



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Henry Ignatius

## Akustinen osittaispurkausmittaus suurjännitekaapeleiden ulkopäätteille

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

5.9.2018

Tekijä Otsikko	Henry Ignatius Akustinen osittaispurkausmittaus suurjännitekaapeleiden ulkopäätteille
Sivumäärä Aika	82 sivua + 3 liitettä 5.9.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Sähköinsinööri Ville Knuutinen Yliopettaja Heikki Valmu
<p>Opinnäytetyön aiheena oli tutkia, miten Baur PD-SGS online eli käytönaikainen osittaispurkausmittalaite soveltuu 110 kV:n ja 400 kV:n suurjänniteulkopäätteiden osittaispurkausmittauksiin. Tutkimus tehtiin Suomen kantaverkkoyhtiön Fingrid Oyj:n sähköasemilla yhteistyössä Eurolaite Oy:n kanssa.</p> <p>Teoreettinen taustatyö tehtiin selvittäen osittaispurkauksien ilmiöt ja osittaispurkaustyypit suurjännitekaapeleiden ja ulkopäätteiden eristyksissä. Teoria sisältää sähkökenttien vaikutukset eristykseen. Olennaista on ymmärtää eristysrakenteiden vaikutus sähkökenttien tiheytemien tasoittamisessa. Osittaispurkaukset ovat akustisen emission lähde ja ultraäänitaajuisten aaltojen synnyttäjä. Mittauksissa käytettiin parabolisen peilin akustista sensoria, jonka keskitaajuus on 40 kHz. Mittalaitteen taajuusalue on lähinnä niitä ultraäänitaajuuksia, joissa osittaispurkaukset syntyessään esiintyvät ulkopäätteissä ja saavat aikaan akustista emissiota. Haitallisia osittaispurkauksia voi tapahtua eristeissä ja sähköeristyksissä.</p> <p>Opinnäytetyön tutkimus toteutettiin mittaamalla akustista emissiota kaksi kierrosta viidellä sähköasemalla, joista ensimmäinen tehtiin talvella ja toinen kesällä. Lisäksi yksi ylimääräinen sähköasema mitattiin kesäkierroksella. Tällä pystyttiin tutkimaan kylmyyden ja kosteuden vaikutusta mittaustulosten luotettavuuteen ulkopäätteillä. Talvella ilmankosteuden, huurteen ja lian yhteisvaikutus synnyttää herkästi koronapurkauksia. Jäätynyttä kosteutta ulkopäätteiden pinnoilla on hankala nähdä ja mittavirhettä on vaikeaa välttää. Koronan mittaamisen voi paremmin välttää ympärillä olevista lasieristimistä ja ilmajohdoista kesäaikaan. Kesällä mittaustulokset ovat luotettavia ulkopäätteiden kunnossapidon päätösten kannalta.</p> <p>PD-SGS parabolisen peilin kanssa soveltuu ulkopäätteiden ennakoivaan kunnossapitoon ja myös uusien asennusten tarkastamiseen. Täsmällistä ja vertailukelpoista tietoa päätteiden kunnosta antaa samalta etäisyydeltä tehdyt mittaukset saman tyyppin ulkopäätteille. Osittaispurkausmittaukset tuottavat tietoa eristeiden kunnosta ja kunnossapidon tai puhdistuksen tarpeesta. Tutkimus osoittaa osittaispurkausmittalaitteen kelvolliseksi mittaustyökaluksi suurjänniteulkopäätteille lämpötilan ollessa plussan puolella. Tutkimuksen tuloksena syntyi mittaustietopankki sekä Fingridin käyttöön soveltuva työohje mittausten suorittamisesta ulkokaapelipäätteille.</p>	
Avainsanat	akustinen emissio, osittaispurkaus, ultraäänisensori, parabolinen peili

Author Title Number of Pages Date	Henry Ignatius Acoustic Partial Discharge Measurement for High Voltage Outdoor Terminations 82 pages + 3 appendices 5 September 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Specialisation option	Electric Power Engineering
Instructors	Ville Knuutinen, Electrical Engineer  Heikki Valmu, Principal Lecturer
<p>The purpose of the research of this thesis was to ensure and find out if Baur PD-SGS device is applicable for 110 kV and 400 kV high voltage outdoor termination partial discharge measurements. The thesis was made for Finland's transmission system operator Fingrid in cooperation with Eurolaite Oy.</p> <p>The theoretical background for this thesis is partial discharge causes and phenomena for high voltage outdoor terminations and high voltage cable dielectrics. The theoretical part of the thesis includes information on how electric fields affect insulation and it examines the theory of partial discharge types. The partial discharges are a source of acoustic emission. This measuring device uses parabolic reflector with convertor average frequency of 40 kHz. Studies show experimentally that it is the best frequency to detect ultrasounds generated by partial discharges. Harmful partial discharges may occur in insulation or in insulators.</p> <p>The study for the thesis was conducted by measuring acoustic emission in five substations with two measuring rounds. In addition, one more substation was added to the second measuring round. The challenges in completing the measurements were surrounding components which generate corona discharges causing acoustic emission and interfering measurements for outdoor terminations. In winter time humidity, moist and dirt in the surface of the terminations increase the corona discharges because it causes frost and ice to build to the surfaces. Condensed moisture cannot be detected easily just by looking at the termination. The measuring round done in the summer is more conclusive and gives more valid results for the maintenance.</p> <p>The conclusion of the thesis is that one of the key factors is proactive condition control. Comparing acoustic measurement values to exactly the same kind of outdoor termination results measured from the same distance, it is possible to examine results afterwards. Comparing gives more accurate information about the differences in termination conditions. The study shows the PD-SGS device with a parabolic reflector is suitable for conducting these types of measurements. For determining lifespan of outdoor terminations, more studies are needed. As the result of the thesis, a measuring data base with instruction manual was created for Fingrid, on how to conduct measurements for outdoor terminations.</p>	
Keywords	acoustic emission, partial discharge, ultrasound sensor, parabolic reflector

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Eristeet sähkökentässä	3
2.1	Kentänvoimakkuus, sähkövuo, sarja- ja rinnakkaiseristykset	3
2.1.1	Sähkövuon tiheys ja permittiivisyys	5
2.1.2	Sarja- ja rinnakkaiseristykset	8
2.2	Sähkökentän taipuminen ja kentän homogeenisuus	10
2.3	Sähkökentän vaikutus eristeeseen	12
3	Osittaispurkaukset ja niiden tyypit	14
3.1	Sisäiset osittaispurkaukset	14
3.2	Pinta- ja liukupurkaukset	17
3.3	Koronapurkaukset	19
3.4	Päätteiden eristerakenteiden vanheneminen	20
4	Suurjännitekaapelit ja kaapelipäätteet	23
4.1	Kaapelit ja niiden eristykset	23
4.2	Ulkokaapelipäätteet ja eristysrakenteet	24
5	Osittaispurkauksien akustisen mittauksen teoria	30
5.1	Akustinen ultraäänisensori ja äänenpaine	31
5.2	Ultraääni osittaispurkauksien synnyttämänä	37
5.2.1	Osittaispurkaukset akustisen emission lähteenä	38
5.3	Akustisen mittaustavan herkkyys	39
6	Osittaispurkausmittausten järjestelyt Fingridin kanssa	41
6.1	Alkuasetelma ja akustisen mittalaitteen käyttöönotto	41
6.2	Baur PD-SGS testaus Metropolian Suurjännitelaboratorion testitiloissa	42
6.3	Sähköasemamittausten järjestelyt Fingrid Oyj:n kanssa	46
7	Akustinen osittaispurkausmittaus ulkopäätteille sähköasemilla	48
7.1	Käytönaikaiset osittaispurkausmittaukset sähköasemilla 1–6	48
7.2	Mittaustapa ja turvallisuus	67
8	Mittalaite Baur PD-SGS ja Sonospot L55	71
8.2	Baur-anturit – kapasitiivinen ja akustinen sensori	73



8.3	Baur-akustinen sensori	75
8.4	Sonospot L55	76
9	Mittaustavan kehittäminen ja luotettava mittaustapa	79
10	Johtopäätökset	81
	Lähteet	83
	Liitteet	
Liite 1.	Metropolia Suurjännitelaboratorio	
Liite 2.	Mittauspöytäkirjat sähköasemien osittaispurkausmittauksista	
Liite 3.	Käyttöohje (En): Baur PD-SGS Kannettava osittaispurkausmittari	

## 1 Johdanto

Fingrid Oyj ja Eurolaite Oy ovat sopineet yhteistyöprojektista ulkokaapelipäätteiden akustisiin osittaispurkausmittauksiin liittyen. Opinnäytetyön ja projektin tilaajana on Fingrid Oyj ja Eurolaite Oy on toimittaja yhteistyöprojektissa. Työn tarkoituksena on selvittää soveltuvatko akustiset osittaispurkausmittaukset suurjännitekaapelien ulkopäätteiden kunnonvalvontaan. Projektin aikana suoritettiin ulkopäätteiden akustisia mittauksia Fingridin sähköasemilla. Mittaukset suoritettiin Eurolaitteen omistamalla ja tähän tarkoitukseen soveltuvalla mittalaitteella.

Teoriaa käydään läpi ajatellen ilmiöitä, joita esiintyy suurjännitekaapeleiden ulkopäätteissä. Aluksi käydään perusteita läpi sähkökentän ilmiöitä, jotta lukija ymmärtää ratkaisuja ja muotojen tarkoitusta ulkopäätteiden suurjännitekaapeleiden eristeissä. Osittaispurkaustyyppit on ymmärrettävä, jotta tietää mistä tutkimuksessa on kyse. Akustinen osittaispurkausmittauksesta esitellään teoria, joka johdattelee käytännön mittauksiin. Käsitellään lyhyesti vaaditut järjestelyt ja laitteen toiminnan alkutestaus.

Tutkimuksesta nähdään millaiset tulokset osittaispurkausmittaukset akustisesti parabolisella peilillä 110 kV ja 400 kV sähköasemilla talvella ja kesällä antoivat. Talviolosuhteissa mitatuilla tuloksilla on eroja kesälämpötiloissa mitattuihin tuloksiin. Tutkimusta tehtiin viidellä sähköasemalla kahteen kertaan ja yksi ylimääräinen mittaus kuudennelle 110 kV:n sähköasemalle. Viidestä sähköasemasta yksi oli 400 kV:n asema ja muut 110 kV:n asemia. Tutkimuksessa pohditaan luotettavaa mittaustapaa ulkopäätteille ja saatuja tuloksia. Kannettavaa Baur PD-SGS mittalaitetta varustettuna parabolisella peilillä esitellään sähköasemien osittaispurkausmittausten jälkeen tarkemmin. Osittaispurkausmittalaitetta PD-SGS ja parabolisen peilin ominaisuuksia käydään tarkemmin läpi käytönaikeisten osittaispurkausmittausten jälkeen. Käytönaikeisen mittauksen etuja pohditaan turvallisuuden kannalta ja johtopäätöksissä nähdään kokonaishyöty, mikä tulevaisuudessa saadaan akustisilla mittauksilla sähköasemilla.

## Eurolaite Oy

Eurolaite Oy on sähkötekniikan tuotteiden asiantuntijayritys ja maahantuontiyritys. Yritys on perustettu vuonna 1988. Eurolaite Oy tarjoaa sähkötekniikka-alan asiantuntijuutta ja teknistä tukea. Tavoitteena on tarjota hyvä asiakaspalvelu, täsmälliset toimitukset ja korkeatasoinen tekninen tuki. Eurolaite Oy edustaa sähköalan johtavia toimittajia, joiden tuotteet ja palvelut ovat laadukkaita sähkötekniikan kokonaisvaltaisia ratkaisuja. Tuotekategorioita ovat tuotteet sähköasemille, jakeluverkon rakentamiseen ja suojaukseen, sähköratatuotteet, työturvavälineet, työkalut ja mittalaitteet, suojareleet, tahdistimet ja tuotteet teollisuudelle. [Yritys - Eurolaite Oy 2018.]

Vuonna 2017 Eurolaite sai aikaan liikevaihtoa: 3 362 000 euroa. [Eurolaite Oy] Kauppa-lehti.fi 2017] Eurolaite kuuluu ja on osana Addtech AB konsernia, joka muodostuu 120 itsenäisestä yrityksestä. Addtech AB on listattuna NASDAQ OMX listalla Tukholmassa ja fiskaalivuoden 2017-2018 (01.04.2017 – 31.03.2018) liikevaihto yrityksellä oli 778,8 miljoonaa euroa v. [25] Konsernilla on 2200 työntekijää ja toimintaa yli 20 maassa. Addtech tarjoaa asiantuntijuutta, kehittää ja myy komponentteja ja järjestelmiä teollisuuden eri tarpeisiin, pääsiallisesti valmistavalle teollisuudelle. Asiakkaita ovat prosessiteollisuus, autoteollisuus, teleoperaattorit sekä elektroniikkateollisuus. [Addtech konserni – Eurolaite Oy 2017.]

## Fingrid Oyj

Fingrid Oyj on Suomen kantaverkkoyhtiö, jonka vastuualue on huolehtia sähkön siirrosta Suomen kantaverkossa. Yhtiö on perustettu 29.11.1996 ja operatiivinen toiminta alkoi 1.9.1997. Fingrid omistaa 18,8 prosenttia sähköpörssi Nord Poolista. Fingrid Oyj:n liikevaihto vuonna 2017 oli 672 miljoonaa euroa ja henkilöstöä vuoden 2017 lopussa 355 työntekijää. Pääkonttori on Helsingissä. Fingrid on osakeyhtiö, joka vastaa maanlaajuisesta kantaverkosta, ollen keskeinen osa Suomen sähköjärjestelmää. Kantaverkko on runkoverkko sähkönsiirrolle, johon ovat liittyneet suuret voimalaitokset, tehtaat ja aluejakeluverkot. Kantaverkko koostuu 400 kV:n, 220 kV:n ja 110 kV:n voimajohtojen siirtoverkosta, jonka pituus on yli 14 000 kilometriä ja siihen kuuluu yli sata sähköasemaa. [Yritys Fingrid Oyj 2018.]

## 2 Eristeet sähkökentässä

Suurjännitepääteissä sähkökentän vaikutus on myös huomioitava eristeiden mitoittamisessa ja muotoilussa. Sähkökenttä vaikuttaa päätteiden eristeeseen. Ulkopäätteet sähköasemilla ovat yleensä joko kuiva- tai öljypäätteitä. Ulkopäätteiden eristimiä on posliinilla tai silikoni-komposiittikuorilla varustettuja. Ymmärtääkseen osittaispurkauksia ja niiden vaikutuksia syvemmin on tunnettava sähkökentän vaikutuksia ja tiedettävä eri läpilyöntien muodot.

### 2.1 Kentänvoimakkuus, sähkövuoto, sarja- ja rinnakkaiseristykset

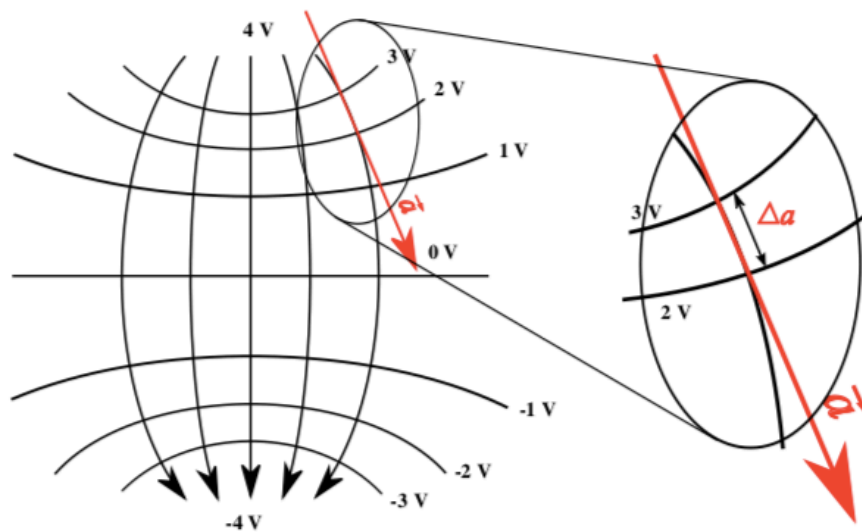
Sähkökentän jakaumat lasketaan ideaalisina, ja eristeiden rakenteet ovat johtamattomia. Laskennassa eristysrakenteen sähkökentän jakaumien johtavuus oletetaan niin pieneksi, että sitä ei tarvitse ottaa huomioon. Johtavuus jätetään huomioimatta ja voidaan käyttää staattisen sähkökentän yhtälöitä. Laskennan toinen edellytys on homogeenisyys ja eristeiden ominaisuuksien säilyminen samassa tilavuudessa. Tämä tarkoittaa sähkökentän ja sähkövuon säilymistä samansuuntaisina. Eriste on riippumaton sähkökentän voimakkuudesta. Sähkövaraukset synnyttävät staattisen sähkökentän. Tietyissä kohdissa sähkökentän voimakkuus on yhtä suuri kuin sen voima, joka kohdistuu sähkökentästä kyseisessä kohdassa olevaan yksikkövaraukseen. Sähkökentän voimakkuus määrittämiseen on yhtälö 1: [5, s. 21–22.]

$$\vec{E} = \frac{d\vec{F}}{dQ}, \quad (1)$$

$d\vec{F}$  on sähkökentänvoima pisteessä

$dQ$  on yksikkövaraus pisteessä.

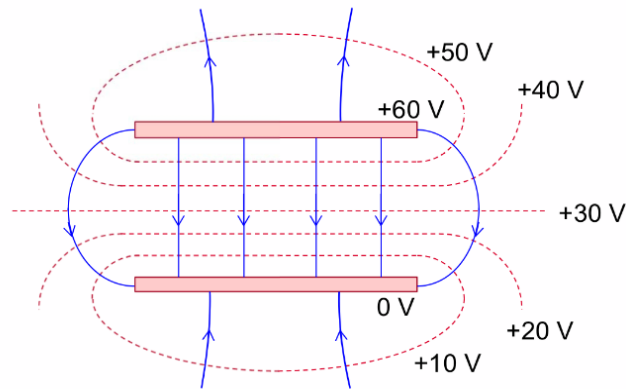
Sähkökentän voimakkuuden ja sähkövuon tiheyden avulla voidaan tarkastella eristysrakenteen kestävyyttä ja erityisesti siis niitä kohtia, joissa jänniterasitus on suurin. Tarkasteltaessa staattista sähkökenttää, jonka synnyttää sähkövaraukset, sähkövuoto on olennainen apu sähkökentän ymmärtämiseksi. Sähkövuoto koostuu vuoalkioista ja jokainen sen positiivinen varausalkion suuruinen vuoalkio etenee kenttäviivojen suuntaisesti. Tietyn varauksen kokonaissähkövuoto on siitä etenevien vuoalkioiden summa. Sähkökentän jakaumaa voidaan kuvata sähkökentän viivojen ja tasapotentiaalipintojen avulla. [20; 5, s. 25.]



Kuvio 1. Etäisyys tasapotentialinjojen  $\Delta V$  välillä ja tasapotentialien muutos  $\Delta a$  määrittää sähkökentän suuruuden [20].

Tarkastellussa tapauksessa sähkökenttä ei ole jatkuva ja muutos on pieni. Tasapotentialinjojen suunta on se suunta, johon varaus liikkuu. Sähkökentän vektorien suunnan mukaisesti piirretty vektori  $a$  on samansuuntaisena yhden kenttävektorin osan kanssa. Kuvassa  $a$ -vektori on piirretty samansuuntaisesti sähkökentän kenttäviivan osan kanssa ja tarkoituksena on määrittää sähkökentän suuruus. Sähkökentän voimakkuuden voi laskea integraalilaskennan ratkaisutapaa käyttäen kuvion 1 tilanteessa, missä vähintään yksi piste tarkasteltaessa on sähkökentän voimakkuuden suuruinen. Sähkökentän voimakkuus pisteessä  $a$  on siis tasapotentialiviivojen funktioiden jännitteen erotus jaettuna  $\Delta a$ :lla, joka on tasapotentialien välinen etäisyys. Kun sähkökentän potentiaali tunnetaan, saadaan voimakkuus laskettua tietyssä pisteessä potentiaalilla avulla. [20; 5, s. 25.]

Sähkökenttä on voima, joka kohdistuu vaikutuspiirissään olevaan sähkövaraukseen. Sähkökentän voimakkuus pyrkii siirtämään sähkövarausta sähkökentässä. Sähkökentän voimakkuus on verrannollinen sähkökentän kenttäviivojen tiheyteen. Kenttäviivat ja tasapotentialipinnat ovat kohtisuoria toisiaan vastaan. Johteella kenttäviivat ja tasapotentialipinta staattisessa sähkökentässä ovat aina kohtisuorassa sitä vastaan. Eristeessä varaukset eivät pysty liikkumaan, joten sähkökentällä on potentiaalienergiaa. [5, s. 22-27.]



Kuvio 2. Tasapotentiaali on pinta tai viiva, jonka pisteessä potentiaali on sama. Sähkökentän kenttäviivat ovat kohtisuorassa tasapotentiaaliviivoja vastaan ja suunta on korkeammasta matalaan potentiaaliin [28].

Kuviosta 2 nähdään, että levyjen välinen jännite on 60 V ja viivojen välillä 10 V. [28.]

### 2.1.1 Sähkövuon tiheys ja permittiivisyys

Sähkökenttää ja sen muutoksia tarkasteltaessa eristeessä olevat eri aineiden rakennekerrokset vaikuttavat omalla permittiivisyydellään sähkökenttään. Permittiivisyys on suure, jonka avulla voidaan laskea sähkövuon tiheys tiedettäessä sähkökentän voimakkuus. Kun tarkastellaan homogeenisia ja isotrooppisia väliaineita, eli ominaisuuksiltaan samanlaisia aineita, sähkövuon tiheys ja sähkökentän voimakkuus ovat verrannollisia keskenään. Sähkövuon tiheys riippuen eristeen permittiivisyydestä lasketaan yhtälön 2 mukaisesti:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}, \quad (2)$$

$\vec{D}$  on sähkövuon tiheys

$\varepsilon$  on väliaineen permittiivisyys

$\vec{E}$  on sähkökentän voimakkuus.

Permittiivisyys on kaasuisissa, nesteissä ja amorfisissa aineissa vakio. Amorfinen aine on kiinteän aineen toinen muoto, jolla ei ole pysyvää rakennetta eikä yksiselitteistä sulamispistettä. Yleensä permittiivisyys on tensori. Permittiivisyydellä tarkoitetaan materiaalin vaikutusta siihen kohdistuvaan sähkökenttään. Tyhjiön permittiivisyys  $\varepsilon_0$  on sähkövakio ja suhteellinen permittiivisyys on  $\varepsilon_r$ . Dielektristä väliainetta kutsutaan sähköeris-

teeksi, jonka sisällä sähkökenttä on heikompi kuin tyhjiössä. Tyhjiön suhteellinen permittiivisyys on 1. Suhteellinen permittiivisyys on eristeen väliaineen permittiivisyyden suhde tyhjiön permittiivisyyteen. Eristeen permittiivisyys lausutaan suhteellisen permittiivisyyden yhtälöllä 3:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (3)$$

$\varepsilon$  on väliaineen permittiivisyys

$\varepsilon_r$  on materiaalin yksikötön suhdeluku

$\varepsilon_0$  on tyhjiön permittiivisyys  $8,854187817 \dots \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$ .

Suhteellinen permittiivisyys voidaan myös ilmoittaa tyhjiön ja aineen susceptibiliteetin summana. Susceptibiliteetti tarkoittaa aineen polarisoituvuutta sähkökentässä, joka kuvaa tyhjiöstä poikkeavaa kykyä polarisoitua. Eristeen permittiivisyyden merkitys eristysrakenteessa on merkittävä. Permittiivisyyden tarkastelu eristysrakenteissa eriste kohtaisesti avaa ymmärrystä sähkökentän vaikutuksista rakenteen sähkölujuuteen. Eristysrakenteessa eriste, jolla on suurempi permittiivisyys on eristeessä pienempi sähkökentän voimakkuus tietyllä sähkövuon tiheydellä. [5, s. 23.]

Eristysrakenteiden alueellisessa tarkastelussa sähkövuon tiheys on tavallisesti vakio. Tällöin eristeiden sisällä ei ole varauksia. Sähkövuon tiheyden pysyessä samana, sähkökentän suuruus on riippuvainen aineen permittiivisyydestä. Verrataan kahden metallilevyn välissä olevia eristeitä erilaisina eristeratkaisuina ja niiden permittiivisyyden vaikutusta sähkölujuuteen. Tilanteessa 1 ja tilanteessa 2 on kaksi metallilevyä vastakkain ja jännite metallilevyjen välillä on sellainen, että levyjen pintavaraus pysyy vakiona. Tilanteessa 1: Kahden metallilevyn välissä on kaksi eristekerrosta, jossa toisen eristekerroksen permittiivisyys on suhteelliselta arvoltaan 1 ja toisen eristyskerroksen suhteellinen permittiivisyys on arvoltaan 2. Tilanteessa 2: Kahden metallilevyn välillä on eristettä permittiivisyyden suhteellisen arvolla 1.

Tilanteessa 1 rakenteen kapasitanssi on suurempi ja saman varauksen luomiseen riittää pienempi jännite verrattuna tilanteeseen kaksi. Tilanteessa 1 myös sähkövuon tiheys eristekerrosten läpi on vakio. Sähkökentän voimakkuus sen sijaan nousee kaksinkertaiseksi pienemmän permittiivisyyden omaavalla eristekerroksella. Kun eristeet ovat kerrostettuja, suurin rasitus kohdistuu tavallisesti siihen eristeeseen, jolla permittiivisyys on pienin. [5, s. 23–24.]

Sähkökentän voimakkuus voidaan ilmaista varaustiheyden avulla. Kun varauksesta lähtee sähkövuoto, niin tietty tilavuus sisältää kokonaisvarauksen. Tilavuutta ympäröivän pinta-alan kautta kulkee silloin kokonaissähkövuoto. Sähkövuon tiheyden ja voimakkuuden välillä on yhteys. Tämän yhteyden avulla tilavuuden sisältämää varausta voidaan käsitellä sähkökentän voimakkuuden aiheuttajana. Tällöin pinnan läpi, joka rajaa tilavuuden sisältävän kokonaisvarauksen, kulkee sähkökentän vuo. Sähkökentän vuo laskeaan Gaussin lakia hyödyntäen ja tarkastellaan yhtälöllä 4:

$$\phi_E = \int_A \vec{E} \cdot \vec{u}_n dA = \frac{Q}{\epsilon}, \quad (4)$$

$\phi_E$  on sähkökentän vuo

$\vec{E}$  on kenttäviiva

$\vec{u}_n$  on tasapotentialipintojen normaali vektori

$Q$  on varaustiheys.

Oletuksena on lisäksi, että ympäristössä ei saa olla muita varauksia ja tarkasteltavalla tilavuudella on tietty permittiivisyys. [5, s. 25.]

Gaussin lain voi ilmaista differentiaalimuodossa, jolloin sähkökentän voimakkuuden ja varauksien välinen yhteys näkyy; staattisessa sähkökentässä varaukset ovat lähteenä sähkökentälle, varausten jakauma ja suuruus määräävät sähkökentän voimakkuuden tarkastelupisteissä. Staattisen sähkökentän tarkasteluun on perusta sähkövarauksissa, jotka ovat tietyllä sähkövuon tiheydellä toisistaan. Näin sähkövuon tiheys ja sähkökentän voimakkuus muodostavat yhteyden toistensa välille. Tarkastelussa on muistettava staattiselle sähkökentälle ominaisuutena pyörteettömyys. Nämä peruslait yhdistettynä saadaan potentiaalin differentiaaliyhtälö, Poissonin yhtälö. Poissonin yhtälö 5 ilmaisee Gaussin lain potentiaalin avulla. Jos taas alueella on ulkopuolisten varausten aiheuttamana sähkökenttä ilman sähkövarauksia, sovelletaan Laplacen yhtälöä 6.

Poissonin yhtälö 5:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}, \quad (5)$$

$\rho$  on paikallinen varaustiheys

$\epsilon$  on tarkasteltavan tilan permittiivisyys.



Tarkastellaan  $x$ ,  $y$ ,  $z$ -avaruuskoordinaatistossa vektorianalyysin tavoin jännite-eroa suhteessa potentiaalietaisyyksiin differentiaalisesti, mikä helpottaa sähkökenttien numeerista laskentaa. Laplace'n yhtälö 6: [5, s. 26–27.]

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0, \quad (6)$$

tarkasteltavalla alueella ei ole sähkövarauksia, kun  $\rho = 0$ .

Tällöin yhtälö muuttuu ulkopuolisten varausten sähkökentän tarkasteluksi.

### 2.1.2 Sarja- ja rinnakkaiseristykset

Todelliset eristeet rakentuvat monenlaisista eristeistä. Eristysrakenteissa on käytettävä ominaisuuksiltaan rakennetta tukevia aineita esimerkiksi komposiittia. Aineen tulee olla eristävää ja silti tulee toteutua mekaaninen kestävyys, riittävä kierto- ja vääntömomentti kestoisuus. Neste ja kaasu eivät pysty tukemaan eristysrakennetta. Tavoite eristeiden suunnittelussa on jänniterasituksen rajoittaminen siten, että sähkötekniinen rakenne on toimiva ja eliniältään kestävä. Kerrostettuun rakenteeseen ja tarkoituksenmukaisesti suunniteltuun sähkötekniiseen rakenteeseen voi tulla lisäkerroksia myös valmistusteknisistä syistä. Tarkasteltaessa rakenteita, joissa on kyse esimerkiksi kahdesta eri eristeestä, voidaan tarkastella sähkökentän voimakkuuden suhteella ja permittiivisyyden suhteella. Oletuksena on myös, että eristeiden johtavuus on olematon eikä vapaita varauksia kerry eristekerrosten rajapinnalle. Kun sähkökenttä on molemmissa kerroksissa homogeeninen, voidaan laskea jännite, joka vaikuttaa eristekerroksien yli. Homogeeniselle sähkökentälle eristyskerroksien yli vaikuttava jännite voidaan laskea yhtälöllä 7:

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2 \quad (7)$$

*Yhtälöstä 7 voi edelleen johtaa eristeiden kentänvoimakkuuksille  $E_1$  ja  $E_2$  yhtälöt:*

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + d_2 \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)} \quad E_2 = \frac{U}{d_2 + d_1 \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right)},$$

$E_1$  on eristeen 1 sähkökentän voimakkuus

$E_2$  on eristeen 2 sähkökentän voimakkuus

$d_1$  on eristeen 1 paksuus

$d_2$  on eristeen 2 paksuus

$\varepsilon_1$  on eristeen 1 permittiivisyys

$\varepsilon_2$  on eristeen 2 permittiivisyys

$U$  on jännite eristysrakenteen yli.

Permittiivisyyden ja sähkölujuuden välillä ei ole selkeää yhteyttä. Eristeet, jotka koostuvat eri eristyskerroksista, ovat kriittisimpiä rakenteita ja alttiita sille, että rakenteisiin pääsee kaasuja. Jänniterasitusten kestävyys joko valmistusvirheen tai kiinteän eristyksen huokoisuuden vuoksi voi monimutkaisten rakenteiden vuoksi vaarantua. Suunnittelussa ja valmistuksessa on tarkoitus luoda laadukas tuote, joka on kestävä, turvallinen ja kaikkien vaatimusten mukainen. Jänniterasitusten kestävyys on yksi olennaisimmista ominaisuuksista sähköteknisen tuotteen eristyksille. Eristyksien jänniterasitusten kestävyys tulee toteutua aina huomioiden soveltuva käyttötarkoitus. [5, s. 28–29.]

Haitallisin eristeiden yhdistelmä jänniterasituskestävyyden kannalta on eristekerrossarjassa, jolla on hyvin pieni permittiivisyys sellaisen eristeen kanssa, jolla on suuri permittiivisyys. Tasoeristysrakenteille voidaan eristyskerroksien paksuuksien ja tiedossa olevien permittiivisyyksien avulla laskea resultoiva permittiivisyys, kun on tiedossa kyseisten eristeiden osuus eristyksen kokonaispaksuudesta. Eristyksen eristeiden kerrostaminen parantaa yleensä koko rakenteen jännitelujuutta. Mikäli eristys muodostuu vain yhdestä kerroksesta ja valmistuksessa on tapahtunut virhe, on suuri riski, että tämä johtaa välittömään eristysrakenteen läpilyöntiin. Eristimet ja eristysrakenteet pyritään valmistamaan useista ohuista eristekerroksista. Tällöin pystytään satunnaisten virheiden vaikutukset jakamaan koko eristysrakenteeseen eikä yhden kerroksen pettäminen välittömästi johda koko eristerakenteen läpilyöntiin, eli pystytään vaikuttamaan ja hidastamaan haitallisia muutoksia. [5, s. 30–31.]

Eristin muodostaa eristyskokonaisuuden eristimen kiinteästä eristeestä ja kaasumaisesta eristeestä. Rinnakkaisten eristeiden rakenteiden kriittinen kohta on eristeiden muodostamissa rajapinnoissa. Esimerkiksi ulkopäätteiden komposiittieristimessä komposiitti on rinnan ilman kanssa ja pinnan sähkölujuuteen vaikuttaa komposiittieristimen pinnalle kertyvä kosteus, lumi, jää tai mahdollinen lika, kuten pöly. Pinnan heikkoutta ja sähkölujuutta kasvatetaan muotoilemalla eristin niin, että rajanpinnan pituus ja sitä kautta kulkeva ylilyöntitie kasvaa. Eristysrakenteet suunnitellaan niin, että eristysrakenteen muodot noudattaisivat vaikuttavan sähkökentän tasapotentialipintoja. Lisäksi sähkökenttien ohjaukseen voidaan käyttää ohjauselektrodeja, jotka tasoittavat jänniterasituksia. [5, s. 30–31.]

## 2.2 Sähkökentän taipuminen ja kentän homogeenisuus

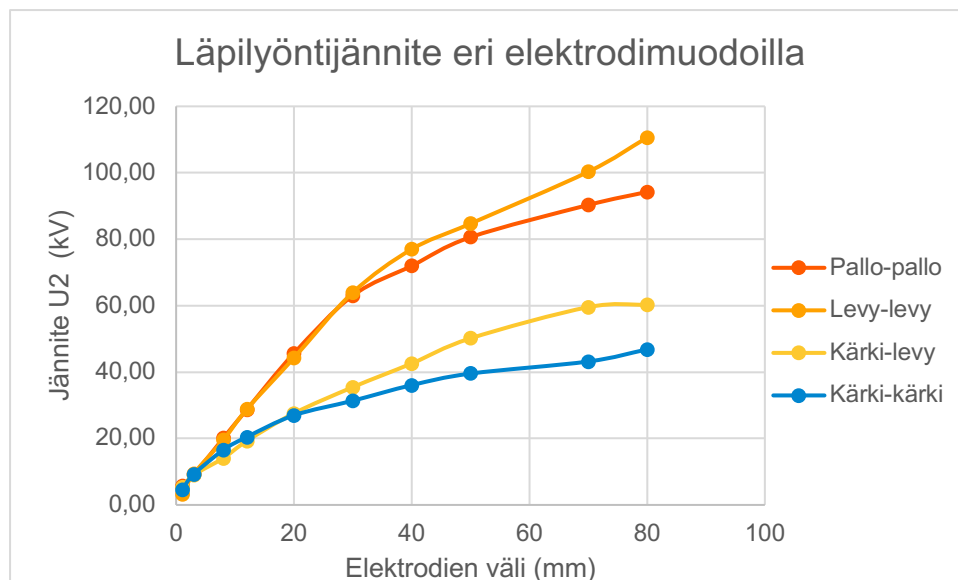
Vaihtojännitteellä polarisaatio lämmittää eristettä vaihtuvan sähkökentän suunnan takia. Sähkövuon kohdatessa kahden eristeen rajapinnan, joiden permittiiviteetit ovat eri suuruiset, sähkövuon suunta muuttuu, mikäli sähkövuoto kohtaa rajapinnan muussa kuin 90°:n kulmassa. Sähkökentän taipuminen saa aikaan sähkökentän tihentymiä, kun kahden eristeen rajapinta kulkee vinosti jonkun ulkoisen tekijän aiheuttamana elektrodipintojen välissä, erityisesti kun eristeiden permittiiviteeteissä on selkeitä eroja. [5, s. 31.]

Kun tarkastellaan eristettä vaihto- ja syösyjännitteellä lisäksi olettaen, että eristeessä ei ole johtavuutta, sähkökentän taipumisen määrittää permittiivisyyksien suhde. Vuoviivojen suunta muuttuu eristeiden rajapinnassa, jossa permittiivisyys muuttuu. Tasapotentialipinnat lähestyvät toisiaan, kun jänniterasitus kasvaa. Sähkökentän taipumista voi hyödyntää eristerajapinnoilla jänniterasitusten pienentämiseksi. Sähkökenttää voi muotoilla ohjauselektrodeilla eristyksen sisällä käyttäen puolijohtavia tai johtavia kalvoja. Elektrodin pinta on aina tasapotentialiaali ja tämän pinnan lähellä tasapotentialiivivojen suunta on oltava vähintään melkein pinnan suuntainen. Kenttäviivojen on oltava ja kuljettava elektrodista kohtisuorassa eristeeseen. Ohjauselektrodeja käytetään monimutkaisissa eristysrakenteissa, joissa on myös useita eristekerroksia, joiden rajapinnoissa sähkökentän taipuminen on otettava huomioon jo rakenteen suunnittelussa. Isoimmat haasteet esiintyvät ohjauselektrodien päissä, jolloin on käytettävä puolijohtavia materiaaleja, joilla voidaan loiventaa reunavaikutuksia vähäisemmäksi. Ohjauselektrodeja käytetään esimerkiksi läpivientirakenteissa ja mittamuuntajissa. [5, s. 31–32, 33.]

Homogeenisen sähkökentän luominen on käytännössä vaikeaa, vaikka kahden tason välissä sähkökenttä olisi homogeeninen, tasojen päissä on väistämättä tihentymiä. Tätä kutsutaan reunavaikutukseksi. Sähkökentän voimakkuus on elektroditasojen reunoilla suuri verrattuna homogeeniseen kenttään. Suuremmilla jännitteillä sähköeristeen sähkölujuus ylittyy reunoilla. Tämä voidaan välttää muotoilemalla elektrodivälin reunat tasapotentialiipintojen mukaan. Tällaista muotoiltuja elektrodeja tasapotentialialien suuntaisesti kutsutaan Rogowskin-elektrodeiksi. Niiden käyttöidea on, että elektrodivälin reunoilla kentän voimakkuus ei ylitä sitä kentän voimakkuutta, joka on elektrodivälin keskellä. Eristeen valinnassa, suunnittelussa ja käytössä on taloudelliset tavoitteet liittyen eristysrakenteen elinikään ja kustannusten minimointiin. Jo ennen valmistusta pyritään määrittämään rakenteen sähkökentän muodot. Eristysrakenteesta on välttämätöntä tie-

tää, miten sähkökenttä rakenteessa jakautuu ja missä kriittiset maksimikohdat rakenteessa sijaitsevat. Eristysrakenteen sähkökentän jakauman määrittämiseen käytetään analyyttisiä laskentoja, graafisia, suoria mittauksia ja numeerisesti laskennallisia menetelmiä. [5, s. 33–34.]

Elektrodivälin maksimikentänvoimakkuus on riippuvainen elektrodien muodosta, kun verrataan eri muotoisia elektrodeja samalla elektrodivälien etäisyydellä. Elektrodien muoto vaikuttaa kentän esiintyvään maksimiin, purkausten alkamisjännitteeseen ja läpilyöntijännitteeseen. Purkausten alkamisjännite on erisuuri erimuotoisilla elektrodeilla, vaikka elektrodiväli on sama. Alla kaaviosta 1 voidaan tarkastella millä jännitteellä ja il-mavälillä läpilyönti syntyy erimuotoisten elektrodien välillä. Elektrodien il-maväli ja muoto vaikuttaa siihen, kuinka herkästi läpilyönti syntyy. Testaukset tehtiin Metropolian suurjännitelaboratoriossa [5, s. 42.]



Kaavio 1. Metropolian SJ-laboratoriossa tehty läpilyöntikoe. Elektrodin muoto vaikuttaa läpilyöntijännitteeseen eri elektrodiväleillä ja erityisesti jännitetason kasvaessa yli 20 kilovolttiin.

Sähkökenttien numeeriset menetelmät ovat nykyisin yleisin tapa suorittaa sähkökenttä-laskentaa. Kaksiulotteiset ja akselin ympäri pyörähdyssymmetriset sähkökentät pystytään ratkaisemaan hyvin tarkasti. Kolmiulotteisten kenttien laskeminen on myös kehittynyt. Niin kuin aikaisemmin teoriassa käytiin läpi Poissonin ja Laplacen yhtälöitä, sähkökenttien laskenta numeerisilla ratkaisuilla perustuu näiden yhtälöiden soveltamiseen. Kun on riittävästi tunnettuja tietoja, voidaan sähkövuon tiheyttä, kentän voimakkuutta ja potentiaalin jakautumista tarkastella halutun tutkittavan alueen jokaisessa pisteessä. [5, s. 45.]

### 2.3 Sähkökentän vaikutus eristeeseen

Edellä olevissa alaluvuissa on käsitelty permittiivisyyttä, tarkoitus on avata ymmärrystä eri väliaineiden ominaisuuksista, jotka vaikuttavat kentän voimakkuuteen ja sitä kautta eristerakenteisiin. Permittiivisyys kertoo myös aineen polarisoitumiskyvystä. Polarisaatiossa eri aineiden polaroitumiskyvyssä on eroja. Eri materiaalien energianvarastointikykyä voidaan tarkastella polarisoitumiskyvyllä, joka on materiaalin kykyä sitoa energiaa itseensä. [5, s. 23, 52–54.]

Heikossa sähkökentässä eristyksen väliaineet polarisoituvat. Vaihtojännitteen jakautuminen eristyksessä tapahtuu permittiivisyyden mukaan. Voimakkaassa sähkökentässä eristeen jännitelujuus ylittyy. Eristeen lujuuden rikkoontuessa alkaa syntyä sähköpurkauksia, jotka ovat osittaispurkauksia. Osittaispurkauksien seurauksena syntyy yli- tai läpilyönti. Sähkökenttä aiheuttaa molekyylien ja atomien negatiivisiin ja positiivisiin osiin eri suuntiin kohdistuvan voiman eristeessä. Tämä aiheuttaa lievän siirtymän normaalitilasta, ilmiötä kutsutaan polarisaatioksi. Polarisaatio vaihtojännitteellä aiheuttaa eristeessä molekyylien liikehdintää omalla paikallaan, jota voisi kutsua kääntyilemiseksi. Kääntyileminen lämmittää eristettä, mikä johtuu kitkasta. Eristeeseen tuotaessa jännite polarisaation vaikutus näkyy eristeen varautumisena ja varausvirtana, ja jännitteen poistuessa varaus alkaa vähitellen purkautua eristeestä. [5, s. 53.]

Polarisaatioita on eri lajeja: elektroni-, atomi-, dipoli- ja avaruusvarauspolarisaatio. Monien polymeerien sekä orgaanista alkuperää olevien eristeiden merkittävä polarisaatiolaji on dipolipolarisaatio. Polaroitumistapahtuma jää joka kerta jonkin verran jälkeen polarisoitumisen seurauksena syntyvästä sähkökentästä molekyylien hitausmomentin ja molekyylikitkan vuoksi. Tämä ilmiö on nimeltään dielektrinen jälkivaikutus. Polarisoituminen lisää eristeen kykyä varastoida sähkövarauksia. Elektrodit puolestaan kerryttävät lisää varauksia eristeen polarisaation johdosta. Vaihtojännitekentässä eristeessä on dielektrisiä häviöitä, molekyylikitkaa ja dielektrinen jälkivaikutus. Tehohäviöitä syntyy myös eristeiden johtavuuden vuoksi, sillä eristeet eivät koskaan ole ideaalisia. Eristeiden johtavuus kasvaa lämpötilan noustessa. Terveellä eristyksellä dielektriset häviöt ovat verrannolliset sähkökentän voimakkuuden neliöön, likimääräisesti vakiotajuudella ja -lämpötilassa. [5, s. 53–54.]

Eristeen permittiivisyys on kompleksinen, ja se koostuu polarisaatiosta eristeessä ja imaginäärisestä eristeen johtavuuden osasta. Eristyksen häviökerroin  $\tan\delta$  sisältää eristyksen häviökulman deltan. Delta kulma kertoo mitatun eristeen häviön eron ideaalisesta eristeestä. Häviökerroin ilmaisee myös dielektristen häviöiden  $P_d$  ja kapasitiivisen loistehon suhteen  $Q_c$ . Häviökerroinmittauksia tehdään arvioitaessa dielektrisiä häviöitä. Dielektriset häviöt näyttävät suunnan eristeen kunnan huononemisesta. Häviökerroinmittaukset ovat yksi kunnanvalvonnan tapa tutkia eristeiden kuntoa. Terveellä eristykseällä  $\tan\delta$ -käyrä jännitteen funktiona mitattuna on lähellä ideaalista vakiokäyrää. Ideaalinen käyrä on vaakasuora ja eriste on kunnossa, kun  $\tan\delta$ -käyrä on likimain ideaalista suoraa. Loivasti jatkuva kulman muutos kertoo mahdollisesta eristeen liian nopeasta heikkenemisestä ja taas äkillinen häviökulman muutos kertoo osittaispurkauksien syttymisestä eristeessä. Häviökerroin  $\tan\delta$  on eristemateriaalin permittiivisyyden suhdeluvun imaginääriosan  $\varepsilon_r''$  suhde eristeen permittiivisyyden suhdelukuun  $\varepsilon_r'$ . [5, s. 54–55, 197–198.]

### 3 Osittaispurkaukset ja niiden tyypit

Osittaispurkaus eli PD (Partial Discharge) on sähköpurkaus, jonka muotoja on moninaisia. Osittaispurkaus on ilman elektrodiväliä tapahtuva sähköpurkaus, joka on seurausta eristeessä olevasta materiaaliiviasta tai eristeen vanhenemisesta. Osittaispurkaus syntyy, kun eristysrakenteen tai materiaalin sähkölujuus ylittyy sähkökentän voiman vaikutuksesta. Kun eriste vaurioituu tai vaurioituminen etenee, syntyy osittaispurkaus, joka edelleen etenee läpilyönniksi. Osittaispurkauksia voi syntyä eristeiden rajapinnoilla, kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä eristeissä. Osittaispurkaukset voidaan jakaa seuraavanlaisesti: sisäiset osittaispurkaukset, pinta- ja liukupurkaukset, koronapurkaukset sekä kipinäpurkaukset. [5, s. 80–91.]

Osittaispurkauksia voidaan tarkastella konkreettisesti yksittäisinä purkauksina, niiden aiheuttamina pulssijonoina tai integroituina suureina kuten kokonaisenergia tai teho. Osittaispurkauksen suuruuden mitta on eristysrakenteen varauksen muutos. Osittaispurkauksissa jännitteenmuutos eristerakenteessa on se varaus, joka on yhtä suuri kuin itse osittaispurkaus. Osittaispurkauksen virtapulssin näennäisvarauksen yksikkö on pikocoulombi (pC). Osittaispurkauksen näennäisvaraus on verrannollinen purkauksen tehoon ja energiaan sekä vian suuruuteen. Osittaispurkauksien energia muuntuu ontelon sähkökenttään varautuneesta sähköenergiasta kemialliseksi, optiseksi sekä akustiseksi energiaksi että lämpöenergiaksi. [5, s. 88–89.]

#### 3.1 Sisäiset osittaispurkaukset

Sisäiset osittaispurkaukset tapahtuvat eristeen sisällä. Osittaispurkauksia esiintyy eristeen valmistusvirheistä johtuvissa onteloissa. Ilmaonteloita esiintyy erityisesti kahden eristeen välisillä pinnoilla. Onteloita esiintyy eristysrakenteen eristekerrosten välisillä pinnoilla, eristeen ja metallin rajapinnoilla. Valmistuksessa tai eristeen esimerkiksi ulkopäänteen asennusvaiheessa voi syntyä eristepinnan tasaisuuseroja, johtuen esimerkiksi asennusvirheestä, jolloin eristeen sisälle voi jäädä ilma- tai kaasuontelo. Asennuksessa tai valmistuksessa voi vahingossa eristekerrosten väliin joutua vieras esine, hiekanjyvä, metallisiru tai muu vieras hiukkanen. [5, s. 80–85.]

Eristysrakenteiden sisältäessä onteloita tai kaasukuplia, joissa on ympäröivää eristettä pienempi jännitelujuus, ontelossa on suurempi jänniterasitus kuin ympäröivässä eristeessä johtuen osittaispurkauksesta. Kun ontelon yli vaikuttaa jännite, joka on rikkonut

kaasun jännitelujuuden, alkaa syntymään osittaispurkauksia ontelossa. Osittaispurkauksessa positiiviset ionit ja elektronit törmäilevät ontelossa aiheuttaen eroosiota ontelon seinämiin, mikä alkaa rikkomaan ja hajottamaan eristettä. Epäsymmetrisen ontelon muoto saattaa aiheuttaa sähkökentän tihentymän, joka puolestaan saa purkaukset keskittymään kyseiseen kohtaan, jolloin eriste alkaa hajoamaan pisteessä purkausten kai-vaessa käytävää. Tästä voidaan puhua myös eroosion etenemisenä osittaispurkauksiontelossa. [5, s. 80–91.]

Osittaispurkaukset syntyvät ontelossa tietyllä syttymisjännitteellä. Syntyvän purkauksen osa varauksesta siirtyy ontelon toiselle puolelle. Siirtyvän varauksen johdosta jännite yli ontelon pienenee. Ontelossa sähkökentän voimakkuus vaikuttaa suuremmin kuin ympärillä olevassa eristeessä. Tämä johtuu ilman pienestä suhteellisesta permittiivisyydestä. Ontelon sammumisjännite osittaispurkaukselle on se jännite, jonka alapuolelle jännitteen laskiessa purkaus sammuu. Syttymisjännite osittaispurkauksiin on riippuvainen kaasuentelossa vallitsevasta sähkökentän voimakkuudesta eli sähkökentän rasiuksesta. [5, s. 71–74.]

Sähkökentän voimakkuuteen vaikuttavat ympäröivän sähkökentän vaikutus, ontelon suunta ja muoto sekä ympäröivän eristeen suhteellinen permittiiviteetti. Riippuen ontelon muodosta sähkökentän voimakkuus vaihtelee riippuen eristeiden suhteellisesta permittiivisyydestä. Townsendin läpilyöntikriteeri määrittää ehdon kahden elektrodin välissä tapahtuvalle läpilyönnille. Kaasueristeisen läpilyöntijännitteen voi määrittää Paschenin yhtälöllä homogeenisessa elektrodivälissä vakioämpötilassa. Purkauksen syttymistä ontelossa voidaan laskea ja tutkia Paschenin lain yhtälön 8 avulla:

$$U_b = \frac{B p d}{\ln \frac{A p d}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})}}, \quad (8)$$

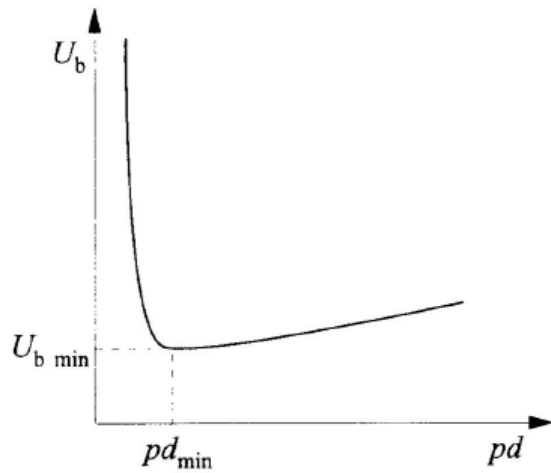
$U_b$  on läpilyöntijännite

$p$  on paine

$d$  on elektrodiväli

$\gamma$  on sekundäärinen ionisaatiokerroin.

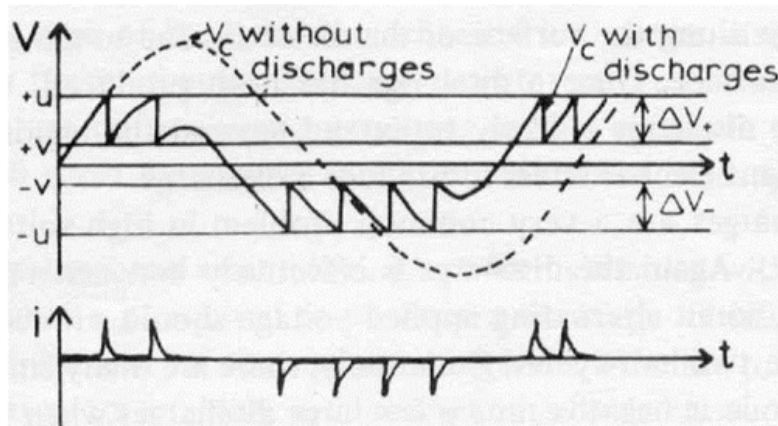




Kuvio 3. Paschenin käyrä kaasun paineen ja elektrodien välisen etäisyyden  $d$  funktio.  $U_b = f(pd)$ , missä  $U_b$  on läpilyöntijännitteen huippuarvo, voimassa kun  $pd < 5 \text{ kPam}$ , homogeeninen sähkökenttä ja vakioämpötila ( $20^\circ\text{C}$ ) [6].

Eristeen ontelon osittaispurkausten syttymisjännite saadaan Paschenin lain mukaan. Tiedettäessä ontelon kaasu ja paine voidaan syttymisjännite ontelossa arvioida tai laskea suhteellisen hyvällä tarkkuudella. Laki antaa ontelon homogeenisen elektrodivälin vakioämpötilassa ja on voimassa Townsendin läpilyöntiehdon olosuhteiden mukaan. Paschenin lain kuvion 3 mukaan on olemassa alaraja, jolla läpilyönti ei ole mahdollinen. Ilmalla läpilyönnin syntymisen alaraja on noin 240 voltin jännite, jota alhaisemmalla jännitteellä läpilyönti ei ole mahdollinen. Eristeiden läpilyöntilujuuteen vaikuttaa osaltaan rasiusaika, minkä vuoksi eristeet kestävät lyhytkestoista rasiustusta huomattavasti paremmin kuin pitkäkestoista. [5, s. 71–74, 82–84; 6.]

Seuraavalla sivulla olevasta kuvasta 1 nähdään jännitteen muutos, kun osittaispurkaus tapahtuu ontelossa.



Kuva 1. Osittaispurkaus ontelossa. Osittaispurkaus kun jännite on kaksi kertaa niin suuri kuin syttymisjännite. Ontelon jännitteen muutos ( $\Delta V+$ ,  $\Delta V-$ ) on syttymisjännitteen ( $+u$ ,  $-u$ ) ja sammumisjännitteen ( $+v$ ,  $-v$ ) erotus.  $V_c$  on jännitteen suuruus ilman osittaispurkauksia ja osittaispurkauksien kanssa [15].

### 3.2 Pinta- ja liukupurkaukset

Pintapurkaukset syntyvät voimakkaassa eristepinnan suuntaisessa sähkökentässä. Pintapurkauksien todella haitallinen muoto on liukupurkaus, mikä tarkoittaa erittäin voimakasta pintapurkausta. Liukupurkaukset tapahtuvat kahden eristeen rajapinnalla. Niiden syntyyn tarvitaan suuri rajapinnan suuntainen voima, joka on huomattavan voimakas verrattuna pintapurkauksiin. Rajapinnan vastainen kohtisuora voimakomponentti voimistaa liukupurkausilmiötä. Tärkeimpiin liukupurkausrakenteisiin kuuluvat kaapelipäätteet. Eniten huomioitavat rajapinnat esimerkiksi kaapelipäätteillä liukupurkausten kannalta ovat ilman ja kiinteän eristeen välinen pinta sekä kiinteän eristeen ja nesteen esimerkiksi öljyn välinen pinta. [5, s. 80–91.]

Kaapelipäätteet suunnitellaan muotoilultaan sähkölujuutta ajatellen kestäväksi. Eristemateriaalit valitaan huomioiden asennusympäristön vaikutukset. Tyypillinen elinkaari on 30–40 vuotta. Liukupurkaukset kuluttavat nopeasti eristettä. Orgaanisella eristeellä liukupurkauksen vaikutus korostuu. Ulkopäätteitä pitää tutkia, visuaalinen havainnointi on olennaista huoltotoimenpiteiden tarpeen arvioinnin ja purkauksien estämisen vuoksi. Huolloilla estetään purkauksien tapahtuminen, etenkin pitkäaikaisia purkauksia ei saisi päästä tapahtumaan orgaanisissa eristeissä. Liukupurkauksissa sähkökenttä taipuu eristeiden välisellä pinnalla. Sähkökentällä on eristeiden pinnalla pinnan suuntainen komponentti. [5, s. 80–91.]

Liukupurkauksien ylilyönti syntyy, kun pinnalla alkaa syttymään osittaispurkauksia. Jännitteen kasvaessa osittaispurkaukset pitenevät liukupurkauksiksi pintaa pitkin. Sähkökentän jakauma muuttuu liukupurkauksien johdosta ja tämä aiheuttaa eristysrakenteen ylilyönnin. Liukupurkaukset voivat aiheuttaa läpilyönnin, mutta tämä tapahtuu varsinaisen elektrodialueen sivualueilla. Liukupurkausten osittaispurkausmuoto voi vaurioittaa kiinteään eristeen pintaa. Eristekerroksen paksuus ja eristeen suhteellinen permittiivisyys ovat määrittävät tekijät liukupurkausten syttymisjännitteelle. [5, s. 80–91.]

Tehollisarvoinen syttymisjännite liukupurkausrakenteelle voidaan laskea likimääräisesti kokeellisen yhtälön 9 kaavalla:

$$U_i \approx k_1 \cdot \left(\frac{d}{\epsilon_r}\right)^{0,45}, \quad (9)$$

$U_i$  on syttymisjännitteen tehollisarvo

$k_1$  on ominaiskerroin liukupurkausrakenteelle

$d$  on eristekerroksen paksuus

$\epsilon_r$  on suhteellinen permittiivisyys.

Liukupurkauksessa syttymisjännite ei riipu pintamatkan pituudesta. Syttymisjännitteen yläpuolinen ylilyöntijännite on verrannollinen pintamatkan potenssiin. Ilmalla syttymisjännitteen yläpuolella oleva ylilyöntijännite on verrannollinen eristeen pintamatkan potenssiin 0,2 Öljyssä vastaava luku on 0,4, jolloin eristeen pintamatkan kasvattaminen öljyllä on huomattavasti tehokkaampaa kasvatettaessa ylilyöntijännitettä. Syttymisjännite kasvaa suurennettun ylilyöntijännitteen mukana. Tehokkainta on kuitenkin tasoittaa jännitteenjakamaa kapasitiivisella ohjauksella. Liukupurkausrakenne vaikuttaa kokonaisuudessaan ulkopäätteen elinkaareen ja eristeiden kestävyYTEEN. [5, s. 85–86.]

Pintapurkaus muodostaa pysyvän onkalon eristeen pinnalle ja nämä onkalot aiheuttavat eristeiden heikkenemisen. Pintapurkauksia esiintyy tyypillisimmin, kun eriste on hiilipohjainen. Suurjännitesähköasemat ovat usein vaikeita puhdistaa, joten likaa voi ajan saatossa kertyä paljon. Kosteissa olosuhteissa likakerrokset voivat lisätä ja aiheuttaa vuotovirtaa komponenttien ja eristimien pinnassa ja tämä lämmittää pintaa ja haihtuminen puolestaan aiheuttaa häiriötä eristimen kosteassa kerroksessa. Näihin onkaloihin pääsee purkauksesta kipinöitä, joiden seurauksena syntyy hiiletystä eristeessä ja siten muodostuu pysyviä hiilijälkiä eristimen pinnalle. Tämä prosessi ajan kanssa aiheuttaa läpilyönnin ja lopulta eristeen hajoamisen. [10, s. 17.]

### 3.3 Koronapurkaukset

Koronailmiössä elektrodin pinnalla esiintyy osittaispurkauksia. Positiivisella ja negatiivisella puolijännitteellä syntyvät koronat ovat ilmiönä toisistaan poikkeavia. Koronaosittaispurkaukset voivat ilmentyä ilmassa tai kaasussa elektrodin pinnalla. Korona syntyy negatiivisella puolijaksolla johtuen suuremmasta kentänvoimakkuudesta kuin syntyvä varaus on. Syttymisen jälkeen purkausten suuruus pysyy samana, mutta lukumäärä kasvaa. Koronapurkaukset esiintyvät jännitteen puolijaksossa huipun kohdalla. Näin korona on helppo tunnistaa jännitteen kuvaajasta. Suurilla jännitteillä purkauksia on positiivisella jaksolla epäsäännöllisesti. Positiivisen puolijakson koronapurkaukset ovat suurempia kuin negatiiviset puolijakson purkaukset. Koronalla on monia ilmenemismuotoja. Ilmenemismuotoja ovat Trichel-pulssit, negatiivinen hohtopurkaus (glow discharge), positiiviset purkaukset, negatiiviset huiskupurkaukset (streamer), hohtopurkaukset sekä voimakkaat positiiviset huiskupurkaukset. Positiiviset purkaukset ja Trichel-pulssit ovat ilmiönä yleisiä. Nämä ilmenemismuodot eivät aiheuta isoja koronahäviöitä. Positiivisilla pulseilla tosin on merkittävä vaikutus radiohäiriöihin. Huonolla säällä ja hyvin harvoin syntyy hohtopurkauksia. Ne ovat yleisin koronahäviöiden aiheuttaja. Niiden voimakkuus syntyy ylijännitteillä. [5, s. 80–91.]

Avojohtojen korona on riippuvainen johtimen pinnan puhtaudesta ja sääilmiöiden vaikutuksesta. Uuden johtimen pinta ei ole vielä kulunut ja pinta on rasvainen. Nämä tekijät edesauttavat sateella pisaroiden kertymisen johtimen pinnalle. Johtimelle kertynyt pisara saa aikaan herkästi koronapurkauksen, sähkökenttä venyttää pisaroita, mikä taas edesauttaa pisaraa pysymään johtimen pinnalla. Tämä puolestaan lisää koronaa entisestään. Kuluneella ja vuosia käytetyllä johtimella vesi pääsee johtimen säikeiden väliin. Tämä aiheuttaa pisaroiden tippumisen johtimen alapuolelta nopeasti. Tämän vuoksi käytetyssä johtimessa on selkeästi alhaisemmat koronahäviöt. Käytetyssä ja kuluneessa johtimessa on myös vähemmän häiriöitä ja harvemmin voimakkaita koronapurkauksia kuin uudessa. [5, s. 80–91.]

Sumuisilla keleillä kosteuden ja ilman tiheyden kasvaminen ehkäisee koronan syntymistä, sillä tällöin ilman sähkölujuus lisääntyy. Mikäli sumu tiivistyy vesipisaroiksi, varsinkin kun lämpötila laskee alle kastepisteen, kosteus tiivistyy ja korona lisääntyy. Lumi ja sadepisarat synnyttävät koronaa ennen kuin edes koskettavat johdinta. Tuuli lisää positiivisia huiskupurkauksia ja niiden tiheyttä, koska negatiivisen jakson avaruusvaraus siir-

tyy tuulen vaikutuksesta. Huurre, lumisade ja vesisade huomattavasti voimistavat koronahäviöitä. Korona aiheuttaa äänihäiriöitä, rätinää ja kohinaa ja korvin kuultavia purkauksia. Ilmiö on tärkeää tiedostaa mitattaessa, kun tarkoituksena on mitata haitallisia osittaispurkauksia eristeiden kannalta. Koronapulssien amplitudi-taajuus-spektri on 100Hz–10MHz. Koronaa esiintyy akustisten mittalaitteiden ultraäänialueella. Purkausmuotona öljyssä ovat usein koronapurkaukset. Öljyssä tapahtuva korona on osittaispurkauksia kaasukuplissa, jotka purkauksen terävä kärki synnyttää. Öljyssä korona on eristyksen kannalta haitallisempaa kuin korona ulkopäätteiden pinnalla. [5, s. 80–91.]

### 3.4 Päätteiden eristerakenteiden vanheneminen

Eristerakenteiden tulisi kestää käytön aikaiset rasitukset ilman sähköisten, mekaanisten ja termisten ominaisuuksien huonontumista. Vanhentueessaan eristys voi myös muuttua, vaikka se olisi käyttämättömänä. Vanhetessaan eristys tai sen osat muuttuvat vähitellen käytön tai ajan mukana, tämä tarkoittaa materiaalin yhden tai useamman ominaisuuden palautumatonta muuttumista. Myös ympäristökijät voivat rasittaa eristettä ja näin vaikuttaa myös niiden vanhenemiseen. Vähittäinen rappeutuminen johtaa eristyksien vaurioitumiseen. Kun sähkölaitteiden vaurioiden ajallista jakaumaa tarkastellaan, on voitu huomata, että suurin osa vaurioista tapahtuu käytön alussa, kun huonosti käyttötarkoitukseen sopivat tai valmistusvialliset laitteet vaurioituvat. Tämän jälkeen vauriotiheys pysyy tasaisena pitkään ja vaurioita esiintyy vain satunnaisesti tai erityisen rasituksen yhteydessä. Toinen vauriotiheyden piikki esiintyy laitteiden tullessa käyttöikänsä päähän. Suurjännitelaitteiden osalta oletetaan huonosti käyttötarkoitukseen soveltuvien tai valmistusviallisten yksilöiden poistamista jo laitteiden tuotantoon sisältyvissä testauksissa. [5, s. 181.]



Kuva 2. Osittaispurkauksen aiheuttama eristevaurio [24].

Kuvasta 2 voidaan nähdä läpilyönnin aiheuttama eristeeseen syntynyt vahinko. Osittaispurkaukset syntyivät likaantumisen seurauksena. Likaiset kohdat aiheuttivat välillensä pintapurkauksia ja hiileentymistä eristimessä ja lopulta läpilyönnin. Kokonaisia paloja on irronnut sen seurauksena. [24] Päätteiden pintojen likaisuus altistaa pinnassa esiintyvälle purkausilmiölle, kuten koronalle, sillä lika edesauttaa kosteuden kertymistä päätteiden pinnoilla. Erityisesti eristysrakenteiden käyttöikä lyhenee pitkäaikainen rasitus korkeissa lämpötiloissa. Muutoksilla alttiimpia olevat materiaalit ovat yleensä orgaanista alkuperää ja näissä muutokset ovat palautumattomia. [5, s. 180–182.]

Lämpömuutokset tapahtuvat tasaisesti laajalla alueella eristeessä ja muutokset ovat riippuvaisia rasisajasta ja lämpötilan vaihteluista. Orgaanisissa aineissa tapahtuu hapettuminen vanhetessaan, mikäli materiaali on kosketuksissa hapen kanssa. Jos kosketusta hapen kanssa ei tapahdu, on muutoksen taustalla joko pyrolyysi tai hydrolyysi. Reaktioita voivat kiihdyttää erilaiset katalyytit, kuten esimerkiksi vesi, happamat yhdisteet ja synteettiset polymeerit. Veden tunkeutuminen voi muuttaa materiaalin sähköisiä ominaisuuksia, kuten esimerkiksi jännitelujuutta, häviökerrointa ja permiivisyyttä. Veden tunkeutuminen orgaaniseen materiaaliin riippuu materiaalin koostumuksesta, lämpötilasta ja molekyyliarakenteesta. Lämpövanhenemisen tapahtuu eristeessä kemiallisten reaktioiden kautta ja reaktioiden todennäköisyys kasvaa aina lämpötilan mukana. [5, s. 181.]

Ultravioletisäteily voi vanhentaa tiettyjä orgaanisia materiaaleja ja se on peräisin pääasiassa auringon valosta, mutta myös koronapurkausten aiheuttama Uv-säteily vanhentaa eristeitä. Vanheneminen aiheutuu valohapettumisesta, joka aiheuttaa materiaalin verkottuneiden polymeeriketjujen katkeamista. Valohapettuminen voi kiihtyä säteilyn intensiteetin kasvaessa sekä lämpötilan kohotessa. Reaktio on havaittavissa esimerkiksi eristimen vaipan mikrohalkeamina ja pinnan karheutumisenä. Yhtäaikainen mekaaninen rasitus ultravioletisäteilyn kanssa voi edistää vanhenemistä ja vaurioitumista. Lämmön vaikutuksesta materiaalin kemialliset ja muut vanhenemismekanismit kuten veden tunkeutuminen eristeeseen voivat kiihtyä. Haurastuminen voi aiheuttaa eristeeseen halkeamia, jotka voivat aiheuttaa osittaispurkauksia ja sitä kautta eroosiota ja läpilyönnin. Kulumisen seurauksena eristimen pinta karheutuu ja se voi kerätä likaa ja kosteutta, mikä puolestaan lisää vuotovirran suuruutta. [5, s. 180–183, 187.]

Kosteissa olosuhteissa lian päästessä eristimen pinnalle muodostuu siinä sähköisiä purkauksia. Pinnan alkaessa kuivua kasvaneen vuotovirran vuoksi syntyy kuivien vyöhykkeiden kipinöintiä. Kipinöinti puolestaan edesauttaa urautumista, materiaalin kulumista sekä ylilyöntejä. Urautumisen seurauksena pinnalle syntyy johtavia reittejä, joiden seurauksena eristimen jännitelujuus heikkenee. [5, s. 181–188.]

Päätteiden ja eristeiden vanhenemista voidaan tarkastelua teoreettisesti. Eliniän arviointiin voidaan käyttää Dakinin yhtälöä. Eristeen vanhenemista tarkastellaan oletuksesta, että eristeen elinikä päättyy, kun eristeen käyttäytymisen kannalta kriittinen ominaisuus saavuttaa ennalta asetetun raja-arvon.

Dakinin yhtälö 10:

$$r = Ae^{-E/Tk_B}, \quad (10)$$

$A$  on reaktiovakio

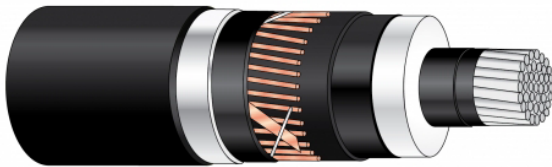
$E$  on prosessin aktivaatioenergia

$k_B$  on Boltzmannin vakio ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

Osittaispurkaukset vaikuttavat eristeisiin kemiallisesti ja fysikaalisesti. Tehohäviöiden lisäksi korona aiheuttaa transienttiyljännitteellä kulkuaaltojen vaimenemista. Onteloissa osittaispurkauksien ionipommitus saa aikaan etenevää eroosiota. Purkauskanavissa osittaispurkaukset aiheuttavat lämmön nousua. Muuten osittaispurkaukset aiheuttavat kemiallisia prosesseja, joista syntyy kaasuja, happoja ja syövyttäviä ainesosia eristeisiin. Lisäksi osittaispurkaukset synnyttävät ultraäänitaajuisista äänistä radiotaajuisiin ääniä energiapurkauslähteestä ja UV-säteilyä. Osittaispurkausten haitallisuus korostuu, kun niiden voimakkuus ja esiintymistiheys kasvaa. [5, s. 182.]

## 4 Suurjännitekaapelit ja kaapelipäätteet

### 4.1 Kaapelit ja niiden eristykset



Kuva 3. Suurjännitekaapeli ja sen eristysrakenne. Kaapelityyppien eristekerrokset sisimmästä uloimpaan: 1. Johdin, 2. Johdinsuoja, 3. PEX-eristys, 4. Hohtosuoja, 5. Vesitiivistys, 6 Kosketussuoja, 7 Ulkovaippa [23].

Kuvan 3 keskellä on johdin, joka on materiaaliltaan alumiinia tai kuparia. Johtimen suojana on puolijohtava muovista valmistettu johdinsuoja. Eristyksenä kaapelissa on vaalea PEX-muovi. Tämän jälkeen on puolijohtava kerros, hohtosuoja, joka on puolijohtavaa muovia tasaten edelleen sähkökentän jakaamaa. Vesitiivistys on puolijohtavaa vesitiiveysnauhoitusta, joka toimii kosketussuojan alla pitkittäisenä vesisulkuna. Kosketussuoja on kerros kuparinauhasidosta ja kuparilankoja. Päälimmäisenä on ulkovaippa, joka on valmistettu sähkönkestävästä PE-muovista ja vaippaan on kiinnitetty alumiinilaminaattia, jonka tehtävänä on varmistaa poikittaisen vesitiiveyden. [23.]

Kuvassa 3 on vain yksi esimerkki SJ-kaapelin eli suurjännitekaapelin rakenteesta. Nykyisin käytetään kaapeleita XLPE-eristeellä ja vesisulkuna käytetään lyijyä alumiinin sijaan. Lyijyvaippa toimii myös kosketussuojana.

Kaapeleille sähkökentän lieriösymmetrisyys kaapelieristysrakenteissa on tärkeää. Eristeinä kaapeleissa käytetään yleisesti muovia tai vähemmän vaihtoehtoisena eristeenä voidaan käyttää öljyä. Paperieristeiset, öljykyllästeiset kaapelit ovat joko paineistettuja tai paineistettamattomia. Uusien kaapeleiden eristeenä käytetään nykyään useimmiten muovia, ja sitä käytetäänkin kaikissa kaapeleissa jännitealueella 36–245 kV. Suuremmilla jännitteillä siis käytetään polyeteeniä (PE) tai ristosilloitettua polyeteeniä (Cross-linked polyethylene, XLPE tai PEX). Toisistaan ristosilloitettu polyeteeni ja tavallinen poly-



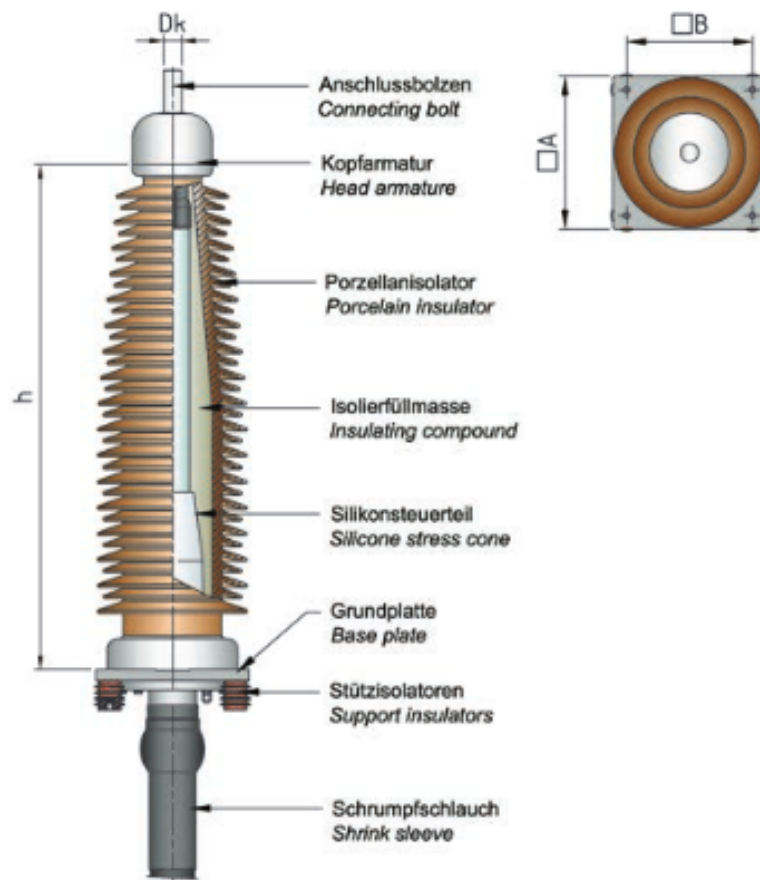
eteeni eroavat siten, että ristisilloitetussa polyeteenissä makromolekyyliketjut ovat sidottuna kemiallisesti toisiinsa, jonka seurauksena muovin sulamispiste nousee niin, että sen käytettävyys on mahdollista jatkuvassa 90 °C:n käyttölämpötilassa, sekä lyhytaikaisesti 120–130 °C:n lämpötilassa. [5, s. 155.]

Polyeteenin ominaisuus ja heikkous on epäpuhtauksien ja pienten muovipalasten syntyminen. Näiden syntymistä ei ole pystytty estämään valmistusprosessin huolellisuudesta ja tavasta huolimatta. Valmistuksen virheiden toteamiseen käytetään laadunvalvontamenetelmänä osittaispurkausmittausta. [5, s. 154–155.]

Tarkastelu rajoittuu ilmajohtojen ja suurjännitekaapelien liittämiseen. Ulkokaapelipäätteet toimivat suojana kaapelin eristykselle ja jatkoksena kaapeleille. Ulkokaapelipäätteet ovat tärkeä ja välttämättömän suoja kaapeleille liitettäessä ilmajohtoja suurjännitekaapeleihin. [5, s. 158.]

#### 4.2 Ulkokaapelipäätteet ja eristysrakenteet

Ulkokaapelipäätteen tarkoitus on liittää siirtoverkon ilmajohto maakaapeliin ja siitä edelleen kentältä eteenpäin sähköasemalle. Ulkopäätteet tyypillisesti sijaitsevat sähköasemakentällä, johon ilmajohdot päättyvät ja laskeutuvat omille ulkopäätteilleen. Ulkopäätte suojaa suurjännitekaapelin päätä ja eristeitä ulkoisilta vaikutuksilta ja sähkörasituksilta estäen kosteuden ja lian pääsyn kaapelin sisään. Tutkimuksessa tarkasteltujen Suurjännitekaapeleiden eli SJ-kaapeleiden ulkopäätteiden tehtävä on liittää ilmajohto kaapeliin turvallisesti. Ulkopäätteen rakenteen tehtävä on huolehtia liittyminen tasoittaen sähkökentän jakaumia ja eristäen ilmajohdoilla johtimen pinnalla esiintyvien ilmiöiden siirtymistä haitallisena liitetyn kaapelin eristeisiin. Suurimmat sähkörasitukset ovat kaapelin ja ilmajohdon liitoskohdassa ja eristeiden reunoilla. Kaapelin eristykset eivät kestäisi sähkökentän ja salamajännitteiden aiheuttamaa rasitusta, jos ulkopäätte ei olisi suojaamassa näiltä vaikutuksilta.



Kuva 4. Ulkopäätteen rakennekuva, tappi, pään suoja, posliinieristin, eristävä osa, silikonikeila, asennusalusta, tukieristimet, kutistesukka.

Kuvassa 4 näkyy posliinisen ulkopäätteen rakennekuva, josta voi nähdä ulkopäätteen rakenne sisältä. Ulkopäätteen tappi on ilmajohton liittämistä varten. Ulkopäätteen pään-suoja on huipun päällä ennen varsinaista posliinieristintä. Eristimessä on laippoja, jotka kasvattavat ryömintämatkaa. Keskellä näkyy kaapelin eristekerros, jonka juuressa on silikoninen kartiomainen keilarakenne omalla muodollaan varmistamassa homogeenisen sähkökentän jatkumisen kentänohjausmassan kanssa. Kaapelin ympärillä on kutistesukka suojaamassa kaapelin vaipan maadoitusta, eristeteippauksia ja vesitiiveysmassoja. [21; 22.]

Kentänvoimakkuusjakauma helposti vääristyy jatkoksen seurauksena synnyttäen paikallisia kentänvoimakkuushuippuja. Tätä kutsutaan liukupurkausrakenteeksi. Liukupur-

kausten välttämiseksi on jännitteenjakaumaa ohjattava (grading). Liukupurkausten syytymisjännitteen suuruutta eristeen rakenteessa voidaan nostaa kasvattamalla eristekerroksen paksuutta. [5, s.159–160.]

Kentänohjauksella pyritään siihen, että kaapeli- ja lisäeristeen väliin jäävään rajapintaan kohdistuu mahdollisimman pieni ja vakiona pysyvä aksiaalinen sähkökenttä. Kaapelipäätteiden yhteydessä käytetään permittiivisyyteen perustuvaa ohjausta tai resistiiviskapasitiivista ohjausta. Permittiivisyyteen perustuvan ohjauksen (epsilon control) toiminta-ajatuksena on, että elektrodien reunat päällystetään sopivasti muotoillulla eristeellä, jonka permittiivisyys poikkeaa ympäröivän eristeen permittiivisyydestä. Toinen tapa on kiinnittää tiiviisti suuren permittiivisyyden omaava tasapaksu eristelieriö (refractive stress control) kaapelieristyksen kuoritun loppuosan päälle. Suuren permittiivisyyden omaavan kerroksen vuoksi metallivaipan reunan ja vaipattoman eristeosan välillä oleva kapasitanssi kasvaa ja kapasitanssijakauma on sellainen, että ilmatilaan tunkeutuva kenttä jakautuu eristyksen pinnalle melko tasaisesti. [5, s. 161.]

Resistiiviskapasitiivisessa ohjauksessa jännitteen jakauma määräytyy eristeen päälle kierretyn resistiivisen kerroksen ja tämän kerroksen ja johtimen välisen kapasitanssin perusteella. Huomattavaa on, että resistiiviskapasitiivisen ohjauksen tasajännitteellä aikaansaama kentänjakauma voi poiketa vaihtojännitteellä vaikuttavasta kentänjakaumasta oleellisesti. Resistiiviskapasitiivista kentänohjausta hyödyntävillä kaapeleilla on varmistettava eristeiden kestoisuus ja se, voidaanko tavallinen kenttäkoe, joka vaihtovirtakaapeleille tehdään, suorittaa vaarantamatta eristystä. [5, s. 161.]

Kaapelipäätteillä jännitteenohjaus voidaan toteuttaa rakentamalla päätteeseen kaapelin eristyksen päälle keilamainen lisäeristys (stress cone). Keila ohjaa geometrisesti kentänvoimakkuuden jakaumaa. Tämän lisäeristyksen sisällä tai pinnalla on johtava kerros, ja samalla saadaan aikaan ulkoisen eristyksen kentänjakauman tasaantuminen. Sähkökentän ohjauksella tarkoituksena on muotoilla sähkökenttä niin, että eristeen ja kaapelin eristeen väliin jäisi pieni ja samansuuruisena pysyvä aksiaalinen sähkökenttä. [5, s. 159–160.]

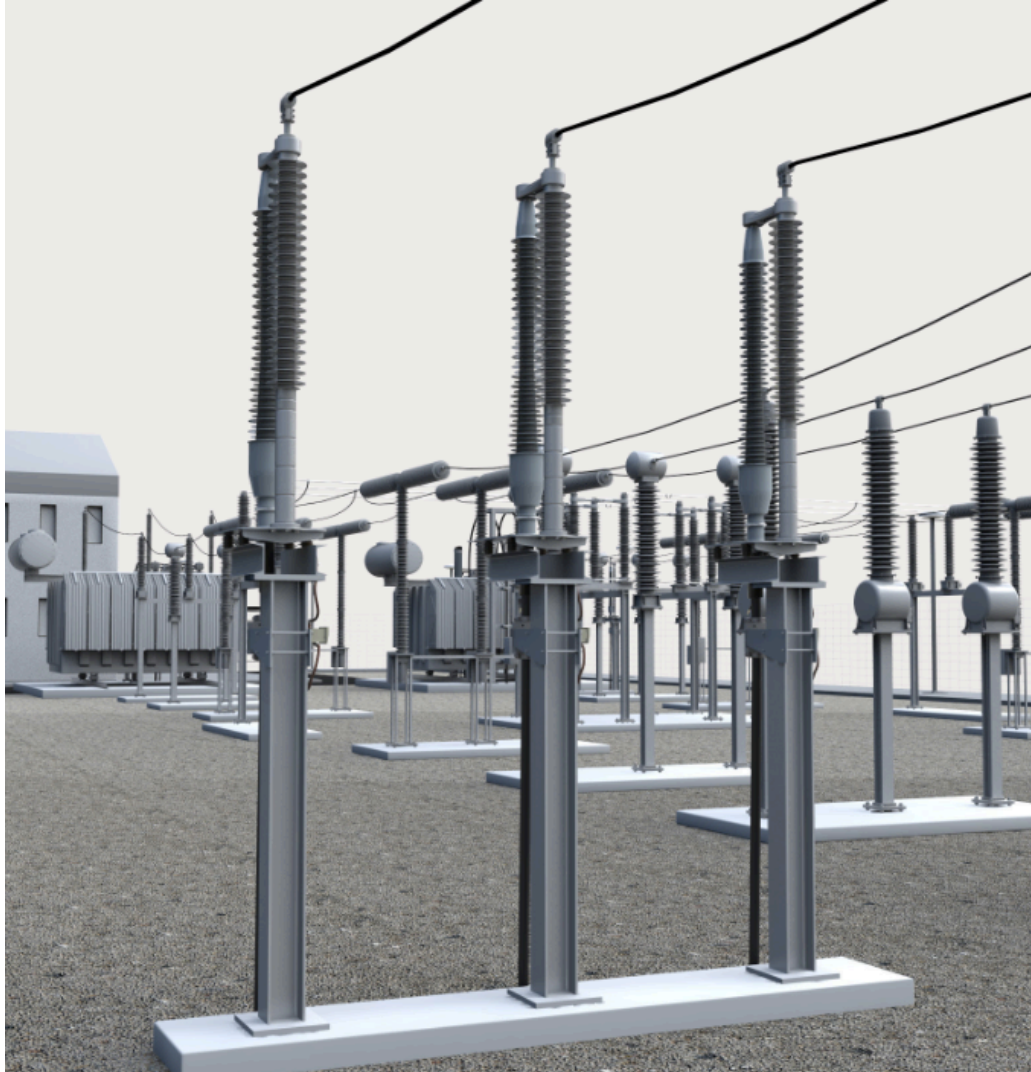


Kuva 5. ESS öljyeristeinen komposiittiulkopääte, Pfisterer.

Sähköasemalla mitatut ulkopäätteet ovat useiden eri valmistajien öljyeristeisiä päätteitä. Mitatut päätteet olivat öljyeristeisiä ulkoeristykseltään komposiittieristimellä ja posliinieristimellä varustettuja. Kuva 5 esittää öljyeristeistä komposiittiulkopäätteettä. ESS-ulkopäätteitä voidaan käyttää 72,5 kV:n jännitteestä aina 300 kV:n jännitteeseen saakka ja 110 kV:n jännitetasolle on olemassa neljä mallia 3075–4194 mm minimiryömintämatkalla. ESS-ulkopäätteen kuorena on komposiittieristin silikonieristinlautasilla. Komposiittieristimen sisällä on lasikuidulla vahvistettu putki. Nämä ominaisuudet luovat mahdollisimman korkean mekaanisen lujuuden. Tämä sillikoni-komposiittieristinkuori on täytetty eristävällä komposiittiaiaineseoksella, joka on päätteen ulkoeristyksen materiaali. Helposti asennettava päänsuojus ja sähkökentän ohjaus tekee ESS-päätteestä huoltovapaan. Pääte on asennettavissa momenttiruuvikengillä. [21.]

Ulkopääte voi olla myös öljyeristeinen posliinieristimellä kuten Pfistererin ESP-ulkopääte. Pfistererin ESP-ulkopäätettä voidaan käyttää 72,5 kV:n jännitetasosta aina 300

kV:n jännitetasolle asti ja 110 kV:n jännitetasolle ja ryömintämatka on valittavissa kahdella mitalla, 3813 mm ja 4540 mm. Posliininen eristin luo korkean mekaanisen lujuuden ja korkeimman suojan UV-säteilyä vastaan. Pääteen posliinieristinkuori on täytetty eristävällä posliiniaineseoksella. [21.]



Kuva 6. Pfistererin kuivaeristeisiä EST-ulkopäätteitä.

EST-ulkopäätte on uusi ympäristöystävällinen kuivaeristeisten ulkopäätte, joka korvaa perinteisesti käytetyt öljy- ja kaasueristeiset ulkopäätteet. Kuivaeristeisten päätteiden suurin etu on asennuksen helppous ja nopeus. EST-ulkopäätteet soveltuvat sekä sähköasemille että ilmajohtopylväisiin helpon asennettavuuden vuoksi. Päätteiden asennus ei vaadi alustoja ilmajohtoasennuksissa, sillä päätteet voidaan asentaa maassa ja sen jälkeen nostaa ilmajohtopylväaseen. Tämän seurauksena katkokset ovat lyhyitä. Päätteet eivät sisällä neste- tai kaasueristettä, jonka vuoksi niissä ei ole räjähdysvaaraa eikä

vuoto-ongelmia koko niiden elinkaaren aikana. Päätteissä on käytetty uutta älykästä rakennetta, joka kompensoi lämpölaajenemisen aiheuttamat muutokset. Kuivaeristeiset EST-ulkopäätteet soveltuvat 72,5 kV:n jännitetasosta 170 kV:n jännitetasolle asti ja 110 kV:n jännitetasolle on olemassa kaksi mallia 3075 mm:n ja 3814 mm:n minimiryömintämatkalla. Ulkopäätteet koostuu yhdestä joustavasta ESF-päätteestä ja yhdestä tukieristemestä. Eristeenä ulkopäätteessä on käytetty silikonipäälysteistä lasikuidulla vahvistettua vartta. [21.]

Sähkökentän tihtyminen altistaa eristeen vanhenemiselle ja rasittaa sitä. Ajan kanssa kyseisessä kohdassa tapahtuu helpommin eristeen läpilyönti. Sähkökentän tihtymisiä ja läpilyönnin riskiä voidaan välttää suunnittelemalla ulkopäätteiden eristysrakenteet käyttäen mahdollisimman pyöreitä muotoja. Eristysrakenteen geometrian, johtavien tai puolijohtavien pintojen suunnittelu keskittyy sähkökentän muotoon. Jänniterasituksia voidaan pienentää käyttäen hyväksi sähkökentän taipumista ulkopäätteiden eristeiden rajapinnassa. Läpilyönnit tapahtuvat eristysrakenteen heikoimmassa kohdassa. Sähkökentän tiheytyminen voi aiheuttaa eristeen sähkölujuuden ylityksen. Eristeen sähkölujuuden ylittymisestä ei välttämättä heti seuraa läpilyöntiä, mutta osittaispurkaukset ajan kanssa vahingoittavat eristettä lopulta aiheuttaen vaurion etenemisen ja johtaen läpilyöntiin. [5, s. 34.]

## 5 Osittaispurkauksien akustisen mittauksen teoria

Osittaispurkausaktiivisuutta löytyy akustisissa mittauksissa, jos akustista energiaa vapautuu eristysrakenteesta ultraäänialtointa ulkopäätteen ympärille. Nimensä mukaisesti osittaispurkaus ei sulje johtavaa elektrodiväliä kokonaan. Purkauksien syntyä edesauttavat eristeen valmistusvirheet, asennuksen ja kuljetuksen aikainen vioittuminen, erilaiset ylikuormitustilanteet sekä käyttöympäristö. Purkauksen tyyppiin ja suuruuteen vaikuttavat seuraavat tekijät: komponenttien nimellisjännite, toimintalämpötila, eristeen materiaali ja eristevaurion tyyppi, laajuus ja sijainti. [5, s. 80–89.]

Akustisten mittausten peruserä on kerätä mitattavasta sähkölaitteistosta osittaispurkauksen aiheuttamaa ääntä. Akustisten mittalaitteiden taajuusalue on 10 kHz–500 kHz, mutta käytännön taajuusalue on 30–50 kHz, joka sijoittuu ultraääniä synnyttävälle osittaispurkauksille. Käyttökelpoisin se on siksi, että juuri noin 40 kHz:n alueella on haitalliset osittaispurkaukset, sillä korona ei ole osittaispurkauksista se mitä halutaan kunnonvalvonnalla mitata. On olemassa akustisia mittalaitteita, joissa mitattavan kappaleen eri osiin tai eri puolille on kiinnitetty ultraääniantureita, joiden avulla voidaan laskea purkauksen äänen voimakkuuden ja kulkuajan tiedoilla. Ultraäänialto kulkee suoraan eristeiden ja väliaineiden läpi purkaukskohdasta. Ääniaallon nopeus riippuu väliaineesta. Akustista paikannusta käytetään muuntajien ja Gis-laitteiden osittaispurkauksien paikantamisessa. Muuntajilla haasteena on selvyyden saaminen siitä, onko tuloksena sydänlohkojen välinen kipinä tai haitallinen osittaispurkaus. [5, s. 201, 498.]

Tässä tutkimuksessa käytettävä mittaus perustuu akustiseen ultraäänisensoriin, johon kerätään äänet parabolisella peilillä. Mittausten oikeaoppinen suorittaminen edellyttää työn ohessa laaditun mittausohjeen mukaista toimintaa. Mittaus tulee suorittaa ulkopäätteille samalla tavalla ja samalla etäisyydellä mitattuna ulkopäätteen telineen juuresta. Mittaus perustuu osittaispurkauksista aiheutuvan akustisen emission ja ulkopäätteen normaalin akustisen ultraäänitason mittaamiseen. Mittauksissa havaittuun normaalitasoon verrataan akustista emissiota. Ulkopäätetyyppi pitää olla sama ja jokaiselle ulkopäätteelle mittaus on tehtävä samalla tavalla. Vertailemalla arvoja voi päästä myös suoraan tulokseen siitä, että jatkotoimet joko tiheämmällä aikavälillä, uusintamittaukset tai kunnossapidon toimet ovat tarpeen mukaisia.

## 5.1 Akustinen ultraäänisensori ja äänenpaine

Ultraääni muodostuu mekaanisesta aaltoliikkeestä muiden äänien tavoin. Ultraääniaaltojen taajuus on ihmisen kuuloalueen yläpuolella. Ääniaaltoja on joko poikittaisia tai pitkittäisiä ja äänen nopeuteen vaikuttaa väliaineen tiheys missä ääni liikkuu. Ultraääniaaltoja voidaan kuvailla elastisiksi aalloiksi, joita esiintyy kiinteissä aineissa, nesteissä ja kaasuissa. Ultraäänen nopeus on riippuvainen väliaineen materiaalista ja muodosta. Edetessään ultraääniaalto luo liikettä väliaineeseen. Lyhykäisydessään voidaan sanoa, että ultraääniaaltoja on kahdenlaisia; laaja aalto, joka etenee väliaineen sisällä ja ohjattu aalto, joka etenee väliaineen pinnalla tai väliaineiden välisellä alueella. [13; 14.]

Aallonpituus pystytään laskemaan seuraavalla kaavalla 11:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (11)$$

$v$  on ääniaallon etenemisnopeus

$\lambda$  on aallonpituus

$f$  on taajuus.

Ultraäänien tunnistuksessa aallonpituus on olennainen osa ja kohteen koon pitäisi olla vähintään puolet aallon pituudesta kyseessä olevalla käyttötaajuusalueella. Ääniaallon voimakkuus lasketaan kaavalla 12:

$$I = \frac{P}{A}, \quad (12)$$

$I$  on äänen intensiteetti

$P$  on teho

$A$  on pinta-ala.



Äänen etenemisen nopeus riippuu väliaineesta ja siitä, kuinka vahvasti sen molekyylit ja atomit ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Ääniaaltojen eteneminen on hitainta kaasuissa, joissa osasten vuorovaikutus on heikompaa vapaan liikkuvuuden vuoksi ja nopeinta ääniaaltojen eteneminen on kiinteissä aineissa, joissa aineen osaset eivät pääse liikkumaan vapaasti. Ilman lämpötila on suurin äänen nopeuteen vaikuttava asia. [14.]

Äänennopeus lasketaan kaavalla 13: [14]

$$v = \sqrt{\gamma RT}, \text{ missä} \quad (13)$$

$v$  on äänennopeus

$\gamma$  on adiabaattinen vakio

$R$  on kaasuvakio

$T$  on lämpötila.

Nesteessä ja kaasussa ääni kulkee paineaaltoina. Ääniaallon amplitudi eli värähdyslaajuus kertoo ääripisteiden etäisyyden toisistaan. Äänenvoimakkuus suurenee värähdyslaajuuden suuretessa. Äänenpainetasona ilmoitetaan äänen voimakkuus, joka lasketaan kaavalla 14: [13]

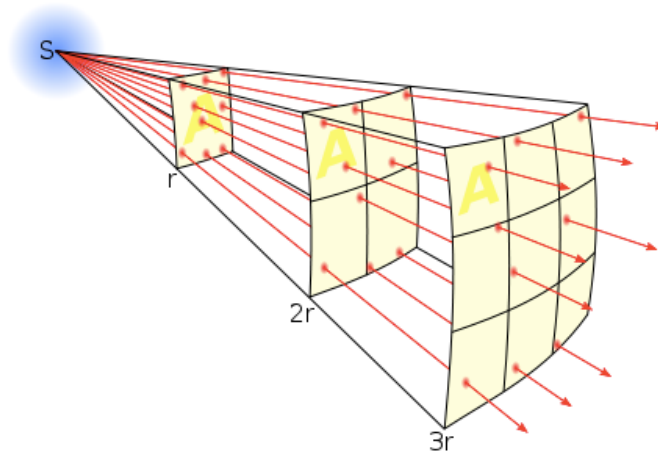
$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{Prms^2}{Pref^2} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{Prms}{Pref} \right) \text{ dB}, \quad (14)$$

$Prms$  on mitattu äänenpaine

$Pref$  on vertailuarvo (ihmiseen kuuloalueen vertailuarvo on  $20 \mu\text{Pa}$ )

$L_p$  on äänenpaineen taso.

Kuvasta 7 seuraavalla sivulla nähdään, miten pistemäisen äänilähteen äänen intensiteetti laskee etäisyyden neliönä. Mitattaessa äänten voimakkuuksia eri äänilähteistä on tärkeää ilmoittaa mittausetäisyys, jotta mittaustulos olisi luotettava ja toistettavissa.



Kuva 7. Äänen heikkeneminen etäisyyden funktiona. Sama teho kulkee pintojen läpi, mutta pinta-ala on verrannollinen etäisyyden neliöön. Pinta-alan kasvaessa ääniaallot hajaantuvat pidemmälle alueelle ja vaimenevat [13].

Osittaispurkausten akustinen ilmaisu perustuu osittaispurkauksien synnyttämään ultraääneen. Suurjännitelaitteille akustisia mittauksia tehdään pääasiallisesti tehomuuntajissa ja GIS-laitteistoissa sekä ilmaisemiseen, tunnistamiseen että paikallistamiseen. Käyttötarkoituksen mukaan käytetään eri taajuusalueita, jotka parhaiten sopivat eri laitteistoille. Siksi eri laitteissa käytettävät ultraäänianturit ovat erityisesti niille tehtyjä. Tehomuuntajilla purkausten lähettämä äänisignaali on 100–400 kHz, kaasueristeisessä kytkinlaitoksessa ultraäänisignaali on 20–250 kHz sekä normaaleilla äänitaajuuksilla 100–300 kHz. Kaapelipäätteillä ja jatkoksilla osittaispurkausten paikantaminen ja niiden aiheuttaman äänen taajuusalue on sopiva keskimäärin 5–50 kHz:n välillä. Tällöin vaihtelua osittaispurkauksien aiheuttamilla taajuuksilla on kymmeniä kilohertsejä ja yli 50 kHz:n alueen kymmeniä kilohertsejä. Seuraavassa esitetään, miten aallonpituus ultraäänillä vaihtelee 40 kHz:n ja 80 kHz:n taajuuksilla eri väliaineissa seuraavien laskujen mukaan aallonpituuden kaavalla 11. [5, s. 201.]

Kaavan 11 mukaisesti aallonpituus eri väliaineissa on:

Aallonpituus muuntajaöljyssä:

$$\lambda = \frac{1390 \text{ m/s}}{40000 \text{ Hz}} = 0,03475 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{1390 \text{ m/s}}{80000 \text{ Hz}} = 0,01737 \text{ m}$$

Aallonpituus ilmassa:

$$\lambda = \frac{343 \text{ m/s}}{40000 \text{ Hz}} = 0,008575 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{343 \text{ m/s}}{80000 \text{ Hz}} = 0,00429 \text{ m}$$

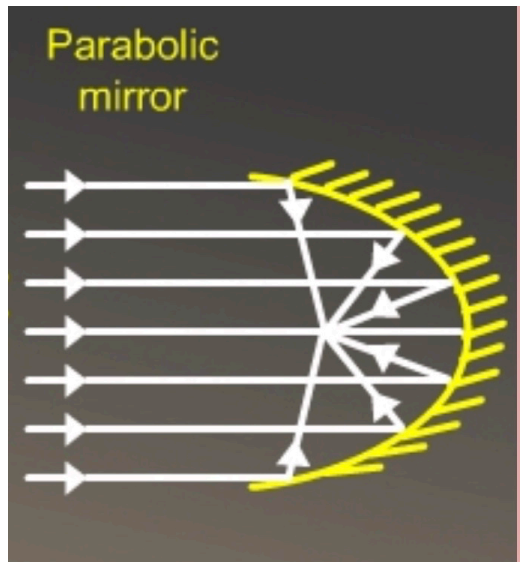
Aallonpituus posliinissa:

$$\lambda = \frac{4880 \text{ m/s}}{40000 \text{ Hz}} = 0,122 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{4880 \text{ m/s}}{80000 \text{ Hz}} = 0,061 \text{ m}$$

Äänen nopeus vedessä vaihtelee 1403–1543 m/s 0–100°C:n lämpötilassa ja esimerkiksi -2°C:n jäässä ääni kulkee 3610 m/s. Komposiitilla äänennopeus 3070 m/s. Normaalisti havaittajalle saapuvan aallon taajuus on sama kuin lähteen värähtelytaajuus. Väliaineen vaihtuessa nopeus muuttuu, mutta taajuus pysyy samana, jolloin aallon pituus muuttuu. Ääniaallot taipuvat, kun kulkunopeus muuttuu. Ääniaallot pyrkivät esteen kohdalla taipumaan kohdatun esteen taakse. Teho ja värähtelytaajuus ovat tekijöitä, joiden havaitsemisen vaikuttaa sensorin herkkyys ja taajuuksien vastaanottokyky. [17; 18; 19 s. 86.]

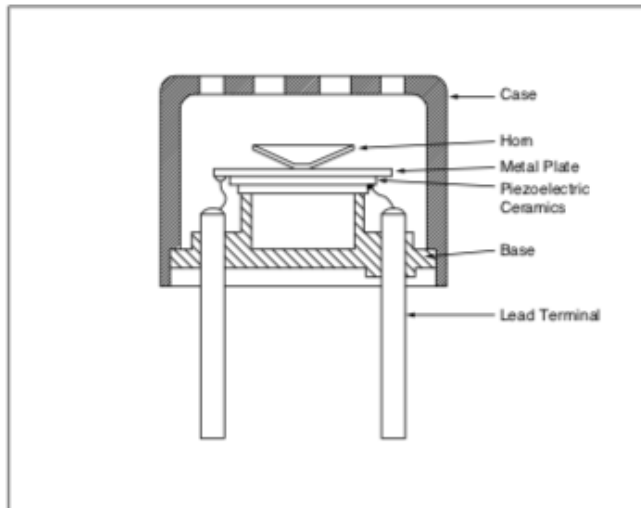
Akustinen PD-ilmaisu perustuu siihen, että osittaispurkaukset esiintyvät ultraäänialueella akustisen tai mekaanisen aallon pistelähteenä. Akustisten aaltojen leviäminen sisäisessä rakenteessa jatkuu niin kauan, kunnes ne saavuttavat ulkopinnan. Ultraääniaallot esiintyvät erilaisina aaltoina, joilla kaikilla on eri etenemisnopeus. Niiden läpäisy ja heijastukset eri rajapinnoilla aiheuttavat vaimennusta, absorptiota sekä hajaantumista. On hyvin tyypillistä, että akustiset aallot ilmaistaan ja muunnetaan mittalaitteistossa sähköiseksi signaaleiksi erilaisten antureiden avulla. Siitä eteenpäin signaalit muutetaan desibeleiksi. Antureihin tuleviin osittaispurkaussignaaleihin kerrostuu heijastuksia, jotka vaikuttavat osittaispurkauksista syntyvien vikojen tunnistamiseen ja paikantamiseen negatiivisesti akustista mittausta käytettäessä. Ulkopäätteillä paikantaminen on suhteellisen helppoa akustisesti. [5, s. 200–201.]



Kuva 8. Parabolinen peili kerää ääniaallot yhteen fokuksipisteeseen [27].

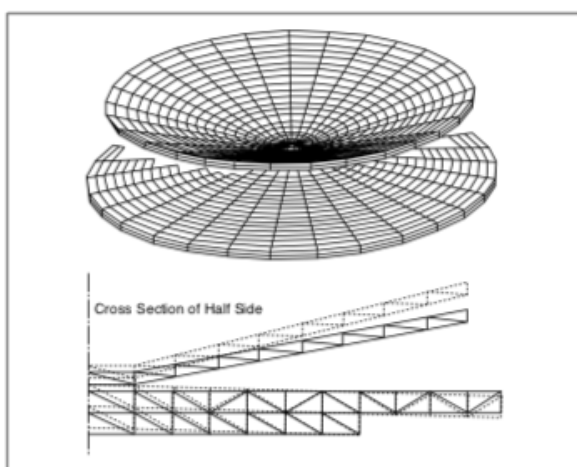
Akustisia antureita on aktiivisia ja passiivisia sekä kosketus- tai etäantureita. Erilaisia anturityyppejä ovat esimerkiksi pietsosähköinen anturi, akusto-optinen anturi sekä kondensaattorimikrofoni. Parabolisen peilin kanssa mitattaessa ultraääni jatkaa matkaansa ilmassa, kunnes saavuttaa peilin, joka kerää aallot sensorin keilan pisteeseen. Kuvassa 8 nähdään, miten parabolinen peili toimii. Akustinen osittaispurkausmittaus parabolisen peilin kanssa poikkeaa siitä akustisen emission mittaustavasta, jossa käytetään antureita kiinnitettynä sähkölaitteiston kylkeen. Usean anturin akustista mittaustapaa on käytetty mm. muuntajien osittaispurkausmittauksissa ja paikantamisessa. Akustisten PD-mittausmenetelmien etuina voidaan pitää mm. suhteellisen helppoa suorittamista, riittävän herkkää verifiointia eli toimintatestausta toimintapaikalla sekä sitä, että akustinen mittausta on immuuni aseman erilaisille sähkömagneettisille häiriöille. [5, s. 201.]

Osittaispurkauksia voi syntyä ihmisen kuuloalueen taajuudella esimerkiksi korona 16 kilohertsistä eteenpäin. Ihmiskorva ei havaitse 20 kHz:ä suurempia ultraääniä, koska ne ovat korvan kuuloalueen taajuuden yläpuolella. Ne eivät myöskään etene tyhjiössä vaan tarvitsevat aina väliaineen, jossa edetä. Kaasussa ja nesteessä eteneminen tapahtuu pitkittäisinä aaltona, kun taas kiinteissä aineissa ultraäänien eteneminen on pitkittäistä ja poikittaista vaimeten tehokkaammin. Ultraäänien ominaisuuksia ovat taittuminen, fokuksituminen ja heijastuminen. [7.]



Kuva 9. Rakennekuva sensorista: 1. liitäntänapa, 2. alustaelementti, 3. pietsosähköinen, ke-raaminen taso, 4. metallinen lautanen, 5. äänitorvi, 6. kotelo [16].

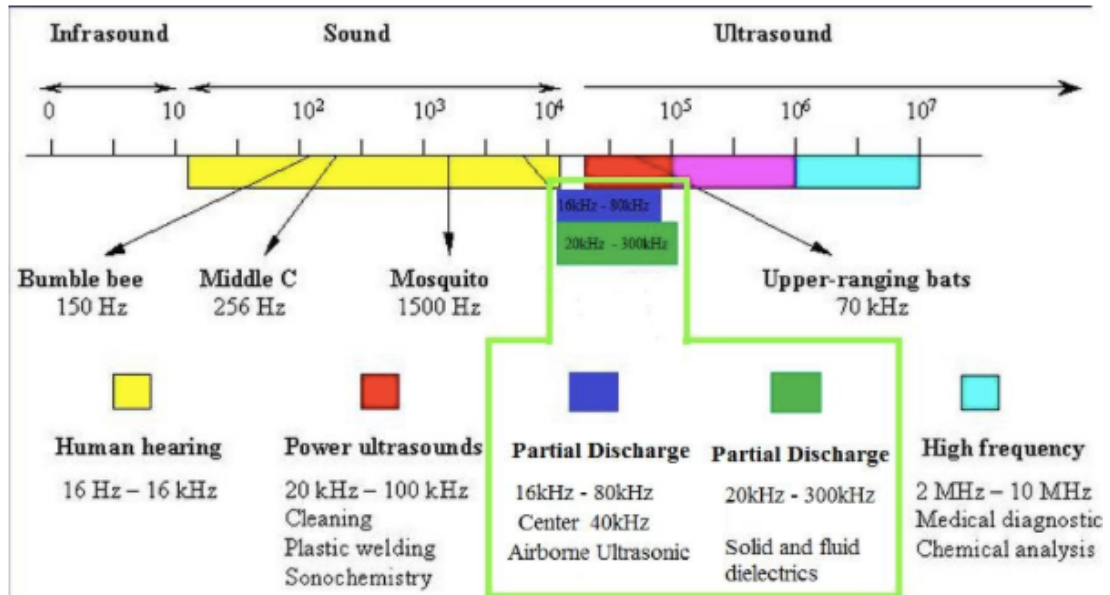
Akustisissa ultraäänisensoreissa on sisällä materiaalia, joka ottaa vastaan mekaanista stressiä ja liikehtii sen seurauksena mekaanisesti, kun osittaispurkauksen synnyttämä ultraääniaalto saavuttaa sen. Rakenteeltaan sensori on kuvan 9 mukainen, jonka välityksellä ultraääni kulkeutuu äänitorven kautta resonoiden ja värähdellen metallilevylle ja siitä eteenpäin pietsosähköiselle keraamiselle alustalle. Tätä mekaanista liikehdintää kutsutaan pietsosähköiseksi ilmiöksi, jossa molekyylit kristallisoituvat ja muodostavat molekyylidipolisidoksia, jotka liikkuvat samansuuntaisesti muodostaen vierekkäisten dipolimolekyyliden kanssa piirin. Kun vahva sähkökenttä vaikuttaa sidoksiin niin varaukset suuntautuvat kentän mukaisesti. Mitä isompi mekaaninen stressi kohdistuu vastaanotto-lautaseen, sitä suurempi sähkövaraus syntyy. Kuvassa 10 esitetään vastaanottavan ma-teriaalin muotoa, joka on lautasmainen, minkä vuoksi se resonoi hyvin ääntä värähtele-mällä. [16, s. 3, 12.]



Kuva 10. Ultraäänisensorin vastaanottolautasen malli [16].

## 5.2 Ultraääni osittaispurkauksien synnyttämänä

Ultraäänien taajuus on suurempaa kuin 16 kHz ja suurimmillaan 1000 MHz.



Kuvio 4. Osittaispurkauksien synnyttämät ultraäänit. [9]

Kuvio 4 selventää osittaispurkausten syntymistä ja käyttäytymistä eri eristeissä. Kuvio osoittaa, että osittaispurkaukset aiheuttavat ultraääniä ilmasyntyisesti 16–80 kHz:n alueella. Muistutetaan vielä, että ultraääni ei etene tyhjiössä vaan tarvitsee edetäkseen väliaineen. Osittaispurkausten aiheuttamat ultraäänit syntyvät ja etenevät sekä kiinteissä että nestemäisissä eristeissä yleisimmin 20–300 kHz:n taajuusalueilla. [9]

Akustisen mittalaitteen toiminta ja ilmaisu perustuu siihen, että osittaispurkaukset esiintyvät ultraääniaallon pistemäisenä lähteenä ultraäänitaajuudella. Purkauksen aiheuttamat ääniaallot leviävät kaapelipäätteiden sisäisissä rakenteissa kohdaten rakenteen ulkopinnan. Monenlaisia ääniaaltoja erilaisilla etenemisnopeuksilla menee rakenteesta läpi. Ääniaallot heijastuvat rajapinnoilla, jolloin akustisina ilmiöinä ääni vaimenee, absorboituu ja hajaantuu. Osittaispurkaus synnyttää akustista emissiota ultraäänitaajuusalueella. Ultraääni läpäisee eristeessä olevan materiaalin, kun vauriokohdasta akustinen energia purkautuu. Purkauksen seurauksena havaitaan akustista emissiota vahvempaa äänenpaineen tasona verrattuna normaaliin akustiseen tasoon. Tulosten ymmärtämiseen tarvitaan vertailuarvoja sekä vertailua mittausten aikana. [5, s. 199–204.]

Fokusoituminen on ääniaaltojen keskittymistä siten, että eri suunnista tulevat yhdensuuntaiset ultraäänit muodostavat uuden suunnan. Heijastumisessa eri väliaineiden olomuotoalueet eli faasit ovat homogeenisia osa-alueita, joissa rajapinta erottaa esimerkiksi kaasu- tai nestefaasin kiintofaasista. Heijastuminen on siis kahden eri faasin pinnalla tapahtuvaa ultraäänien muutosta, jossa aallot muuttavat suuntaa ja jatkavat liikettä samassa faasissa. Taivutuksessa tarkastellaan ultraääntä kahden olomuotoalueen rajapinnassa, jossa suunta muuttuu ultraäänien jatkaessa matkaa toisessa faasissa. Tulo- ja taitekulmat ovat erisuuruiset riippuen olomuotoalueen aineen ominaisesta taivutuskertoimesta. Sähkövoimatekniikan komponenteissa ja laitteissa ultraääntä synnyttävät osittaispurkaukset eri materiaalien yhdistelmissä niiden olomuotoalueissa. [7.]

### 5.2.1 Osittaispurkaukset akustisen emission lähteenä

Osittaispurkaukset synnyttävät akustista emissiota ja sitä mitataan ultraäänisensorilla. Aikaisemmin esitellyllä ratkaisulla ultraäänisensorista pystytään mittaamaan osittaispurkauksen aiheuttamaa akustista energiaa äänenpaineitasoina. Osittaispurkauksia voidaan tarkastella ja konkretisoida yksittäisinä purkauksina, pulssijonoina, voidaan tarkastella myös integroitua arvoja, kokonaisenenergiaa ja tehoja. Rakenteet ovat vertailtavat, kun verrataan kahden identtisen rakenteen arvoja keskenään. Osittaispurkauksessa varautunut sähköenergia muuntuu lämmöksi, optiseksi, kemialliseksi ja akustiseksi energiaksi. Akustinen emissio on ultraääniaaltoja. Osittaispurkaukset paikannetaan akustisen emission kasvuna johtuen purkauksista, jotka tulevat eristyksen rasituspisteestä tai synnyttävät akustisen aallon pistelähteestä. Tällainen pistemäinen lähde voi olla edellä sisäisen osittaispurkauksen tai pinta- ja liukupurkauksien, aiheuttamaa, mutta myös koronaa. Ääniaallot etenevät neste- ja kaasueristyksessä pallonmuotoisena ja pitkittäisenä paineaaltona. Kiinteässä eristyksessä tai eristyksen pinnalla etenevä akustinen aalto on huomattavasti monimuotoisempi ja muodoltaan mutkikkaampi. Teho syntyy purkauksista ja liikkuu väliaineessa ultraääniaaltona akustiselle sensorille. Sensorilla energia muuntuu eri suuruisiksi sähköisiksi signaaleiksi ja tästä edelleen vahvistettuna ja ilmaistuna akustisen emission tasona desibeleinä. [5, s. 88-89, 200-201.]

Syvällä eristyksen sisällä syntyvä akustinen emissio on voimakkaasti riippuvainen eristyksen materiaaleista ja siksi vaimenee voimakkaasti. Mittauksen herkkyyden saavuttaminen on tärkeää. Osittaispurkauksien kirjattujen tulosten perusteella voidaan kerätä sormenjälkikirjastoja, joiden avulla voidaan tehdä syvempää analyysiä kunnonvalvonnan

avuksi ja myöhemmin kymmenien vuosien päästä kirjastoon kerättyjen tulosten perusteella tehdä päätöksiä ajatellen elinikää ja ovatko ulkopäätteet tulossa elinkaarensa päähän. Akustinen emissio osittaispurkauksen aiheuttamana äänenä ultraäänialueella on intensiteetiltään erottuva tausta melutasosta. Ultraäänialto kulkee rikkinäisen eristeen, särön tai ontelon ympärillä olevasta väliaineesta tai pintapurkaukskohdasta läpi ja ilmassa suoraan pitkittäisenä aaltoliikkeenä sensorille. [5, s. 200-201, 498.]

Akustinen osittaispurkausten ilmaisu on sopiva menetelmä mittamuuntajien, läpivientien, kaapelijatkosten, kaapelipäätteiden sisäisten purkauksien sekä osittaispurkausten paikantamiseen että havaitsemiseen. Huomioitavaa on, että akustinen signaali on riippuvainen mitattavien laitteiden eristyksen eroista, tietyllä laitetyypillä ominaisella ultraäänitaajuusalueella. Akustinen signaali on riippuvainen myös osittaispurkaustyypeistä ominaisella ultraäänitaajuusalueella. Etäisyys mittaustapausta on tärkeä säilyttää samana purkausten paikantamisen ja tulosten vertailukelpoisuuden vuoksi. [5, s. 201.]

### 5.3 Akustisen mittaustavan herkkyys

Mittaustarkkuus (accuracy) on käsite, joka on tärkeä ymmärtää. Mittaustarkkuudella ei ole yksiselitteistä suuruutta tai arvoa. Riippuen mittaustavasta ja tutkimustavasta voidaan löytää mittaustarkkuudelle tulosten keskiarvojen vaihteluväli tai toleranssi. Edellytys tarkkuuden parantamiseen on kaikki mahdolliset virheiden tiedostaminen ja löytäminen. Mittausvirhe (measuring error) ja niiden tuntemattomuudesta huolimatta virheellä on aina suuruus. Kaikki virheet, jotka tunnistetaan, voidaan korjata. Tulokset on korjattava ennen kuin voidaan todeta mittaustulos luotettavaksi. Mittaukset tulee tehdä luotettavalla mittaustavalla. Tarvitaan ohjeistus, jotta mittaus tehdään oikein eikä virheitä tehdä. Tunnettua virhettä ei voi sallia. Mittalaitteella jäljitettävyyttä (traceability) on kalibrointien ketju käytettyyn mittaustapausta ja siihen liittyviin normaaleihin sekä kansainvälisiin tulosvertailuihin. Näin jäljitettävyyttä on erityisesti laadun varmistusta siitä, että mittaustapausta todella on kalibroitu luotettavasti ja näin ollen tulokset ovat luotettavia. Mittaukset on suoritettava ohjeiden mukaisesti ja näin luotettavuus voidaan taata ja tulevaisuudessa standardisoida. Kalibroinnin tarkoituksena on yhdenmukaistaa mittaukset ja määrittää sekä dokumentoida mittaustapausta, eikä korjata niitä. Kalibroinnin tulos on pätevä kalibrointihetkellä niissä kalibrointiolosuhteissa eikä takaa tuloksen pysyvyyttä. [5, s. 447–450.]



Suurjännitemittausjärjestelmien kalibroinnista on käytössä kaksi tapaa toimia. Ensimmäinen toimintamalli on vertailu referenssijärjestelmään skaalauskerroimen ja sen riippuvuuksien määrittämiseksi käyttäen stabiiliutta sekä läheisyysvaikutuksia sekä lineaarimittausta. Toinen tapa kalibroida suurjännitemittauksia on komponenttikohtaiset mitaukset, joilla määritetään skaalauskerroin ja sen kaikki riippuvuudet sekä dynaamiset ominaisuudet. Osittaispurkausmittauksissa kalibrointien välinen aika voi olla merkityksellinen ja mittausjärjestelmä on kalibroitava heti, jos testauksessa ilmenee laitteen toiminnan muutosta herkkyydessä ja tuloksissa. [5, s. 450.]

## 6 Osittaispurkausmittausten järjestelyt Fingridin kanssa

Fingridin kanssa käytiin läpi mittauksien toteutus viidellä sähköasemalla. Mittauskierroksia toteutettiin kaksi, joista toinen mittauskierros tehtiin talvella 2018 ja toinen kesällä 2018. Kesällä tuli vielä mitattavaksi yksi sähköasema lisää. Mittauskierrokset on toteutettu kylmänä ja lämpimänä vuodenaikana, jotta tuloksista pystytään poissulkemaan erinäisiä ilmiöitä, joita eristeiden pinnalla tapahtuu, jotka mahdollisesti vaikuttavat tuloksissa tulkinnallisena haasteena. Tällaisia ovat esimerkiksi säätilojen ja jään aiheuttamat häiriöt. Mittaustuloksilla saadaan varmuutta, mitä visuaalisesti on havaittavissa. Toisaalta voidaan löytää silmin havaitsemalla muutoksia ulkopäätteen pinnalla, mitä ei olisi pelkästään mittaamalla osannut katsoa päätteen pinnalta tarkemmin. Tällöin mittaustilanteessa pitää pystyä poissulkemaan suurjännitekaapelien ulkopäätteiden läheisyydessä olevien ilmajohtojen, liittimien ja myös ulkopäätteiden pinnalla esiintyvien hetkellisten säällisten olosuhteiden vaikutuksesta syntyvät koronailmiöt mittaustuloksissa.

Mikäli mittaaja löytää akustisella mittauksella ulkokaapelipäätteestä osittaispurkausaktiivisuutta, tulee hänen havainnollistaa ja havainnoida vallitseva tilanne. Hyvänä dokumentitapana voidaan pitää valokuvausta, josta pystyttäisiin erottamaan, oliko mitattavassa kohteessa esim. likaa, lunta, jäätä tai tiivistynyttä kosteutta. Tämän voisi dokumentoida esimerkiksi kuvaliitteenä tarkempina kommenttina sekä pöytäkirjan huomautuskenttään pienempinä huomautuksina. Verifiointi tehdään mittauspaikalla ennen varsinaisten mittausten aloittamista mittaamalla ympäristön ääniolosuhteita ottaen ylös yleinen akustinen taso ennen kuin ulkopäätteitä aletaan mittaamaan.

### 6.1 Alkuasetelma ja akustisen mittalaitteen käyttöönotto

Ennen varsinaisten mittausten aloittamista testattiin mittalaite. Näin saatiin käsitys mitausherkkyydestä. Laitteen mittausetäisyyden testaus oli olennaista ennen varsinaista mittausta. Metropolian suurjännitelaboratoriosta varattiin aika mittauksia ja testausta varten. Testauksen tarkoitus oli ymmärtää paremmin laitteen toiminta, käytettävyyden, herkkyys ja akustisten tasojen vaimeneminen, jotta näitä ilmiöitä olisi helpompaa huomioida ja havaita itse mittaustilanteissa sähköasemilla. Akustisten tasojen vaimeneminen näkyy, kun mittausetäisyyttä muutetaan. Mittaukseen liittyy olennaisesti se, kuinka tarkasti mittaaja pystyy havainnoimaan, kuuntelemaan ja kohdentamaan laitteen mittauspisteisiin, joita on tarkoitus mitata.

## 6.2 Baur PD-SGS testaus Metropolian Suurjännitelaboratorion testitiloissa



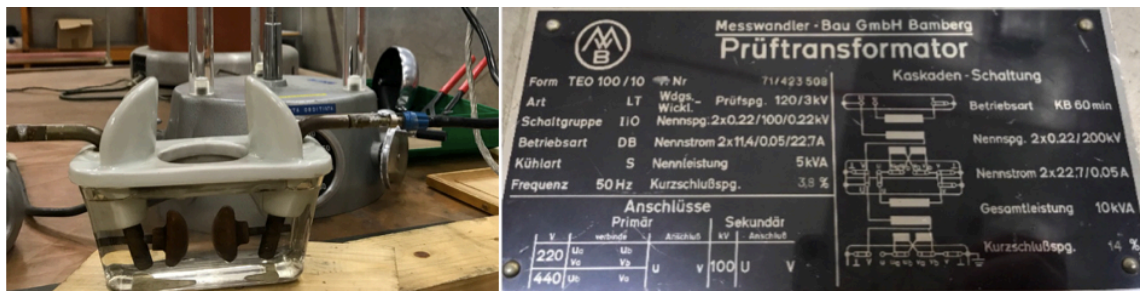
Kuva 11. Suurjännitelaboratorion muuntajan ohjauskeskus ja mittarit.

Kuvassa 11 näkyy Metropolian suurjännitelaboratorion testitilat, joissa suurjännitemuuntaja taustalla. Testauksessa tehtiin akustisia osittaispurkausaktiivisuusmittauksia ja mitattiin akustista emissiota kolmesta, viidestä ja kuudesta metristä. Testaustilanteessa lasiastiassa oli muuntajaöljyä ja kaksi mittakärkeä tietyllä etäisyydellä toisistaan. Elektrodiväli oli 12,9 mm, joten vasta korkeammilla jännitetasoilla tapahtui selkeitä isoja purkauksia. Testiasettelu näkyy kuvassa 13. Testauksen edetessä nostettiin jännitetasoja hiljalleen, samalla kirjaten ylös akustisia mittaustuloksia desibeleinä eri jännitetasoilta. Testaus suoritettiin sisätiloissa ja näin ollen olosuhteet olivat hyvin erilaiset verrattuna ulko-olosuhteisiin ja mahdollisten erilaisten melulähteiden olemassaoloon. Isoja muutoksia ei havaittu esimerkiksi siinä, että tila olisi heijastanut häiritseviä mittaustuloksia vääristäviä arvoja.



Kuva 12. Metropolian muuntajalaitteisto.

Kuvassa 12 näkyy muuntajalaitteisto lähikuvassa. Testauksen kannalta mietittiin, miten esimerkiksi suurjännitelaboratorion akustiikka vaikuttaa siihen, että purkauksien heijastumat seinistä olisivat muuttaneet mittaustuloksia. Kohdistaminen ohi öljyastiasta kymmenen senttimetriä pudotti akustiset desibeliarvot lähes nollassa. Tuloksista nähdään, milloin akustista emissiota alkoi syntyä ja purkaukset öljyssä alkoivat. Etäisyys ja osittaispurkausaktiivisuus vaikuttivat akustisiin arvoihin. Mitä suurempi jännitetaso sitä enemmän akustista emissiota öljyssä syntyy. Kun purkauksia öljyssä syntyy, voidaan saada käsitys akustisen emission suuruudesta. Osittaispurkaustasoon vaikuttaa öljyn ominaisuudet, kosteus ja kaasupitoisuudet. Öljyn ilmakuplat altistavat osittaispurkauksille ja koronalle.

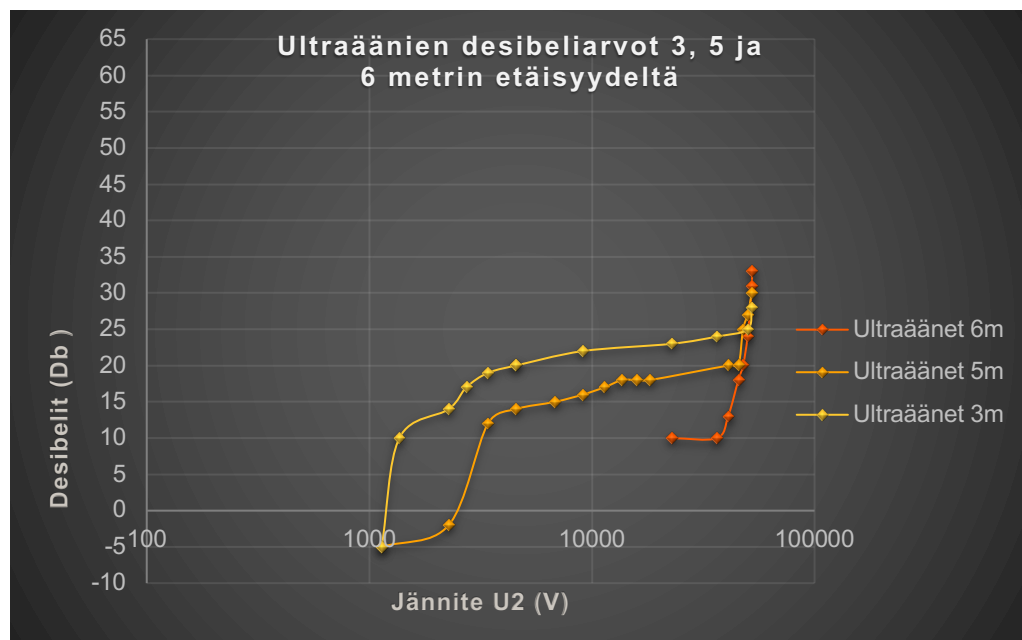


Kuva 13. Testiasetus suurjännitemuuntajalla, öljyastiassa elektrodiväli 1,29 cm.

Mittauksissa jännitetasoja suurettamalla kasvoivat mittaustuloksissa akustisen emission suuruus. Ultraäänien akustinen energiaan määrä kasvaa, kun jännitettä suurennetaan. Osittaispurkaukset alkoivat kolmen metrin etäisyydeltä 1,4 kV:n kohdalla ja viiden metrin

etäisyydeltä 2,3 kV:n kohdalla. Taulukosta 1 nähdään ultraäänenpaineentason kasvaminen jännitetasolle 50 kV:iin saakka. Etäisyys vaikuttaa vaimentaen desibeliaaltoja. Etäisyyttä kasvattaessa pienemmät osittaispurkauksien synnyttämät äänenpainetasot jäivät selkeästi alhaisemmaksi. Baur PD-SGS parabolisella peilillä on erittäin herkkä ja tarkka. Keilan leveys oli mittauspisteestä alle 20 cm kuuden metrin etäisyydeltä. Aluksi vertailaan arvoja kolmen ja viiden metrin etäisyyksiltä 30 kV:n tasolle saakka. Verrattaessa kolmen ja viiden metrin välillä tehtyjä mittaustuloksia nähdään samoilla osittaispurkauksella jännitetasoilla alussa yli kymmenen desibelin ero. 3,49 kV:n kohdalla ero oli 7 desibeliä. 9,91 kV:n kohdalla ero oli 6 desibeliä ja 41 kV:n kohdalla ero oli viisi desibeliä.

Taulukko 1. Mittaustulokset taulukoituna Suurjännitelaboratorion PD-SGS testauksesta, desibeliarvot kolme kuvaajaa 3, 5 ja 6 metrin etäisyydeltä mitattuna jännitteen funktiona.



Kuuden metrin etäisyydeltä mittauksia tehtiin jännitetasoilta 23 kV:a aina 52 kV:in asti. Verrattaessa kuuden metrin tuloksia viiden ja kolmen metrin tuloksiin, näytti mittaus 23 kV:n kohdalla 8 desibelin eroa viiden metrin ja 13 desibelin eroa kolmen metrin tuloksiin. Etäisyydellä on iso vaikutus desibeliarvojen suuruuteen, akustisen arvojen keräämiseen mittauspisteestä ja tulostarkkuuteen. Kolmen metrin etäisyydeltä ero oli 23 desibeliä. Eli erot viiteen metriin oli 8 desibeliä ja kolmeen metriin jo 13 desibeliä. Mittauksissa mentäessä yli 40 kV:in, lähtevät viiden ja kuuden metrin tulokset eksponentiaaliin nousuun ja 50 kV:n kohdalla kaikilla etäisyyksillä arvot saavuttivat toisensa ja erot olivat ainoastaan kaksi desibeliä. Tässä päädyttiin siihen, että näinkin isoilla eroilla desi-



beliarvoissa pienillä purkauksilla etäisyyden vaikutus on suuri. Suuri jännitetaso suurentaa purkauksia öljyssä ja testauksessa 50 kV:n kohdalla etäisyyden vaikutusta ei enää pystynyt yli 25 desibelin arvoilla erottamaan. Päädyttiin siihen, että mittaukset on hyvä suorittaa kolmen metrin etäisyydeltä. Selvitettiin tuloksien luotettavuuden ja turvallisuuden kannalta mittausten suorittamisetäisyys. Päädyttiin, että mittaukset tehdään kolmen metrin etäisyydeltä ulkopäätteiden telineestä mitattuna. Kolme metriä mittausetäisyydelle ei ole mitään estettä ja turvallisuusetäisyydet riittävät jännitteisiin osiin.

Työssä tarkoituksena on luoda pöytäkirja, joka kertoo kaiken tarvittavan vallitsevista olosuhteista ja akustisen emission tasot kirjattuna desibeliarvoina. Desibelieroja voi vertailla ja tulkita jälkikäteen. Tulosten avulla voi uusintamittauksilla saada kunnonvalvontaan luotettavan työkalun akustisesta mittauksesta. Erityisesti paikantamiseen akustiset mittaukset antavat ison avun. Aikaisemmin todettiin, kuinka mittauspisteherkkä kyseinen mittalaite on. Tämä edellyttää kokemusta mittalaitteen käyttäjältä. Mittaajalla tulee olla osittaispurkauksien teorian syvempää tuntemusta ulkokaapelipäätteissä mahdollisesti esiintyvistä ilmiöistä. Tämä tukee ajatusta, että mittauksia tehdessä sekä löytääkseen tarkan että luotettavan arvon vaaditaan mittaajalta käytännön kokemusta. Olennaista on tarkkuus, taito skannata päätte läpi ja skannata muu mahdollinen taustan äänilähde läpi. Mittaajan tulee varmistua ja havainnoida tulosten luotettavuus vertaillen arvoja lähellä mittauspistettä. Mittaajan tulee löytää tarkka piste, jossa purkaus syntyy, jolloin todellinen ja oikea mittausarvo purkauksesta löytyy. Kuvassa 14 talven mittauskierrokselta osittaispurkausmittausta.



Kuva 14. PD-mittaus Baur PD-SGS osittaispurkausmittarilla parabolisella peilillä.

### 6.3 Sähköasemamittauksien järjestelyt Fingrid Oyj:n kanssa

Tämän opinnäytetyön toteutus alkoi perehtymällä Fingrid Oyj:n vaatimukseen, jonka jälkeen selvittävät asiat liittyivät varsinaiseen mittalaitteeseen ja sen ominaisuuksiin sekä teknisiin tietoihin. Tämän jälkeen työn aikataulut selkiytyivät Fingridin palaverissa, jossa käytiin tarkemmin läpi raamit työlle. Mittauksissa on toimittava Fingridin ohjeiden ja määräysten mukaisesti. Mittausten onnistumisen kannalta on tärkeää käsittää itse mittaustilanne ja mahdollisesti paikalla olevat työryhmät. Ensimmäisellä käyntikerralla sähköasemalla on aina mukana palveluntoimittaja, joka huolehtii paikallisopastuksen ja varsinaisen opastuksen liittyen kaikkeen tarvittavaan mittauskohteessa. Sähköasemalla voi samanaikaisesti olla esimerkiksi menossa kunnossapitotyö, joka voi muuttaa mittaustilannetta.

Kaikki mitattavat ulkopäätteet ovat öljyristeisiä kolmelta eri valmistajalta. Niistä viidellä sähköasemalla silikonikomposiittieristeisiä öljypäätteitä ja yhdellä asemalla posliinieristeisiä öljypäätteitä. Palaverissa selvitettiin myös turvallisuusasioita ja sitä, kuinka mitaukset suoritetaan turvallisesti. Turvallista työskentelyä varmistamassa Fingridillä on olemassa turvallisuusasioista verkkokoulu, joka pitää olla kaikilla mittaajilla suoritettuna ennen sähköasemille pääsyä. Sähköasemilla tarvittiin paikallisopastus, joka järjestettiin ennen mittausta. Akustisen emission PD-mittaukset ulkokaapelipäätteille päätettiin tehdä lähialueelta lähimmillään turvallisuuden takaamiseksi. Käytiin yhdessä läpi ja käsiteltiin työn tarkempi ja turvallinen suorittaminen, yhteisessä palaverissa.

Näin turvallisuus varmistetaan mittausta tehdessä pysymällä lähialueen rajalla. Tarkoitus on kuitenkin, että päästään riittävän lähelle, jotta saadaan tarpeeksi luotettavia akustisia mittaustuloksia. Sähköturvallisuuden valvoja vastaa mittaustilanteessa työturvallisuudesta, ettei mittauksessa ole erityisiä riskejä. Lähimmillään mittausetäisyys on tarkoitus toteuttaa kolme metriä mitattuna pylväsjalustaan kohtaan, jonka päälle päätte on kiinnitetty. Etäisyys jännitteiseen osaan on vielä päätteen pituuden verran enemmän.

Lähtökohta mittaukselle oli se, että mittaajan ja mittausryhmän tulee havainnoida olosuhteita ja mitattavaa sähkölaitteistoa sekä mitattavia ulkopäätteitä. Tämä on olennaista turvallisuuden kannalta. Akustisissa mittauksissa korostuu näkö- ja kuulohavainnointi. Online-mittauksissa on tärkeää tehdä jatkuvaa havainnointia mittauksien edetessä jokaisen ulkopäätteen kohdalla kunnosta ja niissä vallitsevissa moninaisista ilmiöistä, mitä on

mahdollista havaita. Sähköasemilla päätteiden kuntoon vaikuttavat sääolosuhteet ja sijainnin määrittämät olosuhteet. Likaiset ja meluisat olosuhteet voivat johtua teollisuudesta ja liikenteestä. Tien suolaus on haitallista sähkölaitteistolle. Akustisessa mittauksessa on tärkeää tutkia päätteiden visuaalista kuntoa. Päätelmät ympäristön ja ympärillä olevan melun vaikutuksesta mittaustulokseen on merkityksellistä. Tarkoituksena on oppia havainnoimaan esiintyviä ilmiöitä. Mahdolliset havaittavat ilmiöt, jotka halutaan poissulkea eristeen kunnonvalvonnan kannalta, merkitään pöytäkirjaan. Häiriöiden ja virheiden poissulkemisella jäljelle jää luotettaviksi osoittautuneet mittaustulokset. Akustisella mittauksella voidaan löytää eristeessä tapahtuvia sisäisiä osittaispurkauksia. SJ-ulko-kaapelipäätteen eristeen pinnalla ja ulkopuolella voi tapahtua liuku- ja pintapurkauksia. Osittaispurkauksia voi esiintyä öljyssä.



## 7 Akustinen osittaispurkausmittaus ulkopäätteille sähköasemilla

Sähköasemien akustisten mittausten tarkoituksena on hyvällä tarkalla havainnoinnilla selvittää päätteiden pinnan kuntoa sekä varmistaa vallitsevien mittausolosuhteiden olevan soveltuvat ilmankosteudeltaan ja lämpötilaltaan. Näin voidaan poissulkea ilmiöt kuten korona ja päästä luotettavampiin tuloksiin. Mittauspöytäkirjaan kirjataan havainnot ulkopäätteen pinnan kunnosta.

Eristeessä etenevästä mahdollisesti vahingollisesta ja poikkeuksellisen isosta normaalitytön poikkeavuudesta voidaan päätellä, että ulkopäätteen kuntoa tulee seurata mahdollisesti tiheämmin. Tällöin uusintamittauksella voidaan varmistua osittaispurkauksen etenemisestä eristeessä, joka johtaa lisäkunnossapidon toimiin. Tutkimusta voidaan jatkaa mahdollisilla syvemmillä osittaispurkausmittauksilla ja tulla päätökseen siitä, että kyseinen ulkopääte on tullut elinkaarensa päähän. Käytön aikaisilla akustisilla mittauksilla voidaan päästä tulokseen, milloin ulkokaapelipäätteet ovat elinkaarensa päässä. Öljy-eristeisessä ulkopäätteessä tapahtuu normaalistikin pieniä purkauksia ja koronaa, jota voidaan käsitellä normaalina akustisena emissiona.

### 7.1 Käytön aikaiset osittaispurkausmittaukset sähköasemilla 1–6

Mitattaessa osittaispurkauksia tulee huomioida, että mittausvirheitä voi syntyä helposti esimerkiksi lähes mistä tahansa mekaanisesta äänestä, sillä kyse on kuitenkin äänen-  
taajuusalueesta, jota ihmiskorvalla ei voi kuulla. Ensimmäisessä mittauksessa huomattiin, että paikalla olevien työryhmän jäsenten askeleet peiloutuivat hangen pinnasta paraboliseen peiliin ultraäänimikrofonin kautta korkeiksi desibelipiikeiksi. Tämä tehti lisätyötä ja uusintamittauksia, mutta oli hyvä, että tämä huomattiin mittausten aikana. Keväthangella askelia ei kannata ottaa, mikäli haluaa luotettavia mittaustuloksia ilman desibelipiikkejä.

Ilmajohtojen korona voi aiheuttaa kantautuessaan paraboliseen peiliin aiheuttaa vääriä mittaustuloksia mitattaessa ulkopäätteitä, vaikka mittauspisteessä ei tulisi mitään purkauksia tulokset voivat vääristyä. Tämän voi poissulkea mitaten myös ympäristöä ja mittausten taustaa, ilmajohtoja ja niiden liittimiä. Vaikutuksia mittaustuloksiin voi arvioida myös mittaustapahtuman jälkeen, kun dokumentoidaan ja kuvataan ulkopäätteet järjestelmällisesti ja asianmukaisesti. Kuvassa 15 näkyy kokonainen lähtö talven mittauskierrokselta.



Kuva 15. Ulkopäätteet 110 kV:n sähköasemalla talvella.

Ulkopäätteen eristeen pinnan kunto tutkitaan silmämääräisesti. Mikäli kunto todetaan moitteettomaksi ja puhtaaksi, pystytään poissulkemaan pintapurkaukset pois. Ulkopäätteen pinnalla ei ole tällöin näkyvää kertynyttä kosteutta, jäätä eikä likaa. Akustisen emission tasosta pystytään päättelemään luotettavasti, onko kyse eroista, joita tulee tarkastella ja tutkia tarkemmin. Pöytäkirjasta katsotaan, ovatko tulokset muiden vertailtavien ulkopäätteiden tasolla. Päätteen pinnan visuaalisessa tarkistuksessa pintapurkausten mahdollisuutta tarkastellaan etsimällä eristimen pinnalta hiilijälkiä. Korona on ilmiönä harmiton verrattuna ulkopäätteen eristyksen muihin sisäisiin- ja pintapurkauksiin. Korona voi harmillisesti kuitenkin peittää merkityksellisten osittaispurkauksien akustiset aallot.

Mittalaitteina sähköasemilla oli käytössä:

- käytönaikainen osittaispurkausmittari Baur PD-SGS
- parabolinen peili Sonospot L55 akustisille mittauksille
- lämpökamera FLIR i3
- sääasema Vaisala Hand-held RH & T Meter HM70
- laser-etäisyysmittalaite Leica DISTO D2.

## Sähköasema 1

Taulukko 2. Sähköasema 1:n mittausolosuhteet.

Test Date	29.3.2018	Time:9.00	Location	Substation 1	Humidity:54,1%	Temperature: -1,7°C	Measuring distance 3,0 m
Test Date	7.6.2018	Time:13.00	Location	Substation 1	Humidity: 38,44%	Temperature: 13,06°C	Measuring distance 3,0 m

Sähköasema 1 on vuonna 1996 valmistunut sähkönsiirron asema. Taulukosta 2 nähdään kesän ja talven mittausolosuhteet. Mittauspäivänä maaliskuussa vallitsi aurinkoinen sää, joka lämmitti ja sulatti kosteutta ulkopääteistä. Säätietojen seuraaminen on mittaamisen kannalta olennaista, sillä eri sääilmiöt voivat vaikuttaa mittaustuloksiin mm. häiriöinä. Mittaukset tehtiin 110 kV:n ulkopäätteille sähköasemalla. Sähköasemalla annettiin mittaustiimille paikallisopastus, mihin sisältyi sähköasemaan tutustumisen sekä papereiden läpikäymistä. Tämän jälkeen kuittasimme läpikäytyt asiat ymmärretyiksi.

Leicon-lasermittauslaitteella mitattiin etäisyys kuuden ja kolmen metrin päästä päätteiden alareunasta. Tarkoituksena oli luoda mahdollisimman luotettava tapa mitata ja saada luotettavaa mittausdataa. Ensimmäinen selvä vaikutus on eri mittausetäisyydeltä tehdyillä mittauksilla. Mitä lähempänä mittaaja on mittauskohdetta, sitä enemmän saadaan tulokseen tarkkuutta ja intensiteettiä. Mittauksia tehdessä voi tulla vastaan tilanne, jossa on mitattava eri etäisyydeltä tai kulmasta kuin aikaisemmin on mitattu, esimerkiksi jos on kyseessä päate, jota ei päästä mittaamaan niin lähelle kuin muita päätteitä.

Paikallisopastuksen jälkeen varsinainen mittaus alkoi ja sen aluksi katsottiin sääasemasta tietoja mittausolosuhteista. Suhteellinen ilmankosteus ja lämpötilaolosuhteet kirjattiin pöytäkirjaan. Kannettavan sääaseman mukaan sähköaseman kenttäolosuhteissa ilmankosteus oli 54,41 %. Mukana olleen sääaseman Vaisala Hand-held RH & T Meter HM70 mukaan lämpötila oli -1,7°C. Häikäisyuojatut suojalasit olivat hyödylliset, jotta näki kohdistaa laitteen mittauspisteeseen. Mittaukset aloitettiin ensimmäisestä johtolähdöstä edeten järjestelmällisesti seuraaviin. Pöytäkirjaan kirjattiin ylös kentän tunnuksat, lähdöt ja mistä vaiheesta L1, L2, L3 oli kyse.

Esteenä voi olla lähellä oleva seinä tai muu jännitteinen osa rajoittamassa mittauspai-  
kalle pääsyä tai tiettyä mittaussuuntaa. Pääte voi olla myös niin korkean telineen päällä,  
ettei ole mahdollista päästä lähemmäksi kuin ainoastaan telineen juureen, tällöin tosin  
mittauskulma on erityisen pieni. Turvallisuudesta vastaa sähköturvallisuuden valvoja.  
STTV eli sähköturvallisuuden valvoja ohjaa ja varmistaa ettei edessä ole jännitteistä  
osaa tai päätettä liian lähellä mittaajaa. Mittaajalle jää pohdittavaksi mittausta tehdes-  
sään, millaisesta kulmasta ja mistä suunnasta mittausta tulisi suorittaa, jotta saataisiin lu-  
ottavasti mitattua mitattavaksi tarkoitettu kohde.

Sähköasema 1:n ulkopäätteiden ikä on 21 vuotta. Toisella kesämittauskierroksella löytyi  
pintapurkausjälkiä ulkopäätteistä PD-SGS-mittalaitteella. Purkauskohdat löytyivät akus-  
tisella ultraäänimittauksella pienellä akustisen emission tason suuruuden poikkeami-  
sella. Purkauskohdista esitetään kuvia ja niitä käsitellään tarkemmin tuonnempana. Tu-  
lospoilkeamalla oli selkeä ero tavalliseen akustisen emission tasoon.

Talvella mitattiin koronaa ja kentällä olevan työryhmän askeleita. Askelhäiriöt antoivat  
yhteisvaikutuksillaan suuria vaihteluita mittaustuloksiin kuten myös korona. Ensimmäi-  
sen kierroksen tulokset menivät osittain harjoittelun piikkiin. Kesän mittauksia vertail-  
lessa talven arvoihin voidaan kuitenkin havaita, että suuremmat arvot tulivat myös tal-  
vella juuri niistä ulkopäätteistä, joista sitten kesällä löydettiin akustisilla mittauksilla ja  
visuaalisella tarkastelulla osittaispurkauskohtia.

Taulukko 3. Sähköasema 1 mittaustuloksia merkittynä erottuvat lähdöt ja ulkopäätteet.

Test Engineer	Ville ja Henry		Substation Name	2.kierros	Temperature	13,06 °C						
Test Date	7.6.2018	Time:	Location	Sähköasema1	Humidity:	38,44 %				Mittausetäisyys 3m		
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 3m(dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)	
AE =110kV	L1		1	Top	-4	-4	-3	0	kuva laipan alapuolella jälki/halkeama			
				Middle	-5	-5	-2	-4				
				Bottom	-5	-4	-1	-5				
				Max dB								
16	L2		2	Top	-4	-3	-5	-4				
				Middle	-4	-5	-3	-3				
				Bottom	-5	-5	-5	-3				
				Max dB								
	L3		3	Top	-4	-2	-4	-4				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-4	-5	-5				
				Max dB								
	L1		4	Top	-2	-4	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Max dB								
14	L2		5	Top	-3	-2	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Max dB								
	L3		6	Top	-5	-3	-5	-4				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Max dB								
	L1		7	Top	-5	-5	-5	-3	Jälki 3 laipan alla vas -2dB			
				Middle	-5	-5	-5	-3				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Max dB								
15	L2		8	Top	-3	-5	-5	-2	7 lautanen ylhäältä jälki 0dB			
				Middle	-2	-4	-5	-5				
				Bottom	-3	-5	-5	-5				
				Max dB								

Taulukossa 3 esiteltynä kesän mittaustuloksia. Taulukossa on ympyröitynä tuloksia ulkopäätteistä, jotka mittausrvoillaan ja visuaalisesti erottuivat selkeästi muista päätteistä. Nämä olivat lähdön 16 pääte 1, lähdön 15 päätenuumerot 7 ja 8. Muita erottuvia ulkopäätteitä kesänmittausten akustisen emission vertailussa olivat lähdön 16 pääte numero 3, lähdön 14 pääte numero 5. Päätteissä 3 ja 5 ei nähty visuaalisessa tarkastelussa muutoksia ulkoeristyksen pinnalla.

Muita erottuvia ulkopäätteitä kesän mittausten akustisen emission vertailussa oli myös lähdön 11 päätenuumerot 16 ja 18, lähdön 10 päätteen numerot 20 ja 21 ja lähdön 8 päätenuumero 23, joissa akustinen arvo oli enemmän kuin kahden desibelin erolla. Mittauksia tulee ottaa useammasta kuin yhdestä suunnasta. Sähköaseman 1 kesäarvot näyttivät suhteellisen tasaisilta.

## Sähköasema 2

Taulukko 4. Sähköasema 2 mittauskierroksien talvi- ja kesäolosuhteet.

Test Date	3.4.2018	Time:10.15	Location	Substation 2	Humidity:46,99%	Temperature:2,74°C	Measuring distance 4,5 m
Test Date	4.6.2018	Time:10.00	Location	Substation 2	Humidity:28,8%	Temperature:19,27°C	Measuring distance 4,5 m

Taulukosta 4 nähdään kesän ja talven mittausolosuhteet. Sähköasema 2:n 110 kV:n sähköasemalla mitattavia lähtöjä oli yhteensä kolme kappaletta. Sähköasemalla oli huomattavasti lunta. Sähköasemalla liikuttaessa lumella askeleet aiheuttavat häiriötä mittauksessa. Lämpötila kohteessa huhtikuun alussa oli +2,74 celsiusta ja ilmankosteus 46,99 %. Päätteet mitattiin ensin edestä päin siten että mittalaitteen etäisyys päätteiden jalustaan oli 4,5 metriä. Jalusta on noin kuusi metriä korkea, minkä päälle mitattavat komposiittieristeiset ulkopäätteet ovat asennettu. Mittaustulokset olivat tasaisia ja matalia akustisen emission desibeliarvoja, lukuun ottamatta yhtä päätettä. Matalat arvot olivat odotuksissa ulkopäätteiden nuoresta iästä johtuen. Sähköasema 2 on valmistunut vuonna 2009. Päätteisiin ei myöskään sijaintinsa puolesta ollut kertynyt silmin nähtävää likaa. Sähköasema sijaitsi likavaikutusten ulottumattomissa, eikä mitään mittauksiin vaikuttavaa ultraääniä synnyttävää taustamelua ollut lähellä.

Talven mittauskierroksella oli yksi poikkeava pääte. Pääte 6 antoi sekä edestä vasemmalta yläosastaan että takaa samaiselta kohtaa melko korkea desibeliarvon vaihdellen 12–19 desibelitasojen välissä. Tämä aiheutti ihmetystä mittaustiimissä, sillä kohteessa ei ollut havaittavissa silminnähdn likaa, joka olisi vaikuttanut mittaustuloksiin ja asema on muutenkin nuori ja samoin päätteet. Pääte kuvattiin sekä kameralla että lämpökameralla ja huomattiin, että lämpökamerassa ei näkynyt mitään merkittävää lämpömuutosta. Päätteen takapuolelta otetusta valokuvasta kuitenkin tarkentaessa selvisi, että ulkopäätteen huipulla näkyi pieni jääpiikki, joka sai aikaan päätteen pinnalla osittaispurkauksia.



Kuva 16. Pääte 6: Osittaispurkauksia aiheuttava jääpiikki.

Kuvassa 16 näkyy osittaispurkauksia aiheuttava jää päätteen 6 huipulta. Mittauksen kannalta päädyttiin tulokseen, jossa uusintamittaus suoritettaisiin tunnin kuluttua. Tunnin päästä päätte mitattiin uudelleen, aurinko oli sulattanut jääsakaran. Mittaustulokseksi saatiin samansuuruisia desibeliarvoja kuin muissakin päätteissä. Talven toisen mittauspäivän anti oli, että saatiin mitattua koronaa ja muuten näytti kaikki päätteet olevan kunnossa.

Kesällä tulokset olivat odotetusti alhaisia. Näin uusilla päätteillä tulokset kuuluivat olla alhaisia. Lähtö 3 päätte 7 oli ainut päätte, jonka arvot kesän mittauksissa huipulta ja keskeltä erosi 5 desibeliä tavallisesta tasosta.

Taulukko 5. Lähdon 3 päätte 7 erottui joukosta ja muutenkin poikkeuksellisesti 2 desibelin eroja löytyi kyseisessä lähdössä.

		7	Top	0	-2	-5	0
			Middle	0	-2	-5	-5
			Bottom	-5	-5	-5	0
			Max dB				
		8	Top	-4	-5	-5	-5
			Middle	-3	-5	-5	-5
			Bottom	-3	-5	-5	-5
			Max dB				
		9	Top	-3	-4	-5	-4
			Middle	-4	-4	-5	-3
			Bottom	-5	-5	-5	-5
			Max dB				

## Sähköasema 3

Taulukko 6. Sähköasema 3 mittausolosuhteet talvella ja kesällä.

Test Date	4.4.2018	Time:9.00	Location	Substation 3	Humidity:45,66%	Temperature: 3,72°C	Measuring distance 3,0 m
Test Date	7.6.2018	Time:13.00	Location	Substation 3	Humidity: 30,52%	Temperature: 18,16°C	Measuring distance 3,0 m

Sähköasemalla 3 on 110 kV:n ulkopäätteet. Alusta asti oli ilmajohtojen eristimistä, liittimistä ja muista tukieristimistä kantautuvaa koronaa lähellä ulkopäätteitä eikä niitä haluttu mitata. Taulukosta 6 nähdään kesän ja talven mittausolosuhteet. Ylijännitesuojat ilmajohtoineen olivat lähellä, minkä vuoksi oli mietittävä mistä pisteestä mittaaaja pystyy ja voi mitata. Huomioitavia tekijöitä oli mittaussuunnan ja mittauskorkeuden oikea määrittäminen suhteessa mitattavaan kohteeseen. Mittaajan tulee ottaa huomioon mittauskulma, jotta pystytään mittaustilanteessa poissulkemaan muista sähköaseman komponenteista kantautuvat akustisen emission arvot, joita ei haluta mitata. Mittauksen kohdistuessa ulkopäätteisiin mittauspaikalla oli ilmajohtojen eristimiä lasilautasilla, jotka ilmajohtojen kanssa aiheuttivat omalta osaltaan akustista häiriötä mittauksessa. Ilmajohdon päästä ja ilmajohdon pylvään alareunasta päätteiden yläpuolelta tuli selkeää häiriötä mittaustuloksiin.

Taulukko 7. Sähköasema 3: talven mittaustulokset mittaustuloksien vertailua.

Test Date	4.4.2018	Time:9.00	Location		Humidity:45,66%	
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) left
AE -110kV	L1 R		1	Top	-2	
				Middle	-4	
				Bottom	-4	
				Mix dB		
4 S	L2		2	Top	0	
				Middle	-1	
				Bottom	-1	
				Mix dB		
	L3 T		3	Top	0	
				Middle	0	
				Bottom	0	
				Mix dB		
	L1 R		4	Top	1	
				Middle	0	
				Bottom	5,8,5	
				Mix dB	na	
6 S	L2		5	Top	0	
				Middle	8,1	
				Bottom	-3	
				Mix dB	na	
	L3 T		6	Top	-2	
				Middle	25	
				Bottom	-2	
				Mix dB	na	



Sähköasema 3 taulukossa 7 näkyvä talven tuloksia. Normaalitaso oli talvella -4–5 desibeliä ja siitä poikettiin reilusti. Mittauksissa saatiin normaalista poikkeavia tuloksia ja on mielenkiintoista verrata, miten nämä korreloivat kesän tuloksiin.

Taulukko 8. Sähköasema 3:n kesän mittaustulokset. Kuvassa tarkastellaan punaisella ulkopäätteen yläosasta mitatut arvot, keltaisella merkittynä keskiosasta ja sinisellä alaosasta mitatut arvot. Arvot on ympyröity, mikäli erottuvat 3 desibeliä tai enemmän normaalista desibelitasosta. Normaalitaso on -5 desibeliä. Siniset nuolet osoittavat lähtöjä, joista kauttaaltaan tuli korkeampia arvoja etusuunnasta mitattuna.

Substation Name	2. kierros	Temperature: 18,16° C							
Location	Sähköasema3	Humidity: 30,52%							
Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 3m (dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)	
1	Top	-3	-5	-5	-2	Päätteiden huipulla liittimissä 0dB			
	Middle	-2	-6	-5	-1				
	Bottom	-2	-5	-5	-2				
	Max dB								
2	Top	0	-4	-5	-1				
	Middle	0	-5	-3	-1				
	Bottom	-2	-5	-4	0				
	Max dB								
3	Top	1	-1	-5	-2				
	Middle	0	-4	-4	-3				
	Bottom	-1	-4	-4	-2				
	Max dB								
4	Top	0	-4	-4	0				
	Middle	-2	-5	-4	-1				
	Bottom	-1	-4	-4	-2				
	Max dB								
5	Top	-1	1	-5	-4				
	Middle	-2	0	-5	-5				
	Bottom	-1	0	-5	-4				
	Max dB								
6	Top	-5	-1	-5	-5				
	Middle	-5	0	-5	-5				
	Bottom	-5	-1	-5	-5				
	Max dB								
7	Top	-5	-5	-5	-4	Häiriö tukieristimen lautasista 17dB			
	Middle	-5	-5	-4	-5				
	Bottom	-5	-5	-6	-5				
	Max dB								
8	Top	-5	-6	-5	-5				
	Middle	-6	-5	-5	-5				
	Bottom	-5	-5	-6	-5				
	Max dB								
9	Top	-5	-5	-5	-5				
	Middle	-5	-5	-5	-5				
	Bottom	-6	-5	-5	-5				
	Max dB								
10	Top	-2	0	0	1				
	Middle	0	-4	-2	-5				
	Bottom	-2	-5	-4	-5				
	Max dB								
11	Top	-5	-4	0	-4				
	Middle	-4	-5	-5	-4				
	Bottom	-5	-5	-5	-5				
	Max dB								
12	Top	-5	-2	0	-3				
	Middle	-4	-4	-5	-4				
	Bottom	-6	-4	-5	-5				
	Max dB								

Talvella erottuivat normaalitasosta päätteet 2–6. Pääteen 7 talven mittausarvo oli häiriöstä johtuva, joka kantautui muista komponenteista. Kesällä lähtöjen 4 ja 6 päätteiden 1–5 etupuolelta mitattuna tuli muita korkeampia arvoja verrattuna normaalitasoon. Nämä lähdöt on osoitettu taulukossa 8 sinisillä nuolilla.

Haasteita mittauksessa oli sekä kesällä että talvella samaisesta kohtaa. Lähdöstä 8, kantautui lasisista tukieristimistä pääteen 7 mittauksessa häiriötä. Tukieristin oli hyvin pääteen kohdalla taustassa etusuunnasta mitattaessa. Mitattavan pääteen taustalta kantautuivat purkauksien synnyttämät ultraääniaallot lasieristinketjusta. Eristimestä kantautuneet ääniaallot sirosivat taustassa eikä ollut helppoa löytää paikkaa, josta saisi mitattua vain pääteen antamia arvoja. Kauttaaltaan lähdön 7 päätteiden huipulta mitatut arvot erosivat jopa 5 desibelin erolla toisistaan. Toisella mittauskierroksella merkittäviä eroja äänenpainetasossa oli päätteissä 1–6 ja 10–12. Talvella tuloksissa oli koronaa.

Viimeisestä lähdöstä 7 päätte 10 antoi edestä keskeltä mitattuna 5 desibeliä erottuvan tuloksen normaalitasosta. Korkeampia arvoja tuli ulkopäätteiden mittauspisteistä huipulta ja keskeltä. Tämä voisi johtua, joko päätteiden tai ilmajohtojen liittimistä. Toisaalta korkeita arvoja tuli myös muista suunnista mitattuna ja päätteiden alaosasta. Alaosasta muusta erottuivat korkeilla arvoilla päätteet 1–6, 10. Eroa oli 3–5 desibeliä normaalitasoon verrattuna. Keskiosasta mitattuna erottuivat samat päätteet. Yläosasta mitattuna erottuivat päätteet 1–6, 10–12. Takaa mitattuna tuloksia vertailtaessa voidaan selvästi nähdä 5 desibelin eroja normaalitasosta päätteistä 10–12. Nämä erottuvat tulokset tulivat päätteiden yläosasta. Sähköasemalla on posliiniset öljyeristeiset ulkopäätteet, jotka on asennettu vuonna 1985.

## Sähköasema 4

Taulukko 9. Sähköasema 4 mittausolosuhteet.

Test Date	4.4.2018	Time:10.15	Location	Substation 4	Humidity: 40,50%	Temperature: 4,79°C	Measuring distance 4,5 m
Test Date	11.6.2018	Time:10.45	Location	Substation 4	Humidity: 36,76%	Temperature: 23,07°C	Measuring distance 4,5 m

Sähköasemalla 4 on 400 kV:n ulkopäätteitä taulukosta 9 nähdään mittausolosuhteet. Aluksi tehtiin melutason mittaus, jotta voidaan arvioida taustamelun vaikutus. Taustamelu oli -5 dB. Mahdollisuus häiriölle ja mekaaniselle taustamelulle on aina olemassa. Taustakartoitus on aina tarpeen ennen kuin mitataan ja mittauksen aikana poissulkien taustalta kantautuva akustinen emissio. Sähköasema sijaitsee moottoritien läheisyydessä, mutta sähköaseman ympäristöllä ei näyttänyt olevan vaikutusta varsinaisten mitaustulosten melutasoihin. Mittaukset suoritettiin 4,5 metrin päästä mitattuna päätteiden alareunaan. Sähköasemalla oli kaksi lähtöä. Kummankin lähdön takana sijaitsi isot muuntajat ja betonilasiseinä suojaamassa muuntajia 5 metrin päässä. Kesällä mitatut arvot verrattuna talven mittauskierrokseen olivat samansuuntaisia lukuun ottamatta päätteitä 2, 5 ja 6.

Taulukko 10. Sähköasema 4: talven mittauksien tulokset.

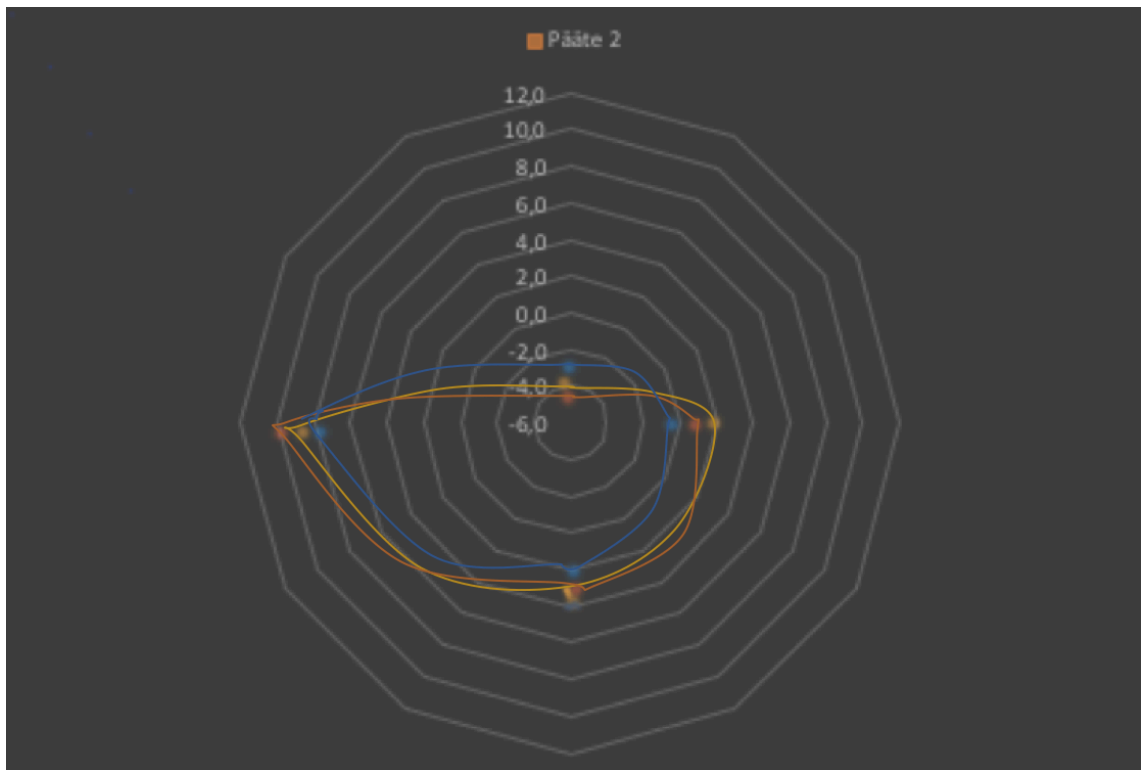
Test Engineer	Ville ja Henry		Substation Name	1. kierros	Temperature: 4,79° C				
Test Date	4.4.2018	Time:10.15	Location	Sähköasema 4	Humidity: 40,50%	Mittausetäisyys 4,5m			
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 4,5m (dB)	2) from the left 4,5m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 4,5m (dB)	
AL	L1		1	Top	7	10		6	
				Middle	6	9		11	
				Bottom	5	8		11	
				Max dB					
	L2	8		2	Top	5	9		6
					Middle	4	6		8
					Bottom	3	5		4
					Max dB				
	L3			3	Top	9	6		10
					Middle	8	4		11
					Bottom	8	4		9
					Max dB				
AL	L1		4	Top	11	11		9	
				Middle	11	11		8	
				Bottom	10	9		8	
				Max dB	na				
	L2	6		5	Top	8	12		9
					Middle	8	10		7
					Bottom	6	9		7
					Max dB	na			
	L3			6	Top	9	11		11
					Middle	9	10		10
					Bottom	7	9		9
					Max dB	na			

Taulukossa 10 nähdään erityisesti selkeitä eroja kesän tuloksiin verrattuna päätteissä 2, 5 ja 6. Päätteessä 2 oli kesällä matalat akustisen emission arvot mitattaessa oikealta. Päätteessä 5 oli kesällä korkeammat arvot oikealta. Päätteessä 6 oli talvella selkeästi korkeammat arvot. Päätteessä 2 oli vasemman puolen arvot kasvaneet 3 desibelin verran ja toisaalta taas oikeanpuolen arvot laskeneet 5–6 desibeliä. Vasemmalta mitattuna päätteestä 2 tulee isoja arvoja verrattuna muista suunnasta mitattuihin arvoihin.

Taulukko 11. Sähköasema 4: Talven mittaukset vasemmalla ja kesän tulokset oikealla.

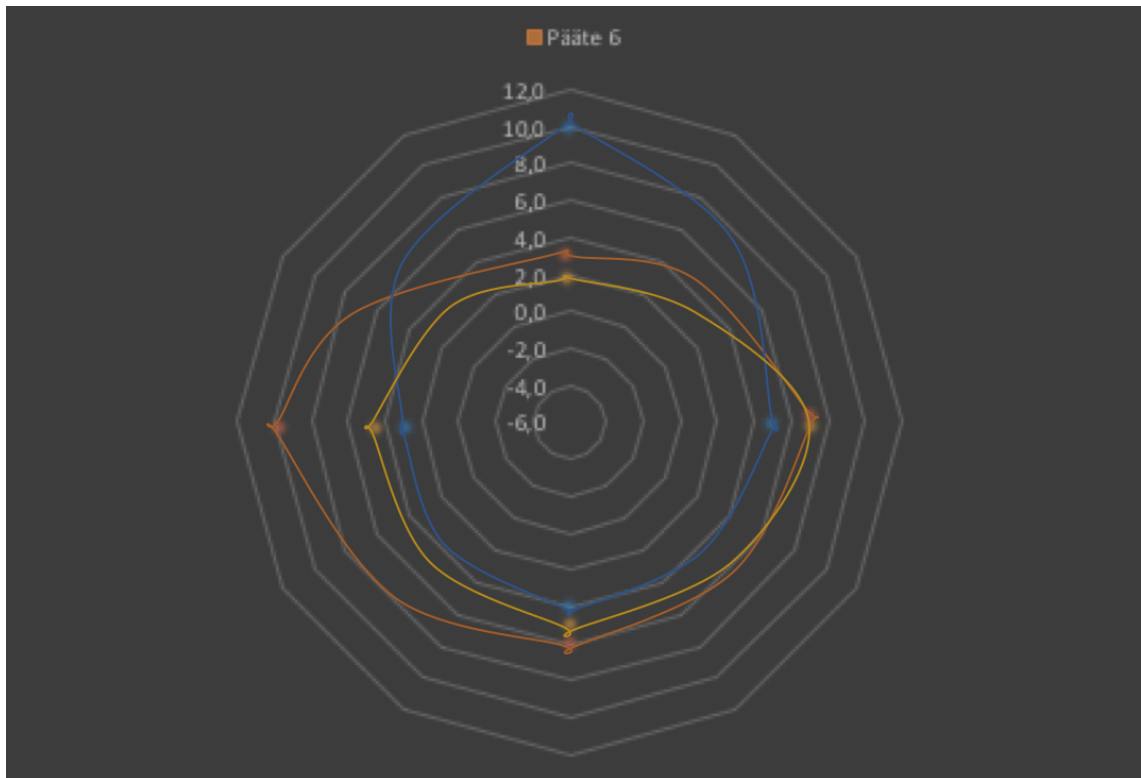
Substation Name	1. kierros				2. kierros								
Location	Sähköasema 4				Sähköasema 4								
Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 4,5m (dB)	2) from the left 4,5m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 4,5m (dB)	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 4,5m (dB)	2) from the left 4,5m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 4,5m (dB)	Comments	1	Acoust (dB)
1	Top	7	10		6	Top	6	8	-4	9			
	Middle	6	9		11	Middle	5	7	-3	8			
	Bottom	5	8		11	Bottom	5	6	-2	7			
	Max dB					Max dB							
2	Top	5	9		6	Top	3	10	-5	1			
	Middle	4	6		8	Middle	3	9	-4	2			
	Bottom	3	5		4	Bottom	2	8	-3	0			
	Max dB					Max dB							
3	Top	9	6		10	Top	7	7	-4	9			
	Middle	8	4		11	Middle	6	5	-3	9			
	Bottom	8	4		9	Bottom	5	4	-2	8			
	Max dB					Max dB							
4	Top	11	11		9	Top	10	10	0	10			
	Middle	11	11		8	Middle	8	8	0	9			
	Bottom	10	9		8	Bottom	6	7	0	8			
	Max dB	na				Max dB	11						
5	Top	8	12		9	Top	10	4	12	18	huippu liitin 31db edestä 1,5 m		
	Middle	8	10		7	Middle	5	4	4	12			
	Bottom	6	9		7	Bottom	4	3	2	6			
	Max dB	na				Max dB							
6	Top	9	11		11	Top	6	10	3	7	liitin päätteen päällä 15dB		
	Middle	9	10		10	Middle	5	5	2	7			
	Bottom	7	9		9	Bottom	4	3	10	5			
	Max dB	na				Max dB							

Päätteissä 1–4 on takaapäin mitatut arvot hyvin matalia verrattuna muista suunnista mitattuihin. Pääteistä 4 ja 5 huipuilta edestä mitattuna tulee isompia desibeliarvoja. Isoja arvoja tulee päätteellä 4 yläosasta mitattuna verrattuna muiden päätteiden yläosan arvoihin. Päätteellä 3 oikealta mitattuna tulee suurimmat arvot. Päätteellä 2 vasemmalta ja päätteellä 1 vasemmalta ja oikealta yläosasta mitattuna saatiin maksimiarvot. Ulkopäätteen 5 huipun yläpuolelta 1,5 metriä ylöspäin liittimestä tulee 31 desibelin arvo. Päätteestä 6 ja 5 tulee poikkeuksellisesti takasuunnasta korkeampia arvoja verrattuna muihin päätteisiin. Korkeammat arvot näkyivät päätteellä 6 yläosasta ja alaosasta mitattuna. Päätteellä 5 yläosasta oikealta mitattuna tuli korkea arvo. Lisäksi päätteen 6 päällä oleva liitin antoi 15 desibeliä akustista emissiota. Jokainen päte antoi isoja eroja desibeliarvoissaan.



Kuva 17. Sähköasema 4, Pääte 2: Mittaustulokset jokaiselta ulkopäätteen sivulta mitattuna polaarisuuntakuviona. Asteikko on -6dB:stä ja 12dB:iin ja viivojen välit 2 desibelin välein. Punaiset mittauspisteet mitattuna päätteen yläosasta, keltaiset päätteen keskiosasta ja siniset päätteen alaosasta.

Kuvassa 17 on esitetty yhden päätteen, päätteen 2, mittauksen tulokset havainnollistamaan polaarisuuntakuviona siten, että kokonaiskuva päätteen akustisesta emissiosta hahmottuu, kun ulkopääte on mitattu neljästä suunnasta. Suuntakuvion alareunan pisteet ovat ulkopäätteen edestä mitatut desibeliarvot ja yläreunan pisteet ulkopäätteen takaa mitatut arvot. Kuvasta nähdään, miten emissio jakautuu ylä-, keski-, ja alaosan kesken. Syvemmin tarkasteltuna samasta mittaussuunnasta mitatut arvot ovat hyvin samansuuntaisia arvoja. Yläosasta vasemmasta suunnasta löytyy maksimi eli 10 desibeliä. Minimiarvo on ulkopäätteen yläosasta -5 dB mittaussuunnasta takaa. Kokonaisuudessaan AE-normaalitaso eli akustisen emission normaalitaso vaihteli arvojen -3–3 desibelin välillä. Suurimmillaan ero on kuitenkin minimin ja maksimin välinen ero 15 desibeliä. Akustinen emissio oli suurimmillaan ylhäältä vasemmalta ja pienimmillään takaa mitattuna erottuen selkeästi oikealta ja edestä mitattujen kanssa. Oikealta ja edestä mitatut arvot olivat suurimmillaan 1–2 desibelin verran verrattaessa ylä-, ala ja keskiosan arvoja keskenään.



Kuva 18. Sähköasema 4, Pääte 6: Mittaustulokset jokaiselta ulkopäätteen sivulta mitattuna. Asteikko on -6dB:stä ja 12dB:iin 2 desibelin välein.

Kuvasta 18 voidaan nähdä akustisen emissio eroavaisuudet suuntakuviona ja miten emissio jakautuu ylä-, keski-, alaosan kesken. Syvemmin tarkasteltuna yläosasta vasemman suunnan mittausarvot eroavat huomattavasti keski- ja alaosan kanssa. Keski- osan kanssa viisi desibeliä ja alaosan kanssa seitsemän desibeliä.

Kun yläosan mittausarvoja verrataan keskenään, kuvasta voidaan suoraan nähdä äänenpaineen tason suuruus ja muoto. Vasemmalta mitattu arvo on useita desibelejä suurempi verrattuna muista suunnista mitattujen yläosan arvojen kanssa. Voidaan myös todeta vasemman yläosan olevan koko ulkopäätteen toinen maksimi. Suurin ero yläosasta mitattujen tulosten kanssa syntyy takaa mitatun arvon kanssa, ero on seitsemän desibeliä. Toinen ulkopäätteen maksimi on takaapäin mitattu arvo 10 desibeliä päätteen alaosasta. Minimiarvo ulkopäätteen alaosasta mitattujen AE-tulosten kanssa löytyy vasemmasta suunnasta mitattuna 3 desibeliä. Kokonaisuudessaan AE-normaalitaso vaihteli arvojen 3–7 desibelin välillä. Akustinen emissio oli suurimmillaan ylhäältä vasemmalta ja alhaalta takaa erottuen selkeästi muista. Oikealta ja edestä mitatut arvot olivat suunnilleen samansuuruisia verrattaessa ylä-, ala- ja keskiosan arvoja keskenään.

## Sähköasema 5

Taulukko 12. Sähköaseman 5 mittausolosuhteet.

Test Date	5.4.2018	Time:12.00	Location	Substation 5	Humidity: 76,83%	Temperature: 4,85°C	Measuring distance 3,0 m
Test Date	11.6.2018	Time:13.15	Location	Substation 5	Humidity: 21,88%	Temperature: 29,38°C	Measuring distance 3,0 m

Ulkopäätteiden mittaukset 110 kV:n asemalla. Taulukosta 12 mittausolosuhteet, huhtikuussa asemalla oli +4,85 celsiusastetta ja ilman suhteellinen kosteus oli 76,83 %. Kyseisellä sähköasemalla akustista häiriötä aiheutti tien läheisyys. Kun rekat ajoivat sähköaseman ohi, syntyi mekaanista ultraääntä ja desibeliarvot muuttuivat 2 dB yksikön verran. Kyseessä olevalla asemalla kaapelipäätteet olivat kaikkein uusimmat koko suoritulla mittauskierroksella 110 kV:n sähköasemista. Uutuus näkyi mittaustulosten tasaisina tuloksina. Alhaisiin tuloksiin vaikutti päätteiden puhtaus. Akustiset arvot olivat hyvin matalia, joka johtui ulkopäätteiden nuoresta iästä, ulkopäätteiden ikä vain viisi vuotta. Talven ja kesän mittausarvoissa ei ole eroja. Ulkopäätteet näyttävät olevan erinomaisessa kunnossa silmämääräisesti.

Taulukko 13. Sähköasemien 1-5 päätteiden ikä ja jännitetaso.

Jännitetaso (kV)	Vuosi	Asema	Ikä (a)	Kaapelilähtöjä	Päätteitä	Mitattuja päätteitä
110	1996	Sähköasema 1	22	11	33	24
110	2009	Sähköasema 2	9	5	15	9
110	1985	Sähköasema 3	33	6	18	12
110	2013	Sähköasema 5	5	5	15	9
400	2017	Sähköasema 4	1	2	6	6

Taulukosta 13 voidaan nähdä öljyeristeisten ulkopäätteiden tämän hetkisen iän sähköasemilla. Sähköaseman 3 ulkopäätteet ovat posliinikuorisista öljyeristeisistä päätteistä ja mitausten vanhimpia ulkopäätteitä. Muilla sähköasemilla päätteet ovat komposiittisilikonieristinkuorellisia, sisältä öljyeristeisiä suurjännitekaapeleiden ulkopäätteitä.

## Sähköasema 6

Taulukko 14. Sähköasemalle 6 tehtiin vain yksi mittauskierros.

Test Date	4.6.2018	Time: 13.00	Location	Substation 6	Humidity: 30,70%	Temperature:18,46°C	Measuring distance 3,0 m
-----------	----------	-------------	----------	--------------	------------------	---------------------	--------------------------

Taulukko 15. Sähköasema 6: päätteet 1 ja 6 eroavat muista tuloksista.

AE =110kV	X2	6	1	Top	-5	-4	-5	-4				
				Middle	-4	-5	-5	-5				
				Bottom	-3	-5	-5	-5				
				Max dB								
	X1		2	Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-4	-6	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-6				
				Max dB								
	X3		3	Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-6	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-6				
				Max dB								
	X2	7	4	Top	-5	-4	-5	-5				
				Middle	-5	-4	-4	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Max dB								
	X1		5	Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Max dB								
	X3		6	Top	-4	-5	-5	-3				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-6	-5				
				Max dB								

Sähköasema mitattiin vain kesällä lämpötilassa 18,46 celsiusta ja ilmankosteus oli 30,7 %. Ulkopäätteiden normaali akustinen emissiotaso oli -5 desibeliä. Sähköaseman 6 päätteet 19 ja 1 erosivat tästä korkeimmilla arvoillaan -3 desibelin tasolle.

Taulukko 16. Sähköasema 6: päätteet 19, 20, 22 ja 24 erottuivat mittaustuloksissa.

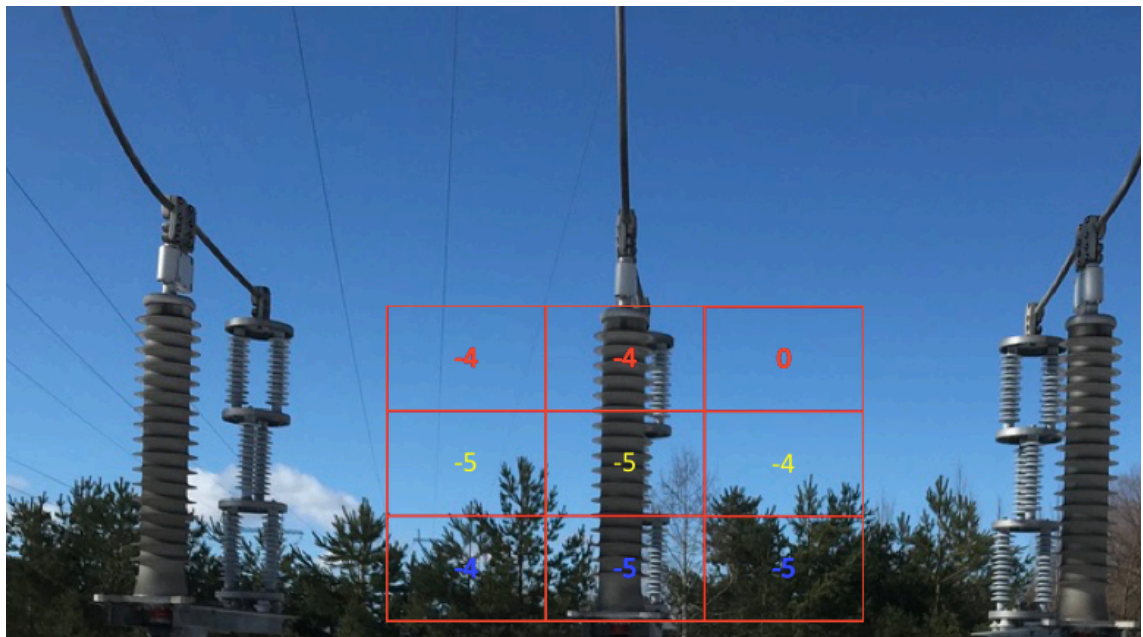
	X3	13	19	Max dB								
				Top	-3	-5	-5	-5				
				Middle	-4	-5	-5	-5				
				Bottom	-4	-5	-5	-5				
	X1		20	Max dB								
				Top	-4	-3	-5	-4				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
	X2		21	Max dB								
				Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-4	-5	-5	-5				
	X2	14	22	Max dB								
				Top	-5	-3	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
	X1		23	Max dB								
				Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-4	-4	-5				
	X3		24	Max dB								
				Top	-5	-5	-5	-3				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-4	-6	-4				



PD-SGS laitteen käyttökuntoisuuden testaus suoritettiin jokaisella mittauskerralla ennen varsinaisen mittauksen aloitusta PD-FT-testerillä.

#### Osittaispurkauksien löytäminen akustisella mittauksella

Ennen mittauksia sähköaseman ympäristö skannataan läpi. Mittaaja mittaa ja havainnoi ympäristöä päätteen ohi. Mittaajan tulee poissulkea äänihäiriöt ja muut äänilähteet ympäristöstä samalla kun mittaa päätettä. Mittaaja käyttää mittalaitetta jatkuvasti havainnoiden ja kartoittaa mahdollisen taustamelun. Parabolisen peilin laserosoitimella käydään läpi koko pääte. Kirjataan tulos ylös kolmesta eri kohtaa, jokaisesta päätteen sivusta. Mittausetäisyys pidetään koko ajan samana ja mittaaja pysyy paikallaan. Näin poissuljetaan mittausvirheet ja mahdollistetaan tuloksien vertailukelpoisuus.



Kuva 19. Akustisen emission tulokset sähköasema 1: päätteestä 1 ja lähdestä 16. Punaisella ulkopäätteen yläosasta mitatut arvot, keltaisella merkittynä keskiosasta ja sinisellä alaosasta mitatut arvot. Vasemmassa sarakeessa vasemmalta mitatut, keskellä edestä mitatut ja oikealla oikealta mitatut arvot.

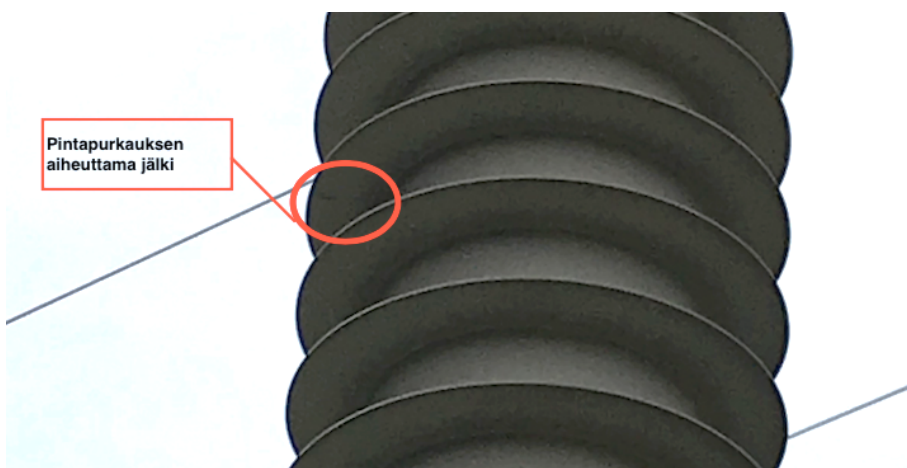
Ylläolevassa kuvassa 19 näkyy, kuinka oikealla ylhäältä mitattu tulos oli hyvin poikkeava verrattuna muuhun normaalitasoon. Lisäksi ulkopäätteen takaa mitatut arvot olivat ylhäältä alas lueteltuna -3, -2, -1. Toinen reilummin poikkeava arvo oli päätteen takaa mitattu arvo alareunasta -1 desibeliä. Mittaustuloksia verrataan muiden ulkopäätteidentuloksiin keskenään. Tulokset ovat vertailukelpoisia, kun on kyse identtisistä päätetyypistä

ja vertaillaan päätteiden samoista pisteistä/osista mitattuja tuloksia keskenään. Tällöin mittausetäisyys pysyy samana, kun vaan on sama etäisyys kaikista suunnista päätteen alareunaan. Osittaispurkaukset erottuvat ja osittaispurkausaktiivisuus nähdään akustisen emission tasoeroina, selvänä vaihteluna äänenpaineentason kasvamisena.



Kuva 20. Sähköasema 1:sen 16 lähtö päätte 1.

Kuvassa 20 näkyy ulkopäätteen yläosan pääsuojuksen alla halkeama/hilijälki eristeen pinnassa. Tämänlainen jälki syntyy pintapurkauksen johdosta. Akustista emissiota mittaamalla havaitut muutokset lukemissa saivat mittausparin havahtumaan ja etsimään mahdollisia muutoksia ulkopäätteiden pinnalla.



Kuva 21. Pintapurkauksen aiheuttama jälki.

Kuvassa 21 Sähköasema 1 lähdön 15 päätteessä 8, lautasen alareunassa näkyy pieni purkausjälki. Mittalaite antoi arvon tavallisesta tasosta poiketen 3 desibeliä suuremman arvon ulkopäätteen edestä keskikohdasta mitattuna.



Kuva 22. Pinta- tai liukupurkauksen aiheuttama hiilijälki eristeen pinnassa.

Kuvassa 22 on sähköasemalta 1 lähdöstä 15 päätteessä 7 näkyvä hiilijälki kolmannen lautaslaipan alapinnalla. Poikkeavia akustisen emission tasoja näkyi muissakin päätteisissä, saman suuruisina poikkeamina, mutta näkö tarkastelulla ei löytynyt mitään kuvattavaa. Jokainen pääte on hyvä kuvata kuten mittauksissa on tehty. Kuulohavainnoin saattoi kuulla pieniä rasahduksia tai rätinää, mutta näissä mittauksessa ei mitattavista kohteista kuulunut merkittävän suuria äänentason vaihteluita toisin kuin Sähköasema 4:n ilmajohtojen liittimistä toisella mittauskierroksella mitattiin kovaa ääntä. Sähköaseman 1 lähdöstä erottuvia olivat lähdöstä 15 päätteet 7–8 ja lähdöstä 16 pääte 1.

Sähköaseman 4 liittimistä ja sähköaseman 3 lasisista kiristinketjun lautasista mitattiin isoja desibeliarvoja. Sähköaseman 4 kuudennen lähdön päätteen 5 yläpuolella saatiin iso tulos mitattaessa liitintä, josta kantautui ääntä edestäpäin mitattuna 31 desibeliä. Päätteen 6 päällä oleva päätteen tapin ja ilmajohtojen yhdistävä liitin antoi mittaustuloksen 15 dB. Sähköasemalla 3 päätteen 7 yläpuolella kantautui ultraäänimelua kiristineristimen lasilautasista 17 desibeliä ja myös päätteen 7 mittaustulos oli korkea. Tämä vaati kriittistä suhtautumista päätteistä saatuun tulokseen. Tarkemmalla tarkastelulla varsinainen häiriölähte löytyi. Mitattaessa ulkopäätettä 7 tukieristin yläpuolella aiheutti häiriön

kuin tulokset olisivat tulleet päätteestä. Häiriötä esiintyi edestä ja vasemmasta mittaussuunnasta ja vaati poissulkevaa mittaustapaa, jotta saatiin luotettava tulos.

Akustisen emission vertailuarvot on hyvä mitata luotettavan vertailun vuoksi kesäkaudella sateettomana päivänä ja suunnilleen samanlaisissa olosuhteissa. Ilmankosteuden ja lämpötilan tulisi olla suunnilleen sama, kun mitattujen arvojen vertailun luotettavuutta ja tuloksien varmuutta halutaan vahvistaa. Vertailua voi tehdä samanlaisten päätteiden kesken. Saman sähköaseman ja samanlaisten päätteiden arvoja tulee verrata keskenään ja aikaisempiin mittauksiin.

## 7.2 Mittaustapa ja turvallisuus

Työturvallisuus ja mittauksien turvallinen suorittaminen on tärkein lähtökohta mittauksien tekemiseen. Mittaaja vastaa huolellisesta ja ammattitaitoisesta suorittamisesta. Sähköasemilla työskentelyssä tulee noudattaa turvallisuuskäytäntöjä ja ohjeita. Sähköasemalla työskenneltäessä tulee käyttää Fingrid Oyj:n määrittämän mukaisia henkilökohtaisia suojavarusteita. Minimivaatimukset ovat leukahihnallinen suojakypärä, turvajalkineet ja huomiovärinen suojavaatetus. Lisäksi sähköasemalla työskenneltäessä mittaajilla tulee olla näkyvillä henkilökuvallinen tunniste. Mittauksiin osallistuvilla henkilöillä tulee olla voimassaolevat työturvallisuus- ja hätäensiapukortit.

Laitetta voivat käyttää koulutetut ja ammatillisen pätevyyden omaavat henkilöt ja sähköinsinöörit, joilla on riittävästi tietoa, kokemusta ja pätevyys havaita mahdolliset vaarat. Mittaukset tehdään tiedostaen mittalaitteen ominaisuudet, mittaustestauksien käytännöt ja tietämys sähköasemarakaisuista sekä komponenteista, kaapelityypeistä ja kytkinlaitoksista. Käytönaikainen osittaispurkausmittalaite Baur PD-SGS on kehitetty osittaispurkausten nopeaan testaukseen sähköasemilla. Ilman huolellista havainnointia ja standardeissa mainittuja etäisyyksiä liikuttaessa sähköasemilla laitteen turvallista käyttöä ei voida taata. Tarkoituksen mukainen käyttö edellyttää manuaalin yksityiskohtaista osaaamista, ymmärrystä sen teknisistä tiedoista, jotka ovat käyttöohjeessa. Määräystenmukaisuus mittaustutkimukseen ja kunnossapidon tarkasteluihin on hallittava. Sähköturvallisuudesta vastaava henkilö on vastuussa turvallisesta toiminnasta ja mittauksista (EN 61010, 3.5.12). Mittaaja on henkilö, joka käyttää mittalaitetta sille tarkoitettulla käyttötavalla määritelmän ja määräysten mukaisesti (EN 61010 3.5.11). [10, s. 8.]

Käytettäessä käytönaikaista osittaispurkausmittari Baur PD-SGS tulee huomioida kyseisen maan ja alueen säännökset ja standardit. EU-maissa käytössä tulee huomioida standardi EN 50110, joka koskee sähköisiä asennuksia. Maakohtaiset tai kansalliset standardit ja säädökset saattavat olla pätevämpiä ja tarkempia vaatimuksissaan. Tarvittaessa kansallinen tai kansainvälinen standardi tai ohje voi määrittää viimeisimmän määräystenmukaisuuden. Sähkölaitteiston omistajan ohjeita on tärkeää noudattaa.

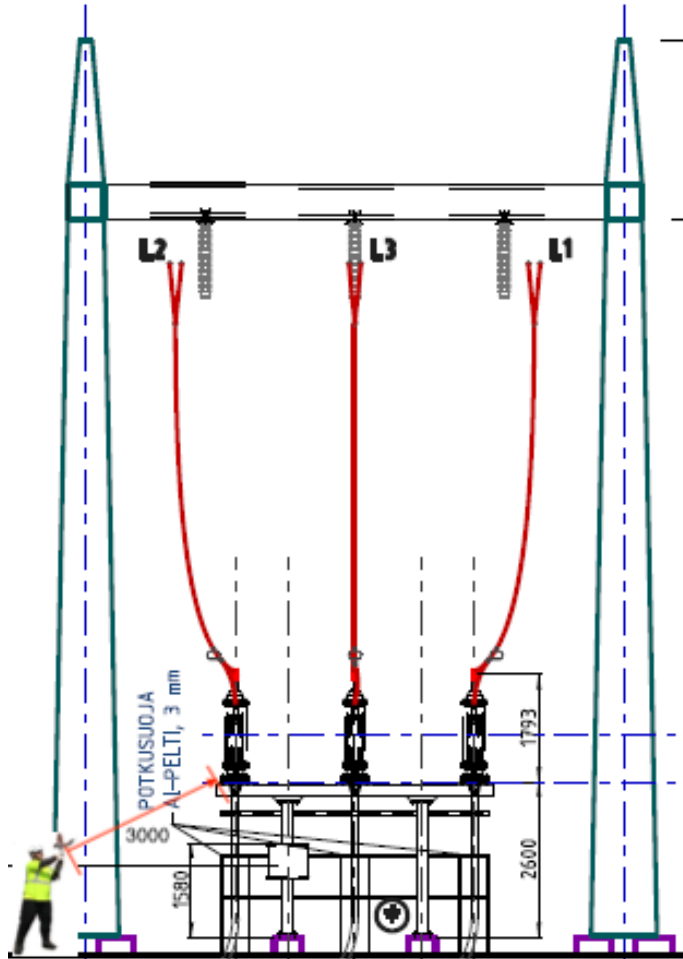
Laitetta ei suositella käytettäväksi märissä tai kosteissa olosuhteissa. Kondensaation estämiseksi tulee tasata laitteen lämpötila ympäristön lämpötilan kanssa ennen mittausta. Osittaispurkaustestit PD-SGS-laitteella vaativat huolellisuutta ja tarkkaavaisuutta erityisesti, kun kyseessä on suurjännitesähkölaitteisto. Mittaushenkilöiden on oltava erityisen huolellisia ja varovaisia mittauksia tehdessään, kun kyseessä on suurjännitelaitteistot. Mittauksia suunniteltaessa tulee ottaa huomioon, että mittaushenkilö ei saa joutua kosketuksiin eikä liian lähelle jännitteisiä osia. Turvallisuusasioissa tulee ottaa huomioon turvaetäisyydet mittalaitteen käytössä sekä ottaa huomioon laitteiden eristyksen ja eristävien osien merkitys. Mittauksia ei saa suorittaa vikaantuneille kaapeleille tai osille, mikäli tarkoituksena on käyttää lähimittausta ilman parabolista peiliä. Mittaajan tulee käyttää asianmukaisia suojarusteita. Mittausten tulisi olla kestoaltaan lyhyitä. [10, s.10-11.]

Jokaisella sähköasemalla liikkuaessa tärkeää on huomioida turvaetäisyys jännitteisistä osista, mikä esimerkiksi 400 kV sähköasemalla on sähköalan ammattihenkilöillä 3,5 metriä. Standardissa SFS 6002 liitteen Z mukaan kohdassa Z1 ilmoitetaan lähialueen ulkomitta  $D_v$  eri jännitetasoilla. Tällaista työskentelyä, jossa liikutaan lähialueen ulkomittan etäisyydellä  $D_v$  jännitteisestä osasta, kutsutaan lähityöksi. 110 kV:n jännitteellä lähialueen ulkomitta  $D_v$  on kaksi metriä ja 400 kV:n lähialueen mitta  $D_v$  on neljä ja puoli metriä. 110 kV:n asemilla on pysyttävä aina vähintään kolmen metrin päässä jännitteisestä osasta ja 400 kV:n asemalla vähintään viiden metrin päässä. [26, s. 66-67.]





lön tehtävänä on huomioida mahdolliset vaaratilanteet ja reagoida niihin asianmukaisesti. Mittauspaikalle saavuttaessa tehtävänä on havainnoida visuaalisesti mittauspaikka ja huomioida mahdolliset vaaralliset alueet, jonka jälkeen vasta mittalaitteet kasaetaan testausta varten. [10, s.12.]



Kuva 24. Mittalaitteen etäisyys ulkopäätteen alareunaan 3000 mm ja riittävä turvaetäisyydet jännitteiseen osaan sähköasemilla 1,3,5 ja 6.

Kuvan 24 mukaiset mittausetäisyydet toteutuivat 110 kV:n sähköasemilla yksi, kolme, viisi ja kuusi. Akustiset mittaukset varmistavat työturvallisuutta, jos purkauksia löytyy pysyvät paikalla olevat reagoimaan ja pysymään kaukana. Purkaukset havaitaan laitteella nopeasti ja voidaan toimia tilanteen vaatimalla tavalla turvallisesti.

## 8 Mittalaite Baur PD-SGS ja Sonospot L55

Osittaispurkaukset on yleisesti hyväksytty hallitsevana syynä sähköeristeiden rappeutumiseen ja lopulta niiden pettämiseen. Tämän seurauksena osittaispurkausten mittaaminen on standardoitu suurjännitelaitteiden valmistuksessa. Käytönaikainen seuranta ja mittaaminen laitteille osittaispurkausten varalta antaa etukäteen varoituksia siitä, milloin eriste on alkanut rappeutua ja heikentyä. Käytönaikaisella mittaamisella voidaan välttää sähköeristeiden pettäminen. Osittaispurkaus säteilee energiaa eri muodoissa ja tämä on havaittavissa PD-SGS laitteella. [10, s.13–14.]

### 8.1 Mittalaite Baur PD-SGS ja sen toiminnot

Laitteen omat PD-sensorit eli osittaispurkaussensorit ovat sijoitettu laitteen eteen, joilla voi helposti kohdistaa mittauksen tutkittavaan pisteeseen. Tutkimuksessa käytettiin kuitenkin Sonospot parabolista peiliä, jossa on oma ultraäänisensori. [10, s. 14.]

PD-SGS kannettavan mittauslaitteen toiminnoilla voidaan selvittää, onko esimerkiksi GIS-kytkinlaitteistossa osittaispurkauksia tai vaatiiko osittaispurkausaktiivisuus jatkotutkimuksia, kuten tarkemman paikantamisen ja offline-testauksen. Lisäksi laitteen avulla voidaan määrittää, aiheuttaako osittaispurkausaktiivisuus välittömän huoltotoimenpiteen tarpeen ja onko kytkinlaitteiston ympäristö turvallinen työskennellä. [11.]





Kuva 25. Baur Handheld PD Detector PD-SGS kuljetuskokonaisuutena:

1. kuljetuslaukku, 2. PD-SGS kannettava osittaispurkausmittari, 3. virtalähde/laturi, 4. PD-FT toimintatesteri, 5. Kuulokkeet

Kuvassa 25 nähdään kannettavan PD-SGS mittalaitteen sisältö. Osittaispurkausmittauksia voidaan tehdä suljetun ilmaeristeisen kytkinlaitoksen kytkinpaneelien pinnalta havaiten transientti-maajännitteitä. Transientti on nopea jännitteen muutos, joka aiheuttaa eristyksessä pieniä määriä varausta, jotka voidaan havaita kapasitiivisella anturilla. Jännitteen muutokset esiintyvät nanosekunneissa. Osittaispurkausaktiivisuutta voidaan selvittää kytkinlaitoksen eri komponenteissa, kuten kaapeleissa, niiden päätteissä sekä kytkinlaitoksen sisällä olevissa johtimissa tai liittimissä hyödyntäen ultraäänipaikannusta. Mittalaitteessa on erittäin herkkä akustinen sensori, jolla voidaan havaita syntyneitä ultraääniä, painamalla laite AE-käyttövalinnalla kytkinpaneelin kiinni. Laite huomioi taustamelun ja -signaalien kohinan. Mittaaja kuulee osittaispurkauksista akustinen ilmaisen kuulokkeisiin ja näytölle numeroina, ilmaisuna väriledein ja desibeliarvona. PD-SGS osittaispurkausaktiivisuuden aikajaksomittaus on mittaajan painalluksen mittainen. Laitteessa on toiminto, jolla voidaan painikkeen pohjaan pidon ajalta mitata maksimiarvo painalluksen ajalta. Tällä toiminnolla voidaan helposti saada oikea arvo purkauksesta.

Maksimilukema jää näytölle luettavaksi, jonka jälkeen laite palautuu lyhyellä painalluksella takaisin normaalimittaustilaan.

## 8.2 Baur-anturit – kapasitiivinen ja akustinen sensori

Baur PD-SGS havaitsee potentiaaliset heikot kohdat välittömästi akustisesti ja numeraalisesti. Kytkinlaitteistoissa on olemassa jo skaalattu liikennevalo mitta-asteikko, vihreä, punainen ja keltainen. Vihreä tarkoittaa, että mitattavassa kohteessa näyttäisi kaikki olevan kunnossa. Keltainen väri osoittaa, että mittatulokset ylittävät rajan, jolloin on syytä pohtia uusintamittausta. Punaisen värin ilmaantuessa on mietittävä lyhyellä aikavälillä uusintamittausta ja kunnossa pidon toimia. Värijärjestelmä on käytössä laitteessa kriittisyyden mukaan sekä TEV– transient earth voltages että AE–acoustic emission käyttövalinnalla tulkintaa varten kaapelipiireissä ja kytkinpaneelissa, kaapelipäätteille ei ole värijärjestelmää vielä. PD-SGS käyttövalinta mahdollisuuksia on siis TEV, AE ja AE erillisellä parabolisella peilillä. TEV-anturin toiminta perustuu elektromagneettisen säteilyn ja pienien transientti-maajännitteiden havaitsemiseen esimerkiksi sähkökytkin laitteiston paneelin pinnalta. AE-sensorin toiminta osittaispurkauksen akustisen emission mittaamiseen. Osittaispurkauksen voimakkuus sekä toistuvuus ovat tärkeitä tekijöitä määrittäessä osittaispurkausaktiivisuutta, johon tämä mittalaite on kehitetty. Laitteessa oleva integroitu kapasitiivinen anturi ja ultraäänisensori tunnistavat nopeasti ja luotettavasti molemmat korkeataajuiset osittaispurkaukset mitkä aiheutuvat pinta- tai liukupurkauksista tai koronapurkauksen seurauksena. Kannettavassa laitteessa on liitäntä paraboliselle antennille, jolla voidaan tutkia vaikeasti saavutettavissa olevia komponentteja tai mitkä edellyttävät turvaetäisyyttä, joihin ei voi koskettaa kapasitiivisella anturilla. Tämä on siis ratkaisu akustisen emission mittaamiseen ilman mitattavan sähkökomponentin koskettamista. [10, s. 43; 11.]

PD-SGS osittaispurkauksien mittalaitteessa on sisäänrakennettu TEV-kapasitiivinen anturi sekä sisäänrakennettu akustista emissiota mittaava AE-ultraäänisensori, jonka avulla sisäiset pintapurkaukset havaitaan ja mitataan. Ultraäänisensori havaitsee akustisen emission osittaispurkauksien aiheuttamana. Osittaispurkaus luo elektromagneettista säteilyä, joka kuluttaa eristettä joka suuntaan purkauksesta poispäin. Laite havaitsee tämän säteilyn TEV-käyttövalinnalla. TEV-säteily kimpoilee kytkinpaneeliin, ja se havaitaan kapasitiivisella anturilla koskettaen laitteella kytkinpaneelin ulkopintaa. TEV moodilla havaitaan erittäin nopeita purkauksia taajuusalueella 20 MHz – 200 MHz. Tässä tutkimuksessa ei käytetty kumpaakaan sisäänrakennettua sensoria. [10, s. 13–14, 38.]

Purkauksien synnyttämät ultraääniäallot voidaan havainnoida akustisesti ultraäänialueella, kun mitattavan kohteen ja mittalaitteen välillä on suora yhteys. Ilmaeristeisissä kaapelipäätteissä koronapurkaukset ovat hyvin tyypillisiä ja ne aiheuttavat akustista emissiota. Tukieristimet ovat alttiita pintapurkauksille, missä sähköinen altistus eristimen pinnalla aiheuttaa purkauksia, jotka hajottavat eristimen pintaa ja luovat hiilijälkiä. Tämä voi aiheuttaa ylilyönnin ja koko sähkölaitteen hajoamisen. [10, s. 13–14.]

Kuulokkeet helpottavat työskentelyä meluisilla alueilla ja purkausten löytämistä. Kuulokkeista voi kuulla purkaukset, mitä ei muuten ihmisen kuuloaistin avulla kuule. Laitteen mukana on akkukäyttöinen PD-FT-testeri, jota käytetään laitteen testaamiseen ennen jokaista varsinaista mittausta. Näin voidaan varmistaa laitteen toimivuus. PD-SGS-laite on suunniteltu mittaamiseen parabolisen peilin kanssa ilman kosketusta mitattavasta osasta, jonka vuoksi sitä voidaan käyttää sähköasemilla käytönaikaisissa mittauksissa. [10, s. 13, 32.]

### 8.3 Baur-akustinen sensori

Laite mittaa osittaispurkauksien akustista emissiota ja näyttää ultraäänisignaalien suuruuden desibeleissä. Taulukossa 17 nähdään, miten laite käsittelee piirissään akustista emissiota. Mitattu arvo näkyy anturin ulostulona desibeleinä näytöllä ja mittalaite muodostaa tämän desibeliarvon mittapiirissään purkauksen/AE-aktiivisuuden synnyttämästä akustisesta energiasta desibelimikrovoltteina  $\text{dB}\mu\text{V}$  niin että  $0\text{dB} = 1\mu\text{V}$ .

Taulukko 17. AE-signaalin  $\mu\text{V}$ :n ja  $\text{dB}$ :n välinen suhde: desibelit desibelimikrovoltteina.

$\mu\text{V}$	$\text{dB}$
0.5	-6
1	0
2	6
5	14
10	20
20	26
35	31
50	34
100	40
1 000	60
3 100	70

Kaavalla 15 voidaan tehdä laskutoimitus, josta saadaan samaiset taulukon 17 desibeliarvot. Alla on esitettyinä kaava 15:

$$U(\text{dB}\mu\text{V}) = 20 \cdot \log \frac{U(\mu\text{V})}{1 \mu\text{V}} \quad (15)$$

Laitteen sensori ottaa ultraääninäänen intensiteetin äänenpaineena talteen ja muuntaa sen ulostulona sähköksi ja signaaliksi pietsosähköisen ilmiötä hyödyntäen. Laite näyttää tuloksen desibeliarvona, joka kuvaa osittaispurkausaktiivisuutta. Parabolisessa peilissä Sonospot L55 on oma ultraäänisensori, jota käytetään tässä tutkimuksessa PD-SGS-mittalaitteen kanssa AE-moodissa.

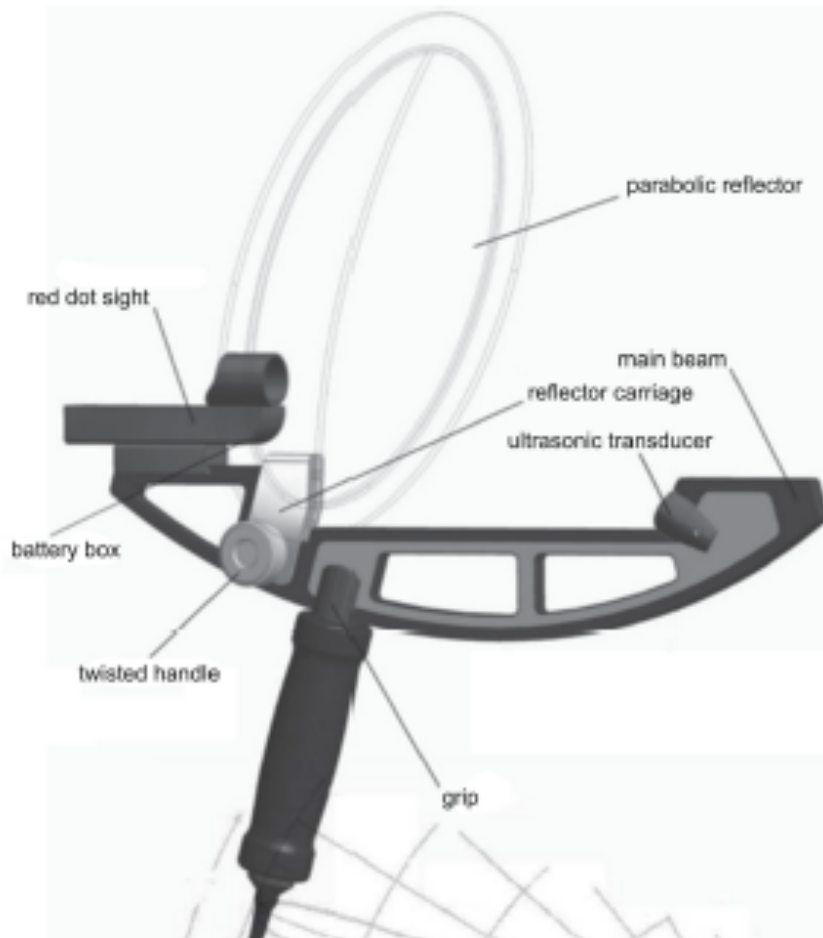
#### 8.4 Sonospot L55



Kuva 26. Sonospot L55 [10, s. 35].

Akustisena sensorina mittauksissa käytettiin Sonospotin parabolista peiliä liitettynä Baurin käytönaikaiseen osittaispurkausmittalaitteeseen. Osittaispurkausmittarin käyttövalintana mittauksissa oli akustisen emissio eli AE-käyttövalinta, jolla mitattiin akustista emissiota ulkopäätteistä. Laite on varustettu laserosoitimella ja tähtämellä mahdollistaen näin tarkan mittauksen pisteestä. Mittaaja pystyy tämän avulla itse toteamaan mittauksen kohdistuksen haluttuun komponenttiin. Akustisen emission lähde ja desibeliarvon luotettava mittaustulos halutusta komponentista riippuu siitä, onko mittaaja varmistunut, ettei taustalla ole muita lähteitä. Suurella varmuudella ja herkkyydellä tulokset ovat mittauksessa tähdätystä kohteesta. Baur PS-SGS:n Sonospotin sensori on hyvin herkkä, ja sillä mittaaja voi verrata arvoja siirtämällä mittauspistettä. Kuvassa 26 mittaaja lukee PD-SGS:n näytöltä desibeliarvoja.

Mittaaja voi vertailla saatuja arvoja aikaisempiin mitattuihin arvoihin ja aikaisemmalla kertyneellä kokemuksella tehdä havaintoja luotettavasti. Antennin suunnattavuus sekä suuntaherkkyys mahdollistaa osittaispurkauksien ja sähkökomponenttien eristyksien vaurioiden havaitsemisen tarkasti mittauspisteestä. Akustisen ultraäänianturin toiminta-alue karsii pois taustamelua, jonka vuoksi sen käyttö on ideaalista meluisilla alueilla, joissa taustahäiriötä esiintyy paljon.



Kuva 27. Parabolinen peili [10, s. 33].

Kuvassa 27 on osoitettuna kaikki tärkeät osat parabolisesta peilistä. Parabolinen peili kerää ultraääniaallot ja suuntaa ne ultraäänisensorille. Antenni on suunniteltu nopeaan, luotettavaan ja kustannustehokkaaseen tiivistemassojen ja eristysten pettämisen havaitsemiseen. Laitetta voi käyttää myös pneumaattisten vuotojen, tietoliikenneverkkojen, teollisuuden koneiden sekä putkien kunnan mittaamiseen. Erityisesti mittaaminen onnistuu sellaisista laitteistoista, joihin on vaikeaa päästä lähelle, tai suurjännitteen takia on ole-

massa määrätyt turvallisuusetäisyydet. Parabolisen peilin käyttö mahdollistaa energia-  
tehokkuuden, koska mittauksista ei aiheudu käytön keskeytyksiä. Online-mittauksilla  
pystytään varmistumaan käytön operaationaalista luotettavuudesta. [8.]

Laite on varustettu punaisella ja vihreällä laserosoittimella ja tähtäimellä mahdollistaen  
näin tarkan mittauksen pisteestä. Mittaaja voi omin silmin todeta, että mittaus on kohdis-  
tettu haluttuun komponenttiin. Tämä lisää tarkkuutta kohdistamiseen. Mittauskohteesta  
mitatun arvon luotettavuus on kiinni siitä, että tulos todella on halutusta komponentista.  
Luotettavuus siis voi riippua siitä, onko mittaaja varmistunut, että taustalla ei ole muita  
lähteitä tai onko huomionnut taustan vaikutuksen. Kuitenkin suurella varmuudella ja herk-  
kyydellä tulokset ovat tähdätystä kohteesta. Antennin suunnattavuuden hyvin korkea  
herkkyys ja tarkka ohjattavuus mahdollistaa osittaispurkauksien ja sähkökomponenttien  
eristyksien vaurioiden havaitsemisen. Ultraäänianturin toiminta-alue karsii pois tausta-  
melun, jonka vuoksi sen käyttö on ideaalista meluisilla alueilla, joissa taustahäiriötä esiin-  
tyy paljon. Laite on helppo koota ja kuljettaa purettuna mittauspaikalle pienessä kevy-  
essä kantolaukussa. Peilin halkaisija on 270 mm ja taajuusalue 40 kHz. Mitat paraboli-  
sella peilillä on käyttökunnossa 390 x 270 x 440 mm. Laite on kevyt, ainoastaan 700 g  
ja se on liitettävissä Baur PD-SGS:n antenniliitäntään. [8.]

Surisevat eristeet ja värisevät liittimet tuottavat ultraääniä ympäristöön, joita ihmiskorva  
ei kuule. Ultraääniaallot ympäristössä ovat paikallistettavissa parabolisella peilillä, joka  
kasaa ja kerää ne ultraäänimikrofonille sekä muuntaa äänet kuuluvalla taajuudelle mit-  
taajan kuulokkeisiin ja analysoitavaksi osittaispurkausmittalaitteeseen. Ääni on mittaa-  
jalle merkittävä apu purkauksen tai akustisen emission paikallistamiseen. Toiminta-alue  
laitteella on 20 metriin asti, ja se on erittäin hyvin suuntaava peili ultraäänianturin kanssa.  
[8.]

## 9 Mittaustavan kehittäminen ja luotettava mittaustapa

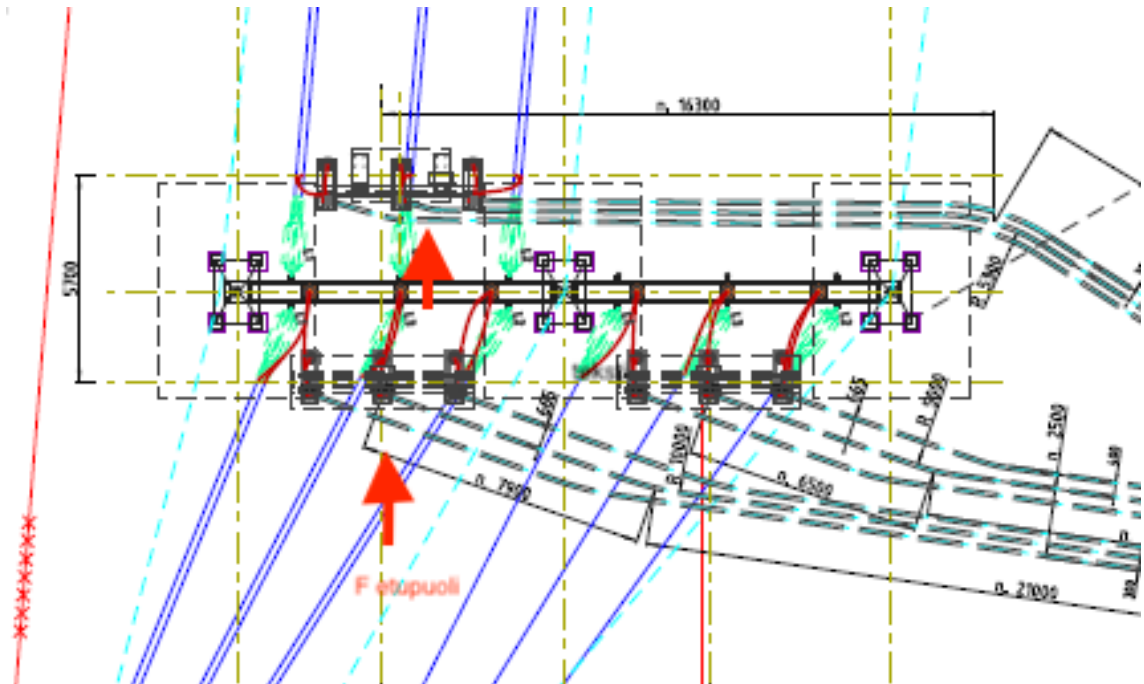
Online mittauksissa tarvitaan käyttökokemusta mittauksen aikana siitä, että mitkä häiriölähteet ulkopäätteiden läheisyydessä voivat muuttaa tulosta epäluotettavaksi. Korkeita arvoja saadessaan mittaaja käy läpi mittauksessaan kaikki ne kohteet, jotka voisivat akustista emissiota aiheuttaa ympäriltä ja taustasta. Mittaajan on tiedostettava vaikuttavat ilmiöt, jotka on jo mainittu edellisissä kappaleissa purkauksien eri muodoista. Koronapurkauksia tapahtuu ilmajohtojen pinnoilla, liittimissä ja eristimissä. Mittaajan on löydettävä myös poikkeuksellisissa tilanteissa mittaussuunta, josta mitattava kohde on pelkästään ulkopääte. Siirtämällä mittauspistettä mittaaja voi varmistua luotettavista tuloksista. Mittaaja selvittää, ettei tuloksissa ole mukana muista sähkölaitteiston osista kantautuvaa akustista emissiota, tausta-arvoja sotkeutuen mitattavan ulkopäätteen mittaus-tulokseen. Mittaajan on varmistettava, ettei taustalla tai päätteen yläpuolella olevista eristimistä tai ilmajohdoista tule akustista emissiota ulkopäätteen mittauspisteeseen. Tätä testataan pienillä siirroilla ohi ulkopäätteen mittauspisteestä. Näiden mittaustuloksia haittaavien häiriöiden poissulkeminen on tärkeää. Ilmastolliset olosuhteet on huomioitava mittaustilanteessa, joista häiriöitä saattaa syntyä.

Osittaispurkaukset esiintyvät mekaanisen rasituksen tai akustisen ääniaallon pistemäisenä lähteenä ulkopäätteestä. Nämä akustiset aallot muunnetaan mittalaitteessa sähkösignaaliksi. Kaapelipäätteiden, joiden eristeinä on joko kaasu tai neste, säteilevä ääni ideaalisessa tilanteessa etenee pitkäjäisinä aaltona pallomaisena muotona. Akustinen osittaispurkausten mittaus soveltuu purkausten kohdentamiseen ja paikantamiseen. Ulkopäätteitä mitattaessa pystytään vertailemaan ulkopäätteiden mittausarvoja toisiinsa ja suurten eroavaisuuksien kohdalla voidaan miettiä tarkempia vaikeampia ja myös samalla kalliimpia mittausten menetelmiä. PD-ilmaisu akustisesti on nopea ja käytännöllinen tapa mitata ulkopäätteitä turvallisesti turvalliselta etäisyydeltä ilman käytön keskeytyksiä ja monimutkaisia mittaussuunnitelmia. Parabolisella peilillä saadaan herkkiä ja keilamuodoltaan erittäin pistetarkkoja tuloksia, kun mittausetäisyys on oikea ja mittaaja huolehtii laserosoitimen jatkuvasta seuraamisesta kertamittauksen ajalta, että mittaus pysyy koko ajan kohteessa. [5.]

Mittaustavan luotettavuus kasvaa kokemuksen karttuessa ja analyyttisen pohdinnan kautta. Mittaustulosten järjestelmällinen taltiointi on edellytys mittaustulosten myöhemmän tarkasteluun. Mittaukset ja niiden suunta on merkittävä vertailua varten, jotta aiem-



piin mittaustuloksiin voidaan luotettavasti tehdä uusien tulosten vertailua. Mittaussuunnat sovitaan ja kirjataan ylös layout-kuviin. Kuvassa 28 punainen nuolimerkintä osoittaa ulkopäätteiden lähdön etupuolen kuvasta. Voidaan myös sopia lähdön etupuoleksi se puoli mistä SJ-kaapeli nousee telinettä vasten ulkopäätteelle. Näin on sitten helpompi puhua samasta suunnasta jatkossakin mitattaessa uudestaan tai tulosten tulkinnessa.



Kuva 28. Mittaussuunta merkattu nuolella osoittaen kaapelilähdön etupuoli.

Mittauksen aikana ei lähistöllä saa kävellä sillä askeleista soralla tai heinikossa aiheutuu mekaanista ääntä, joka sotkee mittaustilanteen ja tulokset. Mittaustulokset kirjataan sähköturvallisuuden valvojan ja mittaustyöparin toimesta oikeisiin sarakkeisiin pöytäkirjaan heti. Mittauksen toteutumisen kannalta mittaajalla tulee olla työpari. Työpari kirjaa tulokset oikeellisesti ylös ja toimii sähköturvallisuuden valvojana.

## 10 Johtopäätökset

PD-SGS:n parabolisella peilin sensorin taajuus soveltuu purkausten paikantamiseen ja oikeiden tulosten mittaamiseen SJ-ulkopäätteillä. Purkauksien paikantaminen tapahtuu siellä, missä ulkopäätteessä on havaittavia akustisen emission muutoksia, kuten äänenpaineentason kasvamista ja korviin havaittavaa mittalaitteen kuulokkeista kuuluvaa osittaispurkauksen ääntä. Mittaaja havaitsee mittausrvojen selkeään vaihtelun, kuulo-, ja näköhavainnoin, että on mitannut osittaispurkausta. Tarkoituksenmukaista on vertailla akustisten tasojen arvoja toiseen samanlaiseen päätteen arvoihin, jotka ovat vertailukelpoisia. Näköhavainnot perustuvat ulkopäätteiden tarkkaan tarkasteluun.

Ulkopäätteiden pinnan likaisuus altistaa osittaispurkauksille. Puhdistaminen ja pintojen puhtaana pito on perusteltua ja tärkeää. [24.] Visuaalisella tarkastuksella voidaan nähdä puhdistustarve ajoissa. Käytönaikainen osittaispurkausmittaus on ennakoiva tapa selvittää huollontarpeesta kunnonhallinnassa. Parhaimmillaan sähköasemakäynneillä on aina mukana käytönaikainen osittaispurkausmittalaite, jolla ennakoivasti pystytään seuraamaan osittaispurkauksien olemassaoloa. Laitteen käyttö takaa helpon ja turvallisen työkentelyn sekä liikkumisen sähkölaitteistossa.

Elinkaaren määrittämiseen voidaan saada kerätessä mittaustietoa tismalleen samoista ja samanlaisista ulkopäätteistä eri ikäisinä. Tutkimuksen mittaustuloksilla en voi näin pienellä mittausotannalla ottaa kantaa eliniän odotukseen ja elinkaaren määrittämiseen. Mittausdataa tulee kerätä tietopankkiin pidemmältä ajalta, jotta elinkaaren tutkiminen olisi luotettavampaa. Sähköasemien erilaisuuden, ulkopäätteiden ja telineiden korkeuserojen vuoksi tulokset eivät ole suoraan verrannollisia sähköasemien kesken. Sähköaseman 2 ja sähköaseman 5 mittausrvot olisivat muuten olleet vertailukelpoisia keskenään päätetyyppien jännitetaso ollessa sama, mutta mittausetäisyys oli eri korkean telineen vuoksi. Toisessa teline oli 2,6 metriä korkea, kun taas toinen teline oli korkeampi, korkeudeltaan kuusi metriä. Ulkopäätteiden elinkaaresta saa lisätietoa eristeiden kunnosta ja vanhenemisesta, kun saa kerättyä samanikäisten ja samalla teknisellä ratkaisulla varustettujen identtisesti samanlaisten ulkopäätteiden tuloksia samalla jännitetasolla. Tuloksia vertailemalla eri-ikäisten normaaliin akustiseen aktiivisuustasoon voidaan tulevaisuudessa laskea ja arvioida ulkopäätteiden elinkaari.

Perusta kaikelle on uusien asennuksien mittaaminen, jotta myöhemmin voitaisiin tehdä lisää luotettavia johtopäätöksiä osittaispurkausaktiivisuudesta. Käytettäessä parabolista

peiliä desibeliarvot vaihtelevat mittausetäisyyden mukaan. Tutkimuksessa luotu mittaus-tietopankki tukee tutkimusta myöhemmin oikeassa tulkinnassa. Akustisen emission suu-ruus kertoo, onko osittaispurkausaktiivisuustaso kasvanut ja antaako se aihetta lisämit-tauksiin ja seurantaan. Lisämittauksilla voidaan poissulkea haitallisten osittaispurkauk-sien esiintyvyys tai reagoida kunnossapidon toimin. PD-SGS käytönaikaisella mittalait-teella parabolisen peilin kanssa saadaan käsitys ulkopäätteen eristeen kunnosta, jolloin jos akustisen emission taso poikkeaa normaalista mitatusta aktiivisuustasosta, voidaan tehdä kunnossapidon päätöksiä.

Baur kannettava online-osittaispurkausmittalaite PD-SGS Sonospot L55 kanssa sovel-tuu mittausten suorittamiseen SJ-ulkopäätteisiin. Mittaaminen on helppoa ja jo nopeasti saadaan tietoa päätteiden kunnan eroavaisuudesta. Voidaan lopuksi todeta, että Baur PD-SGS on luotettava työkalu käytettävyyden säännölliseen arviointiin. Opinnäytetyön lopputuloksena syntyi soveltuva työohje mittausten suorittamisesta ulkopäätteille Fingri-din käyttöön.

## Lähteet

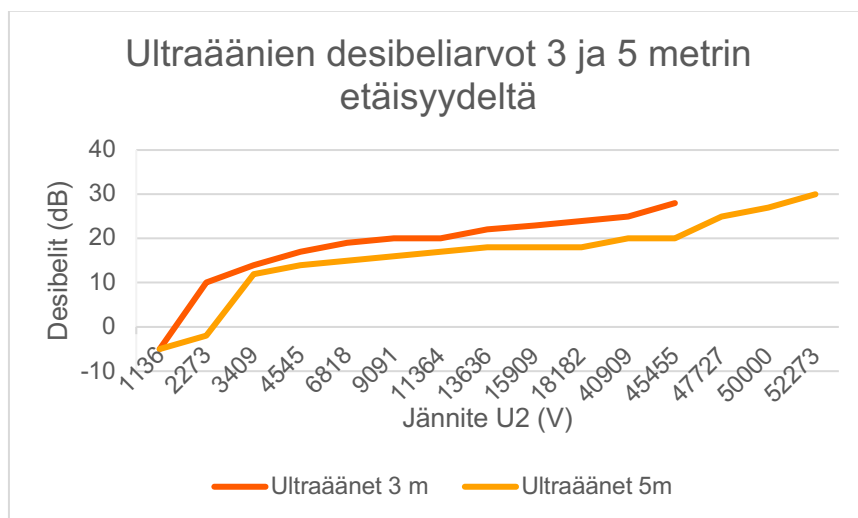
- 1 Yritysesittely. Verkkoaineisto. Eurolaite Oy. <https://www.eurolaite.fi/yritys/>. Luettu 25.3.2018.
- 2 Yritykset. Verkkoaineisto. Kauppalehti. <https://kauppalehti.fi/yritykset/yritys/eurolaite+oy/07347170>. Luettu 25.3.2018.
- 3 Addtech konserni. Verkkoaineisto. Eurolaite Oy. <https://www.eurolaite.fi/yritys/addtech-konserni/>. Luettu 25.3.2018.
- 4 Avaintiedot. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/esittely/avaintiedot/>. Luettu. 25.3.2018.
- 5 Martti Aro; Jarmo Elovaara; Matti Karttunen; Kirsi Nousiainen; Veikko Palva. Suurjännitetekniikka. 2015. Neljäs painos. Otatieto. Gaudeamus Helsinki University Press.
- 6 Jarmo Partanen. Sähköpurkaukset. Verkkoaineisto. BL20A0300 Suurjännitetekniikka. <http://docplayer.fi/4899536-BL20a0300-suurjannitetekniikka.html> luettu 6.5.2018.
- 7 Ultraääni. Verkkoaineisto. Metropolian wikipalvelu. <https://wiki.metropolia.fi/pages/viewpage.action?pageId=109450909>. Luettu 19.5.2018.
- 8 Sonospot. Verkkoaineisto. <https://www.sonotec.eu/products/preventive-maintenance/ultrasonic-testing-devices/sonospot/> Luettu. 19.5.2018.
- 9 Partial Discharge sensor. Verkkoaineisto. <https://www.linkedin.com/pulse/guide-understanding-partial-discharge-sensor-dustin-ashliegh>. Luettu 1.6.2018.
- 10 Baur Handheld Online PD-detector: Verkkoaineisto. Eurolaite Oy. [https://www.eurolaite.fi/fileadmin/user\\_upload/eurolaite/pdfs/BAUR/UM\\_822-162\\_PD-SGS\\_en-gb.pdf](https://www.eurolaite.fi/fileadmin/user_upload/eurolaite/pdfs/BAUR/UM_822-162_PD-SGS_en-gb.pdf) Luettu 5.6.2018.
- 11 Datalehti. Verkkoaineisto. Baur GmbH. [https://www.baur.eu/XooWebKit/bin/download.php/e2b41\\_18c3ac8c59/DS\\_Handheld%20online%20PD%20detector\\_PD-SGS\\_BAUR\\_en-gb.pdf](https://www.baur.eu/XooWebKit/bin/download.php/e2b41_18c3ac8c59/DS_Handheld%20online%20PD%20detector_PD-SGS_BAUR_en-gb.pdf). Luettu 5.6.2018.
- 12 Detection of partial discharges. Verkkoaineisto. Sonotec Ultraschallsensorik Halle GmbH. <https://www.sonotec.eu/products/preventive-maintenance/applications/detection-of-partial-discharges/application-notes/detection-of-partial-discharges-using-ultrasound/>. Luettu 5.6.2018.
- 13 Äänien ominaisuuksia. Verkkoaineisto. [http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/fy/fy3/3\\_aani/302?C:D=iS3i.iPhW&m:selres=iS3i.iPhW](http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/fy/fy3/3_aani/302?C:D=iS3i.iPhW&m:selres=iS3i.iPhW). Luettu 16.6.2018.
- 14 Ultrasonic Sensing. Verkkoaineisto. <http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~ihara/column/ultrasonic%20sensors%20draft.pdf>. Luettu 16.6.2018.
- 15 Partial Discharge Measurement. Verkkoaineisto. <http://www.electricalindia.in/blog/post/id/14041/management-of-the-equipment>. Luettu 16.6.2018.

- 16 Ultrasonic Sensor. Verkkoaineisto. Symmetron Group. <http://www.symmetron.ru/suppliers/murata/files/pdf/murata/ultrasonic-sensors.pdf>. Luettu 24.3.2018.
- 17 Speed of Sound in Common materials. Verkkoaineisto. [http://www.precision-flow.co.uk/speed\\_of\\_sound.htm](http://www.precision-flow.co.uk/speed_of_sound.htm). Luettu 16.6.2018.
- 18 Äänen nopeus väliaineessa. Verkkoaineisto. [http://www.taulukot.com/fysiikka/aaltoliike\\_valo\\_oppi/](http://www.taulukot.com/fysiikka/aaltoliike_valo_oppi/). Luettu 16.6.2018.
- 19 Sound Speed, Reflectivity and Absorbtion Measurements. Verkkoaineisto. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a246293.pdf>. Luettu 17.6.2018.
- 20 Electric field. Verkkoaineisto. Northwestern University. <http://groups.physics.northwestern.edu/lab/second/equipotential.pdf>. Luettu 22.6.2018.
- 21 Ulkopäätteet. Verkkoaineisto. Eurolaite Oy. [https://www.eurolaite.fi/fileadmin/user\\_upload/eurolaite/pdfs/cable-systems-hv-kaapelipaatteet.pdf](https://www.eurolaite.fi/fileadmin/user_upload/eurolaite/pdfs/cable-systems-hv-kaapelipaatteet.pdf). Luettu 24.6.2018.
- 22 Ulkopäätteen rakenne. Verkkoaineisto. Brugg Cables Co. Ltd. [http://www.bruggcables.com/fileadmin/site/documents/HS\\_Zubehoer/HighVoltageCable\\_Accessories\\_EN.pdf](http://www.bruggcables.com/fileadmin/site/documents/HS_Zubehoer/HighVoltageCable_Accessories_EN.pdf). Luettu 24.6.2018.
- 23 Suurjännitekaapelin rakenne. Verkkoaineisto. Reka Oy. <https://www.reka.fi/keski-ja-suurjannitekaapelit/suurjannitekaapelit/suurjannitekaapeli-ahxchbmk-w>. Luettu 24.6.2018.
- 24 Eristimien visuaalinen tarkistus. Verkkoaineisto. <https://testguy.net/content/257-high-voltage-bushing-maintenance-techniques#visual>. Luettu 25.6.2018.
- 25 Addtech AB Financial Report. Verkkoaineisto. Addtech AB. <http://mb.cision.com/Main/3619/2520244/840953.pdf>. Luettu 28.6.2018.
- 26 SFS-Käsikirja 600-2. Sähköasennukset. 2015-10. Osa 2: Sähkötyöturvallisuus, erityisasennukset ja liittyvät standardit. 2. painos. SFS, Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 27 Curved reflectors. Verkkoaineisto. <http://www.acoustics.salford.ac.uk/feschools/waves/reflect.php>. Luettu 24.7.2018.
- 28 Sähköpotentiaali. Verkkoaineisto. Turku AMK. [http://fysiikka.turkuamk.fi/fysiikka/Infya/5b\\_sahkopotentiaali.pdf](http://fysiikka.turkuamk.fi/fysiikka/Infya/5b_sahkopotentiaali.pdf). Luettu 28.6.2018.

## Liite 1. Metropolia Suurjännitelaboratorio

### Pöytäkirja PD-SGS mittalaitteen testauksesta

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Suurjännitelabrassa mittalaitteen testausta eri jännitetasoilla															
2																
3	Etäisyys 3m			Muuntosuhde: 220/100000			Etäisyys 5m			Etäisyys 6 m						
4		dB	U1	U2				dB	U1	U2			dB	U1	U2	
5			28	115	52273			30	115	52273			15	50	22727	
6			25	110	50000			27	110	50000			10	80	36364	
7			24	80	36364			25	105	47727			13	90	40909	
8			23	50	22727			20	100	45455			18	100	45455	
9			22	20	9091			18	90	40909			15	105	47727	
10			20	10	4545			20	40	18182			24	110	50000	
11			19	7,5	3409			18	35	15909			31	115	52273	
12			17	6	2727			18	30	13636			33	115	52273	
13			14	5	2273			17	25	11364						
14			10	3	1364			16	20	9091						
15			-5	2,5	1136			15	15	6818						
16								14	10	4545						
17								12	7,5	3409						
18								-2	5	2273						
19								-5	2,5	1136						
20																
21																
22																



Ultraäänit 3 ja 5 metrin etäisyydeltä (elektrodiväli oli 12,9 mm öljyssä)

## Liite 2. Mittauspöytäkirjat sähköasemien osittaispurkausmittauksista



- A PART OF ADDTECH GROUP

Test Date	29.3.2018	Time:9.00	Location	Sähköasema 1	Humidity:54,1%	Temperature:-1,7°C	Mittausetäisyys 3,0m
Test Date	7.6.2018	Time:13.00	Location	Sähköasema 1	Humidity: 38,44%	Temperature: 13,06°C	Mittausetäisyys 3,0m

Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähköasema1	Temperature:-1,7°C							
Test Date	29.3.2018	Time:9.00	Location		Humidity:54,1%	Mittausetäisyys 3,0m						
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind3m (dB)	4) from the right 3m(dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)	
AE +110kV	L1		1	Top	4							
				Middle	11							
				Bottom	8							
				Max dB	17							
	16	L2		2	Top	18						
					Middle	17						
					Bottom	12						
					Max dB	17						
		L3		3	Top	13						
					Middle	16						
					Bottom	15						
					Max dB	20						
	L1		4	Top	22							
				Middle	33							
				Bottom	9							
				Max dB	na							
14	L2		5	Top	2							
				Middle	7							
				Bottom	14							
				Max dB	na							
	L3		6	Top	26							
				Middle	19							
				Bottom	30							
				Max dB	na							
	L1		7	Top	11							
				Middle	16							
				Bottom	14							
				Max dB	na							
15	L2		8	Top	23							
				Middle	20							
				Bottom	21							
				Max dB	na							
	L3		9	Top	12							
				Middle	26							
				Bottom	25							
				Max dB	na							
	L1		10	Top	-4							
				Middle	-3							
				Bottom	-4							
				Max dB	na							
12	L2		11	Top	-2							
				Middle	-1							
				Bottom	0							
				Max dB	na							
	L3		12	Top	3							
				Middle	7							
				Bottom	6							
				Max dB	na							

Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 3m (dB)	Comments	2	Acoustic Level (dB)
	L1		13	Top	4						
				Middle	-4						
				Bottom	11						
				Max dB	7						
13	L2		14	Top	-4						
				Middle	-3						
				Bottom	-5						
				Max dB	na						
	L3		15	Top	-4						
				Middle	-1						
				Bottom	-1						
				Max dB	na						
	L1		16	Top	2						
				Middle	23						
				Bottom	-2						
				Max dB	na						
11	L2		17	Top	5						
				Middle	6						
				Bottom	6						
				Max dB	na						
	L3		18	Top	-4						
				Middle	0						
				Bottom	0						
				Max dB	na						
	L1		19	Top	6						
				Middle	-2						
				Bottom	6						
				Max dB	na						
10	L2		20	Top	-3						
				Middle	-2						
				Bottom	-5						
				Max dB	na						
	L3		21	Top	-4						
				Middle	-5						
				Bottom	-3						
				Max dB	na						
	L1		22	Top	-3						
				Middle	-4						
				Bottom	-2						
				Max dB	na						
8	L2		23	Top	0						
				Middle	0						
				Bottom	1						
				Max dB	na						
	L3		24	Top	-3						
				Middle	-1						
				Bottom	-3						
				Max dB	na						



Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähkösosema1	Temperature: 13,06°C							
Test Date	7.6.2018	Time: 9.00	Location		Humidity: 38,44%				Mittausetäisyys 3,0m			
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 3m (dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)	
AE =110KV	L1		1	Top	-4	-4	-3	0	kuva laipan alpuolella jää/halkeama			
				Middle	-5	-5	-2	-4				
				Bottom	-5	-4	-1	-5				
				Mix dB								
	16	L2		2	Top	-4	-3	-5	-4			
					Middle	-4	-5	-3	-3			
					Bottom	-5	-5	-5	-3			
					Mix dB							
		L3		3	Top	-4	-2	-4	-4			
					Middle	-5	-5	-5	-5			
					Bottom	-5	-4	-5	-5			
					Mix dB							
14	L1		4	Top	-2	-4	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Mix dB								
		L2		5	Top	-3	-2	-5	-5			
					Middle	-5	-5	-5	-5			
					Bottom	-5	-5	-5	-5			
					Mix dB							
		L3		6	Top	-5	-3	-5	-4			
					Middle	-5	-5	-5	-5			
					Bottom	-5	-5	-5	-5			
					Mix dB							
15	L1		7	Top	-5	-5	-5	-3	jääki laipan alla -0dB			
				Middle	-5	-5	-5	-3				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Mix dB								
		L2		8	Top	-3	-5	-5	-2	7 lautanen ylhäällä jääki 0dB		
					Middle	-2	-4	-5	-5			
					Bottom	-3	-5	-5	-5			
					Mix dB							
		L3		9	Top	-5	-3	-3	-4			
					Middle	-4	-5	-5	-5			
					Bottom	-5	-5	-5	-5			
					Mix dB							
12	L1		10	Top	-4	-4	-5	-4				
				Middle	-4	-4	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Mix dB								
		L2		11	Top	-4	-5	-5	-5			
					Middle	-5	-5	-5	-5			
					Bottom	-5	-5	-5	-5			
					Mix dB							
		L3		12	Top	-4	-5	-5	-5			
					Middle	-5	-5	-5	-5			
					Bottom	-5	-5	-5	-5			
					Mix dB							

Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 3m (dB)	Comments	2	Acoustic Level (dB)
	L1		13	Top	-5	-5	-5	-5			
				Middle	-5	-5	-5	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
13	L2		14	Top	-5	-5	-3	-4			
				Middle	-5	-5	-5	-5			
				Bottom	-5	-4	-5	-5			
				Mix dB							
	L3		15	Top	-5	-5	-5	-4			
				Middle	-5	-5	-5	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-4			
				Mix dB							
	L1		16	Top	-4	-5	-4	0			
				Middle	-5	-5	-4	-4			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
11	L2		17	Top	-4	-5	-4	-2			
				Middle	-5	-5	-5	-3			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
	L3		18	Top	-3	-2	0	-5			
				Middle	-5	0	-5	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
	L1		19	Top	-5	-5	-5	-4			
				Middle	-5	-5	-5	-5			
				Bottom	-6	-5	-5	-5			
				Mix dB							
10	L2		20	Top	-1	-4	-3	-4			
				Middle	-3	-3	-2	-4			
				Bottom	-4	-5	-2	-5			
				Mix dB							
	L3		21	Top	-3	-5	-5	-5			
				Middle	-5	-4	-5	-5			
				Bottom	-4	-5	-6	-5			
				Mix dB							
	L1		22	Top	-3	-5	-5	-5			
				Middle	-4	-6	-5	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
8	L2		23	Top	-3	-5	-5	-5			
				Middle	-5	-5	-4	-5			
				Bottom	-2	-4	-2	-5			
				Mix dB							
	L3		24	Top	-5	-4	-4	-4			
				Middle	-5	-4	-5	-3			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							

Test Date	3.4.2018	Time:10.15	Location	Sähköasema 2	Humidity:46,99%	Temperature:2,74°C	Mittausetäisyys 4,5m
Test Date	4.6.2018	Time:10.00	Location	Sähköasema 2	Humidity:28,8%	Temperature:19,27°C	Mittausetäisyys 4,5m

Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähköasema 2	Temperature:2,74°C							
Test Date	3.4.2018	Time:10.15	Location		Humidity:46,99%		Mittausetäisyys 4,5m					
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 4,5m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind3m (dB)	4) from the right 3m(dB)	Comment	1	Acoustic Level (dB)	
AE110kV	1	L1	1	Top	0		0					
				Middle	-2		-2					
				Bottom	-2		-2					
				Max dB	-3							
	2	L2	2	Top				-2				
				Middle	0		-2					
				Bottom			-2					
				Max dB				-1				
	3	L3	3	Top	-2		-1					
				Middle	0		-1					
				Bottom	-3		-1					
				Max dB	-2							
4	L1	4	Top			-4	-2					
			Middle			-3	-3					
			Bottom			-3	-1					
			Max dB									
5	L2	5	Top			-3	-2					
			Middle			-3	-3					
			Bottom			-3	-2					
			Max dB									
6	L3	6	Top			15	17	-1 icepeak				
			Middle			0	0	-4				
			Bottom			0	-1	-2				
			Max dB									
7	L1	7	Top	-3			-1					
			Middle	-4			-1					
			Bottom	-4			-1					
			Max dB									
8	L2	8	Top	-1			-1					
			Middle	0			-1					
			Bottom	-4			0					
			Max dB									
9	L3	9	Top	-2			0					
			Middle	-3			-1					
			Bottom	-3			-2					
			Max dB									

Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähkösema 2	Temperature:19,27°C							
Test Date	4.6.2018	Time:10.00	Location		Humidity:28,8%	Mittausetäisyys 4,5m		Taustamelu -4dB				
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front 4,5m (dB)	2) from the left 4,5m (dB)	3) from behind 4,5m (dB)	4) from the right 4,5m(dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)	
AE110KV	L1		1	Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Mix dB								
	L2		2	Top	-5	-5	-5	-4				
				Middle	-5	-5	-5	-4				
				Bottom	-5	-5	-5	-4				
				Mix dB								
	L3		3	Top	-4	-5	-5	-5				
				Middle	-4	-5	-5	-5				
				Bottom	-4	-5	-5	-5				
				Mix dB								
	L1		4	Top	-5	-5	-5	-4				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Mix dB								
	L2		5	Top	-5	-4	-4	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Mix dB								
	L3		6	Top	-5	-5	-5	-4				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Mix dB								
	L1		7	Top	0	-2	-5	0				
				Middle	0	-2	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	0				
				Mix dB								
	L2		8	Top	-4	-5	-5	-5				
				Middle	-3	-5	-5	-5				
				Bottom	-3	-5	-5	-5				
				Mix dB								
	L3		9	Top	-3	-4	-5	-4				
				Middle	-4	-4	-5	-3				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Mix dB								

Test Date	4.4.2018	Time:9.00	Location	Sähköasema 3	Humidity:45,66%	Temperature: 3,72°C	Mittausetäisyys 3,0m
Test Date	7.6.2018	Time:13.00	Location	Sähköasema 3	Humidity: 30,52%	Temperature: 18,16°C	Mittausetäisyys 3,0m

Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähköasema3	Temperature: 3,72°C							
Test Date	4.4.2018	Time:9.00	Location		Humidity:45,66%				Mittausetäisyys 3,0m			
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind3m (dB)	4) from the right 3m(dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)	
AE =110kV	L1 R		1	Top	-2							
				Middle	-4							
				Bottom	-4							
				Mix dB								
	L2 4 S		2	Top	0							
				Middle	-1							
				Bottom	-1							
				Mix dB								
	L3 T		3	Top	0							
				Middle	0							
				Bottom	0							
				Mix dB								
L1 R		4	Top	1								
			Middle	0								
			Bottom	5,8,5								
			Mix dB	na								
L2 6 S		5	Top	0								
			Middle	8,1								
			Bottom	-3								
			Mix dB	na								
L3 T		6	Top	-2								
			Middle	25								
			Bottom	-2								
			Mix dB	na								
L1 R		7	Top	-5								
			Middle	-5								
			Bottom	20								
			Mix dB	na								
L2 8 S		8	Top	-5								
			Middle	-5								
			Bottom	-5								
			Mix dB	na								
L3 T		9	Top	-5								
			Middle	-5								
			Bottom	-4								
			Mix dB	na								
L1 R		10	Top	-3								
			Middle	-4								
			Bottom	-4								
			Mix dB									
L2 7 S		11	Top	-2								
			Middle	-3								
			Bottom	-4								
			Mix dB	na								
L3 T		12	Top	-3								
			Middle	-4								
			Bottom	-4								
			Mix dB	na								

Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähköasema3	Temperature: 18,16C							
Test Date	7.6.2018	Time:13.00	Location		Humidity: 30,52%				Mittausetäisyys 3,0m			
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 3m (dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)	
AE =110kV	L1 R		1	Top	-3	-5	-5	-2	Pääteen häipäly liittimessä 0dB			
				Middle	-2	-6	-5	-1				
				Bottom	-2	-5	-5	-2				
				Max dB								
	L2 S	4	2	Top	0	-4	-5	-1				
				Middle	0	-5	-3	-1				
				Bottom	-2	-5	-4	0				
				Max dB								
	L3 T		3	Top	1	-1	-5	-2				
				Middle	0	-4	-4	-3				
				Bottom	-1	-4	-4	-2				
				Max dB								
L1 R		4	Top	0	-4	-4	0					
			Middle	-2	-5	-4	-1					
			Bottom	-1	-4	-4	-2					
			Max dB									
L2 S	6	5	Top	-1	1	-5	-4					
			Middle	-2	0	-5	-5					
			Bottom	-1	0	-5	-4					
			Max dB									
L3 T		6	Top	-5	-1	-5	-5					
			Middle	-5	0	-5	-5					
			Bottom	-5	-1	-5	-5					
			Max dB									
L1 R		7	Top	-5	-5	-5	-4	Häiriö tukerösinen lautasista 17dB				
			Middle	-5	-5	-4	-5					
			Bottom	-5	-5	-6	-5					
			Max dB									
L2 S	8	8	Top	-5	-6	-5	-5					
			Middle	-6	-5	-5	-5					
			Bottom	-5	-5	-6	-5					
			Max dB									
L3 T		9	Top	-5	-5	-5	-5					
			Middle	-5	-5	-5	-5					
			Bottom	-6	-5	-5	-5					
			Max dB									
L1 R		10	Top	-2	0	0	1					
			Middle	0	-4	-2	-5					
			Bottom	-2	-5	-4	-5					
			Max dB									
L2 S	7	11	Top	-5	-4	0	-4					
			Middle	-4	-5	-5	-4					
			Bottom	-5	-5	-5	-5					
			Max dB									
L3 T		12	Top	-5	-2	0	-3					
			Middle	-4	-4	-5	-4					
			Bottom	-6	-4	-5	-5					
			Max dB									

Test Date	4.4.2018	Time:10.15	Location	Sähköasema 4	Humidity: 40,50%	Temperature: 4,79°C	Mittausetäisyys 4,5m
Test Date	11.6.2018	Time:10.45	Location	Sähköasema 4	Humidity: 36,76%	Temperature: 23,07°C	Mittausetäisyys 4,5m

Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähköasema 4		Temperature: 4,79°C				
Test Date	4.4.2018	Time:10.15	Location		Humidity: 40,50%	Mittausetäisyys 4,5m				
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 4,5m (dB)	2) from the left 4,5m (dB)	4) from the right 4,5m(dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)
AL	L1		1	Top	7	10	6			
				Middle	6	9	11			
				Bottom	5	8	11			
				Max dB						
	L2		2	Top	5	9	6			
				Middle	4	6	8			
				Bottom	3	5	4			
				Max dB						
	L3		3	Top	9	6	10			
				Middle	8	4	11			
				Bottom	8	4	9			
				Max dB						
AL	L1		4	Top	11	11	9			
				Middle	11	11	8			
				Bottom	10	9	8			
				Max dB	na					
	L2		5	Top	8	12	9			
				Middle	8	10	7			
				Bottom	6	9	7			
				Max dB	na					
	L3		6	Top	9	11	11			
				Middle	9	10	10			
				Bottom	7	9	9			
				Max dB	na					

Test Engineer			Substation Name	Sähköasema 4	Temperature:23,07C							
Test Date	11.6.2018	Time:	10.45	Location		Humidity: 36,76%				Mittausetäisyys 4,5m		
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 4,5m (dB)	2) from the left 4,5m (dB)	3) from behind3m (dB)	4) from the right 4,5m(dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)	
AL	L1		1	Top	6	8	-4	9				
				Middle	5	7	-3	8				
				Bottom	5	6	-2	7				
				Max dB								
	L2		2	Top	3	10	-5	1				
8				Middle	3	9	-4	2				
				Bottom	2	8	-3	0				
				Max dB								
	L3		3	Top	7	7	-4	9				
				Middle	6	5	-3	9				
				Bottom	5	4	-2	8				
				Max dB								
AL	L1		4	Top	10	10	0	10				
				Middle	8	8	0	9				
				Bottom	6	7	0	8				
				Max dB	11							
	L2		5	Top	10	4	12	18	hulppu liitin 31db edestä			
6				Middle	5	4	4	12	1,5m korkeudessa			
				Bottom	4	3	2	6	päättteen päällä			
				Max dB								
	L3		6	Top	6	10	3	7	liitin päättteen päällä 15dB			
				Middle	5	5	2	7				
				Bottom	4	3	10	5				
				Max dB								
	L1		7	Top								
				Middle								
				Bottom								
				Max dB								
	L2		8	Top								
				Middle								
				Bottom								
				Max dB								
	L3		9	Top								
				Middle								
				Bottom								
				Max dB								



Test Date	5.4.2018	Time:12.00	Location	Sähköasema 5	Humidity: 76,83%	Temperature: 4,85°C	Mittausetäisyys 3,0m
Test Date	11.6.2018	Time:13.15	Location	Sähköasema 5	Humidity: 21,88%	Temperature: 29,38°C	Mittausetäisyys 3,0m

Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähköasema 5	Temperature: 4,85°C				
Test Date	5.4.2018	Time:12.00	Location		Humidity: 76,83%		Mittausetäisyys 3,0m		
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	3) from behind3m (dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)
	L1		1	Top	-3				
				Middle	-5				
				Bottom	-5				
				Max dB					
13	L2		2	Top	-4				
				Middle	-5				
				Bottom	-5				
				Max dB					
	L3		3	Top	-4				
				Middle	-5				
				Bottom	-5				
				Max dB					
	L1		4	Top	-5				
				Middle	-5				
				Bottom	-6				
				Max dB	na				
15	L2		5	Top	-5				
				Middle	-5				
				Bottom	-6				
				Max dB	na				
	L3		6	Top	-5				
				Middle	-5				
				Bottom	-6				
				Max dB	na				
	L1		7	Top	-5	-5			
				Middle	-5	-4			
				Bottom	-5	-5			
				Max dB	na				
12	L2		8	Top	-5	-5			
				Middle	-5	-5			
				Bottom	-5	-5			
				Max dB	na				
	L3		9	Top	-5	-5			
				Middle	-5	-5			
				Bottom	-5	-5			
				Max dB	na				

Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähköasema 5	Temperature: 29,38°C							
Test Date	11.6.2018	Time: 13.15	Location		Humidity: 21,88%				Mittausetäisyys 3,0 m			
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3,0 m (dB)	3) from behind3m (dB)	4) from the right 4,5m(dB)	Comment:	1	Acoustic Level (dB)	
	L1		1	Top	-5	-5	-5	-4				
				Middle	-6	-6	-5	-4				
				Bottom	-6	-5	-5	-5				
				Max dB								
	L2		2	Top	-5	-5	-6	-4				
13				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-4				
				Max dB								
	L3		3	Top	-5	-4	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-6	-5	-5	-5				
				Max dB								
	L1		4	Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Max dB								
	L2		5	Top	-5	-4	-6	-4				
15				Middle	-5	-4	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-4				
				Max dB								
	L3		6	Top	-5	-5	-5	-6				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-6	-5	-5				
				Max dB								
	L1		7	Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-4	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Max dB								
	L2		8	Top	-6	-5	-5	-5				
12				Middle	-5	-4	-5	-5				
				Bottom	-5	-4	-5	-5				
				Max dB								
	L3		9	Top	-5	-5	-5	-6				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-6	-5	-5	-5				
				Max dB								

Ulkopäätteiden jännite (kV)	Asema	Vuosimalli	Ikä (a)	Kaapelilähtöjä	Päätteitä
110	Sähköasema 1	1996	22	11	33
110	Sähköasema 2	2009	9	5	15
110	Sähköasema 3	1985	33	6	18
110	Sähköasema 5	2013	5	5	15
400	Sähköasema 4	2017	1	2	6

Test Date	4.6.2018	Time: 13.00	Location	Sähköasema 6	Humidity: 30,70%	Temperature: 18,46°C	Mittausetäisyys 3,0m
-----------	----------	-------------	----------	--------------	------------------	----------------------	----------------------

Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähköasema 6	Temperature: 18,46C							
Test Date	4.6.2018	Time:	Location		Humidity: 30,70 %				Mittausetäisyys 3,0m			
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 3m (dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)	
AE +110kV  6	XQ		1	Top	-5	-4	-5	-4				
				Middle	-4	-5	-5	-5				
				Bottom	-3	-5	-5	-5				
				Mix dB								
	XI			2	Top	-5	-5	-5	-5			
					Middle	-4	-6	-5	-5			
					Bottom	-5	-5	-5	-6			
					Mix dB							
	XG			3	Top	-5	-5	-5	-5			
					Middle	-6	-5	-5	-5			
					Bottom	-5	-5	-5	-6			
					Mix dB							
7	XQ		4	Top	-5	-4	-5	-5				
				Middle	-5	-4	-4	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Mix dB								
	XI			5	Top	-5	-5	-5	-5			
					Middle	-5	-5	-5	-5			
					Bottom	-5	-5	-5	-5			
					Mix dB							
	XG			6	Top	-4	-5	-5	-3			
					Middle	-5	-5	-5	-5			
					Bottom	-5	-5	-6	-5			
					Mix dB							
4	XI		7	Top	-4	na	-5	-5			Kondensattori sijutulla	
				Middle	-4	na	-5	-5			siidalla na	
				Bottom	-6	na	-5	-5			ei mahdollista	
				Mix dB							mitata kulkista	
	XQ			8	Top	-5	na	na	na			suunnista
					Middle	-5	na	na	na			
					Bottom	-5	na	na	na			
					Mix dB							
	XG			9	Top	-5	na	-5	-5			
					Middle	-5	na	-5	-5			
					Bottom	-5	na	-5	-5			
					Mix dB							
8	XQ		10	Top	-5	-4	-5	-5				
				Middle	-5	-4	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
				Mix dB								
	XI			11	Top	-5	-4	-5	-5			
					Middle	-5	-5	-5	-5			
					Bottom	-4	-5	-5	-4			
					Mix dB							
	XG			12	Top	-5	-5	-5	-5			
					Middle	-5	-4	-5	-5			
					Bottom	-5	-5	-5	-5			
					Mix dB							

Test Date	4.6.2018	Time: 13.00	Location	Sähköasema 6	Humidity: 30,70%	Temperature: 18,46°C	Mittausetäisyys 3,0m
-----------	----------	-------------	----------	--------------	------------------	----------------------	----------------------

Test Engineer	Henry ja Ville		Substation Name	Sähköasema 6	Temperature: 18,46C							
Test Date	4.6.2018	Time:	Location		Humidity: 30,70 %				Mittausetäisyys 3,0m			
Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 3m (dB)	Comments	1	Acoustic Level (dB)	
AE +110kV  6	XQ		1	Top	-5	-4	-5	-4				
				Middle	-4	-5	-5	-5				
				Bottom	-3	-5	-5	-5				
				Mix dB								
	XL		2	Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-4	-6	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-6				
	XG		3	Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-6	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-6				
	7	XQ		4	Top	-5	-4	-5	-5			
					Middle	-5	-4	-4	-5			
Bottom					-5	-5	-5	-5				
Mix dB												
XL			5	Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
XG			6	Top	-4	-5	-5	-3				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-6	-5				
4		XL		7	Top	-4	na	-5	-5		Kondensattori	
					Middle	-4	na	-5	-5		rajatulla	
	Bottom				-6	na	-5	-5		aidalla na		
	Mix dB									ei mahdollista		
	XQ		8	Top	-5	na	na	na		mitata kulkista		
				Middle	-5	na	na	na		suunnista		
				Bottom	-5	na	na	na				
	XG		9	Top	-5	na	-5	-5				
				Middle	-5	na	-5	-5				
				Bottom	-5	na	-5	-5				
	8	XQ		10	Top	-5	-4	-5	-5			
					Middle	-5	-4	-5	-5			
Bottom					-5	-5	-5	-5				
Mix dB												
XL			11	Top	-5	-4	-5	-5				
				Middle	-5	-5	-5	-5				
				Bottom	-4	-5	-5	-4				
XG			12	Top	-5	-5	-5	-5				
				Middle	-5	-4	-5	-5				
				Bottom	-5	-5	-5	-5				
					Mix dB							

Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 3m (dB)	3) from behind 3m (dB)	4) from the right 3m (dB)	Comments	2	Acoustic Level (dB)
9	XQ		13	Top	-5	-5	-5	-5			
				Middle	-5	-5	-5	-4			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
	XI		14	Top	-5	-5	-5	-5			
				Middle	-5	-5	-5	-6			
				Bottom	-5	-5	-5	-6			
				Mix dB							
	XG		15	Top	-5	-4	-5	-5			
				Middle	-5	-5	-5	-6			
				Bottom	-5	-5	-5	-6			
				Mix dB							
XG		16	Top	-5	-4	-5	-5				
			Middle	-4	-5	-4	-5				
			Bottom	-5	-5	-5	-5				
			Mix dB								
12	XI		17	Top	-5	-4	-5	-5			
				Middle	-5	-5	-5	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
XQ		18	Top	-5	-5	-5	-5				
			Middle	-5	-5	-5	-5				
			Bottom	-5	-5	-4	-5				
			Mix dB								
13	XG		19	Top	-3	-5	-5	-5			
				Middle	-4	-5	-5	-5			
				Bottom	-4	-5	-5	-5			
				Mix dB							
XQ		20	Top	-4	-3	-5	-4				
			Middle	-5	-5	-5	-5				
			Bottom	-5	-5	-5	-5				
			Mix dB								
XQ		21	Top	-5	-5	-5	-5				
			Middle	-5	-5	-5	-5				
			Bottom	-4	-5	-5	-5				
			Mix dB								
14	XQ		22	Top	-5	-3	-5	-5			
				Middle	-5	-5	-5	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
XQ		23	Top	-5	-5	-5	-5				
			Middle	-5	-5	-5	-5				
			Bottom	-5	-4	-4	-5				
			Mix dB								
XG		24	Top	-5	-5	-5	-3				
			Middle	-5	-5	-5	-5				
			Bottom	-5	-4	-6	-4				
			Mix dB								

Cable output name/ Field ID	Phases L1, L2, L3	Serial Number	Hv termination No.	Section of termination	1) from the front Acoustic Level 3m (dB)	2) from the left 9m (dB)	3) from behind 9m (dB)	4) from the right 9m (dB)	Comments	3	Acoustic Level (dB)
15	X3		25	Top	-5	-5	-5	-5			
				Middle	-4	-5	-5	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
	X1		26	Top	-5	-5	-5	-5			
				Middle	-5	-5	-4	-5			
				Bottom	-5	-5	-4	-5			
				Mix dB							
	X2		27	Top	-4	-4	-5	-5			
				Middle	-4	-4	-4	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
16	X3		28	Top	-4	-4	-5	-4			
				Middle	-5	-4	-5	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
	X1		29	Top	-5	-4	-5	-4			
				Middle	-5	-5	-5	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
	X2		30	Top	-5	-5	-5	-5			
				Middle	-5	-5	-5	-5			
				Bottom	-5	-5	-5	-5			
				Mix dB							
			31	Top							
				Middle							
				Bottom							
				Mix dB							
			32	Top							
				Middle							
				Bottom							
				Mix dB							
			33	Top							
				Middle							
				Bottom							
				Mix dB							

**Liite 3. Käyttöohje (En): Baur PD-SGS Kannettava osittaispurkausmittari**

Luettavissa: <https://www.eurolaite.fi/tuotteet/tyokalut-ja-mittalaitteet/kaapeliverkon-testaus-ja-diagnosointi/pd-sgs-akustinen/>