos ei siis välttämättä ole lineaarinen ja käyrän todellista muotoa ei tässä tapauksessa tunneta.

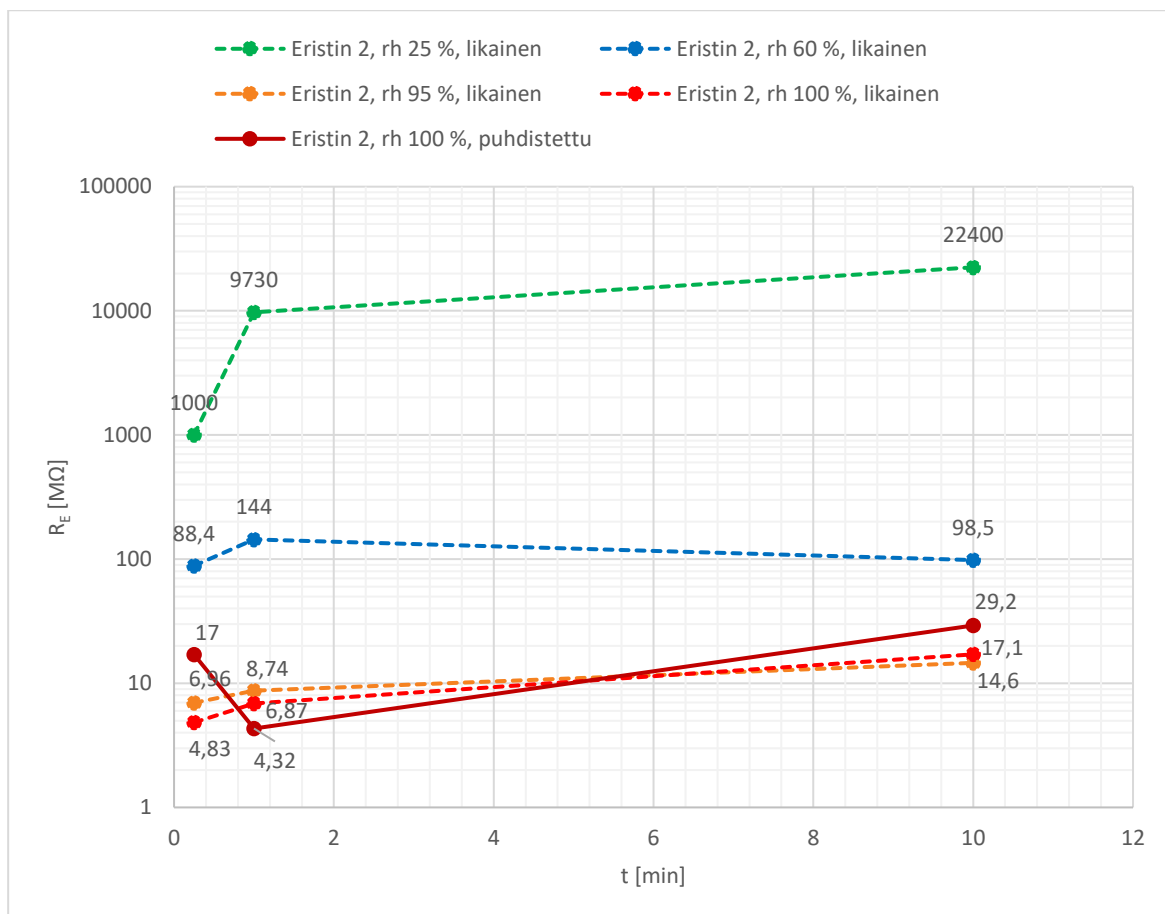
10.2.1 Eristysvastus



Kuvio 2. Eristimen 1 eristysvastus

Kuvion 2 vihreän katkoviivan mukaan eristimen 1 eristysvastus oli huoneilman kosteudessa yllättävän hyvä, vaikka ulkoisesti eristimen kunto näytti heikolta. Kymmenen minuutin kohdalla tulos oli 16,8 GΩ ja 15 sekunnin kohdallakin peräti 590 MΩ. Ilmankosteuden noustessa 60 prosenttiin (sininen katkoviiva) 10 min arvo oli tippunut 18,2 megaohmiin ja 15 s arvo 10,4 megaohmiin. 95 prosentin kosteustasoilla mittarin näyttämä oli enää < 4 MΩ. Tulos oli siis alle mitta-alueen ja mittalaite rajoitti koejännitettä. Tuloksia kosteusprosentilla 95 ei tämän vuoksi ole esitetty. Mittari kuitenkin näytti mittauksen aikaisen koejännitteen ja vuotovirran, jotka kirjattiin ylös seuraavana päivänä 100 % kosteustasolla ja joista tulos saatiin laskemalla (punainen katkoviiva). Mittauksen lopussa jännite oli 997 V ja vuotovirta 258 μA, joista eristysvastukseksi saadaan Ohmin lain mukaisesti 3,8 MΩ. Vastaavasti 15 s arvo oli vain 1,5 MΩ. Eristimen pintojen puhdistamisen jälkeen kastepisteessä mitatut tulokset (punainen viiva) olivat huomattavasti parempia, välillä 16,1...123 MΩ.

Mittausten perusteella eristin 1 olisi ollut kuivassa ilmassa edelleen käyttökunnossa jopa ilman pintojen puhdistamista. Kosteuden noustessa pinnan puhtauden merkitys korostui ja tulokset olivat huomattavasti parempia puhdistetulla, kuin likaisella eristimellä. Vielä puhdistettunakin kostean eristimen tulokset jäivät kuitenkin riskialttiille tasolle, eivätkä nousseet kuivan mutta likaisen eristimen tasolle. Likaisen eristimen tulokset korkeissa kosteuksissa olivat kelvottoman huonoja.



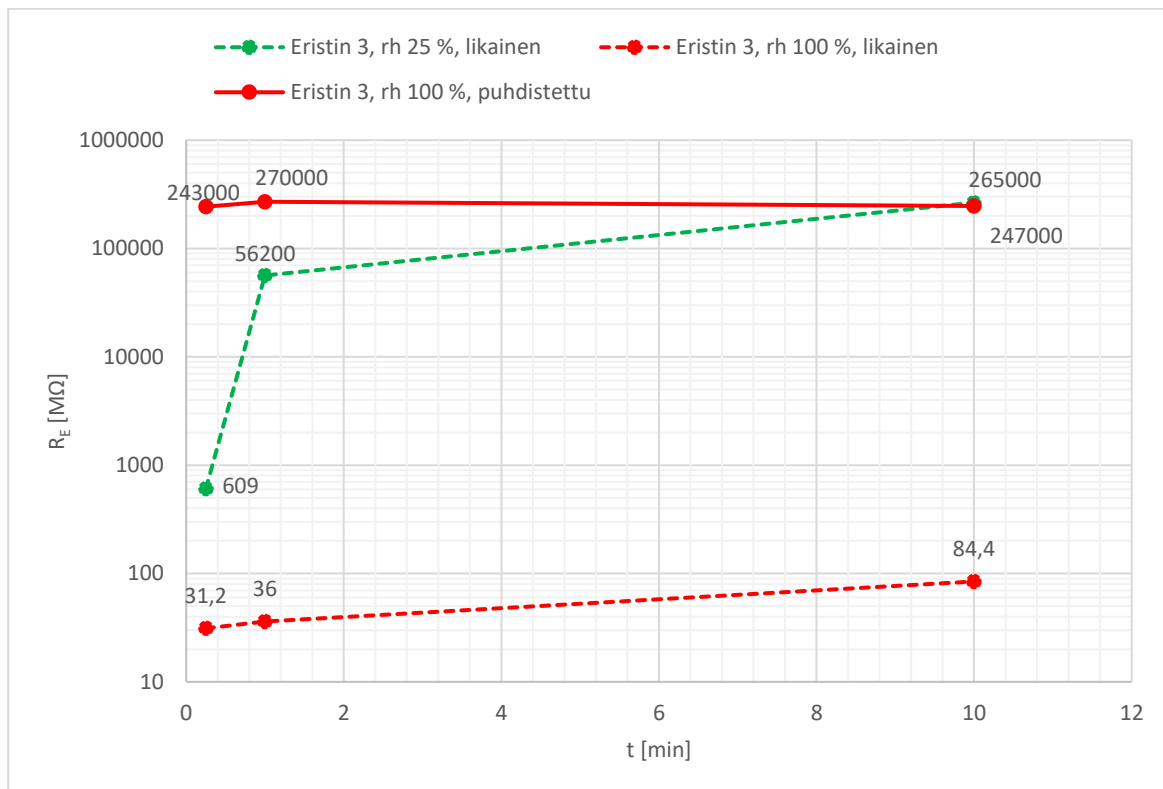
Kuvio 3. Eristimen 2 eristysvastus

Huoneilman kosteudessa eristimen 2 arvot ovat hyvin vastaavat kuin eristimellä 1, tulosten ollessa noin 1...22 GΩ. Ilmankosteuden noustessa 60 prosenttiin (kuvio 3, sininen katkoviiva) eristysvastus tippui noin 100 megaohmin tuntumaan, mikä vaikuttaa vielä jokseenkin turvalliselta tasolta. Tosin eristysvastuksen käyttäytymisessä ajan suhteen on pientä epäloogisuutta, sillä 1 min arvo on hie-man korkeampi kuin 10 min arvo. Kosteusprosentteilla 95 (oranssi katkoviiva) ja 100 (punainen katkoviiva) eristysvastus laski noin 15 megaohmin tasolle, mitä ei voida pitää enää turvallisena. Huomattavaa on, että kastepisteessä eristysvastus ei enää heikentynyt, vaikka pinnalle oli selvästi tiivistynyt kosteutta. Kosteutta absorboinut lika vaikutti siis olevan merkittävämmässä roolissa kuin kastepisarat.

Pinnan puhdistamisen jälkeen kastepisteessä tehty mittaus (punainen viiva) antoi yllättävän tuloksen, sillä 1 min arvo oli selkeästi heikompi kuin 15 s arvo, mikä on epätavallista. Syytä tulokselle ei tiedetä varmaksi, mutta oletettavasti tulos johtui kostean pinnan johtavuuden vaihtelusta. Joka tapauksessa eristysvastus jäi puhdistuksen jälkeenkin kosteisiin olosuhteisiin riittämättömälle tasolle.

Puhdistuksen jälkeen mitattu 10 min arvo kastepisteessä oli 29,2 MΩ. Arvon riittävyys on tulkinnanvarainen. Kuten luvussa 6.1 todettiin, Suomessa voimassa oleva suurjännitestandardi ei anna raja-arvoja ja amerikkalaisen standardin suosituksen mukaan eristysvastuksen tulisi olla 20 GΩ. Amerikkalainen suositus täyttyy juuri ja juuri huoneilman kosteudessa, mutta ei enää korkeammilla kosteuspitoisuuksilla. Amerikkalaisessa standardissa todetaan, että ympäröivä ilmankosteus vaikuttaa

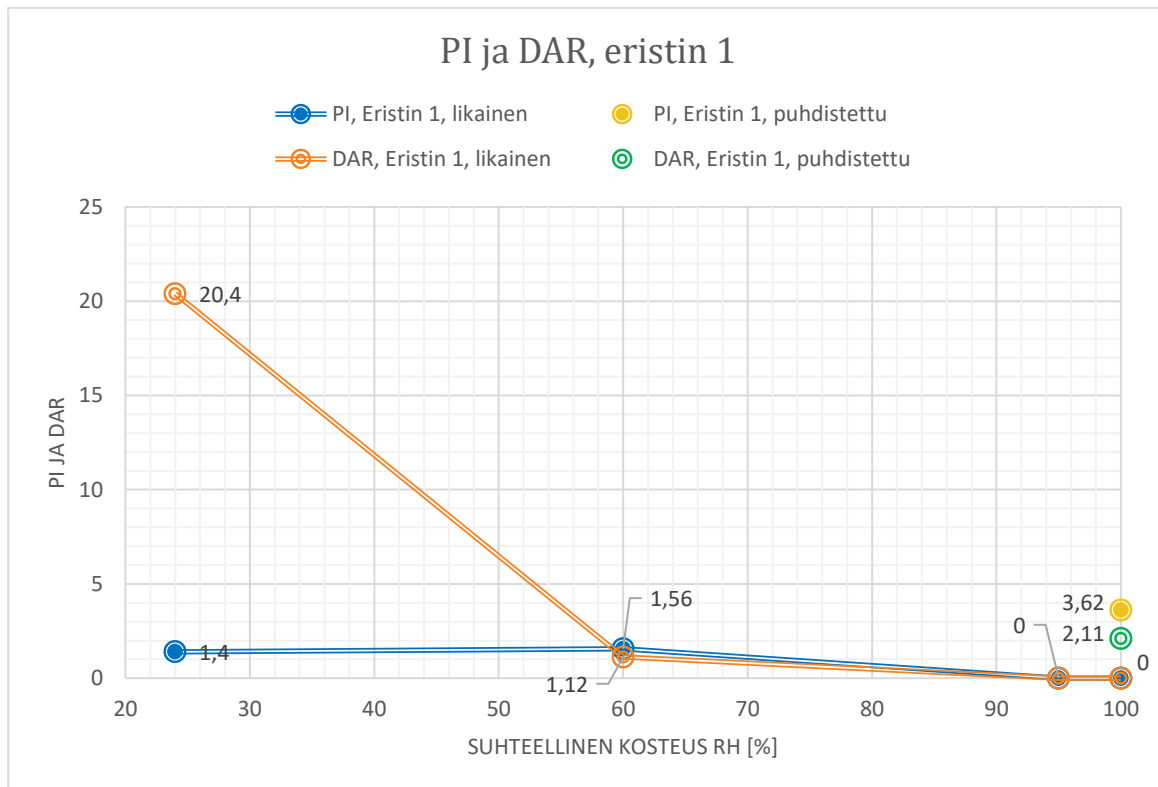
tuloksiin, mutta mitään korjauskertoimia tai kaavaa tuloksen muuttamiseksi normaalisolosuhteita vastaavaksi ei ole esitetty. Standardin mukaan tuloksia tulisi verrata historialliseen trendiin, mutta käytännön sovelluksissa tämä ei ole käyttöpaikalla mahdollista, sillä eristysvastuksen mittaaminen vaatii käyttökätkön ja mitattavan eristimen erottamisen verkosta.



Kuvio 4. Eristimen 3 eristysvastus

Laboratorioajan puutteen vuoksi eristimen 3 mittaukset tehtiin vain huoneilmassa ja kastepisteessä. Tämä eristin oli ulkoisesti tarkasteltuna parhaassa kunnossa ja likaisuutta lukuun ottamatta se näytti uuden veroiselta. Kuvion 4 punaisesta kuvaajasta nähdään, että pinnat puhdistettuina eristysvastus pysyi kastepisteessäkin läpi mittauksen erinomaisella tasolla. Vastaavasti punainen katkoviiva osoittaa, että likaisena eristysvastus tipahtaa merkittävästi kosteissa olosuhteissa ja ylilyönnin riski kasvaa käyttötilanteessa. Puhdistamisen vaikutus oli tässä eristimessä vertailujoukon suurinta.

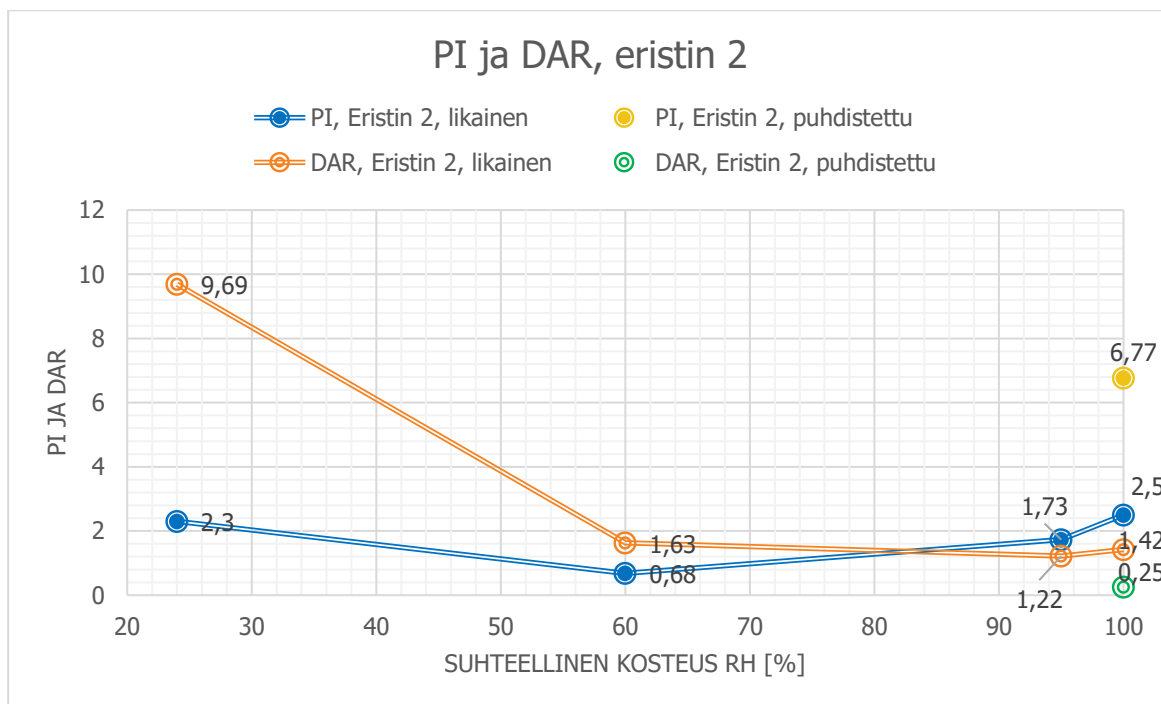
10.2.2 Polarisaatioindeksi ja dielektrinen absorptiokerroin



Kuvio 5. Eristimen 1 polarisaatioindeksi PI ja dielektrinen absorptiokerroin DAR

Kuvion 5 sinisen kuvaajan mukaan eristimen 1 polarisaatioindeksi oli jo kuivassa ilmassa kyseenalaisella tasolla mittaustuloksen ollessa 1,4. Sen sijaan oranssin kuvaajan osoittama dielektrinen absorptiokerroin oli erinomainen tuloksella 20,4. Kosteuden ollessa 95 % eristimen eristyskyky romahti ja vuotovirta kasvoi liian suureksi, jolloin mittarin näyttämänä PI:lle ja DAR:lle molemmille annettiin nolla.

Pintojen puhdistamisen jälkeen kastepisteessä mitattuna PI oli hyvä 3,62 ja DAR erinomainen 2,11, eli puhdistamisella oli merkittävä vaikutus eristeen käyttäytymiseen.



Kuvio 6. Eristimen 2 polarisaatioindeksi PI ja dielektrinen absorptiokerroin DAR

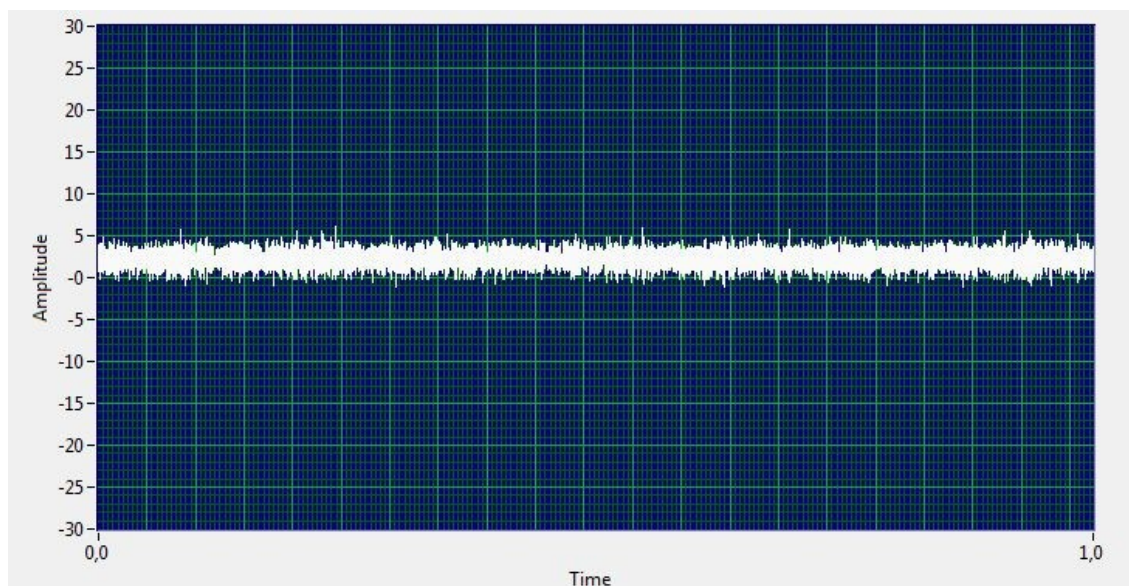
Eristimen 2 huoneilman kosteudessa ennen puhdistamista mitattu PI 2,3 oli hyvällä ja DAR 9,69 erinomaisella tasolla. Suhteellisen kosteuden ollessa 60 % PI oli kyseenalainen 1,63 ja DAR huono 0,68. Molemmat arvot paranivat kosteustasolla 95 % ja edelleen kastepisteessä, mikä oli vastoin ennakko-odotuksia. Kastepisteessä sekä PI 2,5, että DAR 1,42 olivat hyvällä tasolla.

Myös puhdistamisen jälkeen kastepisteessä tehtyyn uusintamittaukseen saatiin odottamaton tulos, kun kuvion 3 mukaisesti eristysvastus 15 sekunnin kohdalla oli yllättävän korkea (29,2 M Ω) ja vastaavasti yhden minuutin kohdalla hyvin matala (4,32 M Ω), minkä vuoksi kuvion 6 vihreän kuvaajan osoittama DAR oli vain 0,25. Yhden ja kymmenen minuutin eristysvastuksia vertaava PI taas nousi erinomaiseen arvoon 6,77.

Tuloksia tulkittaessa PI- ja DAR-mittausten tulokset vaikuttavat tässä tapauksessa toissijaisilta, kun otetaan huomioon molempien eristeiden varsin matalat eristysvastukset lähes kaikissa mittaustilanteissa.

10.3 Akustisen ultraäänimittauksen tulokset

Mittaukset tehtiin ilmaitse LRM (Long Range Module) -anturilla kolmen metrin etäisyydeltä ja keskitajuutena oli 40 kHz. Asetukset pidettiin samoina kaikkien mittausten ajan. Kaikista tilanteista tallennettiin ääninäyte, pois lukien tilanteet, joissa ei havaittu purkauksia. Näitä tilanteita edustamaan tallennettiin yksi ääninäyte, jossa esiintyy vain taustakohina.



Kuva 41. Taustakohina aikatasossa yhden sekunnin ajalta

Laitteiston koekäyttövaiheessa ilmennyt heikon oikosulkuvirran aiheuttama toisiojännitteen aleneminen aiheutti merkittävää haittaa akustisille mittauksille. Tarkoituksena oli tehdä mittaukset 11,5 ja 20 kV jännitteillä, mutta laboratoriolaitteiston toisiojännite pysyi vaaditulla tasolla vain huoneilman kosteudessa tehdyillä mittauksilla. Eristimen 1 kohdalla jo 60 prosentin suhteellisessa kosteudessa testilaitteiston toisiojännite notkahti noin puoleen, minkä vuoksi eristimen 1 mittaustulokset olivat käytännössä kauttaaltaan epäedustavia. Eristimen 2 kohdalla tilanne oli hieman parempi ja toisiojännite notkahti merkittävästi vasta ilmankosteuden ollessa 95 %. Eristimen 1 mittaustuloksia ei ole tästä syystä esitetty ja eristimen 3 akustisia mittauksia ei ehditty tekemään lainkaan.

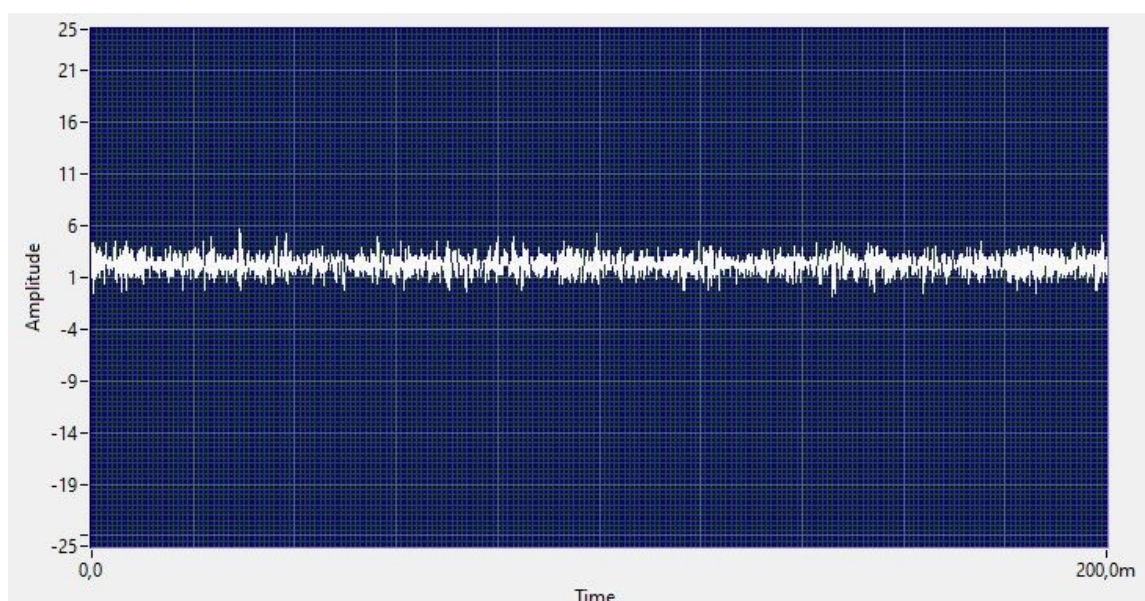
Suurjännitelaitteistossa ilmenneiden ongelmien ja toisiojännitteen mittaustiedon puuttumisen vuoksi tuloksissa esiintyy merkittävää epätarkkuutta. Taulukossa 5 ilmoitetut koejännitteet on arvioitu kullekin kosteustasolle laskemalla ne Ohmin lain ja Kirchoffin jännitelain mukaisesti eristysvastusmittauksen yhden minuutin arvosta $R_{e 1 \text{ min}}$ ja suurjännitelaitteiston suojavastusten arvosta 10,0024 M Ω . Eristysvastuksen katsottiin olevan edustavin minuutin kohdalla, sillä myös akustinen mittaus suoritettiin noin minuutin kuluessa koejännitteen nostamisesta. Käytännössä eristysvastus ei kuitenkaan ole vakio jännitteen kytkemisen jälkeen, joten laskemalla saatiin vain suuntaa antava arvio.

10.3.1 Eristimen 2 mittaustulokset vaihejännitteellä

Taulukko 5. Eristimen 2 akustiset mittaukset vaihejännitteellä

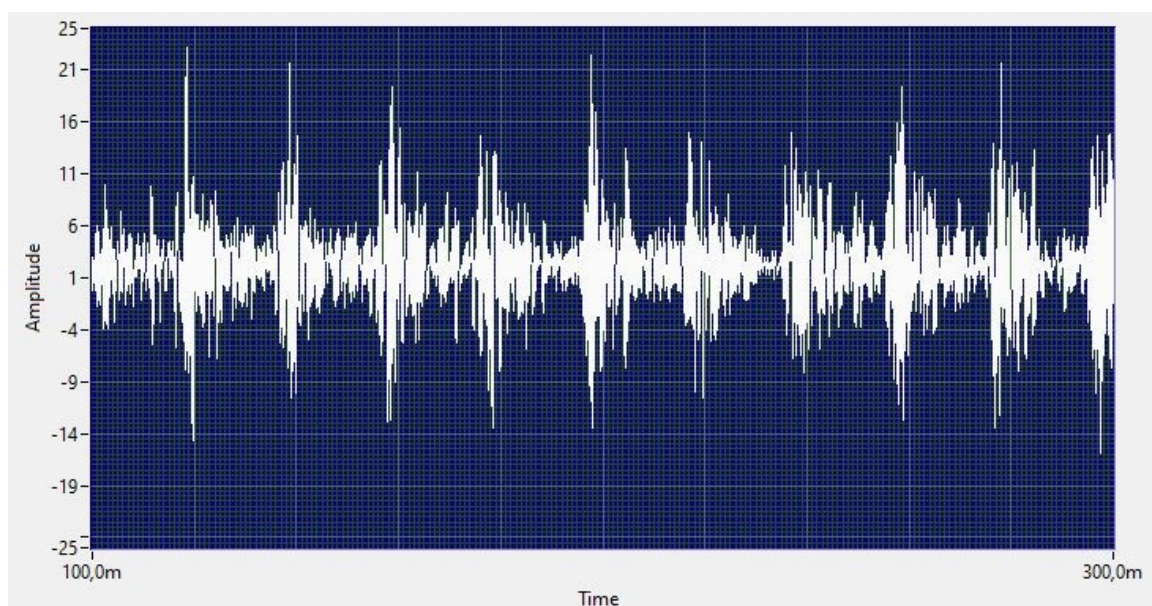
RH [%]	T [°C]	Testijännite [kV]	Etäisyys [m]	Äänenvoimakkuus [dB]	Havainto
22	21	11,5	3	0	Ei äänihavaintoa
60	21	noin 11	3	20	Mittarilla havaittava purkaus, ei kuulohavaintoa, koejännite on laskenut hieman.
95	20	noin 5,5	3	32	Selvä kuulohavainto. Koejännite on laskenut merkittävästi.
100	21	noin 4,5	3	35	Voimakas kuulohavainto. Koejännite on laskenut merkittävästi.

Taulukon 5 arvoista voidaan todeta, että suhteellisen kosteuden noustessa pintapurkauksen äänen-voimakkuus kasvaa. Koejännitteen notkahtaminen vähentää osittaispurkausten määrää ja voimakkuutta, mikä kompensoi kosteuden nousun vaikutusta. Normaalissa käyttötilanteessa (vahvassa verkossa) jännitteen laskua ei tapahtuisi ja purkausten äänenpaineen kasvaminen olisi oletettavasti nyt nähtyä voimakkaampaa. Kosteuden noustessa koejännite tippui arviolta alle puoleen nimellisestä, mutta ääni voimistui vielä siitäkkin huolimatta. Huoneilmassa suhteellisen kosteuden ollessa 22 % ei havaittu lainkaan ääntä tai ultraääntä. Kosteustasolla 60 %, kun koejännite oli vielä hyväksyttävällä tasolla (noin 11 kV), kuultiin purkausääniä ultraäänimittarilla, muttei korvakuulolla. Kosteustasolla 90 ja 100 % ääni oli jo selvästi korvalla kuultavissa.

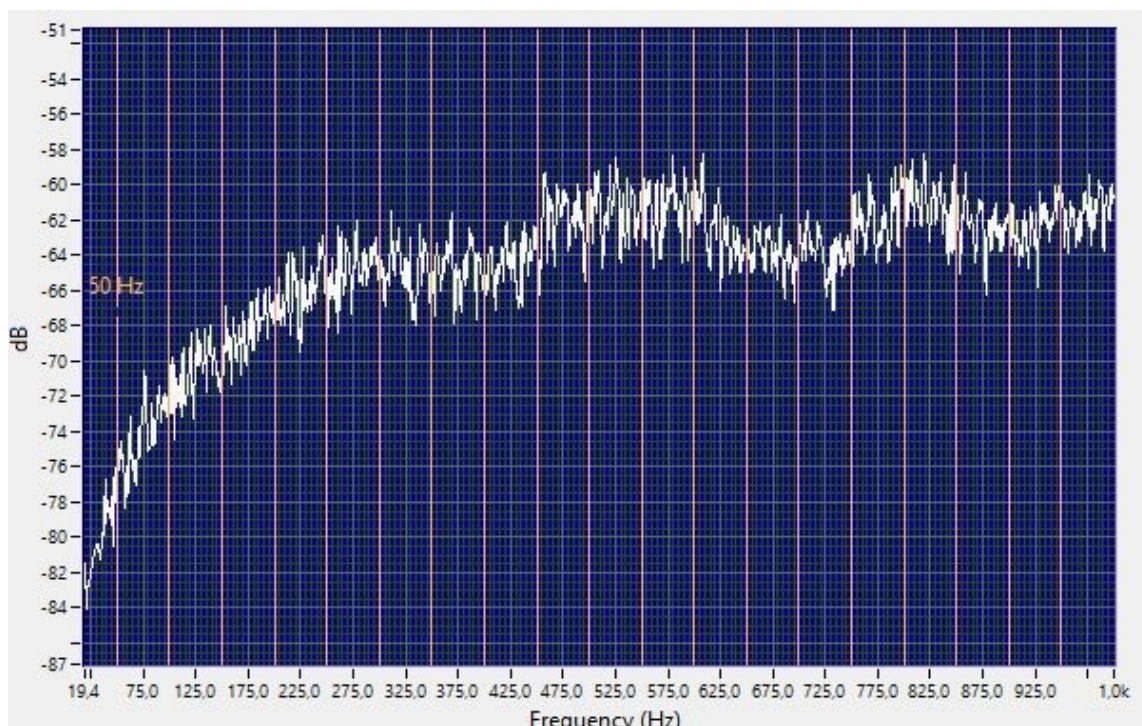


Kuva 42. Eristimen 2 ääninäyte aikatasossa, 11,5 kV, RH 22 %

Huoneilman kosteudessa 11,5 kV jännitteellä tallennettu ääninäyte kuvassa 42 vastaa taustakohinaa, eli siinä ei ole merkkejä purkauksista.

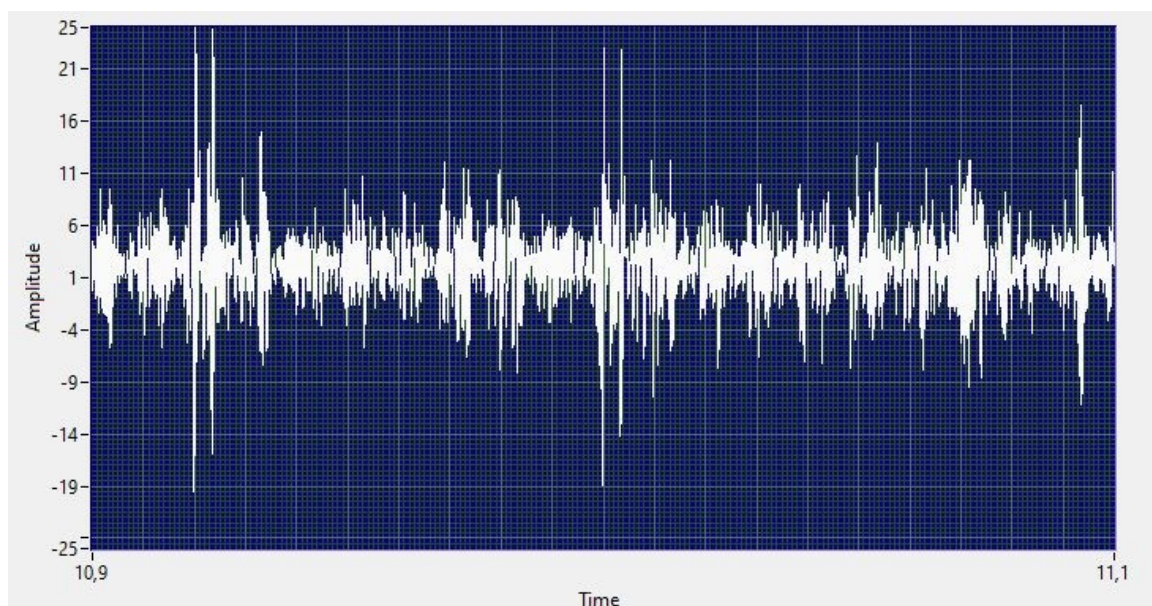


Kuva 43. Eristimen 2 ääninäyte aikatasossa, noin 11 kV, RH 60 %

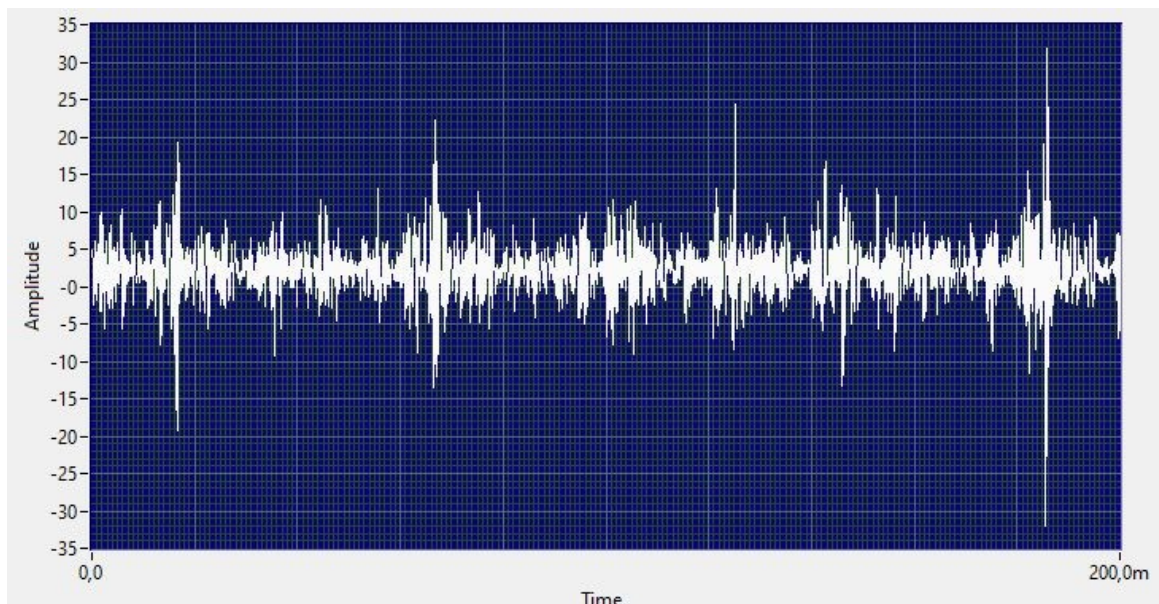


Kuva 44. Eristimen 2 ääninäyte taajuustasossa, noin 11 kV, RH 60 %

11 kV jännitteellä ja 60 % kosteudessa havaitaan jo selvää purkausaktiiviteettia. Kuvassa 43 on esitetty ääninäyte aikatasossa 200 millisekunnin ajalta, eli se sisältää jännitteen siniaallostaa kymmenen jaksoa. PD-aktiiviteettia esiintyy säännöllisesti ja purkauksia on runsaammin joka toisella puolijaksolla, puolijaksojen välisen amplitudin eron ollessa noin 2–3 kertainen. Purkauksien sijainti puolijaksoilla ei ole kovin tarkasti toistuvaa. Toistuvuuden epätarkkuus nähdään paremmin kuvasta 44 taajuustasossa tarkasteltuna, missä ei esiinny 50 Hz harmonisia piikkejä. Kyseessä on melko tyypillinen pintavirtapurkauksen aiheuttama ääni, missä purkaukset sijoittuvat verrattain laajasti puolijaksojen huippujen ympärille.



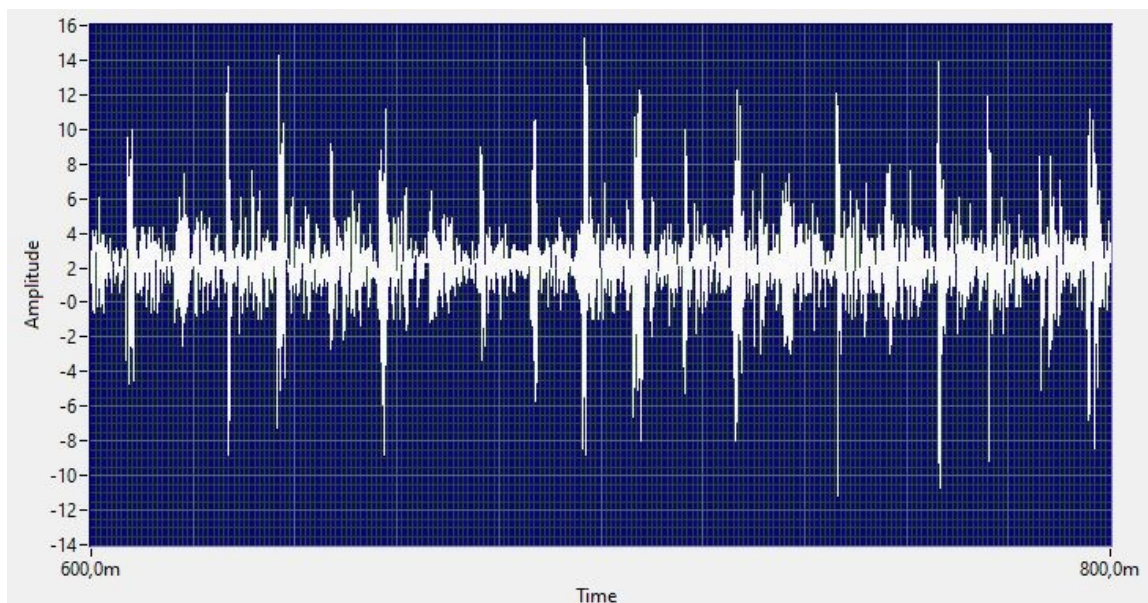
Kuva 45. Eristimen 2 ääninäyte aikatasossa, noin 5,5 kV, RH 95 %



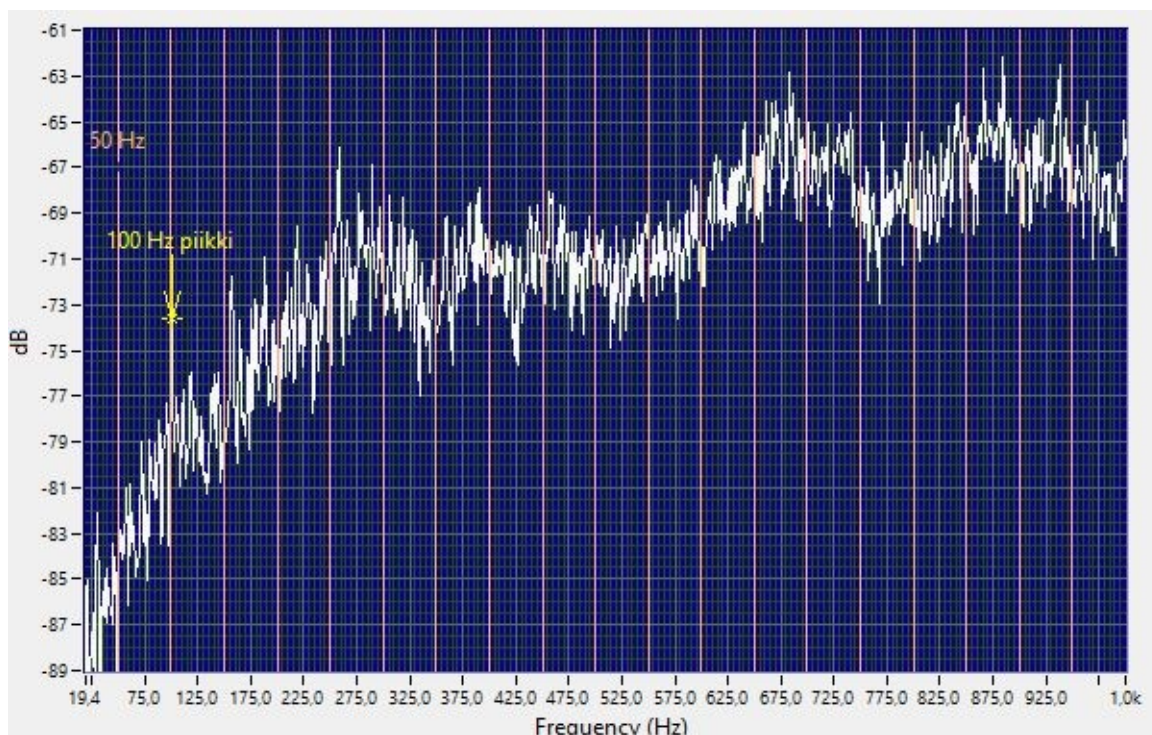
Kuva 46. Eristimen 2 ääninäyte aikatasossa, noin 4,5 kV, RH 100 %

Suhteellisen kosteuden ollessa 95 tai 100 % PD-aktiiviteetti (kuvat 45 ja 46) oli voimakkaampaa ja muuttanut luonnettaan. Nyt toistuvat purkaukset olivat tasaisempia puolijaksojen kesken, joskin voimakkaampia purkauksia esiintyi ilman säännöllisyyttä. Kuvassa 45 äänen amplitudi on selvästi alhaisempi kuin taulukossa 5 ilmoitettu 32 dB, koska kosteustasoilla 95 ja 100 % äänenpaine vaihteli ajoittain voimakkaasti mittausten aikana. Äänenpaineen vaihtelusta on kerrottu tarkemmin luvussa 10.3.3.

10.3.2 Eristimen 2 mittaustulokset pääjännitteellä



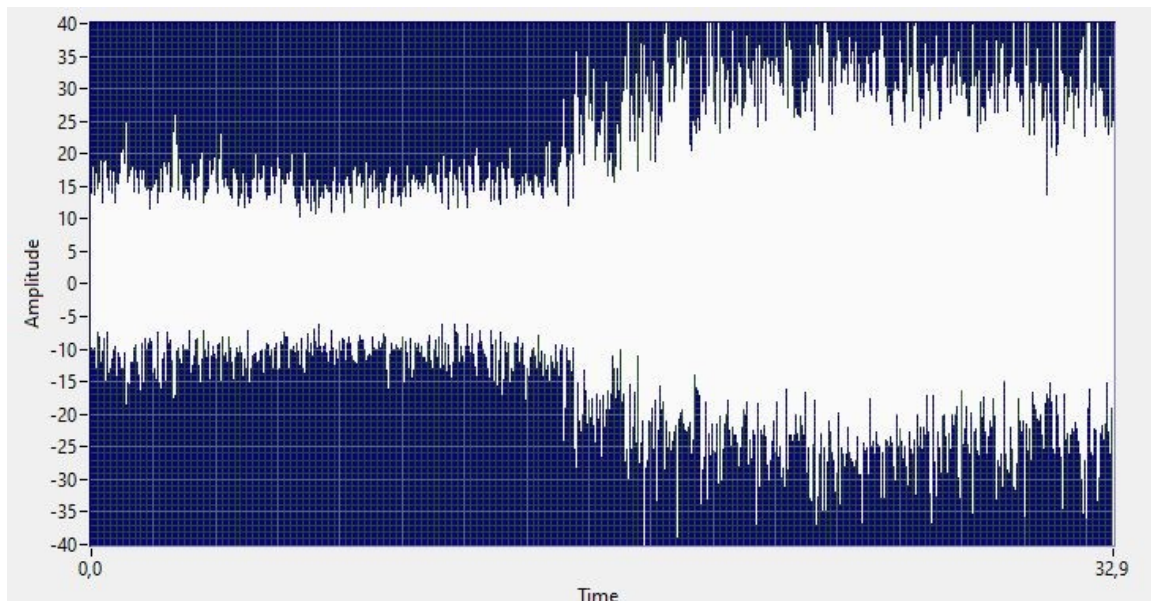
Kuva 47. Eristimen 2 ääninäyte aikatasossa, 20 kV, RH 22 %



Kuva 48. Eristimen 2 ääninäyte taajuustasossa, 20 kV, RH 22 %

Mittauksissa testattiin myös jännitteen nostamisen vaikutusta purkausaktiiviteettiin. Kuvan 42 mukaisesti, ilman suhteellisen kosteuden ollessa 22 % vaihejännitteellä 11,5 kV, ei kuultu lainkaan purkausääniä. Jännitteen nosto pääjännitteeseen 20 kV kosteustason pysyessä samana (kuva 47) aiheutti ultraäänimittarilla kuultavan purkauksen, jonka äänenpaine oli noin 6 dB, hetkellisten huippuarvojen ollessa noin 15 dB. Ääni vaikutti aluksi koronapurkaukselta, sillä toistuvuus oli aikatasossa suhteellisen tarkkaa ja taajuustasossa (kuva 48) näkyi lievä piikki 100 Hz kohdalla. Taajuustasossa 100 Hz monikerrat kuitenkin puuttuvat ja aikatasossakin näkyy epäsäännöllisyyttä piikkien välillä, joten kyseessä oli ennemminkin pienehkö pintapurkaus. Jännitteen nosto pääjännitteen tasolle aiheutti siis matalassakin kosteudessa pintapurkauksia, joskaan ne eivät olleet voimakkaita. Käytännön sovelluksissa tällaisia jännitteen nousuja tapahtuu vain hetkellisesti vikatilanteissa, joten ilmiöllä ei oletettavasti olisi mainittavaa vaikutusta eristimen elinikään. Korkeammassa ilmankosteudessa tilanne voi kuitenkin olla toinen.

10.3.3 Purkauksen intensiteetin vaihtelu



Kuva 49. Purkauksen intensiteetin muutos kesken mittauksen

Kuvassa 49 nähdään äänen nopea voimistuminen kesken mittauksen. Kuvan mittaus on tehty eristimellä 1, 11 kV jännitteellä ja 60 % ilmankosteudessa. Vastaavaa tapahtui korkeammissa ilmankosteuksissa myös eristimellä 2. Ääni saattoi vastaavasti ajan kuluessa myös laskea. Aiemmin työssä esitettyjen teorioiden perusteella ilmiölle voi olla ainakin kaksi selitystä:

- 1a) Äänen voimistuessa: Eristimen kostea ja likainen pinta on jatkuvan johtavuuden tilassa ja purkauksen intensiteetti pientä. Voimakkaampia purkauksia alkaa syntymään kuivuvien alueiden yli, jolloin ääni voimistuu. 1b) Äänen vaimentuessa: Eristimen pinta kuivuu riittävän paljon ja laajasti, jolloin pintavirran ryömintämatka pitenee ja purkauksia ei enää synny niin runsaasti.
- 2a) Äänen voimistuessa: Eristimen pinnan eristysvastuksen paraneminen aiheuttaa heikon verkon vuoksi koejännitteen nousemista, jolloin purkaukset voimistuvat. 2b) Äänen vaimentuessa: Eristimen pinnan eristysvastuksen heikkeneminen aiheuttaa koejännitteen laskeamista, jolloin purkauksen intensiteetti laskee.

Vaihtoehdot 1 ja 2 aiheuttavat päinvastaisen vaikutuksen purkausaktiiviteettiin, eikä voida varmuudella sanoa, kumpi oli mittauksen aikana merkitsevämpi. Akustisen PD-mittauksen kannalta koetilanne oli kaikkiaan hyvin ongelmallinen ja aiheutti kosteuden noustessa merkittävää epätarkkuutta, minkä vuoksi mittauksia ja tulkintoja tulee käsitellä ainoastaan suuntaa antavina. Mittaukset tulisikin uusia vahvemmassa verkossa, missä koejännite ei pääsisi notkahtamaan merkittäväsi.

10.3.4 Purkauksen havainnointi korvakuulolla

Mittauksen aikana todettiin, että purkausääni alkoi kuulua myös korvakuulolla ultraäänimittarin näyttämän ollessa noin 28 dB. Tällöin äänessä on mukana riittävästi myös kuuloalueelle osuvia taajuuksia. Tämä tukee kentällä tehtyjä havaintoja, sillä yli 30 dB:n näyttämien yhteydessä on käytännössä

poikkeuksetta tehty myös kuulohavainto. Näissä tapauksissa eristeen pintojen puhdistaminen on yleensä ollut jo liian myöhäistä, eli purkaukset eivät ole loppuneet puhdistamisen myötä.

Mittalaitteen ominaisuudet, mittaustaaajuus, purkaustyyppi ja etäisyys vaikuttavat merkittävästi kuulo- ja havaintokynnykseen. Kunnossapidon kannalta sopivat hälytysrajat tuleekin määrittää mittalaitteen, mittaustavan, sekä mitattavan laitetyypin ominaisuudet ja mittaushistoria huomioiden. Työssä käytetyllä mittalaitteella ultraäänisignaali on havaittavissa kuulokkeista mittalaitteen näyttämän ollessa 1 dB.

10.4 Yhteenveto mittaustuloksista

Eristysvastusmittauksissa kävi ilmi, että jopa normaalikuntoisen eristimen eristyskyky alkaa pettämään ilmankosteuden noustessa, jos sen pinta on likaantunut. Eristysvastusmittauksen tuloksista nähtiin myös, että eristintä, johon oli jo syntynyt pintavirtojen aiheuttamia jälkiä, ei enää saatu puhdistamalla turvalliseen käyttökuntoon. Sen sijaan visuaalisesti tarkasteltuna hyväkuntoiselta näyttävä eristin saatiin puhdistamalla edelleen turvalliseen käyttökuntoon.

Akustisissa osittaispurkausmittauksissa huomattiin, että myös huonokuntoinen tai likainen eristin voi vaikuttaa kuivassa ilmassa mitattuna oikein hyväkuntoiselta, mutta pintapurkausten määrä ja voimakkuus kasvavat nopeasti ilmankosteuden noustessa. Vaikka akustiset mittaukset eivät onnistuneet toivotulla tavalla johtuen suurjännitelaitteiston rajoitteista, tulokset olivat kuitenkin selkeästi samansuuntaisia eristysvastusmittausten kanssa.

11 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli antaa tietoa ja ymmärrystä akustisesti mitattujen osittaispurkausten vakavuuden määrittelyyn erilaisten ympäristön olosuhteiden vallitessa. Kokonaisuutena työ oli erittäin mielenkiintoinen ja haasteita ilmeni vähintäänkin riittävästi. Alkuperäinen mittaussuunnitelma ei toteutunut materiaalipuutteiden vuoksi, joten suunnitelmaa oli vaihdettava viime hetkillä laboratoriomittausten alkaessa. Tarkoituksenmukaisesti toimivan sääkaapin rakentaminen oli melko työlästä ja suurjännitelaitteiston ongelmat veivät merkittävästi laboratorioaikaa itse mittauksilta. Kaikkien vaikeuksien jälkeenkin lopputulokseen voidaan olla tyytyväisiä. Savonia-ammattikorkeakoulun suurjännitelaboratorioon saatiin rakennettua sääkaapin prototyyppi, minkä pohjalta saatuja kokemuksia voidaan jatkojalostaa ja käyttää myös muihin suurjännitetesteihin. Laboratoriokokeissa saatiin mittauksiin liittyvistä epätarkkuuksista huolimatta johdonmukaisia tuloksia kosteuden ja likaantumisen merkittävästä vaikutuksesta eristimen eristyskykyyn ja pintapurkauksiin. Kentällä tehdyissä akustisissa mittauksissa aiemmin tehtyjen havaintojen mukaan pinnalta "arpeutuneen" eristimen PD-aktiiviteetti on puhdistamisen jälkeen vain hiipunut, muttei kuitenkaan loppunut ja vikaantuminen on jatkanut etenemistään. Nyt tehtyjen eristysvastuskokeiden tulokset tukevat näitä havaintoja. Saatujen tulosten valossa voidaan todeta, että jos eristeen pinnoilla näkyy pintavirtojen aiheuttamia jälkiä, eristin kannattaa uusida. Pelkästään likaantunut eristin voidaan taas puhdistaa valmistajan ohjeen mukaisesti ja puhdistamisen tulisi olla ennakoivaa.

Työssä saadut tulokset eivät odotetusti tarjoa absoluuttisia arvoja akustisesti mitattujen osittaispurkausten vakavuuden arviointiin, vaan mittaustulosten arviointi vaatii aina vertailua vastaavaan referenssiin. Suuntaa antavien korjauskertoimien määrittäminen ulkoisten olosuhteiden vaikutuksista pintapurkauksiin olisi periaatteessa mahdollista, mutta se vaatisi huomattavasti laajempaa otantaa ja luotettavammin toistettavissa olevia mittauksia. Lisäksi kertoimien soveltaminen eri mittalaitteiden ja eristerakenteiden välillä voisi olla vaikeaa. Saatujen tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että kuivassa ilmassa tehty pienikin ultraäänihavainto voi olla merkki voimakkaasti alentuneesta jännitelujuudesta suuremmalla ilmankosteudella. Vastaavasti tulosten perusteella voidaan todeta, että liian kuivalla ilmalla tehdyssä akustisessa mittauksessa vakavakin eristysongelma voi jäädä huomaamatta. Mittauksiin soveltuvan ilmankosteuden alarajan selvittäminen vaatisi lisätutkimusta.

Jatkotutkimuksen tarvetta olisi vastaavien kokeiden järjestämisessä suuremmalla ja paremmin toistettavalla otannalla, sekä vertailussa standardisoituun PD-mittaukseen. Tässä yhteydessä tutkittavana voisi olla jokin liikkuviin kenttämittauksiin soveltuva, eri mittausten menetelmiä yhdistelevä laite, jolla olisi mahdollista havaita myös eristeiden ja kaapeleiden sisäisiä purkauksia. Eristysongelmien tutkimisen mahdollistamiseksi Savonia-ammattikorkeakoulun suurjännitelaitteiston oikosulkuvirtaa täytyisi vahvistaa, jotta se sietäisi nykyistä suurempia vuotovirtoja ilman toisiojännitteen notkahtamista.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

- ABB Ltd. (Helmikuu 2020a). Catalog. *NAL/NALF MV indoor switch-disconnector and switch-fuse combination*.
- ABB Ltd. (Maaliskuu 2020b). Manual. *Indoor Air Switch-disconnector, Installation and operating instructions*.
- Araújo, E.;Araújo, K.;Pereira, O.;Ribeiro, P.;& de Melo, T. (2006). *Fiberglass Wastes/Polyester Resin Composites: Mechanical Properties and Water Sorption*.
- Aro, M.;Elovaara, J.;Karttunen, M.;Nousiainen, K.;& Palva, V. (2015). *Suurjännitetekniikka*.
- Czaszejko, T.;& Sookun, J. (2014). 2014 Electrical Insulation Conference. *Acoustic Emission from Partial Discharges in Solid Dielectrics*. Philadelphia.
- EC&M. (1. 1. 1996). Mittaus ja Testaus, Artikkelit, EC&M -sivusto. *Understanding Insulation Resistance Testing*.
EC&M. Haettu 23. 6. 2020 osoitteesta <https://www.ecmweb.com/test-measurement/article/20898954/understanding-insulation-resistance-testing>
- Fuhr, J. (10. 2005). Artikkelit. *Procedure for Identification and Localization of Dangerous PD Sources in Power Transformers*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 5; October 2005.
- Giussani, R. (2014). *PD Monitoring of Power Electronic Converters*.
- Hamed, J. (2016). *Partial Discharge Source Classification Using Pattern Recognition Algorithms*.
- HV Technologies, Inc. (12. 4. 2019). *The Basics of Partial Discharge Testing*. Haettu 24. 6. 2020 osoitteesta <https://hvtechnologies.com/the-basics-of-partial-discharge-testing/>
- Karjalainen, M. (2000). *Hieman akustiikkaa*. Teknillinen korkeakoulu.
- Kyoritsu Electrical Instruments Works, Ltd. (ei pvm). Instruction Manual. *High Voltage Digital Insulation Tester KEW 3128*.
- Malinen, V. (2022). *Osittaispurkauksessa vapautuvia energiamuotoja*.
- Malinen, V. (2022). *Ideaalinen ääniaalto*.
- NETA. (2011). Standardi ANSI/NETA MTS 2011. *Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems*.
- Neutelings, I. (5. 4. 2022). *Graphics with TikZ in LaTeX*. Haettu 1. 5. 2022 osoitteesta Graphics with TikZ in LaTeX: <https://tikz.net>
- Paikallis-Sähkö Oy. (ei pvm). *Tarkastuskohteissa tehtyjä havaintoja*.
- Paoletti, G.;& Golubev, A. (1999). *Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems*.
- Poole, I. (ei pvm). *FFT Spectrum Analyzer, Electronics Notes*. Haettu 1. 5. 2022 osoitteesta Ian Poolen kirjoittama ja ylläpitämä sivusto: <https://www.electronics-notes.com/articles/test-methods/spectrum-analyzer/fft-fast-fourier-transform-spectrum-analyser.php>
- Produal Oy. (16. 2. 2016). Tekniset tiedot. *KLK 100 - Duct Humidity and Temperature Transmitter KLK*.
- Rugged Monitoring. (28. 5. 2020). *Online Partial Discharge Measurements in Underground Power Cable*. Haettu 1. 5. 2022 osoitteesta <https://www.ruggedmonitoring.com/blog/guidelines-to-perform-online-partial-discharge-measurements-in-underground-power-cable/5e58add9cde096000141a77e>
- Sikorski, W.;& Ziomek, W. (2012). *Detection, Recognition and Location of Partial Discharge Sources Using Acoustic Emission Method*.
- Sisäilmäyhdistys ry. (ei pvm). *Ilman ominaisuudet*. Haettu 1. 5. 2022 osoitteesta Sisäilmäyhdistys ry:n sivusto: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilman-ominaisuudet>

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (29. 6. 2001). Standardi. *High-voltage test techniques - Partial discharge measurements (IEC 60270:2000)*.

Tammertekniikka. (2015). *Tekniikan KAAVASTO* (14. painos p.).

UE Systems Inc. (ei pvm). *UP 10000 Instruction Manual v 3.01*.

Äänipää. (27. 6. 2020). *Äänipään sivusto*. Haettu 1. 5. 2022 osoitteesta Äänipää:

<https://webpages.tuni.fi/aanipaa/index.html>