



# **Osittaispurkaus- ja häviökerroin- mittaukset VLF-tekniikkaa hyödyntäen**

**Keskijännitemaakaapeleiden PD- ja TD-mittaukset  
mittausautolla ennakoivan kunnossapidon tueksi**

Mikael Paatelainen

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2024

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma (AMK)

**Paatelainen, Mikael**

**Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaukset VLF-tekniikkaa hyödyntäen.**

**Keskijännitemaakaapeleiden PD- ja TD-mittaukset mittausautolla ennakoivan kunnossapidon tueksi.**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2024, 46 sivua.

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

## **Tiivistelmä**

Opinnäytetyössä perehdyttiin maakaapelissa tapahtuvien osittaispurkausten ja kaapeliin päässeen kosteuden vaikutuksiin kaapelin ja sen eristeen kuntoon, sekä erilaisiin menetelmiin, joilla kyseisiä tapahtumia on mahdollista havaita ja mitata. Lisäksi selvitettiin, millaiset tekijät vaikuttavat osittaispurkausten syntymiseen ja liiallisen kosteuden esiintymiseen kaapelissa, sekä miten arvioida kaapelin kuntoa osittaispurkaus- ja häviökerroinmittauksissa saatujen tulosten perusteella.

Työn tarkoituksena suorittaa yhdistetty osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaus käytännössä, ja laatia toimeksiantajalle tämän pohjalta yksityiskohtainen prosessikuvaus mittautapahtumasta. Prosessikuvauksen tuli sisältää mittauksia edeltävät toimenpiteet, mittauslaitteiston kytkennät ja kalibrointi, varsinainen mitautapahtuma sekä mittautulosten tulkinta ja tilaajalle lähetettävän mittausraportin laatiminen.

Mittautapahtuma alkoi mittauslaitteiston asentamisesta mittausvalmiiksi ja sen kytkemisestä mitattavaan järjestelmään. Tämän jälkeen laitteistolle suoritettiin kalibrointi, joka oli edellytyksenä todenmukaisille mitautuloksille. Varsinaiset mittaukset suoritettiin VLF-tekniikkaa hyödyntäen yhdistettynä osittaispurkaus- ja häviökerroinmittauksena puistomuuntamon KJ-puolelta lähtevän keskijännitemaakaapelin kaikille kolmelle vaihejohtimelle, kullekin erikseen. Mitattujen tulosten perusteella tehtiin kaapelin kunnon arviointi ja laadittiin tilaajalle lähetettävä mittausraportti, josta selvisi mittautulokset, mitatun kaapelin sen hetkinen kunto ja tarvittavat jatkotoimenpiteet.

Mittausten perusteella ja mittauslaitteiston valmistajan dokumenttien avulla saatiin laadittua toimeksiantajalle kattava prosessikuvaus mittautapahtumasta. Prosessikuvauksen avulla on tarkoitus perehdyttää uusia työntekijöitä osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausten suorittamiseen ja näin lisätä toimeksiantajan tilaustantaa mittauksen osalta. Lisäksi kyseinen dokumentti toimii nykyisille työntekijöille ohjeistuksena mittauksen suorittamisen yhteydessä.

## **Avainsanat (asiasanat)**

osittaispurkaus, häviökerroin, vesipuu, sähköpuu, VLF-tekniikka, osittaispurkausmittaus, Häviökerroinmittaus

## **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

-

**Paatelainen, Mikael**

**Partial discharge and dissipation factor measurements utilizing VLF technology. Medium voltage underground cable PD and TD measurements with a test van to support predictive maintenance.**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2024, 46 pages.

Degree Programme in Electric and Automation Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

The thesis delved into the effects of partial discharges and moisture ingress in underground cables on the condition of the cable and its insulation, as well as various methods for detecting and measuring these occurrences. Additionally, it investigated the factors influencing the occurrence of partial discharges and excessive moisture in the cable, and how to assess the condition of the cable based on the results obtained from partial discharge and dissipation factor measurements. The purpose of the work was to perform a combined partial discharge and dissipation factor measurement in practice and to provide the client with a detailed process description of the measurement event based on this. The process description was to include pre-measurement procedures, connection and calibration of the measurement equipment, the actual measurement event, and interpretation of the measurement results, as well as the preparation of the measurement report to be sent to the client.

The measurement event began with the installation of the measurement equipment and its connection to the system being measured. Calibration of the equipment was then performed, which was a prerequisite for accurate measurement results. The actual measurements were conducted using VLF (Very Low Frequency) technology, combined with partial discharge and dissipation factor measurements, on all three phase conductors of the medium voltage underground cable leaving the substation's transformer side, individually for each phase. Based on the measured results, the condition of the cable was evaluated, and a measurement report was prepared to be sent to the client, detailing the measurement results, the current condition of the measured cable, and any necessary follow-up actions.

Based on the measurements and the manufacturer's documentation of the measurement equipment, a comprehensive process description of the measurement event was prepared for the client. The purpose of the process description is to familiarize new employees with the performance of partial discharge and dissipation factor measurements and thus increase the client's order volume for measurements. Additionally, this document serves as guidance for current employees when conducting measurements.

### **Keywords/tags (subjects)**

partial discharge, dissipation factor, water tree, electrical tree, VLF technology, partial discharge measurement, dissipation factor measurement

### **Miscellaneous (Confidential information)**

-

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Aiheen rajausta ja tutkimuskysymykset .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Maakaapelit Suomessa .....</b>	<b>5</b>
3.1	Yleisimmät maakaapelityypit .....	5
<b>4</b>	<b>Maakaapeleiden vaurioitumiseen johtavat tekijät.....</b>	<b>7</b>
4.1	Osittaispurkaus.....	7
4.1.1	Koronapurkaus.....	8
4.1.2	Pintapurkaus .....	8
4.1.3	Sisäinen purkaus .....	9
4.2	Sähkö- ja vesipuut .....	10
<b>5</b>	<b>Osittaispurkausmittaukset .....</b>	<b>13</b>
5.1	Online-mittaukset .....	13
5.2	Offline-mittaukset .....	14
5.2.1	Mittaukset vaimenevalla vaihtojännitteellä (DAC).....	16
5.2.2	Mittaukset VLF-tekniikkaa hyödyntäen .....	17
5.3	Mittauslaitteiston kalibrointi .....	18
<b>6</b>	<b>Häviökerroinmittaukset .....</b>	<b>20</b>
6.1	Yhdistetty osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaus .....	20
<b>7</b>	<b>Mittauslaitteisto .....</b>	<b>22</b>
7.1	BAUR PHG 80 testijännitegeneraattori .....	22
7.2	PD-TaD 62-diagnostiikkajärjestelmä .....	24
7.3	Power Box .....	26
<b>8</b>	<b>Mittausten suorittaminen .....</b>	<b>27</b>
8.1	Mittauslaitteiston kytkentä.....	27
8.2	Kalibrointi .....	28
8.3	Mittaustapahtuma .....	29
<b>9</b>	<b>Mittautulosten tarkastelu .....</b>	<b>32</b>
<b>10</b>	<b>Mittautulosten tulkinta ja raja-arvot .....</b>	<b>35</b>
10.1	Mitatut häviökerroin-arvot .....	36
10.2	Mitattujen osittaispurkausten arvot .....	37
<b>11</b>	<b>Prosessikuvauksen laatiminen .....</b>	<b>38</b>
<b>12</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>39</b>
12.1	Tutkimuksen tulosten tarkastelu .....	39

12.2 Tutkimuksen luotettavuus ja eettinen tarkastelu .....	41
<b>Lähteet .....</b>	<b>43</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>47</b>
Liite 1. Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausraportti.....	47

## Kuviot

Kuvio 1. AHXAMK-W ja AHXAMK-WP kaapeleiden rakenteet .....	6
Kuvio 2. Kolmikapasitanssimallia vastaava kytkentä .....	10
Kuvio 3. Kaapelin eristeeseen muodostunut vesipuu .....	11
Kuvio 4. Kuviossa (a) on kaapelin eristeeseen muodostunut sähköpuu . Kuviossa (b) on esitty vesipuun kehittyminen sähköpuuksi . .....	12
Kuvio 5. Osittaispurkauksen aiheuttaman virtapulssin eteneminen kaapelissa . .....	15
Kuvio 6. Vaimenevan vaihtojännitteen kuvaaja . .....	16
Kuvio 7. a) Siniaallon kuvaaja b) Kosini-kanttiaallon kuvaaja .....	17
Kuvio 8. Kosini-kanttiaalto jännitteen napaisuuden muutoshetkellä .....	18
Kuvio 9. BAUR PHG 80 testijännitegeneraattori .....	23
Kuvio 10. PD-TaD 62 - diagnostiikkajärjestelmä .....	24
Kuvio 11. HF-suodatin kiinnitettynä PD-TaD 62 - diagnostiikkajärjestelmään .....	25
Kuvio 12. Power Box .....	26
Kuvio 13. Kalibraattori .....	28
Kuvio 14. Kalibrintisignaalin kuvaaja .....	29
Kuvio 15. TD-PD parallel-mittaustyyllillä käytettävät testijännitteet .....	30
Kuvio 16. Mittausraporttiin liitetty kuva Location-näkymästä .....	32
Kuvio 17. Mittausraporttiin liitetty kuva PRPD-näkymästä .....	33
Kuvio 18. Mittausraporttiin liitetyt kuvaajat häviökerroinarvojen keskiarvosta ja -hajonnasta .....	34

## Taulukot

Taulukko 1. IEEE 400.2-2013 standardin mukaiset raja-arvot ikääntyneen polyeteeni eristeisten kaapeleiden häviökerroinarvoille .....	36
--	----

# 1 Johdanto

Sään aiheuttamat vauriot ilmalinjoissa pakottavat maakaapeloinnin jatkuvaan lisäämiseen Suomessa säävarman sähkönjakeluverkon saavuttamiseksi. Sään aiheuttamat vauriot eivät kuitenkaan ole ainoa sähkönjakeluun liittyvä ongelma. Etenkin maakaapeleissa ja niiden eristeessä esiintyy sisäisiä vaurioita, kuten osittaispurkauksia sekä vesi- ja sähköpuita, jotka ovat seurausta kaapelin ikääntymisestä tai esimerkiksi kaapelin valmistuksen tai sen asennuksen yhteydessä tapahtuneista virheistä. Näitä kaapelin sisäisiä vaurioita on hankala havaita kaapelin päällä olevan maakerroksen läpi, joten niiden havaitsemiseksi ja mittaamiseksi on kehitetty erilaisia menetelmiä. Näitä menetelmiä ovat esimerkiksi osittaispurkausmittaukset ja häviökerroinmittaukset. Tällaiset mittaukset mahdollistavat maakaapeleiden kunnon arvioimisen ja huoltotoimenpiteiden toteuttamisen ennen kaapelin täydellistä vioittumista ja siitä aiheutuvan sähkönjakelun katkeamista.

Opinnäytetyöni toimeksiantajalla, Insplan Oy:llä, on käytössään maakaapeleiden sisäisten vaurioiden mittaamiseen tarkoitettu mittauslaitteisto, mutta tällä hetkellä ainoastaan yksi mittauksien suorittamiseen koulutettu työntekijä. Opinnäytetyön tarkoituksena oli laatia toimeksiantajalle prosessikuvaus osittaispurkaus- ja häviökerroinmittauksista, jonka avulla olisi mahdollista perehdyttää uusia työntekijöitä kyseisiin mittauksiin varten ja tätä kautta kasvattaa toimeksiantajan tilauskantaa edellä mainittujen mittausten osalta.

Selvityksen kohteena opinnäytetyössäni ovat erityyppiset vauriot maakaapelissa ja niiden syntymiseen vaikuttavat tekijät. Lisäksi tarkastellaan erilaisia kyseisten vaurioiden tunnistamiseksi kehitettyjä menetelmiä. Tarkemmin perehdytään toimeksiantajalta löytyvään mittauslaitteistoon sekä kyseisen laitteiston mahdollistavien mittausten suorittamiseen. Tarkoituksena on myös toteuttaa toimeksiantajan mittauslaitteistolla osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaukset käytännössä ainakin yhdelle kohteelle. Mittaustapahtuma käydään läpi, sekä arvioidaan saatuja mittaustuloksia ja niiden perusteella mitattavan kaapelin kuntoa. Lisäksi selvitetään mittaustuloksiin liittyviä raja-arvoja sekä mittaustulosten perusteella suoritettavia jatkotoimenpiteitä mitattavalle kaapelille.

## 2 Aiheen rajaus ja tutkimuskysymykset

Tämän työn aiheena ovat maakaapeleissa syntyvien osittaispurkausten sekä kaapeliin päässeen kosteuden aiheuttamat vaikutukset kaapelin ja sen eristeen kuntoon. Lisäksi käydään läpi erilaisia tapoja osittaispurkausten sekä kosteuden havaitsemiseksi ja mittaamiseksi. Aihe on rajattu käsittelemään kolmea yleisintä osittaispurkaustyyppiä, sekä yleisimpiä mittaustapoja. Mittaustapojen osalta perehdytään sekä offline- että online-mittauksiin pääpainon ollessa kuitenkin offline-mittauksissa ja etenkin VLF-tekniikkaa hyödyntävissä mittausten menetelmissä, tutkimuksessa käytetyn mittaustaitteiston perusteella. Tutkimuksen aiheen rajaus on muodostunut toimeksannon ja yhteisen keskustelun myötä. Tutkimuksen tarkoituksena oli siis tuottaa hyödyllistä tietoa toimeksiantajan mittaustaitteistolla suoritettavista mittauksista. Tätä tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi työntekijöiden perehdyttämisessä sekä ammatillisen kehittymisen tukena.

Näitä tarkoituksia lähdettiin selvittämään seuraavilla tutkimuskysymyksillä:

1. Millaisia vaurioita maakaapeleille ja niiden eristeille voi aiheutua kaapeliin päässeestä kosteudesta sekä erityyppisistä osittaispurkauksista?
2. Miten näitä vaurioita sekä niiden aiheuttajia on mahdollista havaita ja sitä kautta ennalta ehkäistä maakaapeleiden vikaantumista?
3. Millaisia jatkotoimenpiteitä on syytä suorittaa maakaapeleille, joissa mittausten perusteella havaitaan haitallisen suuruisia osittaispurkauksia tai liiallista kosteutta kaapelissa?

Opinnäytetyössäni on käytetty kvalitatiivista eli laadullista tutkimusmenetelmää, joka valikoitui työssä tutkittavien ilmiöiden ymmärtämisen kannalta järkevimmäksi vaihtoehdoksi. Tutkimuskysymyksiin pyritään löytämään vastauksia aineistolähtöisesti aiempaa tutkimustietoa tarkastellen ja analysoiden sekä konkreettisten itse toteutettujen mittausten pohjalta.

### 3 Maakaapelit Suomessa

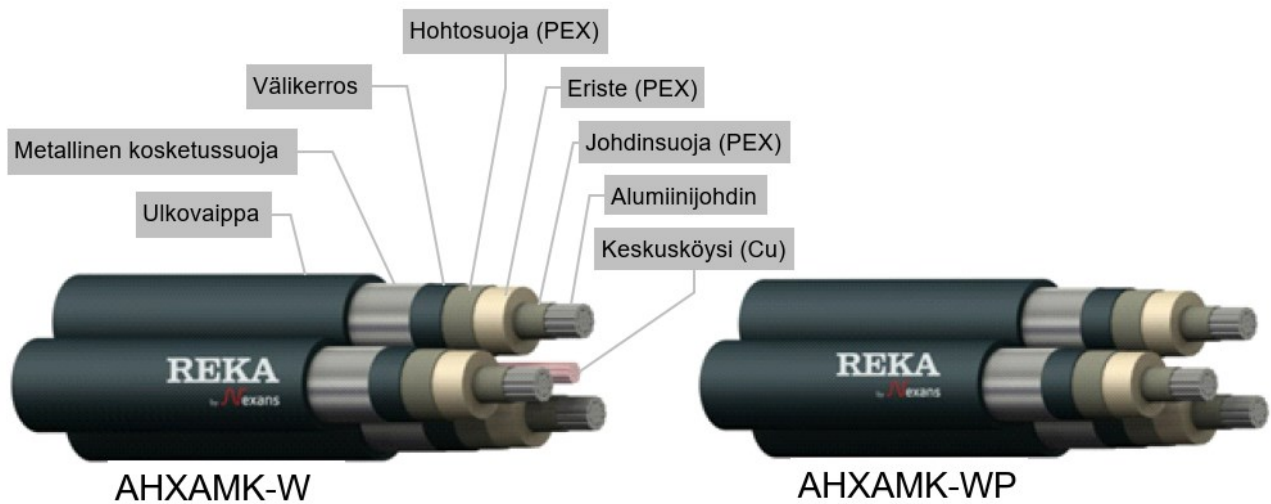
Suomessa maakaapelointi on suuressa roolissa sähköjakeluverkon toimintavarmuuden lisäämiseksi, sillä maakaapelit eivät ole ilmajohtojen tapaan sään aiheuttamille häiriöille alttiita (Saarniemi 2023). Myös sähkömarkkina-asetetut vaatimukset ovat lisänneet maakaapeloinnin tarvetta Suomessa, sillä kyseisen lain mukaan keliolosuhteiden aiheuttaman sähkökatkoksen suurin sallittu kesto asemakaava-alueella on kuusi tuntia ja muilla alueilla korkeintaan 36 tuntia (L 588/2013). Maakaapeloinnin keskeisimpänä kohteena on pienjänniteverkkoja syöttävän keskijänniteverkon maakaapelointi, sillä keskijänniteverkon vikaantuessa sähkökatkoksia ilmenee suhteellisen laajasti (Pelkonen 2019).

Vaikka maakaapelit ovat säävarmoja, voivat nekin vioittua esimerkiksi vahinkojen, vikojen tai huolimattomuuden seurauksena. Suurin osa maakaapeleiden vaurioitumisista tapahtuu erilaisten kaivuutöiden yhteydessä, kun kaapelin sijainti ei ole kaivajien tiedossa, mutta tämä ei kuitenkaan ole ainoa syy kaapelin mahdolliselle vaurioitumiselle (Kun maakaapeli katkeaa – mitä silloin tapahtuu ja mitä se vaikuttaa sähkönkäyttäjälle? 2020). Kaapelissa voi esiintyä rakenteellisia vikoja jo tehtaalta tullessa, joskin tämä on harvinaista kaapelinvalmistajien käyttämien laaduntarkastusjärjestelmien takia. Todennäköisempi syy vaurioille on huolimattomuus kaapelin kuljettamisen tai sen asentamisen yhteydessä. Myös kaapelin vanheneminen lisää vaurioitumisen riskiä etenkin, jos kaapelia on kuormitettu maksimikuormituksella pitkiä aikoja. (Ernvall 2019.) Maakaapeleiden vaurioitumiseen johtavista tekijöistä ja syistä kerrotaan tarkemmin luvussa 3.

#### 3.1 Yleisimmät maakaapelityypit

Maakaapeloinnissa on ajan saatossa käytetty useita erityyppisiä kaapeleita. Suomessa keskijänniteverkon maakaapeloinnissa on aiemmin käytetty yleisesti öljypaperieristeisiä APYAKMM-kaapeleita, mutta näiden on havaittu olevan alttiita kaapelia vaurioittaville osittaispurkauksille. Vanhoja öljypaperieristeisiä kaapeleita on edelleen käytössä sähköjakeluverkossa, mutta herkan vikaantumisen takia uusissa maakaapeliasennuksissa kyseinen kaapelityyppi on korvattu pääasiassa PEX eli polyeteeni eristeisillä, alumiinijohtimisilla AHXAMK-W ja AHXAMK-WP kaapeleilla. (Keränen, Muranen, Pakonen & Verho 2018.)





Kuvio 1. AHXAMK-W ja AHXAMK-WP kaapeleiden rakenteet (REKA:n verkkosivut n.d, muokattu).

Nämä kaksi PEX- eristeistä kaapelia ovat rakenteeltaan samanlaiset, pois lukien AHXAMK-W kaapelista löytyvä kuparinen keskusköysi (Keränen, Muranen, Pakonen & Verho 2018). AHXAMK-W ja AHXAMK-WP kaapeleiden rakenne on esitetty kuviossa 1.

## 4 Maakaapeleiden vaurioitumiseen johtavat tekijät

Kuten aiemmin mainittu, keliolosuhteilta suojassa olevat maakaapelit lisäävät sähkönjakelun toimintavarmuutta, mutta niissäkin esiintyy erityyppisiä vaurioita. Tässä luvussa tarkastellaan erilaisia maakaapeleiden vaurioitumiseen johtavia tekijöitä. Yleisimpiä vaurioiden aiheuttajia ovat erityyppiset osittaispurkaukset, sekä kaapeliin päässyt liiallinen kosteus.

### 4.1 Osittaispurkaus

Osittaispurkaukset (eng. partial discharge) ovat kaapelin eristemateriaalissa tapahtuvia, johtimien välisen eristyksen osittain oikosulkevia sähköpurkauksia, joita esiintyy maakaapeleissa sähkökentän voimakkuuden ylittäessä kaapelin eristeaineen sähkönlujuuden (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiaine & Palva 2015, 80). ”Osittaispurkauksia esiintyy vaihto- tasa- ja syöksyjännitteillä kaasuissa, nesteissä ja kiinteissä eristeissä sekä rajapinnoilla” (Aro ym. 2015, 80). Tästä voidaan päätellä osittaispurkausten olevan suhteellisen yleinen ilmiö sähkönjakeluverkossa. Vaihtojännitteellä tapahtuvat osittaispurkaukset toistuvat usein jokaisella jaksolla, mikä korostaa purkausten merkitystä (Aro ym. 2015, 80). Pienikin vika kaapelin eristyksessä voi aiheuttaa useita toistuvia purkauksia, joiden määrä ja voimakkuus lisääntyvät ajan saatossa. Voimakkaat osittaispurkaukset vaurioittavat kaapelia, minkä seurauksena voi esiintyä valokaaria ja toimintahäiriöitä kaapelin syöttämässä laitteistossa. (Osittaispurkauksen tärkeimmät syyt ja tyypit N.d.) Tietyissä eristemateriaaleissa, kuten polyetyleneissä tapahtuvat pienetkin purkaukset voivat laskea eristeen elinikää, kun taas esimerkiksi vanhoissa kaapeleissa eristemateriaalina käytetty kovapaperi kestää vaurioitumatta suuriakin purkauksia (Aro ym. 2015, 80).

Osittaispurkaukset luokitellaan yleisesti kolmeen eri tyyppiin, joita ovat koronapurkaus, pintapurkaus sekä sisäinen purkaus (Aro ym. 2015, 80). Näistä viimeisin, eli sisäinen purkaus aiheuttaa tutkimusten mukaan eniten vaurioita maakaapeleissa (Osittaispurkauksen tärkeimmät syyt ja tyypit N.d.). Osittaispurkauksen aiheuttamat kemialliset ja fysikaaliset vaikutukset kaapelin eristeeseen sekä ympäristöön riippuvat purkauksen tyypistä (Aro ym. 2015, 80).

#### 4.1.1 Koronapurkaus

Kolmesta osittaispurkaustyyppistä yleisin on pääasiassa avojohdoissa esiintyvä koronapurkaus. Kyseinen purkaus tapahtuu elektrodin ja kaasun, kuten ilman rajapinnassa, useimmiten suurjännitteisen elektrodin puolella. Tämän tyyppinen purkaus hankaloittaa tuhoisampien osittaispurkauksien havaitsemista, mutta ei itsessään vahingoita suuresti kaapelia tai sen eristettä.

(Osittaispurkaukset ja niiden havainnointi N.d.) Koronapurkauksista voi aiheutua ääntä, TV- ja radiohäiriöitä ja tehohäviöitä riippuen koronan ilmenemismuodosta. Tähän vaikuttavia tekijöitä ovat jännite, pinnan laatu sekä elektrodimuoto. (Aro ym. 2015, 90–92.)

Avojohtoilla koronapurkausten syntymiseen vaikuttaa johtimen epätasaisuuden ja mekaanisten ominaisuuksien lisäksi myös ilmassa leijuvat hiukkaset sekä lumi ja vesipisarat, jotka varautuvat ja vahvistavat sähkökenttää paikallisesti. Tästä aiheutuu koronapurkauksia jo ennen hiukkasten ja johtimen välistä kosketusta. Ilman kosteuden ja tiheyden lisääntyessä korona puolestaan vähenee ilman sähkönlujuuden voimistumisen myötä, mutta kastepisteen alapuolelle mentäessä korona vastaavasti lisääntyy kosteuden tiivistyessä pisaroiksi. (Aro ym. 2015, 90–92.)

Korona syttyy vaihtojännitteellä ensin negatiivisella puolijaksolla sähkökentän voimakkuuden ollessa avaruusvarauksen vuoksi suurempi. Purkauksia voi tapahtua kuitenkin myös positiivisella puolijaksolla jännitettä nostettaessa. (Aro ym. 2015, 90–92.) Koronapurkaus näkyy jännitteen puolijakson huippualueella. Jännitteen kasvaessa purkausten toistotaajuus kasvaa, mutta niiden voimakkuus pysyy samana. (Osittaisen Purkauksen Tyypit Ja Ominaisuudet 2024.)

#### 4.1.2 Pintapurkaus

Toinen osittaispurkauksen tyyppi on nimeltään pintapurkaus. Tämä viittaa nimensä mukaisesti johtimen eristepinnan suuntaisen, voimakkaan sähkökentän vaikutuksesta johtimen eristemateriaalin pinnalla syntyvään osittaispurkaukseen (Aro ym. 2015, 85). Purkauksesta aiheutuva eroosio heikentää vähitellen eristettä (What are Partial Discharges? Types and how to control them N.d).

Yksi pintapurkauksen haitallisimpia muotoja on liukupurkaus, joka vahingoittaa ja kuluttaa etenkin orgaanisia eristeitä nopeasti. Liukupurkauksia syntyy erityisesti kiinteän eristeen ja nesteen sekä kiinteän eristeen ja ilman rajapinnalla sähkönkentän rajapinnan suuntaisen komponentin ollessa

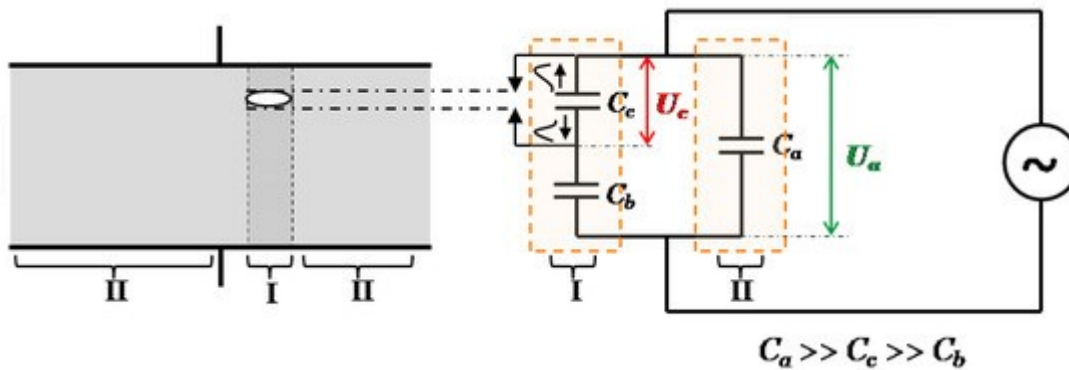
riittävän suuri. Alttiita rakenteita liukupurkauksille ovat erityisesti kaapelipäätteet sekä läpivientieristimet. Liukupurkauksista voi aiheutua radiohäiriöitä ja vaurioita kiinteän eristeen pintaan. Pahimmassa tapauksessa ne voivat johtaa eristysrakenteen ylilyöntiin sähkökentän jakauman muuttuessa purkausten vaikutuksesta. Myös varsinaisen elektrodialueen ulkopuolinen läpilyönti voi olla seurausta liukupurkaus tapahtumista. (Aro ym. 2015, 85.)

Yleisesti pintapurkauksien syntymiseen vaikuttavat eristeen kuluminen ja likaantuminen, sekä kosteuden pääsy eristeeseen (Osittaispurkauksen tärkeimmät syyt ja tyypit n.d.). Pintapurkauksessa purkauspulssi esiintyy samaan aikaan sekä positiivisessa että negatiivisessa jännitejaksossa nollapisteen ja huippuarvon välissä (Osittaisen Purkauksen Tyypit Ja Ominaisuudet 2024).

#### **4.1.3 Sisäinen purkaus**

Kolmantena osittaispurkauksen tyyppinä tuodaan vielä esiin sisäinen purkaus. Sisäinen purkaus, jota kutsutaan myös ontelopurkaukseksi, on usein seurausta kaapeleiden, holkkien ja vastaavien komponenttien eristysviasta ja on liukupurkauksen tavoin todella tuhoisa kaapelin eristeelle (Osittaispurkauksen tärkeimmät syyt ja tyypit n.d.). Esimerkiksi eristysmateriaalin valmistuksessa ja prosessoinnissa tapahtuneiden virheiden seurauksena eristysmateriaaliin voi päästä pieni määrä ilmaa tai epäpuhtauksia, jolloin eristeeseen syntyy eri kokoisia onteloita ja nämä kohdat kaapelissa ovat erityisen alttiita sisäisille purkauksille (Osittaisen Purkauksen Tyypit Ja Ominaisuudet. 2024). Purkauksessa vapautuu ioneja, jotka törmäilevät ontelon seinämiin aiheuttaen eroosiota eristeeseen. Purkausten voimistuessa ne voivat ajan mittaan synnyttää eristeen läpilyöntiin johtavan, niin kutsutun sähköpuun. Vapautuvien ionien lisäksi purkauksen yhteydessä syntyy eristemateriaalia syövyttäviä kemiallisia yhdisteitä sekä aiheutuu radiohäiriöitä ja UV-säteilyä. (Aro ym. 2015, 80 & 131.)

Sisäiset purkaukset esiintyvät jännitejakson nollan ja huipun välissä kahdessa puolijaksossa samanaikaisesti. Jännitteen suuruus ei vaikuta purkausten määrään, vaan sen rajoittaa eristeessä olevan ontelon koko. (Osittaisen Purkauksen Tyypit Ja Ominaisuudet 2024.) Pienissä onteloissa tapahtuvat purkaukset ovat niin nopeita, ettei ulkoinen piiri ehdi vaikuttaa tapahtumaan. Tällaista tilannetta voidaan mallintaa kuviossa 2. esitetyllä kolmikapasitanssimallilla. (Aro ym. 2015, s81).



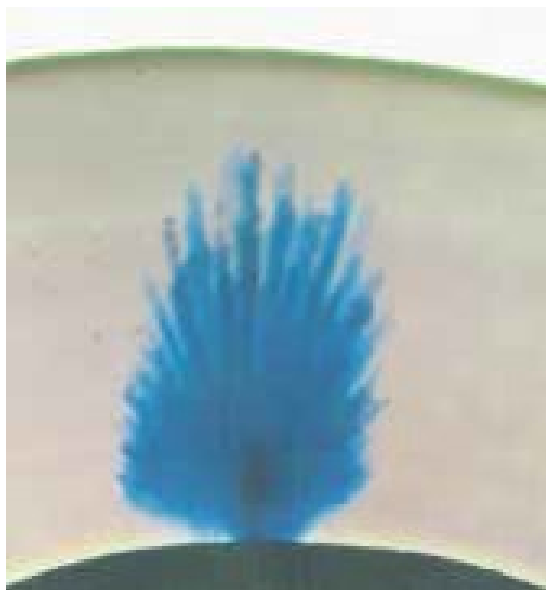
Kuvio 2. Kolmikapasitanssimallia vastaava kytkentä (Hussain ym. 2020, 3).

Kolmikapasitanssimallia esittävässä kuvassa  $C_c$  mallintaa ontelon kapasitanssia,  $C_b$  ontelon kanssa sarjassa olevan eristeen kapasitanssia ja  $C_a$  eristysrakenteen loppuosan kapasitanssia, joka on kytketty sarjassa olevien  $C_c$  ja  $C_b$  rinnalle (Hussain, Zaher, Hummes, Safdar & Lehtonen 2020, 3).

## 4.2 Sähkö- ja vesipuut

Osittaispurkausten ohella vesipuut ovat yksi polyeteenieristeisten kaapeleiden vaurioitumisen yleisimmistä syistä, eikä niiden muodostumismekanismista ole tarkkaa tietoa. Vesipuun tiedetään kuitenkin alkavan muodostumaan kaapelin eristeessä sähkökentän vaikutuksesta (Aro ym. 2015, 161), kun kaapelin sisälle pääsee vettä tai kosteutta esimerkiksi kaapelin ulkovaipan vaurioituessa tai ehjän ulkovaipan läpi diffuusion avulla (Energia-, teollisuus- ja talonrakennuskaapelit 2024, 7). Vettä on mahdollista päästä kaapeliin jo tuotantovaiheessa tai kaapelin ulkovarastoinnin aikana huolimattomasti suljettujen kaapelipäätteiden takia (Energia-, teollisuus- ja talonrakennuskaapelit 2024, 7).

Kaapeliin päässyt vesi etenee kaapelin eristeessä sähkökentän vaikutuksesta ja alkaa muodostamaan eristeessä oleviin onteloihin sähkökentän suuntaisia puumaisia muodostelmia. Nämä niin kutsutut vesipuut heikentävät kaapelin eristeen läpilyöntilujuutta. Kaapelin eristeeseen syntyy valmistuksen ja käytön aikana väistämättä mikroskooppisia epähomogeenisiä onteloita, joihin mahdollisia vesipuita pääsee muodostumaan. (El-Zein, Mohamed, & Talaat 2019.) Eristeen kosteus on suurimmillaan johtimen ja vaipan läheisyydessä, minkä uskotaan olevan syynä siihen, että eristeen keskeltä muodostuneisiin vesipuihin verrattuna puolijohtavista kerroksista kasvavat vesipuut ovat kaapelille haitallisempia (Aro ym. 2015, 161).

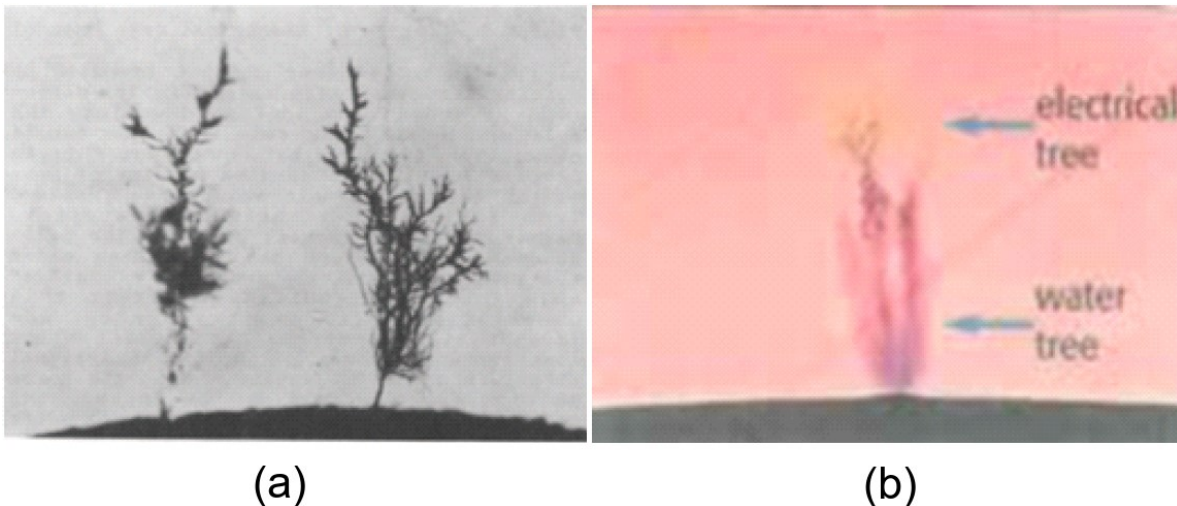


Kuvio 3. Kaapelin eristeeseen muodostunut vesipuu (Neier 2018, 44).

Vesipuiden muodostuminen on verrattain hidas prosessi ja se kestää normaalisti useista kuukausista muutamaan vuoteen. Kaapelin lämpötilan nousun ja kaapelissa kulkevan vaihtovirran taajuuden kasvattamisen on havaittu nopeuttavan vesipuiden muodostumista ja kasvua. (El-Zein, Mohamed, & Talaat 2019.) Vesipuun kasvuun vaikuttaa myös purkauksista syntyvän kaasun vapautuminen purkauspaikasta, sillä purkaukset vähenevät sähkönlujuuden kasvaessa paineen nousun seurauksena (Aro ym. 2015, 161). Kaapelissa oleva kosteus ja sen mahdollisesti aiheuttamat vesipuut voidaan havaita häviökerroinmittauksella (kts. luku 5). Mitä enemmän kaapelissa on kosteutta, sitä suurempi on mitatun häviökertoimen arvo. (Kaapelin ikääntyminen voidaan määrittää häviökerroinmittauksella 2021.)

Vesipuiden rinnalla toinen kaapeleiden kuntoa vaurioittava ilmiö on sähköpuu, jonka perustavanlaatuinen ero vesipuuhun verrattuna on sähköpuun sisällä tapahtuvat jaksottaiset osittaispurkaukset. Sähköpuut muodostuvat kaapelin eristeessä oleviin onteloihin, ulkonemiin tai kohtiin, joissa eristeeseen on päässyt epäpuhtauksia. (Laurent & Teyssedre 2013, 28–29.) Myös kiinteän eristeen ja nestemäisen tai kaasumaisen eristeen rajapinnat ovat alttiita kohtia sähköpuun muodostumiselle (Aro ym. 2015, 131). Näissä kohdissa kaapelin eristeeseen voi aiheutua sähkökentästä liiallista kuormitusta, minkä seurauksena ionisoituu kaasuja ja kaapelin eristeessä olevissa onteloissa syntyy pieniä sähköpurkauksia. Purkausten seurauksena eristeeseen syntyy uusia onteloita ja halkeamia, jotka heikentävät entisestään kaapelin eristävyttä. (Laurent ym. 2013, 28–33.)

Tietyissä olosuhteissa myös vesipuu voi vähitellen kehittyä sähköpuuksi. Kyseiseen ilmiöön vaikuttavia tekijöitä ei tarkkaan tiedetä, mutta esimerkiksi jännitteen tyyppin, lämpötilan ja vesipuun koon arvellaan liittyvän sähköpuun kehittymiseen. (Huang, Zhou, Tao, Yang, M & Yang, D 2014, 1.) Ajan saatossa kaapelin eristeessä tapahtuvat osittaispurkaukset voivat johtaa sähköpuun kasvamiin eristeen läpi aiheuttaen lopullisen läpilyönnin kaapelissa (Aro ym. 2015, 131). Kuviossa 4. on esitetty kuvat sähköpuusta sekä vesipuun kehittymisestä sähköpuuksi.



Kuvio 4. Kuviossa (a) on kaapelin eristeeseen muodostunut sähköpuu (Laurent & Teyssedre 2013, 3, muokattu). Kuviossa (b) on esitty vesipuun kehittyminen sähköpuuksi (Neier 2018, 44, muokattu).

Sähköpuissa tapahtuvat osittaispurkaukset mahdollistavat sähköpuiden havaitsemisen ja paikantamisen kaapelissa osittaispurkausmittausten avulla (Cable diagnostic in MV underground cable networks 2018, 45).

## 5 Osittaispurkausmittaukset

Kaapelia vaurioittavat osittaispurkaukset on mahdollista paikantaa ja mitata osittaispurkausmittauksella. Osittaispurkausmittaukset parantavat sähkönjakelun toimintavarmuutta ja ovat hyvä työkalu sähkönjakelun ennakoivassa kunnossapidossa, sillä mittausten avulla kaapelissa olevat viat saadaan selville enne vikaantumisesta aiheutuvaa käyttökatkoa. (Keskijännitekaapeleiden mittaus n.d.) Mittauksilla varmistetaan kaapelin eristeessä tapahtuvien osittaispurkausten pysyvän sallitun tai sovitun tason rajoissa. Lisäksi osittaispurkausmittaukset toimivat eristeiden kunnonvalvonnan ja elinikäutkimuksen tukena. Mittaukset on mahdollista suorittaa sekä online-, että offline-mittauksina. (Aro ym. 2015, 488–489.)

### 5.1 Online-mittaukset

Online, eli käytönaikaisissa osittaispurkausmittauksissa mitattavaa kohdetta ei irroteta verkosta, vaan mittaukset suoritetaan ilman käyttökatkoja kohteen normaalin käytön aikana. Online-mittaukset voidaan suorittaa joko akustisesti tai radiotaajuisesti. (Online-osittaispurkausmittaukset n.d.) Akustinen mittaus perustuu kaapelissa tapahtuvien osittaispurkausten aiheuttamiin ultraäänialtoihin ja niiden mittaamiseen (Yli-Muilo 2023). Osittaispurkauksista aiheutuvan äänen taajuusalue vaihtelee purkauksen tapahtumapaikan mukaan. Esimerkiksi tehomuuntajissa tapahtuvien purkausten aiheuttama ääni on parhaiten havaittavissa 100-400kHz ultraäänialueella, kun taas kaapelipäätteiden ja -jatkosten osittaispurkauksien havaitsemiseen sopiva taajuusalue on 5-50kHz välillä. (Aro ym. 2015, 201.)

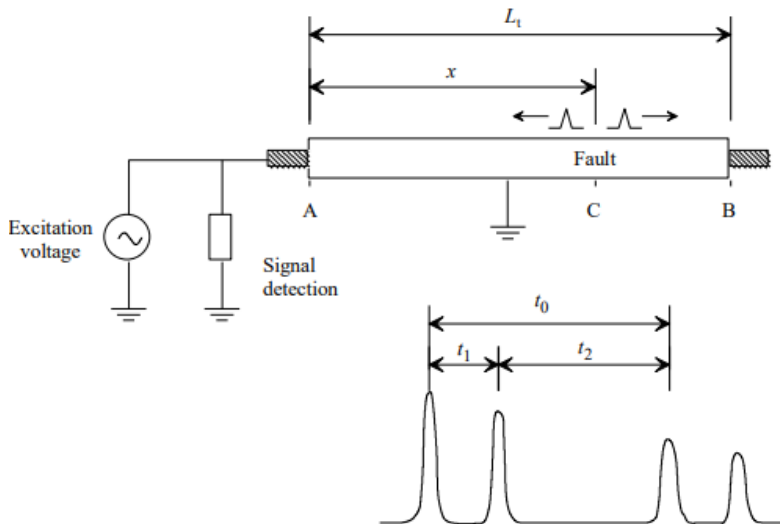
Äänen lisäksi on mahdollista mitata osittaispurkausten tuottamaa sähkömagneettista säteilyä joko RF- (Radio Frequency) tai UHF (Ultra High Frequency) -mittausmenetelmää hyödyntäen, riippuen säteilyn taajuudesta. RF-mittauksella on mahdollista havaita alle 1GHz taajuinen säteily ja UHF-mittaus taas onnistuu taajuuden ollessa 0.3GHz - 3GHz välissä. Ulkopuolisista signaaleista voi aiheutua häiriöitä edellä mainittuihin mittauksiin, mutta sopivan taajuuskaistan antenneja käyttämällä häiriöt saadaan minimoitua. (Aro ym. 2015, 203–204.)



## 5.2 Offline-mittaukset

Offline-mittausta suoritettaessa mitattava kohde irrotetaan verkosta ja mitattavaan kaapeliin syötetään mittauksiin tarvittava testijännite tähän tarkoitukseen valmistetun generaattorin avulla. Mittausmenetelmänä offline -mittaus on usein online -mittausta tarkempi, sillä offline -mittauksessa mitattavaan kaapeliin ei aiheudu kohinaa ja häiriöitä käyttöjännitteestä tai kaapelin syöttämästä laitteistosta. (Partial Discharge Testing: Online And Offline Partial Discharge n.d.) Offline-mittauksen etuna on myös mahdollisuus nostaa koejännite mitattavan järjestelmän käyttöjännitettä suuremmaksi, jolloin saadaan selville hyvin aikaisessa vaiheessa olevat purkaukset ja näin ollen viat korjattua ennen kaapelin vioittumista sen normaalin käytön aikana (Wong, Tian & Neier 2016, 1). Toisaalta offline-mittauksessa ei välttämättä saada täysin selville, millaisia osittaispurkaustapahtumia mitattavassa kaapelissa tapahtuu sen normaalin käytön aikaisten olosuhteiden vallitessa. Offline-mittaus on myös usein online-mittausta kalliimpi mitattavan järjestelmän käyttökatkoksista aiheutuvien kustannusten vuoksi. (Partial Discharge Testing: Online And Offline Partial Discharge n.d.)

Offline-mittaus perustuu osittaispurkauksen synnyttämiin virtapulsseihin, jotka muunnetaan mitauslaitteiston sisältämän mittausimpedanssin tai -muuntimen avulla jännitepulsseiksi. Mitattavaan kaapeliin syötetään testijännitegeneraattorilla ennalta määrätyn suuruista testijännitettä, johon jännitepulsseiksi muunnettavat osittaispurkauksien synnyttämät virtapulssit aiheuttavat mittauslaitteistolla havaittavia poikkeamia. (Aro ym. 2015, 489.) Osittaispurkauksesta syntyvä virtapulssi etenee kumpaankin suuntaan kaapelissa kuvion 5 osoittamalla tavalla, mikä mahdollistaa purkauksen sijainnin paikantamisen, kun tiedetään kaapelin pituus  $l$  ja aallon etenemisnopeus  $v$  kyseisessä kaapelissa.



Kuvio 5. Osittaispurkauksen aiheuttaman virtapulssin eteneminen kaapelissa (Keränen ym. 2018, 31).

Mittauspään ja purkaukohdan välinen etäisyys  $x$  saadaan selville purkauspaikasta mittauspisteen suoraan kulkevan pulssin ja kaapelin toisesta päästä heijastuvan pulssin välisen aikaeron  $\Delta t$  avulla alla esitettyä kaavaa hyödyntäen (Keränen ym. 2018, 31).

$$x = l - v * \left( \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (1)$$

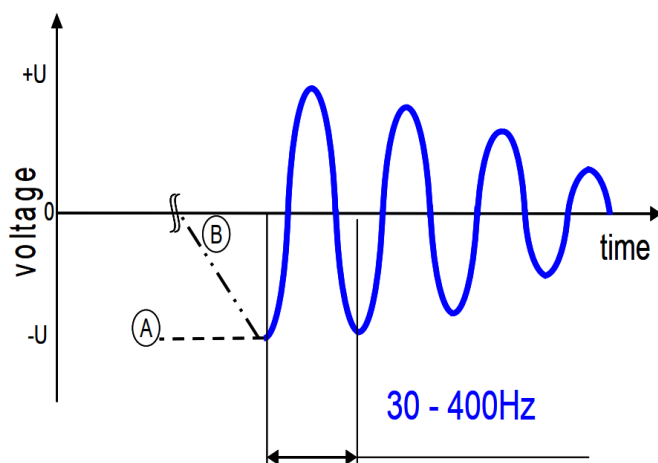
Kyseisen paikannusmenetelmän ansiosta offline-mittaukset soveltuvat erityisesti maakaapeleille, kun paikannusta ei voida toteuttaa purkauksista aiheutuvien ääniaaltojen tai sähkömagneettisen säteilyn avulla kaapelin päällä olevan maakerroksen läpi (Rajalakshmi & Kalaivani 2015, 1).

Osittaispurkausten offline-mittauksien suorittamiseksi on olemassa useita erilaisia menetelmiä, jotka eroavat toisistaan mittauksissa käytettävän testijännitteen luonteen perusteella (Legler, Petzold & Putter 2017, 1). Ihanteellista olisi suorittaa mittaukset taajuudeltaan normaalia käyttöjännitettä muistuttavalla jännitteellä, mutta suuren loistehontarpeen ja siitä aiheutuvan mittauslaitteiston tehon ja koon takia kyseinen menetelmä on kallis ja hankala toteuttaa. Yksi ratkaisu ongelmaan on suorittaa mittaukset tasajännitteellä, mutta tämä ei vastaa vaihtojännitteellä esiintyviä rasituksia ja saattaa vioittaa etenkin polymeerieristeisiä kaapeleita avaruusvarausten hitaan

relaksaation vuoksi. (Aro ym. 2015, 435–436.) Edellä mainituista syistä offline-mittauksia suoritetaan vaihtosähköjärjestelmille pääasiassa erittäin alhaiseen taajuuteen perustuvaa VLF-tekniikkaa hyödyntäen tai vaimenevalla vaihtojännitteellä (Legler ym. 2017, 1), joista kerrotaan tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

### 5.2.1 Mittaukset vaimenevalla vaihtojännitteellä (DAC)

Vaimenevaan vaihtojännitteeseen perustuvassa mittauksessa mitattava kaapeli varataan ensin muutaman sekunnin ajan tasajännitteellä ennalta määrätylle tasolle, jonka jälkeen jännite puretaan välittömästi mitattavan kaapelin rinnalle kytketyn kelan kautta. Kela toimii kuristimena, jonka induktanssi yhdessä mitattavan kaapelin kapasitanssin kanssa saa aikaan resonanssipiirin. (Damped AC Testing n.d.) Resonanssin vaikutuksesta tasajännite alkaa värähtelemään piirin induktanssin ja kapasitanssin määräämällä taajuudella ja syntyy niin kutsuttu vaimeneva vaihtojännite, mikä on mallinnettu kuviossa 6.

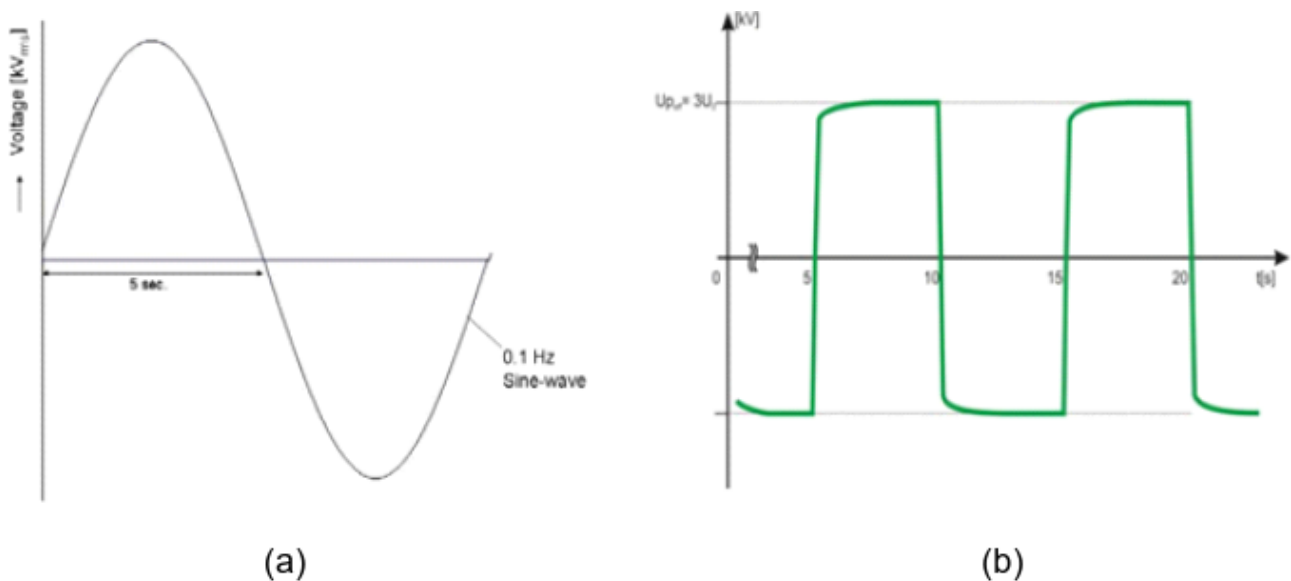


Kuvio 6. Vaimenevan vaihtojännitteen kuvaaja (Salathe 2017, 2).

Vaimenevan vaihtojännitteen taajuus vaihtelee 50Hz-1000Hz välillä, mutta on useimmiten muutamman sadan hertsin luokkaa. Kyseisellä menetelmällä on jännitteen vaimentuessa mahdollista mitata myös kaapelin häviökerroin jännitteen suuruuden funktiona. (Aro ym. 2015, 200 & 436.) DAC-menetelmän on todettu olevan tehokas tapa hyvin vanhoissakin kaapeleissa tapahtuvien osittaispurkausten mittaamiseen, sillä sen lyhyen virityksajan ja vaimenevan aaltomuodon ansiosta mitauksesta ei aiheudu haitallista rasitusta mitattavalle kaapelille (Salathe 2017, 1).

### 5.2.2 Mittaukset VLF-tekniikkaa hyödyntäen

VLF (Very Low Frequency) -tekniikalla osittaispurkausmittauksissa käytettävän testijännitteen taajuus on 0.1Hz, minkä vuoksi mitattavassa kohteessa 50Hz käyttöjännitteellä esiintyvät osittaispurkaukset erottuvat helposti mittaussignaalista. Mittauslaitteet ovat kooltaan pieniä ja kevyitä johdettua pienestä virrasta ja loistehosta suurikapasitanssisissakin mittaushaaroissa, joten laitteisto on helposti siirrettävissä. (Aro ym. 2015, 200.) VLF-mittauksissa mitattavaan kohteeseen kohdistetaan usein huomattavasti käyttöjännitettä suurempi testijännite, jolloin kaapelin vikaantuneet kohdat pettävät normaalin käyttötilanteen sijaan testin aikana. Tämän lisäksi käyttöjännitettä suuremmalla testijännitteellä saadaan selville hyvin alkuvaiheessa olevat viat kaapelin eristeessä. (The Basics of VLF Testing 2018.) VLF-menetelmässä käytettävän testijännitteen aaltomuoto on useimmiten joko siniaalto tai kosini-kanttiaalto (Jin, Shao, Wang & Xie 2018), mutta sini aaltoa pidetään parempana vaihtoehtona, sillä se muistuttaa muodoltaan enemmän normaalin käytönaikaista jännitettä (Neier, Tian & Wong 2016, 1).

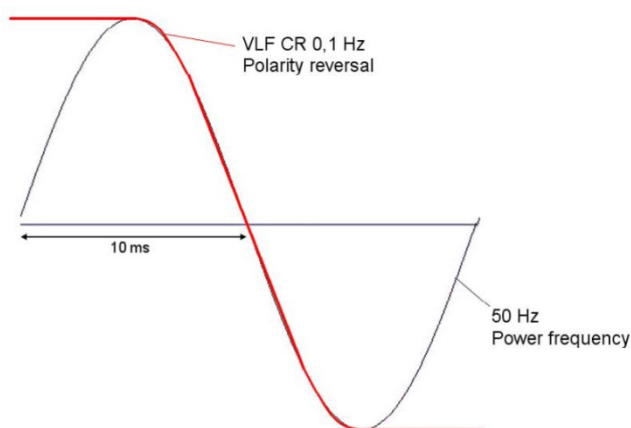


Kuvio 7. a) Siniaallon kuvaaja b) Kosini-kanttiaallon kuvaaja (Götz ym. 2012, 2, muokattu.)

Pienitaajuisista 0.1Hz siniaaltoa tuotetaan perinteisesti käyttötaajuisesta jännitteestä säätömuuntajan ja tyristorisillan avulla, mikä vaatii laitteiston tehoa ja sen tuottaman testijännitteen suuruutta rajoittavia mekaanisia osia (Ildstad, Baur, Blennow, Cavallini, Hozumi, Mohaupt, Sumeder, Mauseth, Blackburn, Castellon, Holbøll, Mayer & Petzold 2019, 3–4). Uusimmissa VLF-laitteistoissa

hyödynnetään siniaallon luomiseen edellä mainitun menetelmän sijaan DRT (Differential Resonance Technology) tekniikkaa, mikä perustuu matalataajuisen siniaallon tuottamiseen korkealle taajuudelle viritetyn resonaattorin ja demodulaattorin avulla. Tällä tavalla tehohäviöitä tapahtuu ainoastaan generaattorin yksittäisissä komponenteissa, ja itse mittaukseen käytettävä teho pysyy kompensoituna. (Geyer, Misteli & Mohaupt 2013, 1–2.)

Kosini-kanttiaalto taas muodostetaan kytkemällä kuormaan vuorotellen positiivista ja negatiivista tasajännitelähdettä joko elektronisen kytkinlaitteen avulla tai bipolaarista latausta hyödyntäen (Ildstad ym. 2019, 4). Kyseistä tekniikkaa hyödyntävien järjestelmien etuna on resonanssiperiaatteen perustuva tehon kierrätys napaisuuden vaihdon aikana, minkä ansiosta järjestelmän kapasitiivinen kuormitus on korkea ja virran kulutus alhainen. Jännitteen napaisuuden muutoshetkellä kosini-kanttiaallon taajuus noin 50 hertsiä, jolloin mittaustapahtuma muistuttaa hetkellisesti kaapelin normaalia käyttötilannetta. (Götz, Oetjen, Petzold & Putter 2012, 2.)



Kuvio 8. Kosini-kanttiaalto jännitteen napaisuuden muutoshetkellä (Götz ym. 2012, 2)

Kosini-kanttiaalto mahdollistaa myös kaapelissa tapahtuvan vuotovirran mittaamisen ja sen aiheuttamien tehohäviöiden havaitsemisen (Götz ym. 2012, 2).

### 5.3 Mittauslaitteiston kalibrointi

Useimmista suurjännitemittauksista poiketen osittaispurkausmittauksiin käytettävän mittauslaitteiston kalibrointi on suoritettava ennen jokaista käyttökertaa, sillä mittauslaitteen näyttämän ja osittaispurkauksen todellisen suuruuden suhde vääristyy pienestäkin testauspiirissä tapahtuvasta

muutoksesta. Kalibrointi suoritetaan mitattavaan kaapeliin kapasitanssin välityksellä kytkettävällä osittaispurkauskalibraattorilla, jonka toiminta perustuu kapasitanssin ja jännitteen synnyttämään varaukseen kalibraattorissa. Jännitettä tai kapasitanssia muuttamalla voidaan vaikuttaa varauksen voimakkuuteen, jolloin saadaan aikaan halutun suuruinen kalibrointipulssi. Joissain kalibraattoreissa varaus on myös mahdollista valita portaittain (ennalta määritettyjä arvoja hyödyntäen) esimerkiksi 5, 20, 50, 100, 250 pC. (Aro ym. 2015, 494–495.)

Kalibroinnissa mitattavaan kaapeliin lähetetään kalibrointisignaali, joka heijastuu vaimentuneena kaapelin toisesta päästä takaisin PD-kartoitusjärjestelmälle. Lähetetyn signaalin ja vaimentuneen paluusignaalin välinen suhde määrittelee tekijän, jolla mittausten aikaisten osittaispurkausten taso voidaan määrittää. Näin saadaan selville todellinen osittaispurkauksen arvo. (BAUR PD diagnostic guidelines 2013, 7.) Kaapelin päästä heijastuvan signaalin ansiosta myös mitattavan kaapelin todellinen pituus saadaan selvitettyä kalibroinnin yhteydessä, ja siten paikannettua tarkasti kaapelissa tapahtuvat osittaispurkaukset. Kaapelin pituuden määrittämiseksi on tiedettävä aallon etenemisnopeus kaapelissa, mikä on riippuvainen kaapelissa käytettävästä eristemateriaalista. Myös mahdolliset kaapelijatkokset on mahdollista havaita ja paikantaa kaapeliin lähetetyn kalibrointisignaalin heijastumina. (Neier 2018, 83.)

## 6 Häviökerroinmittaukset

Häviökerroinmittauksista saatava tieto on tärkeä lisä PD-tapahtumien luokittelussa, sillä pelkään osittaispurkausmittauksista saatu tieto ei anna todellista kuvaa mitattavan kaapelin kunnosta, ellei voida varmistaa kaapelin olevan kuiva (Cable diagnostic in MV underground cable networks 2018, 112). Häviökerroin- eli TD (Tan Delta) -mittauksessa pyritään selvittämään virran resistiivisen ja kapasitiivisen komponentin suhde kaapelin eristyksen läpi (Keränen ym. 2018, 29), mikä avulla saadaan tietoa kaapelin eristeen ikääntymisestä ja mahdollisesta kosteudesta kaapelissa (Järnberg 2023). Häviökerroinmittaukset antavat tietoa koko mitattavan kaapelin kunnosta, eikä vikakohtaa kaapelissa ole osittaispurkausmittausten tapaan mahdollista paikantaa (Keränen ym. 2018, 30).

Mittaus suoritetaan yleensä usealla testijännitteellä ja jokaisella jännitetasolla useamman kerran (Kaapelin ikääntyminen voidaan määrittää häviökerroinmittauksella 2021), jolloin tuloksista saadaan laskettua keskiarvo (MTD), keskiarvojen erotus (DTD) sekä keskihajonta (SDTD) (Järnberg 2023). Testijännitettä nostettaessa ikääntyneillä kaapeleilla häviökertoimen arvo kasvaa ja kosteilla kaapeleilla häviökertoimen arvo vastaavasti pienenee veden höyrystyessä ja kaapelin kuivuessa jännitteen nousun seurauksena. Häviökertoimen arvojen voimakas kasvu jännitteen suhteen voi viitata mahdollisiin osittaispurkauksiin kaapelin eristeessä. (Kaapelin ikääntyminen voidaan määrittää häviökerroinmittauksella 2021.)

### 6.1 Yhdistetty osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaus

Uudemmissa mittauslaitteilla on mahdollista suorittaa niin kutsuttu Full MWT (Full Monitored Withstand Test) -mittaus, jolloin häviökerroinmittaus suoritetaan samanaikaisesti osittaispurkausmittauksen kanssa. Kyseisen menetelmän avulla säästetään huomattavasti aikaa ja kustannuksia, sekä saadaan kaapelin kunnosta mahdollisimman paljon tietoa yhdellä mittauksella. Osittaispurkausmittauksen yhteydessä suoritettua häviökerroinmittauksen avulla on mahdollista selvittää myös kaapelin eristeessä mahdollisesti muodostuvat vesipuut, kun taas pelkällä osittaispurkausmittauksella ei saada tietoa kaapelin sisäisestä kosteudesta. Samanaikaisesti suoritettavan häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksen avulla mahdolliset vikakohdat kaapelissa saadaan paikannettua nopeasti, eikä mitattavaan kaapeliin aiheudu tarpeetonta testijännitteen aiheuttamaa

rasitusta testin lyhyen keston ansiosta. (Bolliger 2018, 1–4.) Yhdistetty osittaispurkaus- ja häviö-kerroinmittaus on mahdollista ainoastaan VLF-tekniikalla siniaaltoista testijännitettä käyttämällä (Neier 2018, 9).



## 7 Mittauslaitteisto

Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittauksien suorittamiseen tarkoitettuja mittauslaitteita löytyy useilta eri laitevalmistajilta. Tässä työssä perehdytään toimeksiantajan käytössä olevaan BAUR:n valmistamaan VLF-tekniikkaa hyödyntävään laitteistoon, joka soveltuu keksijännitemaakaapeleille tehtäviin mittauksiin. Kyseisellä mittauslaitteistolla on mahdollista suorittaa offline-mittauksena sekä osittaispurkaus-, että häviökerroinmittaus joko samanaikaisesti tai erikseen. (PHG 70 portable / PHG 80 portable 2021, 1–3.) Laitteisto koostuu pääasiassa BAUR PHG 80 testijännite generaattorista sekä PD-TaD 62 diagnostiikkajärjestelmästä, sekä virran ja datan jakamiseen käytettävästä Power Boxista. Laitteet on suunniteltu koon ja painon puolesta helposti liikuteltaviksi ja toimeksiantajalla on tätä varten erikseen rakennettu mittausauto, jolla mittauslaitteisto saadaan kätevästi kuljetettua mitattavalle kohteelle. Oleellisena osana mittausten suorittamisessa on myös mittaus-tulosten tarkasteluun ja analysointiin käytettävä BAUR Software 4-tietokoneohjelma, jota käytetään mittausjärjestelmään kytketyllä kannettavalla tietokoneella. Edellä mainittujen laitteiden lisäksi mittausjärjestelmään sisältyy kalibraattori, sekä kytkentöihin tarvittavat kaapelit ja liittimet.

### 7.1 BAUR PHG 80 testijännitegeneraattori

Offline-mittauksiin tarvittava testijännite muodostetaan kuvion 9. mukaisella BAUR PHG 80 testijännitegeneraattorilla.



Kuvio 9. BAUR PHG 80 testijännitegeneraattori (Paatelainen, 2024).

Generaattorilla voidaan tuottaa erittäin matalataajuisia (VLF) siniaaltoja sekä kosini kanttiaaltoja. Sini muotoisella jännitteellä testijännite voidaan nostaa tehollisarvoltaan maksimissaan 57 kV:iin, jolloin huippujännitteen arvo on 80.6kV ja kosini kanttiaaltoja käytettäessä suurin mahdollinen testijännite on 80 kV. Tuotetun testijännitteen taajuus on säädettävissä 0.01–1 hertsin välillä. Generaattorilla on mahdollista tuottaa myös enintään 80kV suuruista negatiivista tai positiivista tasajännitettä esimerkiksi maadoituskaapeleiden testausta varten. Laitteen turvallinen käyttö on varmistettu sisään rakennetulla SCU:lla (Safety Control Unit). (PHG 70 portable / PHG 80 portable 2021, 1–3.) Toimeksiantajalta löytyvä generaattori on kiinnitettynä mittausautoon, mutta se on helposti irrotettavissa ja siirrettävissä, mikäli mittausautolla ei ole mahdollista päästä sopivalle etäisyydelle mitattavaa kohdetta.

## 7.2 PD-TaD 62-diagnostiikkajärjestelmä

PD-TaD 62 on yhdessä BAUR PHG 80 testijännitegeneraattorin kanssa käytettävä PD-diagnostiikkajärjestelmä, joka mahdollistaa osittaispurkaus- ja häviökerroinmittauksen joko samanaikaisesti tai erikseen suoritettavaksi. Laite on rakenteeltaan kevyt ja pieni kokoinen, minkä ansiosta sitä on helppo liikutella mitattavassa kohteessa tarpeen mukaan. (PD-TaD 62, PD-TaD 80 2021, 1–4.)



Kuvio 10. PD-TaD 62 - diagnostiikkajärjestelmä (BAUR:n verkkosivut, 2024).

PD-TaD 62:lla osittaispurkausten suuruus saadaan mitattua 1pC tarkkuudella ja laite itsessään aiheuttaa hyvin vähäistä kohinaa mittaussignaaliin, jolloin mittaustulokset ovat hyvin tarkkoja. Laite sisältää myös erikseen kiinnitettävän HF-suodattimen, jolla minimoidaan ulkoisten häiriöiden vaikutukset mittaustuloksiin (kt kuvio 11.). (Portable PD diagnostics system 2019, 19.)



Kuvio 11. HF-suodatin kiinnitettynä PD-TaD 62 - diagnostiikkajärjestelmään (Paatelainen, 2024).

Testijännitegeneraattorin tuottama jännite syötetään mitattavaan järjestelmään PD-TaD 62:n kautta, mikä rajoittaa testijännitteen tehollisarvon 44 kilovolttiin ja huippuarvon 62 kilovolttiin. (Measure partial discharges more precisely with the new portable BAUR diagnostics systems 2018, 1.) Kyseisen PD-diagnostiikkajärjestelmän avulla saadaan selville osittaispurkausten voimakkuus ja sijainti sekä mahdolliset piiloviat, kuten kosteat liitokset, mitattavassa kaapelissa (PD-TaD 62, PD-TaD 80 2021, 1). Laitteen toiminta perustuu sisäänrakennetulla mittausimpedanssilla varustettuun kytkentäyksikköön sekä PD-mittausyksikköön. Osittaispurkausten aiheuttamat virtapulssit muunnetaan ensin kytkentäyksikön avulla jännitepulssiksi, minkä jälkeen PD-mittausyksikkö mittaa ja paikantaa osittaispurkaukset kytkentäyksiköltä saatujen jännitepulssien perusteella. (Portable PD diagnostics system 2019, 15–19.)

### 7.3 Power Box

Mittauslaitteiston tarvitseman toimintavirran jakamiseen eri laitteille tapahtuu kuviossa 12. esitetyn Power Boxin välityksellä.



Kuvio 12. Power Box (BAUR:n verkkosivut, 2024).

Käytössä olevasta jännitelähteestä syötetään virta Power Boxille, jonka kautta virta jaetaan mittauksessa käytettäville laitteille. Virran jakamisen lisäksi myös mittauksista saatava data siirretään tietokoneelle tarkasteltaviksi Power Boxin välityksellä. Power Boxiin kytkettäviä laitteita ovat testijännitegeneraattori, PD-diagnostiikkajärjestelmä, sekä mittauksen hallintaan käytettävä tietokone. (Portable PD diagnostics system 2019, 18–19.)

## 8 Mittausten suorittaminen

Mittaukset suoritettiin Rauman satama alueella sijaitsevan puistomuuntamon keskijännitepuolelta lähtevälle 20kV PEX-eristeiselle maakaapelille. Ennen varsinaisia mittauksia, mittauslaitteisto kytkettiin mitattavaan järjestelmään ja saatettiin mittausvalmiiksi. Lisäksi mittauksia edeltävänä toimenpiteenä suoritettiin mittauslaitteiston kalibrointi, jota varten tilaajalta oli jo hyvissä ajoin ennen mittauksia selvitetty tarvittavat esitiedot. Mittaukset suoritettiin VLF-tekniikalla full MWT-menetelmää hyödyntäen mitattavan kaapelin kaikille kolmelle vaihejohtimelle yksi kerrallaan.

### 8.1 Mittauslaitteiston kytkentä

Mittauslaitteiston saattaminen mittausvalmiiksi ja sen kytkentä mitattavaan järjestelmään alkoi maadoituskytkennöistä. Ensimmäisenä kiinnitettiin testijännitegeneraattoriin ja PD-diagnostiikkajärjestelmän maadoituskaapelit suoraan mitattavan kaapelin maadoitusjohtimeen mahdollisten häiriöiden vähentämiseksi. Syntyneen maadoituslenkin tuli olla mahdollisimman lyhyt mittauksiin aiheutuvien häiriöiden minimoimiseksi. Tämän jälkeen PD-diagnostiikkajärjestelmä kiinnitettiin mitattavan vaihejohtimen kaapelikenkään mahdollisimman lyhyellä testijännitekaapelilla parhaan mittaustuloksen saavuttamiseksi. Kun PD-diagnostiikkajärjestelmä oli saatu kytkettyä mitattavaan järjestelmään, se liitettiin datakaapeleilla testijännitegeneraattoriin sekä Power Boxiin mittausdatan siirtämistä varten. Seuraavaksi kytkettiin Power Box käytössä olevaan jännitelähteeseen ja testijännitegeneraattori Power Boxiin, jonka kautta generaattorille jaettiin virta. Generaattori kytkettiin tämän jälkeen PD-diagnostiikkajärjestelmään HV-liitäntäkaapelin ja sen yhteydessä olevan suojajohtimen välityksellä. Lopuksi järjestelmään liitettiin tietokone kiinnittämällä se Ethernet-kaapelilla Power Boxiin ja USB-kaapelilla testijännitegeneraattoriin.

Itse mittauslaitteiston vaatimien kytkentöjen lisäksi järjestelmään olisi voitu kytkeä VSE-kaapelit mahdollisten vuotovirtojen havaitsemiseksi ja niiden huomioimiseksi häviökerroinmittausten tuloksissa, mutta vaativien keliolosuhteiden ja mittauksiin varatun ajan puitteissa tätä ei kuitenkaan kyseisten mittausten yhteydessä toteutettu. Mikäli VSE-kaapeleita olisi käytetty, ne olisi kytketty mittauspäässä sekä PD-diagnostiikkajärjestelmän ja mitattavan vaiheen, että PD-diagnostiikkajärjestelmän ja mittaamattoman vaiheen välille. Mitattavan kaapelin toisessa päässä VSE-kaapeli olisi kytketty mitattavan ja mittaamattoman vaiheen välille, jolloin mittaamaton vaihe olisi toiminut mitattavan vaiheen vuotovirtojen paluujohtimena.

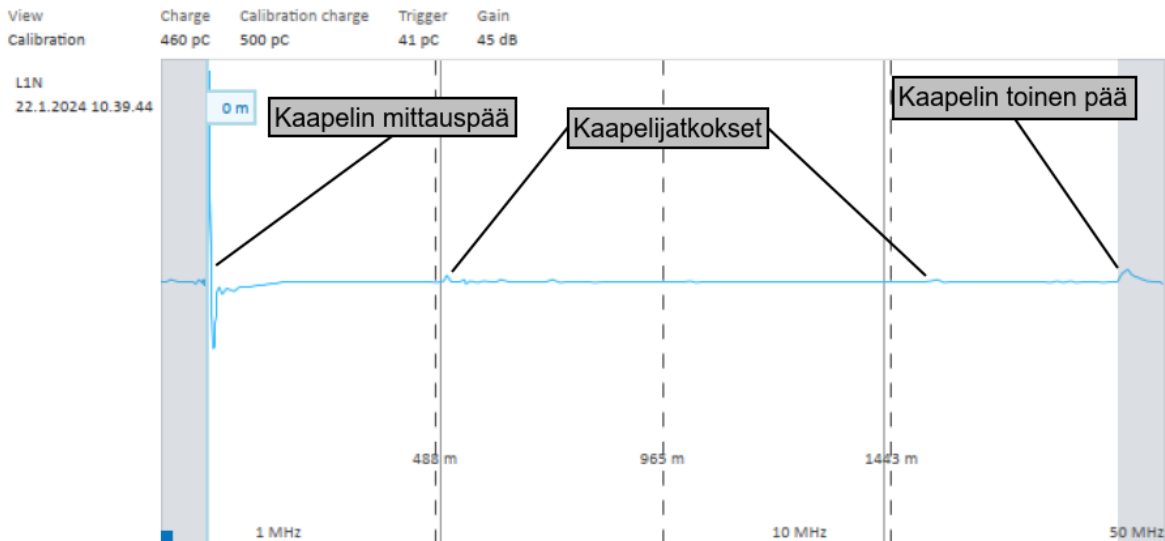
## 8.2 Kalibrointi

Ennen varsinaisten mittausten suorittamista mittauslaitteisto oli kalibroitava. Kalibrointi suoritettiin PD-diagnostiikkajärjestelmän maadoituskaapeliin ja mitattavan vaiheen kaapelikenkään kytke-  
tyllä kalibraattorilla, johon asetettiin sopivan suuruinen kalibrointivaraus. Kyseisessä kohteessa kalibrointivarakseksi asetettiin 500pC, mutta mikäli mitattavassa järjestelmässä olisi esiintynyt paljon kohinaa, olisi varaus täytynyt nostaa suuremmaksi kalibrointisignaalin havaitsemiseksi.



Kuvio 13. Kalibraattori (Paatelainen, 2024)

Kalibroinnin hallinta tapahtui järjestelmään liitetystä tietokoneesta löytyvällä BAUR Software 4-sovelluksella. Sovelluksessa valittiin aluksi käytettäväksi mittaukseen yhdistetty osittaispurkaus- ja häviökerroinmittaus (TD-PD parallel), jonka jälkeen avattiin kalibrointi välilehti ja asetettiin sovellukseen vastaavan suuruinen kalibrointivaraus kuin kalibraattoriin. Sovellukseen asetettiin myös tilaajalta selvitettyjen esitietojen perusteella mitattavan kaapelin arvioitu pituus, aallon etenemisnopeus kyseisessä kaapelissa, sekä mitattavan kohteen käyttöjännitteen suuruus ja mitattavien vaihejohtimien lukumäärä. Tämän jälkeen käynnistettiin kalibrointi, jolloin sovellukseen tuli näkyviin kuviossa 14. esitetty kalibraattorin lähettämän kalibrointisignaalin kuvaaja.



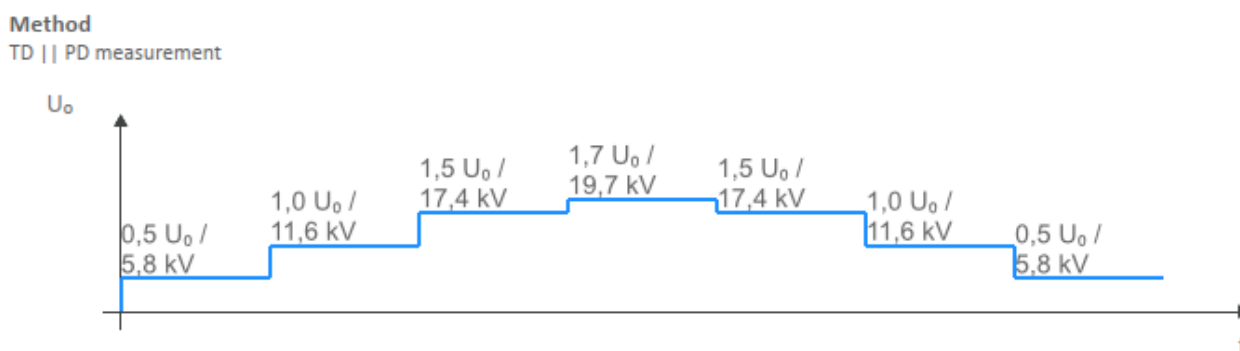
Kuvio 14. Kalibrointisignaalin kuvaaja (Insplan Oy, yrityksen sisäinen dokumentti).

Kuvaajasta nähtiin lähetetty kalibrointisignaali kaapelin mittaus päässä, sekä signaalin heijastuma kaapelin toisessa päässä, jolloin saatiin selville kaapelin tarkka pituus ja näin ollen paikannettua varsinaisen mittauksen yhteydessä tapahtuvat osittaispurkaukset. Lisäksi kuvaajasta selvisi kaapelijatkosten sijainnit poikkeamina kalibrointisignaalisissa.

### 8.3 Mittaustapahtuma

Mittausten suorittaminen ja hallinta tapahtui järjestelmään liitettyllä tietokoneella BAUR Software 4-sovellusta hyödyntäen. Yhdistetyn PD-TD-mittauksen suorittamiseksi, käytettäväksi mittaustyyliksi valittiin jo kalibrointivaiheessa TD-PD parallel. Kyseisellä mittaustyyllillä käytettävät testijännitteet olivat  $0.5U_0$ ,  $1.0U_0$ ,  $1.5U_0$  ja  $1.7U_0$ , missä  $U_0$  vastasi mitattavan kohteen normaalin käytön aikaista vaihejännitettä. Mittaukset suoritettiin jokaisella testijännitteellä järjestyksessä pienimmästä suurimpaan ja takaisin pienimpään kuvion 14. mukaisesti. Tällä tavalla mitattuna ylimääräinen kosteus kaapelissa ehti kuivua ensimmäisen mittaussyklin aikana, jolloin toisella mittaussyklillä mitatuista häviökertoimen arvoista saatiin todenmukaisemmat tulokset.





Kuvio 15. TD-PD parallel-mittaustyyllillä käytettävät testijännitteet (Insplan Oy, yrityksen sisäinen dokumentti).

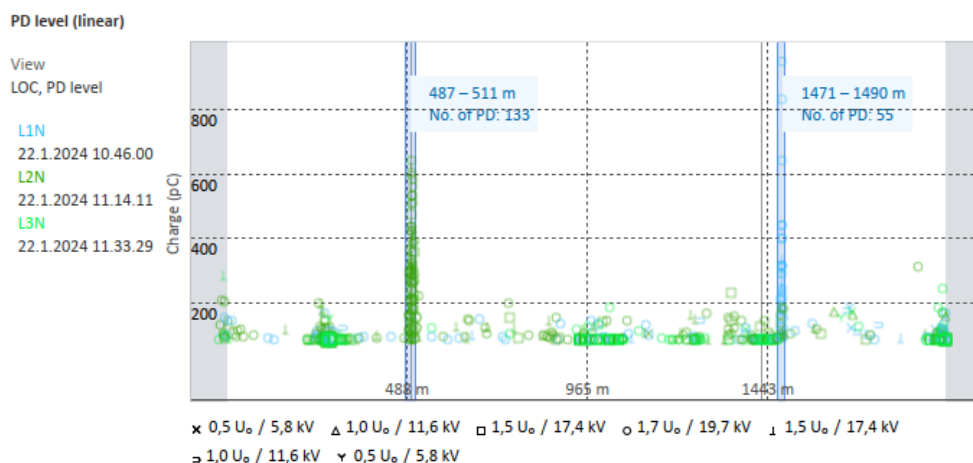
Mittaukset oli mahdollista suorittaa tapahtuma-, jaksokohtaista tai aikaperusteista mittaustapaa käyttäen. Tapahtumakohtaisella mittaustavalla jokaisella testijännitteellä mitataan haluttu määrä osittaispurkaustapahtumia ennen seuraavalle jännitteelle siirtymistä ja jaksokohtaisessa mittauksessa mitataan vastaavasti haluttu määrä testijännitteen siniaallon jaksoja. Mikäli mitattavassa kohteessa esiintyy paljon häiriöitä tai riittävän korkeatasoista kohinaa, järjestelmä tulkitsee nämä osittaispurkaustapahtumiksi, jolloin tapahtumakohtaisella mittauksella sovellukseen asetettu tapahtumien määrä voi täyttyä hyvinkin nopeasti ja todelliset osittaispurkaukset jäädä siten havaitsematta. Tällaisessa tilanteessa on mittaukset kannattaa suorittaa jaksokohtaisesti tai aikaperusteisesti, missä tapauksessa jokaisella testijännitteellä mittausta suoritetaan ennalta määrätty aika. Mittaustavasta riippumatta häviökerroinmittauksia suoritetaan 8 kappaletta kullakin testijännitteellä.

Kyseisessä kohteessa mittaustavaksi valittiin aluksi tapahtumakohtainen, mutta tapahtumien täyttyä hyvin nopeasti mittaustapa vaihdettiin aikaperusteiseksi ja mittausajaksi asetettiin 60 sekuntia. Kaikki mittaustapahtumat tallennettiin sovellukseen niiden myöhempää tarkastelua varten. Kun mittaukset oli saatu suoritettua jokaisella testijännitteellä mitattavan kaapelin ensimmäiselle vaiheelle, testijännitegeneraattorin jännitteensyöttö katkaistiin ja sen SCU kytkettiin päälle. Tämän jälkeen mittauslaitteiston ja mitattavan kohteen jännitteettömyys varmistettiin jännitteenpurkusauvalla, jonka jälkeen PD-diagnostiikkajärjestelmä irrotettiin mitattavasta vaiheesta ja kytkettiin seuraavaan vaiheeseen. Mittaukset suoritettiin samaan tapaan kaikille kolmelle vaiheelle. Mikäli vaihejohtimien pituudet olisivat eronneet toisistaan, olisi mittauslaitteisto täytynyt kalibroida erik-

seen jokaisen vaiheen kohdalla. Kyseisessä kohteessa kaikkien vaihejohtimien tiedettiin olevan saman pituisia, joten alussa suoritettu kalibrointi riitti ja kytkennän siirtämisen jälkeen uuden vaiheen mittaus voitiin aloittaa.

## 9 Mittaustulosten tarkastelu

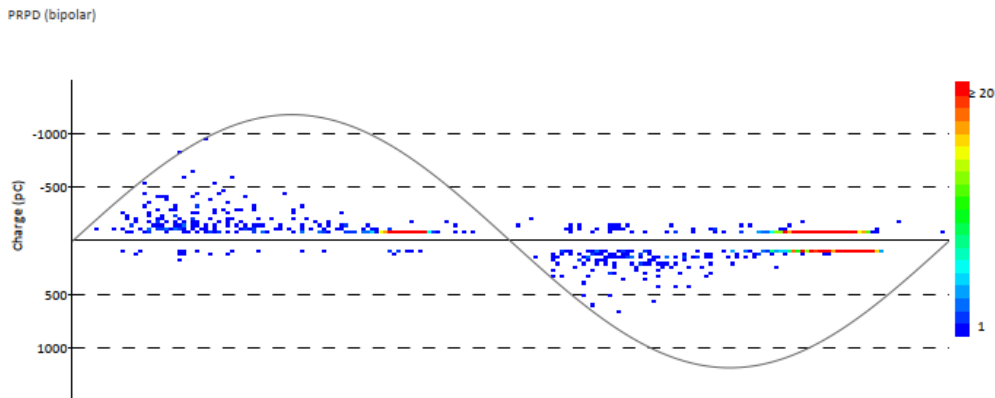
Tallennettuja osittaispurkaustapahtumia päästiin tarkastelemaan sovelluksessa kahdesta eri näkymästä. Location (sijainti)-näkymässä oli nimensä mukaisesti nähtävissä osittaispurkausten voimakkuuden lisäksi myös niiden sijainti kaapelissa purkauspaikan etäisyytenä mittauspäästä. Tarkastelun kohteina olevia tapahtumia voitiin rajata siten, että nähtävillä oli esimerkiksi vain tietystä vaihejohtimesta tai tietyllä testijännitteellä mitatut tapahtumat. Myös yksittäisiä tapahtumia, kuten selviä poikkeamia mittaustuloksissa voitiin rajata tarkasteltavaksi kyseisen tapahtuman sijainnin perusteella. Tarkastelun helpottamiseksi eri vaihejohtimissa havaitut purkaustapahtumat oli esitetty sovelluksessa eri värikoodilla ja eri testijännitteillä havaitut tapahtumat erilaisina symboleina kuvion 16. esittämällä tavalla. Location-näkymästä tallennettiin osittaispurkaustapahtumia havainnollistava kuva tilaajalle laadittavaa mittausraporttia varten, joka luotiin BAUR Software 4-sovelluksella.



Kuvio 16. Mittausraporttiin liitetty kuva Location-näkymästä (Insplan Oy, yrityksen sisäinen dokumentti).

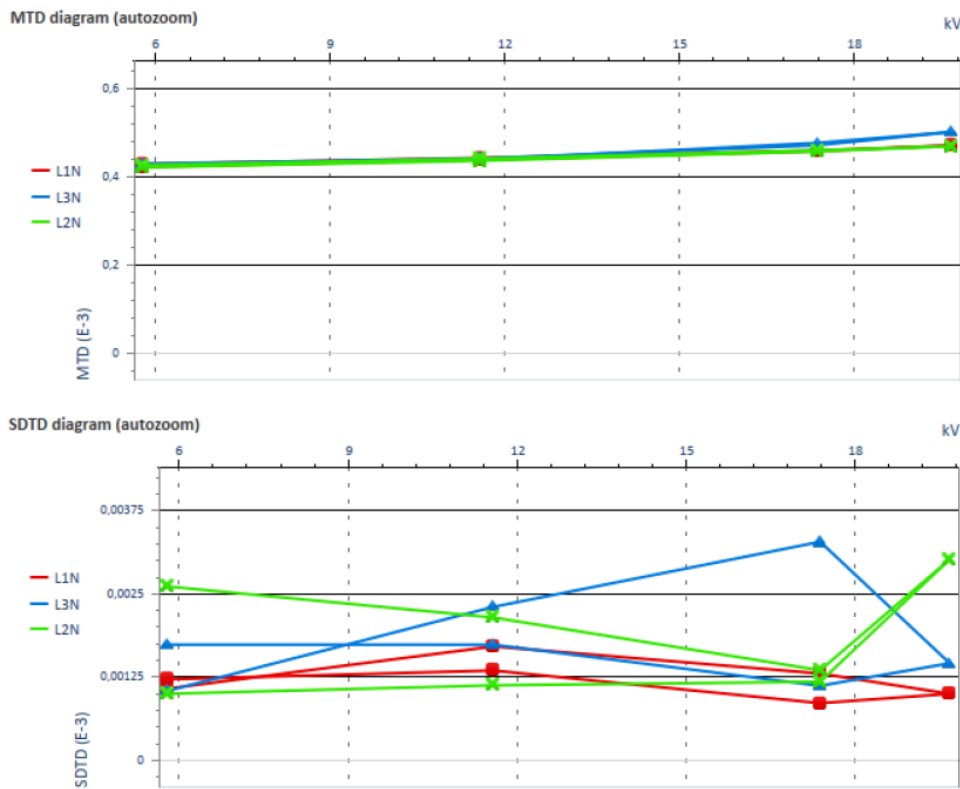
Edellä mainitun näkymän lisäksi purkaustapahtumia oli mahdollista tarkastella myös PRPD (phase-resolved PD) -näkymässä, josta nähtiin purkausten voimakkuus, sekä missä kohdassa testijännitteen siniaallon jaksoa purkauksia tapahtui kuvion 17. esittämällä tavalla. Tämän perusteella voitiin arvioida purkausten tyyppiä ja luonnetta, sekä niiden haitallisuutta kaapelin eristeelle. Tapahtumia oli mahdollista rajata tarkempaa tarkastelua varten samaan tapaan, kuin Location-näkymässä.

Tästä näkymästä tallennettiin raporttia varten kuvat purkaustapahtumista koko kaapelin mitalta, sekä yksittäiset tapahtumat tietyissä kohdissa kaapelia.



Kuvio 17. Mittausraporttiin liitetty kuva PRPD-näkymästä (Insplan Oy, yrityksen sisäinen dokumentti).

Mitatut häviökertoimen arvot olivat nähtävissä sovelluksen TD (Tan Delta) -näkymästä, jossa oli esitetty mittauksen ajankohta, mitattava vaihejohdin, käytössä olleen testijännitteen suuruus, virran resistiivisen ja kapasitiivisen komponentin suhde sekä mitatun häviökertoimen arvo. Tarkasteltavaksi oli mahdollista valita myös mitattujen häviökerroin arvojen perusteella muodostetut keskiarvon (MTD) ja keskihajonnan (SDTD) kuvaajat.



Kuvio 18. Mittausraporttiin liitetyt kuvaajat häviökerroinarvojen keskiarvosta ja -hajonnasta (Insplan Oy, yrityksen sisäinen dokumentti).

Kyseiset kuvaajat ja muut häviökerroinmittauksista saadut tulokset vietiin automaattisesti sovel-  
luksella laadittavaan mittausraporttiin.

## 10 Mittaustulosten tulkinta ja raja-arvot

Käytössä olevissa maakaapeleissa tapahtuvien osittaispurkausten voimakkuudelle ei ole asetettu standardien mukaisia raja-arvoja, vaan ne voivat vaihdella esimerkiksi tilaajakohtaisesti. Lisäksi erityyppiset ja ikäiset kaapelit kestävät eri tasoisia purkauksia vaurioitumatta (Aro ym. 2015, 80).

Myös toimeksiantajan käytössä olevan mittauslaitteiston valmistaja BAUR on asettanut omat suositukset suurimmille sallituille purkauksille eri kaapelityypeissä. Esimerkiksi uusissa polyeteeni eristeisissä kaapeleissa osittaispurkauksen suuruus  $1.7U_0$  testijännitteellä mitattuna ei saisi BAUR:n mukaan ylittää 100pC (Neier 2018, 103), mutta kyseinen raja saattaa ylittyä jo pelkästään mitattavassa järjestelmässä esiintyvän taustakohinan vaikutuksesta. Mikäli mittaustuloksissa esiintyy mitattavassa kohteessa käytössä olevien raja-arvojen ylittäviä osittaispurkauksia, on kyseiselle kohteelle suoritettava erilaisia jatkotoimenpiteitä purkausten voimakkuudesta ja purkauspaikasta riippuen. Jatkotoimenpiteenä voi olla esimerkiksi kohteen uusintamittaus tietyn ajan kuluessa, jos raja-arvon ylittävä purkaus on mitattu käyttöjännitettä suuremmalla testijännitteellä. Mikäli raja-arvon ylitys tapahtuu testijännitteen ollessa käyttöjännitteen suuruinen tai sitä alhaisempi, on kaapeli uusittava tietyn ajan kuluessa tai pahimmassa tapauksessa välittömästi purkauksen voimakkuuden mukaan. Purkauksen tapahtuessa kaapelijatkoksessa tai -päätteessä, ei koko kaapelia tarvitse uusida, vaan tällaisessa tilanteessa kyseisen komponentin uusiminen riittää.

Häviökerrointulosten arvioinnissa hyödynnetään IEEE 400.2-2013 standardin mukaisia raja-arvoja, jotka vaihtelevat eri kaapelityyppien, kaapelin iän ja testijännitteen suuruuden mukaan. Taulukossa 1. (Neier 2018, 69) on esitetty kyseisen standardin mukaiset raja-arvot ikääntyneille polyeteeni eristeisille kaapeleille 0.1 hertsin taajuisella ja  $0.5U_0 - 1.5U_0$  suuruuisella testijännitteellä mitattuna, jossa  $U_0$  vastaa mitatun kohteen vaihejännitettä. Kyseiset raja-arvot on asetettu  $U_0$  suuruuisella testijännitteellä mitattujen tulosten keskihajonnalle (SDTD) ja keskiarvolle (MTD), sekä pienimmällä ja suurimmalla testijännitteillä mitattujen tulosten keskiarvojen erotukselle ( $\Delta$ TD).

Taulukko 1. IEEE 400.2-2013 standardin mukaiset raja-arvot ikääntyneen polyeteeni eristeisten kaapeleiden häviökerroin-arvoille (Neier 2018, 69).

Adapted evaluation criteria for XLPE for TD measurements from  $0.5 U_0$  to  $1.5 U_0$  – aged cables:

Table 4: Historical figures of merit for condition assessment of service-aged PE-based insulations (i.e. PE, XLPE and TRXLPE) using 0.1 Hz – TD measurement up to  $1.5 U_0$

Condition assessment	VLF-TD time stability (VLF-TDTS measured by standard deviation at $U_0$ [ $10^{-3}$ ])		Differential VLF-TD (VLF-DTD) (difference in mean VLF-TD) between $0.5 U_0$ and $1.5 U_0$ [ $10^{-3}$ ])		Mean VLF-TD at $U_0$ [ $10^{-3}$ ]
No action required	< 0.1	and	< 5	and	< 4
Further study advised	0.1 to 0.5	or	5 to 80	or	4 to 50
Action required	> 0.5		> 80		> 50

Myös häviökerrointuloksien keskiarvoa mallintavien kuvaajien trendien perusteella voidaan tehdä päätelmiä kaapelin kunnosta. Hyväkuntoisella kaapelilla kuvajan tulisi olla mahdollisimman vaakasuoria ja mitattujen arvojen pysyä alle  $4 * 10^{-3}$  testijännitteen ollessa vaihejännitteen suuruisen tai sitä alhaisempi. Kaikki testijännitteet käsittävä kuvaaja muistuttaa usein loivasti nousevaa suoraa, sillä jännitettä nostettaessa myös häviökertoimen arvo nousee. Jos taas kuvaaja nousee jyrkästi, voi tämä viitata kaapelissa esiintyvien vesipuiden läsnäoloon sekä osittaispurkaustapahtumiin. Laskevan suoran tapauksessa kaapelissa on luultavasti ollut kosteutta, mikä on kuivanut testijännitteestä aiheutuneen lämmön vaikutuksesta mittausten edetessä. (Neier 2018, 51–57.)

## 10.1 Mitatut häviökerroin-arvot

Suoritettujen mittausten perusteella kyseisen kaapelin häviökerroin-arvot jäivät huomattavasti standardissa esitettyjen raja-arvojen alapuolelle. Vaihejännitteen suuruusella testijännitteellä mitatut MTD arvot vaihtelivat  $0.435 * 10^{-3}$ – $0.447 * 10^{-3}$  välillä, standardissa esitetyn raja-arvon ollessa  $4E-3$ . Samalla testijännitteellä mitatut SDTD arvot jäivät reilusti alle  $0.1 * 10^{-3}$  raja-arvon, mitattujen arvojen vaihdella  $0.001 * 10^{-3}$ – $0.002 * 10^{-3}$  välillä.  $\Delta$ TD arvot mitattiin standardissa esitetystä mallista poiketen  $0.5U_0$  ja  $1.7U_0$  testijännitteiden välillä. Kyseiset arvot osuivat  $0.049 * 10^{-3}$ – $0.078 * 10^{-3}$  välille, joten kaikki tulokset alittivat standardissa esitetyn  $5 * 10^{-3}$  raja-arvon. Mitattujen häviökerrointulosten perusteella kaapeli oli hyvässä kunnossa, eikä siinä havaittu liiallista kosteutta tai mahdollisia vesipuita, joten tämän perusteella kaapelille suoritettaville jatko-toimenpiteille ei ollut tarvetta. Häviökerroinmittauksista saadut tulokset on esitetty liitteenä 1. olevassa mittausraportissa.

## 10.2 Mitattujen osittaispurkausten arvot

Vaihejännitteen  $U_0$  suuruisella tai sitä alhaisemmalla testijännitteellä mitatuille osittaispurkauksille käytettiin tilaajan asettamaa 350pC raja-arvoa. Mittaustuloksissa ei havaittu raja-arvoa ylittäviä purkauksia  $U_0$  suuruisella tai sitä alhaisemmalla testijännitteellä yhdessäkään mitatussa vaihejohtimessa, joten kiireellisille jatkotoimenpiteille ei kyseisen kaapelin kohdalla ollut tarvetta. Vaihejännitettä suuremmilla testijännitteillä sen sijaan havaittiin jopa 948pC suuruisia yksittäisiä purkauksia, jotka saatiin paikannettua tapahtuneiksi kaapelijatkosten kohdalla. Sovelluksen PRPD-näkymästä havaittiin, että mitatut osittaispurkaukset tapahtuivat testijännitteen siniaallon nollakohdan ja huipun välissä. Tästä voitiin päätellä kyseisten purkausten olevan tyypiltään sisäisiä osittaispurkauksia. Näiden raja-arvon ylittäneiden purkausten perusteella suositeltiin kohteen uusintamittausta kahden vuoden kuluessa, jotta nähtäisiin kuinka purkaukset kehittyvät ajan saatossa ja olisiko kaapelin tai jatkosten uusimiselle mahdollisesti myöhemmin tarvetta. Kaapelin käyttöä voitiin kuitenkin mittausten jälkeen jatkaa normaalisti. Häviökerrointulosten tapaan myös osittaispurkausmittauksista saadut tulokset on esitetty liitteenä 1. olevassa mittausraportissa.



## 11 Prosessikuvaus laatinen

Toimeksiantajalle laadittiin kattava prosessikuvaus osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausten suorittamisesta, jonka tuli sisältää tarkat ohjeistukset mittausta edeltävistä toimenpiteistä aina mittausraportin laatimiseen. Prosessikuvaus tehtiin suoritettujen mittausten pohjalta, sekä mittauslaitteiston valmistajan laitekohtaisia ohjeita apuna käyttäen ja valmis dokumentti vastasi toimeksiantajan vaatimuksia. Myös toimeksiantajalla työskentelevältä, mittauksista vastaavalta henkilöltä, sai tarvittaessa apua ja tukea prosessikuvaus laatinen. Prosessikuvaus laadittiin toimeksiantaja yrityksen sisäiseen käyttöön, minkä takia kyseistä dokumenttia ei liitetty tähän työhön.

Valmiin dokumentin tarkoituksena on toimia tarvittaessa mittaustapahtuman aikaisena ohjeistuksena mittausten oikeaoppisen suorittamisen varmistamiseksi, sekä apuna uusien työntekijöiden perehdyttämisessä. Tällä hetkellä toimeksiantajan suorittamat mittaukset ovat yhden työntekijän varassa, eikä mahdollisia tilauksia voida ottaa määräänsä enempää vastaan suuresta kysynnästä huolimatta. Uusien työntekijöiden perehdyttäminen mahdollistaa toimeksiantajan tilauskannan kasvattamisen, sekä mittauksista aiheutuvan kuormituksen jakamisen useamman työntekijän kesken.

## 12 Pohdinta

### 12.1 Tutkimuksen tulosten tarkastelu

Tässä työssä oli tarkoitus perehtyä maakaapelissa tapahtuvien osittaispurkausten ja kaapeliin joutuneen kosteuden havaitsemiseen sekä mittaamiseen osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausten avulla eri mittausmenetelmiä hyödyntäen, pääpainona kuitenkin VLF-tekniikkaan perustuvat mitaukset. Työn tavoitteena oli laatia toimeksiantajalle prosessikuvaus kyseisten mittausten suorittamisesta samanaikaisesti VLF-tekniikkaa hyödyntäen toimeksiantajalta löytyvällä mittauslaitteistolla. Lisäksi suoritettiin konkreettiset mitaukset eräälle puistomuuntamolta lähtevälle keskijännitemaakaapelille toimeksiantajan mittauslaitteistolla, jonka pohjalta prosessikuvaus laadittiin yhdessä laitevalmistajan ohjeita apuna käyttäen. Valmis dokumentti vastasi toimeksiantajan sen hetkisiä tarpeita ja dokumenttia on tarkoitus päivittää sitä mukaan, kun kehitysideoita sekä mittausten kannalta oleellisia asioita ja havaintoja ilmenee.

Ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä lähdettiin tarkastelemaan, millaisia vaurioita maakaapeleille ja niiden eristeille voi aiheutua kaapeliin päässeestä kosteudesta sekä erityyppisistä osittaispurkauksista. Aiempien tutkimuksien pohjalta voidaan todeta, että liiallisen kosteuden seurauksena kaapelin eristeessä oleviin onteloihin voi syntyä vesipuita, mikä johtaa eristeen läpilyöntilujuuden heikkenemiseen. Osittaispurkausten taas on todettu laskevan kaapelin elinikää ja ne voivat ajan saatossa johtaa eristeen läpilyöntiin ja kaapelin täydelliseen vaurioitumiseen.

Toinen tutkimuskysymys pyrki selvittämään, miten maakaapelin vaurioita sekä niiden mahdollisia aiheuttajia voidaan havaita ja ennaltaehkäistä. Aiempia tutkimuksia tarkastelemalla kävi ilmi, että osittaispurkauksia ja häviökerrointa voidaan mitata offline- tai online-mittauksina useita eri menetelmiä hyödyntäen. Työn aikana suoritettujen mittausten perusteella saatiin selville, että VLF-tekniikkaa hyödyntävillä mittauslaitteilla osittaispurkauksia ja kaapelin kosteuden indikaattorina toimivaa häviökerrointa voidaan mitata kustannustehokkaasti samanaikaisesti. Lisäksi VLF-tekniikan todettiin olevan toimiva menetelmä myös hyvin alhaisten ja alkuvaiheessa olevien osittaispurkausten havaitsemiseksi, mikä mahdollistaa purkauksista aiheutuvan kaapelin vaurioitumisen ennaltaehkäisyn

Kolmantena tutkimuskysymyksenä pohdittiin millaisia jatkotoimenpiteitä maakaapeleille tulisi suorittaa haitallisen suuruisten osittaispurkausten havaitsemisen jälkeen. Suoritettujen mittausten yhteydessä selvisi, että kaapelille suoritettavat jatkotoimenpiteet ja niiden kiireellisyys vaihtelee suuresti mitattujen purkausten voimakkuuden ja käytetyn testijännitteen perusteella. Pahimmassa tapauksessa jatkotoimenpiteenä voi olla koko mitatun kaapelin välitön uusiminen, kun taas lievemmissä tilanteissa riittää kaapelin kunnon seuranta uusintamittausten avulla tietyn ajan kuluessa.

Opinnäytetyön aihe oli hyvin ajankohtainen, sillä sähkömarkkina-alaissa määrätty sääolosuhteiden aiheuttamien sähkökatkosten suurimmat sallitut kestoajat pakottavat parantamaan sähkönjakeluverkon säävarmuutta, mikä toteutetaan pääasiassa ilmajohtojen korvaamisella maakaapeilla. Säävarmoissa maakaapeleissa vaurioita aiheuttavat pääasiassa kaapeleihin päässyt kosteus ja niissä tapahtuvat osittaispurkaukset, mitkä heikentävät kaapelin kuntoa ja eristettä ajan saatossa. Näitä vaurioiden aiheuttajia on mahdollista mitata erilaisia menetelmiä hyödyntäen sähkönjakeluverkon ennakoivan kunnossapidon mahdollistamiseksi.

Työtä tehdessä kävi ilmi, että eri kaapelityypit kestävät hyvinkin eri suuruisia osittaispurkauksia vaurioitumatta. Tästä syystä osittaispurkauksille ei ole määritetty tiettyjä raja-arvoja, joiden perusteella mitatulle kaapelille laaditaan suunnitelma tarvittavista jatkotoimenpiteistä, vaan raja-arvot vaihtelevat tilaajan sekä mitattavan kohteen perusteella. Vaikka kohteelle asetettujen raja-arvojen ylittäviä purkauksia havaittaisiinkin ainoastaan käyttöjännitettä suuremmalla testijännitteellä, olisi kohteelle syytä suorittaa uusintamittaus tietyn ajan kuluessa, sillä purkausten on havaittu voimistuvan ajan saatossa ja johtavan lopulta kaapelin täydelliseen vioittumiseen.

Suoritetut mittaukset osoittivat, että mittauslaitteiston kalibrointi on hyvin suuressa roolissa mitaustapahtuman ja mittaustulosten perusteella suositeltavien jatkotoimenpiteiden kannalta. Oikein suoritettu kalibrointi mahdollistaa osittaispurkausten paikantamisen mitattavassa kaapelissa, sekä sen avulla saadaan selville mahdollisten kaapelijatkosten sijainnit, jotka ovat otollisia sijain- teja osittaispurkauksille. Virheellisesti toteutettu kalibrointi voi johtaa turhien jatkotoimenpiteiden suorittamiseen ja siten ylimääräisiin kustannuksiin. Jos esimerkiksi kaapelijatkoksia ei onnistuta paikantamaan oikein, voidaan jatkosten kohdalla todellisuudessa tapahtuvat purkaukset todeta

virheellisesti tapahtuneen kaapelin runko-osuudella, jolloin jatkotoimenpiteenä suoritetaan koko kaapelin uusiminen, vaikka pelkän kaapelijatkoksen uusiminen riittäisi.

Mittausten aikana havaittiin myös mittaustavan valinnalla olevan suuri merkitys onnistuneiden mittausten kannalta. Mikäli kohteessa esiintyy paljon taustakohinaa, saattaa tapahtumakohtaista mittaustapaa käytettäessä tapahtumien määrä täytyä hyvinkin nopeasti, jolloin haitalliset osittaispurkaukset saattavat jäädä täysin havaitsematta. Tämä voi johtaa jatkotoimenpiteiden virheelliseen arviointiin ja kaapelin yllättävään vaurioitumiseen tulevaisuudessa, mikä olisi ollut oikeanlaisten jatkotoimenpiteiden avulla vältettävissä.

Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausten suorittamiseksi on useita eri menetelmiä, ja on mahdollista sanoa mikä niistä on paras. Mittaus menetelmän valintaan vaikuttaa esimerkiksi se, onko mitattava kohde mahdollista irrottaa verkosta mittausten ajaksi, vai täytyykö mittaukset suorittaa ilman käyttökatkoja. Myös kohteen sijainti voi vaikuttaa mittaustavan valintaan, sillä hankalasti päästävällä kohteella on järkevä hyödyntää kevyttä ja helposti kuljetettavissa olevaa mittauslaitteistoa, joka usein tarkoittaa VLF-tekniikkaan perustuvaa mittauslaitteistoa. Lisäksi offline-mittauksissa käytettävän testijännitteen aaltomuoto ja siitä aiheutuva rasitus mitattavalle kaapelille on otettava huomioon mittaustapaa valittaessa etenkin ikääntyneiden kaapeleiden kohdalla.

Kustannusten puolesta VLF-tekniikan voidaan todeta olevan järkevin mittaustapa, sillä tällä hetkellä ainoastaan kyseinen tekniikka mahdollistaa osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausten suorittamisen samanaikaisesti, jolloin mittauksiin käytettävä aika lyhenee ja siten myös kustannukset pienenevät. Mittaustavasta riippumatta mitattavalle kohteelle on mahdollisuuksien mukaan järkevää suorittaa sekä osittaispurkaus-, että häviökerroinmittaus, sillä kumpikin mittaus antaa hyvin erilaista tietoa kaapelin kunnosta. Pelkkä osittaispurkausmittaus antaa kyllä hyödyllistä dataa kaapelin sisäisistä vaurioista, mutta kaapeliin päässeen kosteuden vaikutuksista kaapelin kuntoon voidaan arvioida vain häviökerroinmittausten avulla.

## 12.2 Tutkimuksen luotettavuus ja eettinen tarkastelu

Tutkimuksen eettisyyttä ja luotettavuutta tarkastellessa on hyvä tietää, että englanninkielisiä tutkimusartikkeleita on käännetty suomeksi ChatGPT-sovelluksella niiden syvällistä ymmärtämistä taivottellen. Työ oli kohtalaisen haastava, sillä osittaispurkaus ja häviökerroin olivat itselleni melko

vieraita käsitteitä, ja työn toteutus vaati hyvin perusteellisen perehtymisen aiheeseen. Haastavuutta lisäsi myös suomenkielisten lähteiden puutteellisuus, ja vaikka englanniksi lähteitä löytyi runsaasti, oli niissä käytetty teksti osittain hankalaselkoista. Konkreettisten mittausten suorittamisen jälkeen ymmärrys aiheesta kasvoi ja lähteissä esitettyjä asioita oli helpompi tulkita ja ymmärtää. Tutkimusta tarkastellessa onkin hyvä ymmärtää, että se on tehty yhden opiskelijan toimesta, joka on tarkastellut aihetta omasta näkökulmastaan. Tutkimuksen luotettavuutta lisää yhteistyö toimeksiantajan kanssa työn aikana sekä liitteenä esitelty mittausraportti. Kyseisestä raportista on poistettu tilaajaa koskevat tiedot.

Opinnäytetyössä käytetyt lähteet olivat pääasiassa akateemisia ja aiempiin tutkimuksiin pohjautuvia. Myös joitakin kaupallisia lähteitä, kuten eri laitevalmistajien verkkosivuja ja niistä löytyviä dokumentteja, oli hyödynnetty eri mittaustekniikkaan perustuvien laitteiden perustoimintaperiaatteita selvitettäessä. Työssä pyrittiin hyödyntämään mahdollisimman luotettavaa tietoa, minkä takia joukossa oli myös joitakin hieman vanhempia lähteitä.

## Lähteet

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiaine, K & Palva V. 2015. Suurjännitetekniikka. 4. korj. ja täydennetty p. Helsinki: Otatieto / Gaudeamus Helsinki University Press

BAUR PD diagnostic guidelines. 2013. Insplan Oy:n sisäinen dokumentti. päivitetty maaliskuussa 2013. Viitattu 14.3.2024.

Bolliger, D. 2018. Simultaneous Partial Discharge and Tan Delta Measurements: New Technology in Cable Diagnostics. IEEE Xplore. Julkaistu 23.8.2018. Viitattu 15.3.2024. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/8440325>

Cable diagnostic in MV underground cable networks. 2018. Baurin verkkosivut. Päivitetty helmikuussa 2018. Viitattu 13.3.2024. [https://www.baur.cz/wp-content/uploads/2019/11/BR\\_821-071\\_Cable\\_diagnostic\\_in\\_MV\\_underground\\_cable\\_network.pdf](https://www.baur.cz/wp-content/uploads/2019/11/BR_821-071_Cable_diagnostic_in_MV_underground_cable_network.pdf)

Damped AC Testing. N.d. Power Diagnostic Servicen verkkosivut. Viitattu 20.2.2024. <https://www.pdservice.com/services/cable-testing/>

El-Zein, A., Mohamed, K & Talaat, M. 2019. Water trees in polyethylene insulated power cables: Approach to water trees initiation mechanism. Artikkel ScienceDirect verkkosivulla. Päivitetty 18.12.2019. Viitattu 21.2.2024. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106158>

Energia-, teollisuus- ja talonrakennuskaapelit. 2024. Tuotekatalogi Prysmian Group verkkosivuilla. Päivitetty helmikuussa 2024. Viitattu 12.3.2024. <https://fi.prysmian.com/sites/fi.prysmian.com/files/2024-03/Prysmian-Energia-teollisuus-ja-talonrakennuskaapelit%202024.pdf>

Ernvall, A. 2019. KAAPELIVIAT JA NIIDEN PAIKANNUS. Opinnäytetyö, AMK. Oulun ammattikorkeakoulu, Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Viitattu 10.2.2024. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/165804/Ernvall%20Anselmi.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Geyer, H., Misteli, K & Mohaupt, P. 2013. VLF Testing of High Voltage Cables, State of the Art. Artikkel NTNU:n verkkosivuilla. Julkaistu 16.2.2018. Viitattu 14.3.2024. <https://doi.org/10.5324/nor-dis.v0i23.2461>

Götz, D., Oetjen, H., Petzold, F & Putter, H. 2012. The evolution of VLF testing technologies over the past two decades. IEEE Xplore. Julkaistu 27.8.2012. Viitattu 14.3.2024. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/6281407>

Huang, M., Zhou, K., Tao, W., Yang, M & Yang, D. 2014. Transformation mechanism of electrical tree to water tree in XLPE cables. IEEE Xplore. Julkaistu 22.12.2014. Viitattu 11.3.2024. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/6993780>

Hussain, GA., Zaher, AA., Hummes, D., Safdar, M & Lehtonen M. 2020. Hybrid Sensing of Internal and Surface Partial Discharges in Air-Insulated Medium Voltage Switchgear. Artikkel Energies aikakauslehdessä. Julkaistu 5.4.2020. Viitattu 12.3.2024. <https://doi.org/10.3390/en13071738>

Ildstad, E., Baur, M., Blennow, J., Cavallini, A., Hozumi, N., Mohaupt, P., Sumereder, C., Mauseth, F., Blackburn, T., Castellon, J., Holbøll, J., Mayer, H. & Petzold, F. 2019. Electrical properties of insulating materials under VLF voltage. CIGRE. Julkaistu 2019. Viitattu 14.3.2024. <https://www.e-cigre.org/publications/detail/elt-302-6-electrical-properties-of-insulating-materials-under-vlf-voltage.html>

Jin, Y., Shao, X., Wang, Y & Xie, C. 2018. The Application Research of Very Low Frequency Diagnostic Methods in Acceptance Tests on New Cable Systems of Medium Voltage. IEEE Xplore. Julkaistu 30.12.2018. Viitattu 20.2.2024. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/8592431>

Järnberg, I. 2023. Tuulivoimapuiston sisäverkon mittauksilla kohti parempaa toimintavarmuutta. Artikkelit Tuulivoima-lehden verkkosivuilla. Julkaistu 3.2.2023. Viitattu 14.3.2024. <https://tuulivoimalehti.fi/tuulivoimapuiston-sisaverkon-mittauksilla-kohti-parempaa-toimintavarmuutta/>

Kaapelin ikääntyminen voidaan määrittää häviökerroinmittauksella. 2021. Eurolaitteen verkkosivut. Julkaistu 27.10.2021. Viitattu 21.2.2024. <https://www.eurolaite.fi/ajankohtaista/kaapelin-ikaantymisen-voidaan-maarittaa-haviokerroinmittauksella/>

Keränen, J., Muranen, S., Pakonen, P & Verho, P. 2018. Keskijännitekaapeleiden kunnon arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla. Loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 15.2.2024. <https://www.elenia.fi/files/3e2eea203359f4f61ffe51cf8a4540df0fb4d251/keskija-nnitekaapeleiden-kunnon-arviointi-ha-vio-kerroin-ja-osittaispurkausmittauksilla-loppuraportti.pdf>

Keski- ja suurjännitekaapelit. N.d. REKA:n verkkosivut. Viitattu 18.3.2024. <https://www.reka.fi/tuoteryhma/keski-ja-suurjannitekaapelit/?category=6923>

Keskijännitekaapeleiden mittaus. N.d. Dekran verkkosivut. Viitattu 13.3. 2024. <https://www.dekra.fi/fi/keskijannitekaapeleiden-mittaus/>

Kun maakaapeli katkeaa – mitä silloin tapahtuu ja mitä se vaikuttaa sähkönkäyttäjälle?. 2020. Pohjois-Karjalan Sähkön verkkosivut. Julkaistu 20.8.2020. Viitattu 10.2.2024. <https://www.pks.fi/verkkossa/kun-maakaapeli-katkeaa/>

L 9.8.2013/588. Sähkömarkkinalaki. Viitattu 10.2.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>, ajantasainen lainsäädäntö.

Laurent, C & Teyssedre G. 2013. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years. IEEE Electrical Insulation Magazine. Julkaistu 29.8.2013. Viitattu 21.2.2024 <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/6585854>

Legler, P., Petzold, F & Putter, H. 2017. OFFLINE PD DIAGNOSTICS USING SEVERAL EXCITATION VOLTAGES. Cired. Julkaistu 15.6.2017. Viitattu 14.3.2024. [http://cired.net/publications/cired2017/pdfs/CIRE2017\\_0049\\_final.pdf](http://cired.net/publications/cired2017/pdfs/CIRE2017_0049_final.pdf)

Measure partial discharges more precisely with the new portable BAUR diagnostics systems. 2018. Artikkel BAUR:n verkkosivuilla. Julkaistu syyskuussa 2018. Viitattu 15.4.2024.

<https://www.baur.eu/en/home>

Neier, T. 2018. Cable diagnostic in MV underground cable networks. Dokumentti Insplan Oy:n sisäiseen käyttöön. 4. päivitetty versio.

Neier, T., Tian, Y & Wong, B. 2016. Practical experience using VLF Tan Delta and partial discharge measurement in medium voltage cable. IEEE Xplore. Julkaistu 26.9.2016. Viitattu 14.3.2024.

<https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/7576415>

Online-osittaispurkausmittaukset. N.d. Eurolaitteen verkkosivut. Viitattu 10.3.2024.

<https://www.eurolaite.fi/palvelut/online-osittaispurkausmittaukset/>

Osittaisen Purkauksen Tyypit Ja Ominaisuudet. 2024. Wrindun verkkosivut. Julkaistu 12.1.2024.

Viitattu 17.2.2024. <https://fi.hvtestersupply.com/info/types-and-characteristics-of-partial-discharge-92397817.html>

Osittaispurkauksen tärkeimmät syyt ja tyypit. N.d. Fluken verkkosivut. Viitattu 15.2.2024.

<https://www.fluke.com/fi-fi/lue-lisaa/blogi/vuodontunnistus/osittaispurkaus>

Osittaispurkaukset ja niiden havainnointi. N.d. Yleiselektroniikan verkkosivut. Viitattu 15.2.2024.

<https://www.yeint.fi/uutiset/osittaispurkaukset-ja-niiden-havainnointi>

Partial Discharge Testing: Online And Offline Partial Discharge. N.d. Ocean Technical and Mechanical Services. Viitattu 1.3.2024. <https://ocean-me.com/partial-discharge-testing/>

PD-TaD 62, PD-TaD 80. 2021. Datalehti Baur:n verkkosivuilla. Päivitetty syyskuussa 2021. Viitattu 15.4.2024. <https://www.baur.eu/en/home>

Pelkonen, J. 2019. Säävarman sähköverkon rakentaminen on aikataulussa Suomessa – jatkossa vaikeusaste kasvaa. Artikkel Yleisradion verkkosivuilla. Julkaistu 25.9.2019. Viitattu 10.2.2024.

<https://yle.fi/a/3-10985718>

PHG 70 portable / PHG 80 portable. 2021. Datalehti BAUR:n verkkosivuilla. Päivitetty heinäkuussa 2021. Viitattu 15.4.2024. <https://www.baur.eu/en/home>

Portable PD diagnostics system. 2019. PD-TaD 62 laitevalmistajan dokumentti (Insplan Oy:n sisäiseen käyttöön).

Rajalakshmi, B & Kalaivani, L. 2015. Analysis of Partial Discharge in underground cable joints. IEEE Xplore. Julkaistu 13.8.2015. Viitattu 14.3.2024. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/7193000>

Saariemi, E. 2023. Maakaapelointi lisää sähkön säävarmuutta ja metsien hiilinielua. Tampereen Energia Sähköverkko 28.7.2023. Viitattu 10.2.2024. <https://www.tampereensahkoverkko.fi/maakaapelointi-lisaa-sahkon-saavarmuutta-ja-metsien-hiilinielua/>



Salathe, D. 2017. New methods for offline PD diagnosis on MV cable systems. IEEE Xplore. Julkaistu 23.1.2017. Viitattu 20.2.2024. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/document/7827776>

The Basics of VLF Testing. 2018. HV Technologies verkkosivut. Julkaistu 20.6.2018. Viitattu 20.2.2024. <https://www.hvtechnologies.com/the-basics-of-vlf-testing/>

What are Partial Discharges? Types and how to control them. N.d. DSP Analyticin verkkosivut. Viitattu 17.2.2024. <https://dspanalytic.com/en/electric/what-are-partial-discharges-types-and-how-to-control-them/>

Wong, BV., Tian, Y & Neier, T. 2016. Practical experience using VLF Tan Delta and partial discharge measurement in medium voltage cable. IEEE Xplore. Julkaistu 26.9.2016. Viitattu 13.3.2024. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.jamk.fi:2443/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7576415>

Yli-Muilu, K. 2023. Osittaispurkaus ja sen akustinen mittaus reaaliaikaisesti. Artikkelin Loopshoren verkkosivuilla. Julkaistu 17.4.2023. Viitattu 10.3.2024. <https://loopshore.com/osittaispurkaus-ja-sen-akustinen-mittaus-reaaliaikaisesti/>

## Liitteet

### Liite 1. Osittaispurkaus- ja häviökerroinmittausraportti



## Report

### Cable data

Cable route	Length 1931 m	Nominal voltage 20 kV	From station / To station	Number of phases 3
-------------	------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------------

Cable section	Velocity of propagation (v/2)	Insulation	Sheath properties
0 – 500 m	84,0 m/μs	Basic insulation	PE / XLPE
500 – 1428 m	82,0 m/μs	Basic insulation	PE / XLPE
1428 – 1931 m	84,0 m/μs	Basic insulation	PE / XLPE

### Cable condition

Automatic evaluation

Change risk level



Cable OK



No evaluation available

Measure required

Monitor cable condition

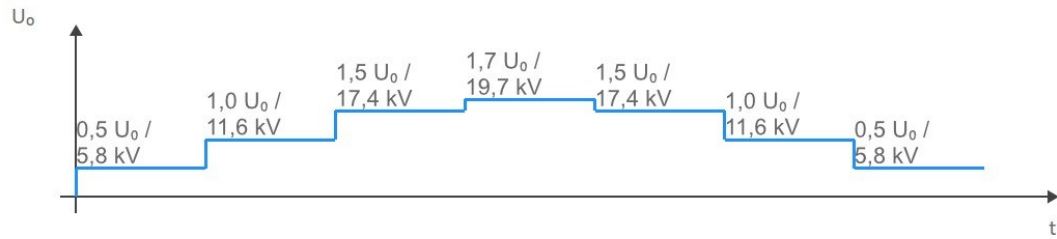
### Sequence

IEEE Maintenance Test/1.7 Uo TD PD parallel

Nc	Method	Evaluation criteria	Result
1	TD    PD measurement	IEEE Maintenance Test / 1.7 Uo TD PD parallel / TD    PD measurement	

**Method**

TD || PD measurement



Step	Voltage	Settings			
1	0,5 $U_0$	No. of TD measurements	8	Evaluated: MTD SDTD $\Delta$ TD Step 1 - Step 2	
		PD measurement duration	50 Events	Max. duration 60 s	
2	1,0 $U_0$	No. of TD measurements	8	Evaluated: MTD SDTD $\Delta$ TD Step 2 - Step 3	
		PD measurement duration	50 Events	Max. duration 60 s	
3	1,5 $U_0$	No. of TD measurements	8	Evaluated: MTD SDTD $\Delta$ TD Step 3 - Step 4	
		PD measurement duration	50 Events	Max. duration 60 s	
4	1,7 $U_0$	No. of TD measurements	8	Evaluated: MTD SDTD $\Delta$ TD Step 4 - Step 1	
		PD measurement duration	50 Events	Max. duration 60 s	
5	1,5 $U_0$	No. of TD measurements	8	Evaluated: MTD SDTD $\Delta$ TD Step 5 - Step 4	
		PD measurement duration	50 Events	Max. duration 60 s	
6	1,0 $U_0$	No. of TD measurements	8	Evaluated: MTD SDTD $\Delta$ TD Step 6 - Step 5	
		PD measurement duration	50 Events	Max. duration 60 s	
7	0,5 $U_0$	No. of TD measurements	8	Evaluated: MTD SDTD $\Delta$ TD Step 7 - Step 6	
		PD measurement duration	50 Events	Max. duration 60 s	

### Evaluation criteria

Template Path

### Basic insulation

Risk level	MTD <input checked="" type="checkbox"/>	SDTD <input checked="" type="checkbox"/>	$\Delta$ TD -/+ <input checked="" type="checkbox"/>
 Risk	> 50,0	> 0,50	> 10,0 < -10,0
 High risk	> 70,0	> 1,00	> 20,0 < -20,0
 Cancel measurement	> 300,0	> 6,00	> 40,0 < -40,0

### Overview

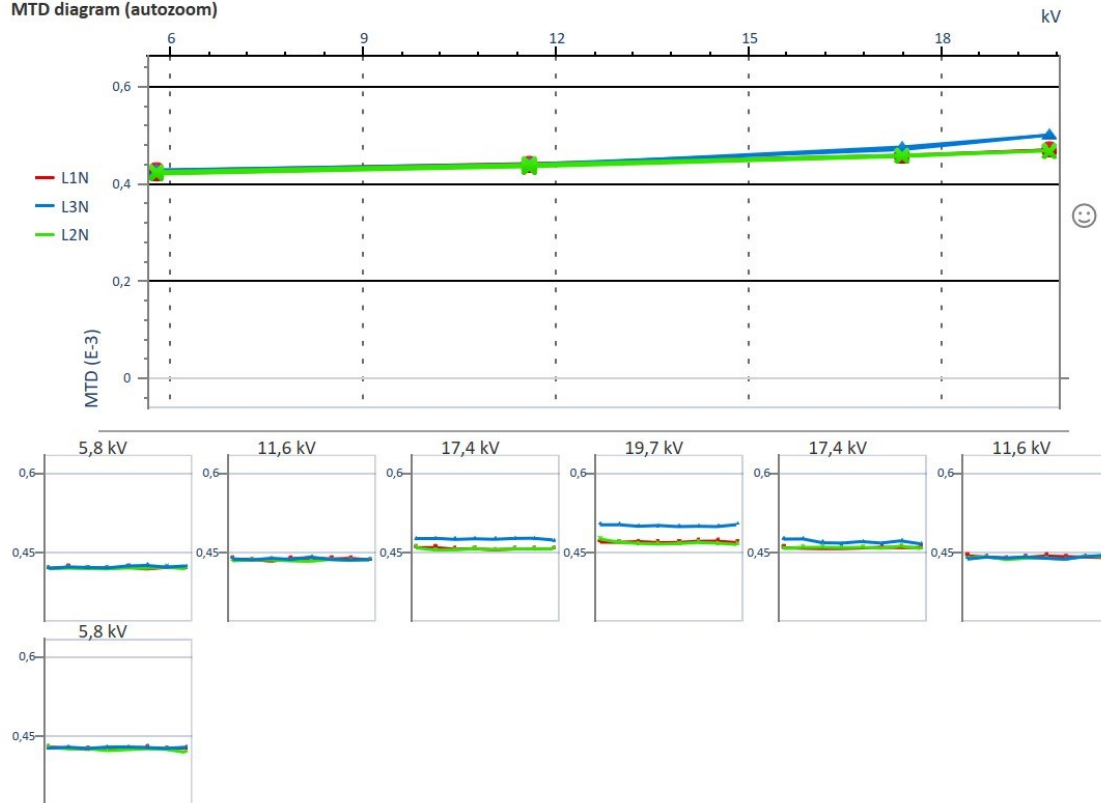
Date/Time	Phase	Insulation resistance (load R)	Capacitance (load C)	Test frequency	Status	Equipment
22.1.2024 10.46.00	L1N	> 100 M $\Omega$	556 nF	0,10 Hz	Measurement completed.	PD 2249454003 3.0.2.1 / d30a8b3 (0) master/3.00.001/1 PHG 2246525006 V6.111
22.1.2024 11.14.11	L2N	> 100 M $\Omega$	561 nF	0,10 Hz	Measurement completed.	PD 2249454003 3.0.2.1 / d30a8b3 (0) master/3.00.001/1 PHG 2246525006 V6.111
22.1.2024 11.33.29	L3N	> 100 M $\Omega$	555 nF	0,10 Hz	Measurement completed.	PD 2249454003 3.0.2.1 / d30a8b3 (0) master/3.00.001/1 PHG 2246525006 V6.111

### Leakage currents

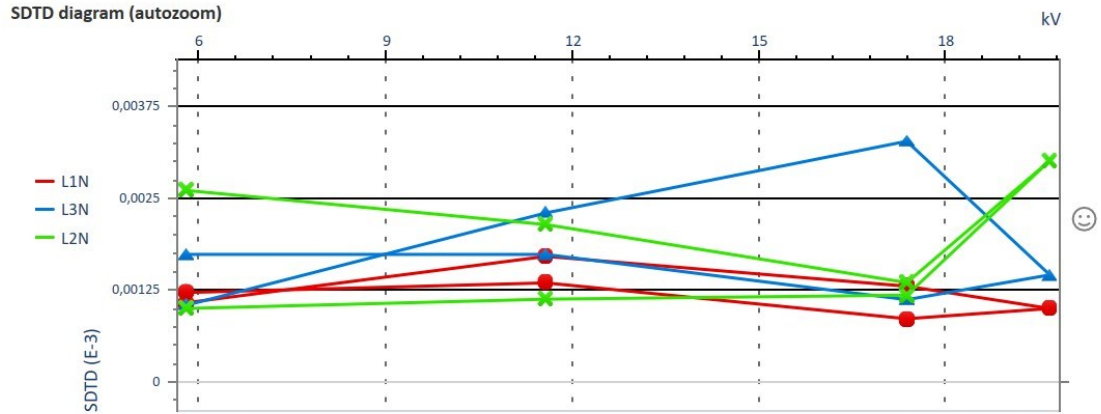
Date/Time	Phase	Step	Leakage current generator		Leakage current VSE
22.1.2024	10.46	L1N	0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV	57 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV	114 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV	172 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,7 U <sub>0</sub> / 19,7 kV	194 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV	172 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV	114 $\mu$ A	0 $\mu$ A
22.1.2024	11.03	L2N	0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV	57 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV	114 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV	171 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,7 U <sub>0</sub> / 19,7 kV	194 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV	171 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV	114 $\mu$ A	0 $\mu$ A
22.1.2024	11.25	L3N	0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV	57 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV	114 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV	171 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,7 U <sub>0</sub> / 19,7 kV	194 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV	171 $\mu$ A	0 $\mu$ A
			1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV	114 $\mu$ A	0 $\mu$ A

11.44      1,0 U<sub>o</sub> / 11,6 kV   114 μA      0 μA  
 11.46      0,5 U<sub>o</sub> / 5,8 kV   57 μA      0 μA

MTD diagram (autozoom)



SDTD diagram (autozoom)



MTD values

	L1N 22.1.2024 10.46.00	L2N 22.1.2024 11.14.11	L3N 22.1.2024 11.33.29
0,5 U <sub>o</sub> / 5,8 kV	0,423	0,422	0,425

1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV	0,440	0,437	0,440
1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV	0,459	0,458	0,478
1,7 U <sub>0</sub> / 19,7 kV	0,472	0,470	0,503
1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV	0,461	0,461	0,473
1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV	0,444	0,442	0,443
0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV	0,430	0,427	0,431

Result: 😊

## SDTD values

	L1N 22.1.2024 10.46.00	L2N 22.1.2024 11.14.11	L3N 22.1.2024 11.33.29
0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV	0,001	0,001	0,002
1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV	0,002	0,001	0,002
1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV	0,001	0,001	0,001
1,7 U <sub>0</sub> / 19,7 kV	0,001	0,003	0,001
1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV	0,001	0,001	0,003
1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV	0,001	0,002	0,002
0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV	0,001	0,003	0,001

Result: 😊

## ΔTD values

	L1N 22.1.2024 10.46.00	L2N 22.1.2024 11.14.11	L3N 22.1.2024 11.33.29
0,5 - 1,0 U <sub>0</sub> / 5,8 - 11,6 kV	-0,016	-0,015	-0,015
1,0 - 1,5 U <sub>0</sub> / 11,6 - 17,4 kV	-0,020	-0,021	-0,038
1,5 - 1,7 U <sub>0</sub> / 17,4 - 19,7 kV	-0,013	-0,012	-0,025
1,7 - 0,5 U <sub>0</sub> / 19,7 - 5,8 kV	0,049	0,048	0,078
1,5 - 1,7 U <sub>0</sub> / 17,4 - 19,7 kV	-0,011	-0,009	-0,030
1,0 - 1,5 U <sub>0</sub> / 11,6 - 17,4 kV	-0,017	-0,019	-0,030
0,5 - 1,0 U <sub>0</sub> / 5,8 - 11,6 kV	-0,014	-0,015	-0,012

Result: 😊

## Details (TD measurement)

L1N : 0,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,423 E-3 😊	SDTD: 0,001 E-3 😊
1	22.1.2024 10.46.42	5,8 kV	1,98 mA	0,422		
2	22.1.2024 10.46.52	5,8 kV	1,98 mA	0,424		
3	22.1.2024 10.47.02	5,8 kV	1,98 mA	0,423		
4	22.1.2024 10.47.12	5,8 kV	1,97 mA	0,422		
5	22.1.2024 10.47.22	5,8 kV	1,97 mA	0,424		
6	22.1.2024 10.47.32	5,8 kV	1,97 mA	0,421		
7	22.1.2024 10.47.42	5,8 kV	1,97 mA	0,424		
8	22.1.2024 10.47.52	5,8 kV	1,97 mA	0,423		

L1N : 1,0 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,440 E-3	SDTD: 0,002 E-3
1	22.1.2024 10.51.22	11,6 kV	3,94 mA	0,440		
2	22.1.2024 10.51.32	11,6 kV	3,94 mA	0,439		
3	22.1.2024 10.51.42	11,6 kV	3,94 mA	0,436		
4	22.1.2024 10.51.52	11,6 kV	3,94 mA	0,441		
5	22.1.2024 10.52.02	11,6 kV	3,94 mA	0,442		
6	22.1.2024 10.52.12	11,6 kV	3,94 mA	0,440		
7	22.1.2024 10.52.22	11,6 kV	3,94 mA	0,441		
8	22.1.2024 10.52.32	11,6 kV	3,94 mA	0,438		

L1N : 1,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,459 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 10.53.12	17,4 kV	5,91 mA	0,461		
2	22.1.2024 10.53.22	17,4 kV	5,91 mA	0,461		
3	22.1.2024 10.53.32	17,4 kV	5,91 mA	0,458		
4	22.1.2024 10.53.42	17,4 kV	5,91 mA	0,459		
5	22.1.2024 10.53.52	17,4 kV	5,91 mA	0,457		
6	22.1.2024 10.54.02	17,4 kV	5,91 mA	0,459		
7	22.1.2024 10.54.12	17,4 kV	5,91 mA	0,459		
8	22.1.2024 10.54.22	17,4 kV	5,91 mA	0,459		

L1N : 1,7 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,472 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 10.56.52	19,7 kV	6,69 mA	0,472		
2	22.1.2024 10.57.02	19,7 kV	6,69 mA	0,471		
3	22.1.2024 10.57.12	19,7 kV	6,69 mA	0,473		
4	22.1.2024 10.57.22	19,7 kV	6,69 mA	0,471		
5	22.1.2024 10.57.32	19,7 kV	6,69 mA	0,471		
6	22.1.2024 10.57.42	19,7 kV	6,69 mA	0,473		
7	22.1.2024 10.57.52	19,7 kV	6,69 mA	0,473		
8	22.1.2024 10.58.02	19,7 kV	6,69 mA	0,471		

L1N : 1,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,461 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 10.59.12	17,4 kV	5,91 mA	0,461		
2	22.1.2024 10.59.22	17,4 kV	5,91 mA	0,460		
3	22.1.2024 10.59.32	17,4 kV	5,91 mA	0,459		
4	22.1.2024 10.59.42	17,4 kV	5,91 mA	0,459		
5	22.1.2024 10.59.52	17,4 kV	5,91 mA	0,461		
6	22.1.2024 11.00.02	17,4 kV	5,91 mA	0,462		
7	22.1.2024 11.00.12	17,4 kV	5,91 mA	0,461		
8	22.1.2024 11.00.22	17,4 kV	5,91 mA	0,462		

L1N : 1,0 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,444 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 11.01.02	11,6 kV	3,94 mA	0,446		
2	22.1.2024 11.01.12	11,6 kV	3,94 mA	0,443		
3	22.1.2024 11.01.22	11,6 kV	3,94 mA	0,441		
4	22.1.2024 11.01.32	11,6 kV	3,94 mA	0,443		
5	22.1.2024 11.01.42	11,6 kV	3,94 mA	0,445		
6	22.1.2024 11.01.52	11,6 kV	3,94 mA	0,444		
7	22.1.2024 11.02.02	11,6 kV	3,94 mA	0,444		
8	22.1.2024 11.02.12	11,6 kV	3,94 mA	0,443		

L1N : 0,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,430 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 11.03.32	5,8 kV	1,97 mA	0,432		
2	22.1.2024 11.03.42	5,8 kV	1,97 mA	0,430		
3	22.1.2024 11.03.53	5,8 kV	1,97 mA	0,427		
4	22.1.2024 11.04.02	5,8 kV	1,97 mA	0,429		
5	22.1.2024 11.04.12	5,8 kV	1,97 mA	0,430		
6	22.1.2024 11.04.22	5,8 kV	1,97 mA	0,431		
7	22.1.2024 11.04.32	5,8 kV	1,97 mA	0,429		
8	22.1.2024 11.04.43	5,8 kV	1,97 mA	0,430		



L2N : 0,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,422 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 11.14.53	5,8 kV	2,00 mA	0,421		
2	22.1.2024 11.15.03	5,8 kV	2,00 mA	0,423		
3	22.1.2024 11.15.13	5,8 kV	2,00 mA	0,422		
4	22.1.2024 11.15.23	5,8 kV	2,00 mA	0,421		
5	22.1.2024 11.15.33	5,8 kV	2,00 mA	0,423		
6	22.1.2024 11.15.43	5,8 kV	2,00 mA	0,422		
7	22.1.2024 11.15.53	5,8 kV	2,00 mA	0,425		
8	22.1.2024 11.16.03	5,8 kV	2,00 mA	0,422		

L2N : 1,0 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,437 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 11.16.43	11,6 kV	3,98 mA	0,436		
2	22.1.2024 11.16.53	11,6 kV	3,99 mA	0,438		
3	22.1.2024 11.17.03	11,6 kV	3,99 mA	0,438		
4	22.1.2024 11.17.13	11,6 kV	3,99 mA	0,436		
5	22.1.2024 11.17.23	11,6 kV	3,99 mA	0,435		
6	22.1.2024 11.17.33	11,6 kV	3,99 mA	0,439		
7	22.1.2024 11.17.43	11,6 kV	3,99 mA	0,437		
8	22.1.2024 11.17.53	11,6 kV	3,99 mA	0,438		

L2N : 1,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,458 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 11.19.23	17,4 kV	5,98 mA	0,461		
2	22.1.2024 11.19.33	17,4 kV	5,98 mA	0,457		
3	22.1.2024 11.19.43	17,4 kV	5,98 mA	0,457		
4	22.1.2024 11.19.53	17,4 kV	5,98 mA	0,459		
5	22.1.2024 11.20.03	17,4 kV	5,98 mA	0,458		
6	22.1.2024 11.20.13	17,4 kV	5,98 mA	0,459		
7	22.1.2024 11.20.23	17,4 kV	5,98 mA	0,459		
8	22.1.2024 11.20.33	17,4 kV	5,98 mA	0,459		

L2N : 1,7 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,470 E-3	SDTD: 0,003 E-3
1	22.1.2024 11.21.13	19,7 kV	6,77 mA	0,478		
2	22.1.2024 11.21.23	19,7 kV	6,77 mA	0,471		
3	22.1.2024 11.21.33	19,7 kV	6,77 mA	0,469		
4	22.1.2024 11.21.43	19,7 kV	6,77 mA	0,468		
5	22.1.2024 11.21.53	19,7 kV	6,77 mA	0,469		
6	22.1.2024 11.22.03	19,7 kV	6,77 mA	0,471		
7	22.1.2024 11.22.13	19,7 kV	6,77 mA	0,470		
8	22.1.2024 11.22.23	19,7 kV	6,77 mA	0,467		

L2N : 1,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,461 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 11.22.53	17,4 kV	5,98 mA	0,460		
2	22.1.2024 11.23.03	17,4 kV	5,98 mA	0,462		
3	22.1.2024 11.23.13	17,4 kV	5,98 mA	0,462		
4	22.1.2024 11.23.23	17,4 kV	5,98 mA	0,461		
5	22.1.2024 11.23.33	17,4 kV	5,98 mA	0,462		
6	22.1.2024 11.23.43	17,4 kV	5,98 mA	0,460		
7	22.1.2024 11.23.53	17,4 kV	5,98 mA	0,464		
8	22.1.2024 11.24.03	17,4 kV	5,98 mA	0,460		

L2N : 1,0 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,442 E-3	SDTD: 0,002 E-3
1	22.1.2024 11.24.33	11,6 kV	3,99 mA	0,442		
2	22.1.2024 11.24.43	11,6 kV	3,99 mA	0,444		
3	22.1.2024 11.24.53	11,6 kV	3,99 mA	0,439		
4	22.1.2024 11.25.03	11,6 kV	3,99 mA	0,441		
5	22.1.2024 11.25.13	11,6 kV	3,99 mA	0,442		
6	22.1.2024 11.25.23	11,6 kV	3,99 mA	0,439		
7	22.1.2024 11.25.33	11,6 kV	3,99 mA	0,445		
8	22.1.2024 11.25.43	11,6 kV	3,99 mA	0,444		



L2N : 0,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,427 E-3	SDTD: 0,003 E-3
1	22.1.2024 11.26.13	5,8 kV	2,00 mA	0,431		
2	22.1.2024 11.26.23	5,8 kV	2,00 mA	0,428		
3	22.1.2024 11.26.33	5,8 kV	2,00 mA	0,429		
4	22.1.2024 11.26.43	5,8 kV	2,00 mA	0,425		
5	22.1.2024 11.26.53	5,8 kV	2,00 mA	0,427		
6	22.1.2024 11.27.03	5,8 kV	2,00 mA	0,428		
7	22.1.2024 11.27.13	5,8 kV	2,00 mA	0,427		
8	22.1.2024 11.27.23	5,8 kV	2,00 mA	0,422		

L3N : 0,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,425 E-3	SDTD: 0,002 E-3
1	22.1.2024 11.34.11	5,8 kV	1,98 mA	0,422		
2	22.1.2024 11.34.21	5,8 kV	1,98 mA	0,425		
3	22.1.2024 11.34.31	5,8 kV	1,98 mA	0,424		
4	22.1.2024 11.34.41	5,8 kV	1,98 mA	0,423		
5	22.1.2024 11.34.51	5,8 kV	1,98 mA	0,427		
6	22.1.2024 11.35.01	5,8 kV	1,98 mA	0,428		
7	22.1.2024 11.35.11	5,8 kV	1,98 mA	0,425		
8	22.1.2024 11.35.21	5,8 kV	1,98 mA	0,427		

L3N : 1,0 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,440 E-3	SDTD: 0,002 E-3
1	22.1.2024 11.35.51	11,6 kV	3,95 mA	0,440		
2	22.1.2024 11.36.01	11,6 kV	3,95 mA	0,438		
3	22.1.2024 11.36.11	11,6 kV	3,95 mA	0,441		
4	22.1.2024 11.36.21	11,6 kV	3,95 mA	0,439		
5	22.1.2024 11.36.31	11,6 kV	3,95 mA	0,444		
6	22.1.2024 11.36.41	11,6 kV	3,95 mA	0,439		
7	22.1.2024 11.36.51	11,6 kV	3,95 mA	0,438		
8	22.1.2024 11.37.01	11,6 kV	3,95 mA	0,439		

L3N : 1,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,478 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 11.38.41	17,4 kV	5,92 mA	0,479		
2	22.1.2024 11.38.51	17,4 kV	5,92 mA	0,479		
3	22.1.2024 11.39.01	17,4 kV	5,92 mA	0,477		
4	22.1.2024 11.39.11	17,4 kV	5,92 mA	0,478		
5	22.1.2024 11.39.21	17,4 kV	5,92 mA	0,477		
6	22.1.2024 11.39.31	17,4 kV	5,92 mA	0,479		
7	22.1.2024 11.39.41	17,4 kV	5,92 mA	0,479		
8	22.1.2024 11.39.51	17,4 kV	5,92 mA	0,476		

L3N : 1,7 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,503 E-3	SDTD: 0,001 E-3
1	22.1.2024 11.40.51	19,7 kV	6,71 mA	0,504		
2	22.1.2024 11.41.01	19,7 kV	6,71 mA	0,504		
3	22.1.2024 11.41.11	19,7 kV	6,71 mA	0,502		
4	22.1.2024 11.41.21	19,7 kV	6,71 mA	0,503		
5	22.1.2024 11.41.31	19,7 kV	6,71 mA	0,501		
6	22.1.2024 11.41.41	19,7 kV	6,71 mA	0,502		
7	22.1.2024 11.41.51	19,7 kV	6,71 mA	0,501		
8	22.1.2024 11.42.01	19,7 kV	6,71 mA	0,504		

L3N : 1,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,473 E-3	SDTD: 0,003 E-3
1	22.1.2024 11.42.31	17,4 kV	5,92 mA	0,477		
2	22.1.2024 11.42.41	17,4 kV	5,92 mA	0,478		
3	22.1.2024 11.42.51	17,4 kV	5,92 mA	0,470		
4	22.1.2024 11.43.01	17,4 kV	5,92 mA	0,470		
5	22.1.2024 11.43.11	17,4 kV	5,92 mA	0,473		
6	22.1.2024 11.43.21	17,4 kV	5,92 mA	0,470		
7	22.1.2024 11.43.31	17,4 kV	5,92 mA	0,474		
8	22.1.2024 11.43.41	17,4 kV	5,92 mA	0,469		

L3N : 1,0 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,443 E-3 ☺	SDTD: 0,002 E-3 ☺
1	22.1.2024 11.44.21	11,6 kV	3,95 mA	0,440		
2	22.1.2024 11.44.31	11,6 kV	3,95 mA	0,444		
3	22.1.2024 11.44.41	11,6 kV	3,95 mA	0,442		
4	22.1.2024 11.44.51	11,6 kV	3,95 mA	0,444		
5	22.1.2024 11.45.01	11,6 kV	3,95 mA	0,441		
6	22.1.2024 11.45.11	11,6 kV	3,95 mA	0,440		
7	22.1.2024 11.45.21	11,6 kV	3,95 mA	0,444		
8	22.1.2024 11.45.31	11,6 kV	3,95 mA	0,447		

L3N : 0,5 U<sub>0</sub>

No.	Date/Time	Voltage	Current	TD value (E-3)	MTD: 0,431 E-3 ☺	SDTD: 0,001 E-3 ☺
1	22.1.2024 11.46.41	5,8 kV	1,98 mA	0,430		
2	22.1.2024 11.46.51	5,8 kV	1,98 mA	0,431		
3	22.1.2024 11.47.01	5,8 kV	1,98 mA	0,429		
4	22.1.2024 11.47.11	5,8 kV	1,98 mA	0,432		
5	22.1.2024 11.47.21	5,8 kV	1,98 mA	0,432		
6	22.1.2024 11.47.31	5,8 kV	1,98 mA	0,431		
7	22.1.2024 11.47.41	5,8 kV	1,98 mA	0,429		
8	22.1.2024 11.47.51	5,8 kV	1,98 mA	0,431		

## PD inception and extinction voltages

Date/Time	Phase	PDIV	PDEV
22.1.2024 10.46.00	L1N	5,8 kV	-
22.1.2024 11.14.11	L2N	5,8 kV	-
22.1.2024 11.33.29	L3N	5,8 kV	-

## Details (PD measurement)

Total cable length	0 – 1931 m	L1N 22.1.2024 10.46.00 Confirmed PD Max. charge (pC)	L2N 22.1.2024 11.14.11 Confirmed PD Max. charge (pC)	L3N 22.1.2024 11.33.29 Confirmed PD Max. charge (pC)
0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV		2 127,6	1 108,5	1 176
1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV		1 92,4	3 176	
1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV		16 102,6	417 478	259 129
1,7 U <sub>0</sub> / 19,7 kV		132 948,7	532 643,7	290 246,3
1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV		38 338,7	375 432,6	262 288,9
1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV		8 178,9		
0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV		1 189,1		3 156,9
		Total no. of PD: 2341		Max. charge (pC): 948,7

Area	487 – 511 m	L2N 22.1.2024 11.14.11 Confirmed PD Max. charge (pC)
0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV		
1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV		
1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV		14 478
1,7 U <sub>0</sub> / 19,7 kV		85 643,7
1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV		34 432,6
1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV		
0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV		
		Total no. of PD: 133
		Max. charge (pC): 643,7

Area	1471 – 1490 m	L1N 22.1.2024 10.46.00 Confirmed PD Max. charge (pC)	L2N 22.1.2024 11.14.11 Confirmed PD Max. charge (pC)	L3N 22.1.2024 11.33.29 Confirmed PD Max. charge (pC)
0,5 U <sub>0</sub> / 5,8 kV				
1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV				
1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV				
1,7 U <sub>0</sub> / 19,7 kV		30 948,7	7 189,1	1 93,8
1,5 U <sub>0</sub> / 17,4 kV		13 338,7	4 120,2	
1,0 U <sub>0</sub> / 11,6 kV				

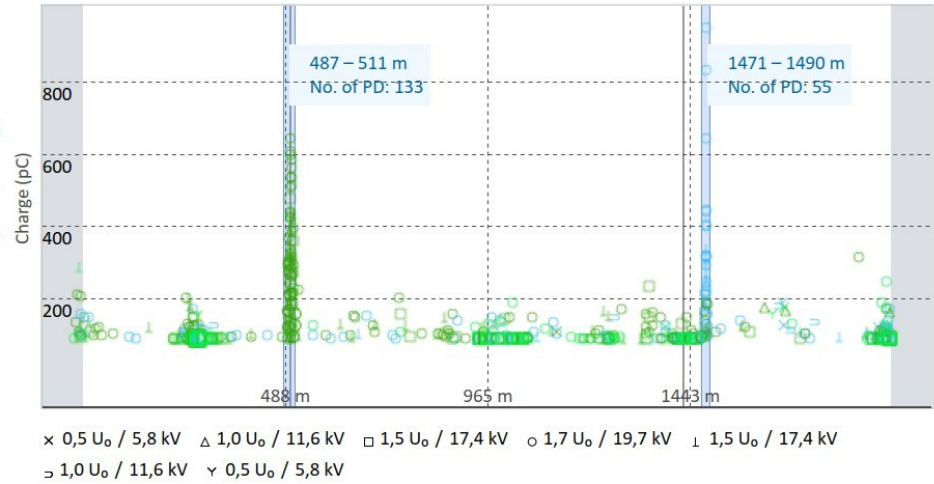
0,5 U<sub>0</sub> / 5,8 kV

Total no. of PD: 55	Max. charge (pC): 948,7
---------------------	-------------------------

PD level (linear)

View  
LOC, PD level

L1N  
22.1.2024 10.46.00  
L2N  
22.1.2024 11.14.11  
L3N  
22.1.2024 11.33.29



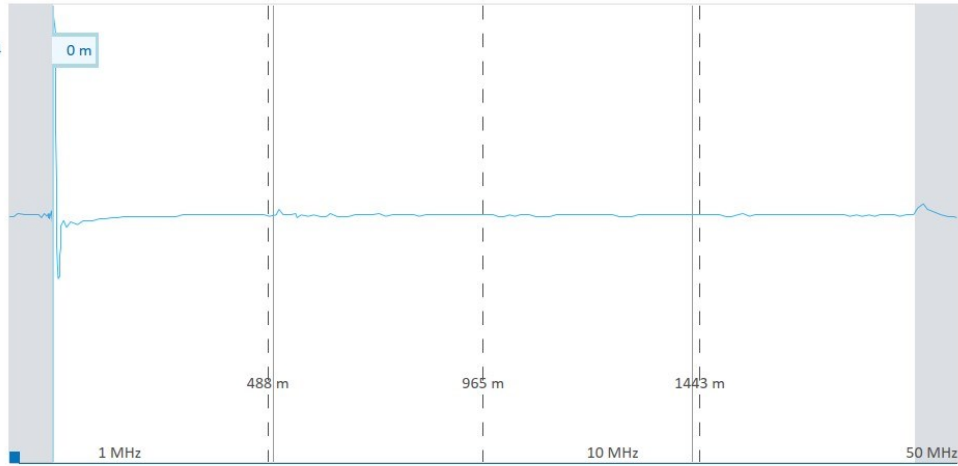
Graphs

Kalibrointikuva\_500pC

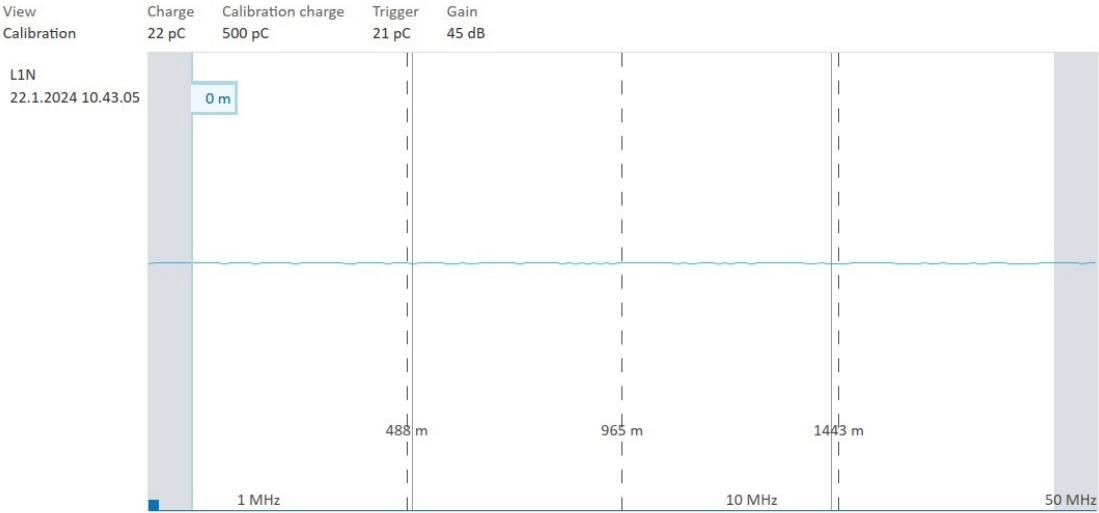
View  
Calibration

Charge	Calibration charge	Trigger	Gain
460 pC	500 pC	41 pC	45 dB

L1N  
22.1.2024 10.39.44

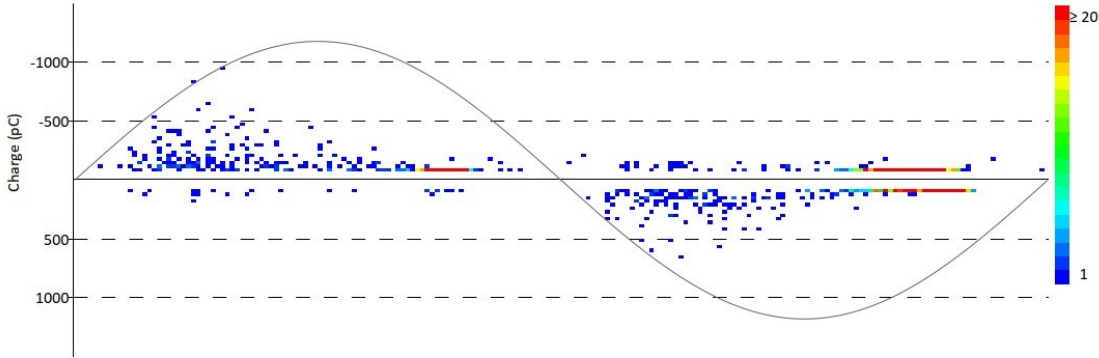


20pC\_kohinakuva



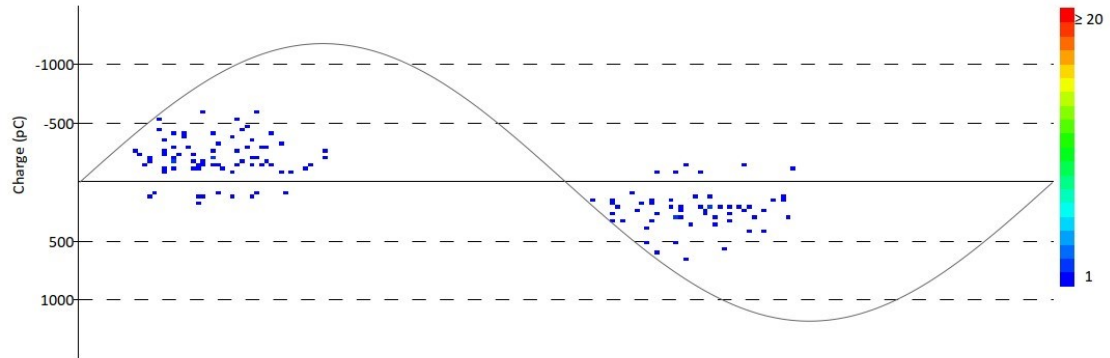
PRPD-kuvaaja koko kaapelimatkalta

View  
PRPD (bipolar)



PRPD-kuvaaja noin 500 m kohdalta

View  
PRPD (bipolar)



PRPD-kuvaaja noin 1480m kohdalta

View  
PRPD (bipolar)

