



Ilja Winqvist

# Sähköverkon puistomuuntamoiden vikaantumisen syyt ja niiden ennaltaehkäisy

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

17.5.2023

## Tiivistelmä

Tekijä(t):	Ilja Winqvist
Otsikko:	Sähköverkon puistomuuntamoiden vikaantumisen syyt ja ennaltaehkäisy
Sivumäärä:	50 sivua + 6 liitettä
Aika:	17.5.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto:	Energiantuotantomenetelmät
Ohjaaja(t):	Lehtori Kai Virta Kunnossapitopäällikkö Petteri Palmumaa

---

Puistomuuntamot ovat yleistyneet merkittävästi Suomessa, kun ilmajohtoverkkoa on aktiivisesti korvattu maakaapeleilla 2010-luvun alusta lähtien. Puistomuuntamot suojaavat muuntajakonetta ja muita sisällä olevia komponentteja esimerkiksi erilaisilta sääilmiöiltä ja muilta ulkoisilta vaikutuksilta, minkä lisäksi näiden huolto onnistuu helposti maanpinnan tasolla. Caruna Oy:n tietyissä muuntamoissa on kuitenkin alettu havaitsemaan poikkeuksellisen paljon ongelmia ja vikoja mm. kondenssaatioon ja sähköpurkauksiin liittyen. Vikaantumista esiintyy erityisesti muuntamoiden 20 kV:n komponenteissa, kuten erottimissa ja kaapelipäätteissä.

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tehdä Caruna Oy:lle selvitys puistomuuntamoissa ilmenevien vikaantumisten syistä ja etsiä mahdollisia ratkaisuja ongelmiin. Työssä perehdyttiin erityisesti puistomuuntamoiden sisällä vallitseviin olosuhteisiin, joita tutkittiin esimerkiksi IoT-mittalaitteiden avulla. Tarkastelussa otettiin huomioon myös esimerkiksi muuntamoiden maantieteelliset sijainnit sekä vertailtiin eri keskijännitekomponentteja suhteessa vikaantumismääriin.

Tutkimuksessa saatiin selville, että erottimien ja päätteiden vikaantumisiin voi vaikuttaa useita tekijöitä, eikä kyseessä välttämättä ole vain yksi juurisyy. Merkittäviä havaintoja olivat eroavaisuus eri valmistajien kaapelipäätteissä, oletettua haastavammat käyttöolosuhteet ja nopeiden lämpötilavaihteluiden vaikutus muuntamoiden sisällä, erottimien käyttöluokitukset sekä asennusvaiheessa vaikuttavat riskitekijät.

Insinööriyön tulosten avulla saatiin parempi ymmärrys puistomuuntamoissa vallitsevista olosuhteista ja keskijännitekomponenttien vikaantumisten syistä. Selvityksen avulla Caruna Oy:llä pystytään päättämään mahdollisista kehityssuunnista sekä jatkotutkimuksista aiheeseen liittyen.

Avainsanat: puistomuuntamo, kaapelipäätteet, erottimet, sähköpurkaukset, hapettuminen, kondenssaatio

## Abstract

Author(s): Ilja Winqvist  
Title: The causes and prevention of malfunctions in electrical network transformer substations  
Number of Pages: 50 pages + 6 appendices  
Date: 17 May 2023

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Energy and Environmental Engineering  
Specialisation option: Energy Production Technologies  
Instructor(s): Kai Virta, Lecturer  
Petteri Palmumaa, Head of Maintenance

---

Small, prefabricated substations have significantly grown in numbers, as underground cables have been replacing power lines in the electrical power grid since the beginning of 2010s. Prefabricated substations protect the transformer and the rest of components inside from different weather phenomena and other factors. In addition, they are easy to maintain as they are located at ground level. Caruna Oy has noted that in certain types of substations, the rate of issues and faults, such as condensation and electrical discharges, have increased. Faults and failures are especially present in 20 kV components, mainly in disconnectors and cable terminations.

The objective of this thesis was to investigate reasons and viable solutions for the faults and issues in prefabricated substations owned by Caruna Oy. The thesis focused particularly on the conditions inside substations, but the geographical location of the substations and differences in the used components were taken also into consideration. IoT measuring equipment was utilized to monitor the underlying conditions.

Results of the investigations suggested that the failures of disconnectors and cable terminations inside prefabricated substations are not the result of a singular reason, but of various potential causes. The most significant findings were made regarding failure rates between two manufacturers, unexpectedly harsh operating conditions and sudden temperature changes inside the substations, equipment withstand ratings, and risk factors during the installation of components.

The thesis granted a better understanding of the conditions inside of prefabricated substations and the reasons behind the 20 kV component failures. With this research, Caruna Oy will be able to decide on a desirable plan of actions and future investigations regarding the matter.

Keywords: Prefabricated substation, Cable termination, Disconnector, Discharge, Oxidation, Condensation

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tutkimusongelma ja tavoite	1
3	Sähköverkon rakenne	2
3.1	Kolmivaihejärjestelmä	2
3.2	Suomen sähköverkko	3
3.3	Muuntaja ja jakelumuuntamo	4
4	Puistomuuntamoiden laitteet ja komponentit	6
4.1	Tarkastelun kohteena olevat komponentit	6
4.1.1	Eroittimet	7
4.1.2	Kaapelipäätteet	10
4.2	Komponenttien oletettu toiminta-aika	11
5	Vikaantumiseen liittyvät ilmiöt	12
5.1	Kondensoituminen	12
5.2	Hapettuminen	12
5.3	Korroosio	14
5.4	Sähköpurkaukset	15
5.5	Osittaispurkaukset	16
6	Yleiset havaitut viat ja niiden seuraamukset	18
6.1	Vikojen havaitseminen	18
6.2	Osittaispurkausten ja läpilyöntien havaitseminen	19
6.3	Palojäljet	20
6.4	Värjäytyminen & Hapettuminen	21
6.5	Vian leviäminen läheisiin komponentteihin	22
6.6	Asiakashaitta	22
7	Vikaantumiseen vaikuttavat tekijät	23

7.1	Puistomuuntamoihin asennetut mittalaitteet	24
7.2	Säätötilavertailu	29
7.3	Käytettyjen komponenttien valinta	31
7.4	Lämmityksen vaikutus sähköpurkausten esiintyvyyteen	35
7.5	Asennusvaiheessa vaikuttavat seikat	39
8	Tulosten tarkastelu	40
9	Löydetyt ratkaisut ja toimenpide-ehdotukset	42
10	Yhteenveto	44
	Lähteet	46
	Liite 1: Suomen sähköverkon rakenne	
	Liite 2: Vuoden lämpötilavaihtelut Salon ja Ranuan alueilla	
	Liite 3: Kahden valmistajan vikaantuneet päätteet	
	Liite 4: Erotinlaitteiston luokittelu ilmansaasteiden ja kondensaation määrän perusteella	
	Liite 5: Lämpötilan vertailu lämmittämättömien ja lämmitettyjen muuntamoiden välillä	
	Liite 6: Taulukko muuntajien lämpöhäviöistä	

## Lyhenteet

IoT: Internet of Things. Erilaisten laitteiden automaattinen tiedonsiirto internetin välityksellä.

KJ: Keskijännite

kVA: Kilovolttiampeeri. Näennäistehon yksikkö

kV: Kilovoltti. Jännitteen yksikkö

VOC: Volatile Organic Compounds, Haihtuvat orgaaniset yhdisteet.

## 1 Johdanto

Insinööriyön toimeksiantajana on sähkönjakeluyhtiö Caruna Oy. Vuonna 2014 perustettu yhtiö vastaa jakeluverkon ylläpidosta, kunnossapidosta ja rakentamisesta omalla verkkoalueellaan. Carunan sähköverkkoa sijaitsee Uudellamaalla, Lounais- ja Länsi-Suomessa, Satakunnassa, Koillismaalla sekä Joensuussa. Kokonaisuudessaan Carunan verkkoalueella on asiakkaita lähes 730 000. Sähköverkossa ilmajohtoja on alettu laajasti korvaamaan maakaapeleilla 2010-luvun alkupuolelta lähtien, mikä on myös lisännyt rakennettujen puistomuuntamoiden määrää vanhojen pylväisiin sijoitettujen muuntajakoneiden poistuessa. Puistomuuntamon rakenne suojaa komponentteja erilaisilta sääilmiöiltä ja niihin kulku onnistuu maanpinnan tasolla, mikä helpottaa esimerkiksi korjaus- ja huoltotoimenpiteitä.

Puistomuuntamoiden laskettu pitoaika on 40–50 vuotta [1], mutta osassa uusia muuntamoita on kuitenkin alkanut esiintyä jonkin verran erilaisia epätoivottuja ongelmia ja vikoja esimerkiksi kondenssaatioon liittyen. Osia on jouduttu vaihtamaan tietyissä muuntamomalleissa kasvavissa määrin ennenaikaisesti sähköisten vikojen, kuten osittaispurkausten ja läpilyöntien vuoksi. Tässä työssä pyritään selvittämään erilaisia syitä Carunan puistomuuntamoiden keskijännitekomponenttien vikaantumiselle ennen laskennallista elinkaarta. Pääasiassa työssä keskitytään puistomuuntamoissa vallitseviin olosuhteisiin ja niiden vaikutusta komponenttien ikääntymiseen, minkä lisäksi etsitään mahdollisia ratkaisuja näiden ongelmien ehkäisemiseksi.

## 2 Tutkimusongelma ja tavoite

Caruna Oy on havainnut, että jakeluverkon puistomuuntamoissa olevia keskijännitekomponentteja vikaantuu ennenaikaisesti odotettua suurempia määriä, minkä vuoksi myös koko muuntamon elinkaari on toisinaan huomattavasti odotettua lyhyempi. Suurimpina ongelmina ovat jännitteellisiin

komponentteihin, kuten kaapelipäätteisiin ja erottimiin kohdistuva voimakas hapettuminen, osittaispurkaukset sekä sähköinen läpilyönti, jotka haittaavat osien toimintaa ja nopeuttavat näiden luonnollista kulumista merkittävästi. Pahimmissa tapauksissa vikaantumiset johtavat koko puistomuuntamon uusimiseen. Kasvaneet vikaantumismäärät nostavat myös Carunan sähköverkon ylläpitämiseen vaadittavaa työmäärää sekä korjauskuluja. Lisäksi muuntamoiden vikaantumiset aiheuttavat asiakashaittoja esimerkiksi yllättävien sähkökatkojen muodossa, mikä ei ole toivottavaa niin yrityksen kuin asiakkaankaan kannalta. On myös havaittu, että Lounais-, Etelä-, ja Länsi-Suomessa muuntamoita vikaantuu määrällisesti huomattavasti enemmän kuin Koillismaan alueella.

Tämän insinööriyön tavoitteena on selvittää Caruna Oy:n puistomuuntamoiden komponenttien vikaantumisen syitä ja etsiä kustannustehokkaita ratkaisuja näiden elinkaaren pidentämiseksi. Lisäksi pyritään luomaan malli, jonka avulla vikaantumista pystyttäisiin ennustamaan ja ennaltaehkäisemään tehokkaasti tulevaisuudessa. Insinööriyössä tehdyn selvityksen avulla Caruna Oy kykenee päättämään tarpeellisista toimenpiteistä, joilla pystytään parantamaan sähkönjakelun luotettavuutta ja vähentämään yritykselle kohdistuvia yllättäviä kunnossapito- ja investointikustannuksia. Vastaavaa selvitystä Carunalla ei vielä ole yrityksen sisällä tehty, joten tämä työ luo hyvän pohjan vastaavien ongelmien ymmärtämiselle ja ratkaisemiselle myös tulevaisuudessa. Tarkoituksena on myös saada selville, millä tavalla erilaiset ympäristölliset tekijät, kuten sääolosuhteet, kosteus sekä muuntamon sijainti vaikuttavat komponenttien vikaantumiseen.

### **3 Sähköverkon rakenne**

#### **3.1 Kolmivaihejärjestelmä**

Kolmivaihejärjestelmässä kolmessa rinnakkaisessa johdossa kulkee sinimuotoinen vaihtovirta sekä -jännite, ja yksittäistä tällaista johdinta kutsutaan vaiheeksi. Jokaisen vaiheen välillä on vaihesiirtymä, jonka seurauksena

vaiheiden jännitteet muuttuvat samanaikaisesti ja samassa suhteessa toisiinsa. Jännitteet vaihtuvat kolmen vaiheen välillä symmetrisesti siten, että vähintään kahdessa vaiheessa jännite on eri suuri kuin nolla. Kolmivaihejärjestelmä mahdollistaa tasaisen ja varman energiansiirron useimmissa tilanteissa, sillä se ei kuormita johtoja tai sähköllä toimivia laitteita yhtä paljon yksivaiheiseen järjestelmään verrattuna. Sähköteho kolmivaihejärjestelmässä lasketaan kaavan 1 avulla, jossa  $P$  = teho (W),  $I$  = Virta (A),  $U$  = jännite (V) ja  $\cos \varphi$  on tehokerroin eli pätötehon ja näennäistehon suhde. [2.]

$$P = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi. \quad (1)$$

Kaava 1: Teho kolmivaihejärjestelmässä

Kaavan perusteella voidaan laskea järjestelmän jännitteitä ja virtoja. Yksinkertaistettuna sähköteho voidaan esittää virran ja jännitteen tulona  $P=I \cdot U$  sekä virran ja resistanssin tulona  $P=I^2 \cdot R$ . Sähköjohdoissa on ominaisresistanssi, joka vaikuttaa siihen, kuinka paljon virtaa pystytään siirtämään tietyllä teholla. Suuret virrat vaativat vakioresistanssilla suuremman sähkötehon, joka johtaa myös suurempiin energiahäviöihin. Tämä selittää, miksi sähköä on kannattavampaa siirtää pitkiä matkoja korkeassa jännitteessä ja pienellä virralla. [3.]

### 3.2 Suomen sähköverkko

Suomen sähköverkko on koko maan kattava 50 Hz:n taajuudella toimiva kolmivaihejärjestelmä, johon on liitetty kaikki tehtaat, voimalaitokset sekä tavalliset kuluttajat. Liitteessä 1 on kuvattu yksinkertaistetusti sähkönjakelujärjestelmän rakennetta; se koostuu voimalaitoksista, suurjännitteisistä kanta- ja alueverkoista, keskijänniteverkosta sekä pienjänniteverkosta. Yleisesti ottaen jännitettä muutetaan sitä pienemmäksi, mitä lähemmäs loppukäyttäjää siirrytään. Voimalaitoksien generaattoreilla tuotetaan sähköä, jonka jännite on tuotannon jälkeen usein 20 kV. Voimalaitokseen liitetyn muuntajan avulla sähkön jännitetaso nostetaan korkeaksi siirtoa varten. Suurjännitteisten verkkojen jännitetasot ovat Suomessa

110, 220 ja 400 kV. Näistä käytetään yhdessä nimitystä kantaverkko, joka on vastuussa sähkön siirrosta pitkillä välimatkoilla läpi valtakunnan. [4.]

Sähkön siirto pitkillä välimatkoilla on kannattavinta korkeassa jännitteessä, sillä tällöin siirtohäviöt pystytään minimoimaan alhaisen virran vuoksi.

Suurjännitteinen sähkö ei kuitenkaan ole soveltuvaa juuri muuhun kuin sähkön siirtoon, sillä suurin osa laitteista on suunniteltu toimimaan alhaisemmalla jännitetasolla. [4.] Suurjännite muutetaan sähköasemilla keskijänniteverkkoon, jonka jännite Suomessa on yleisimmin 20 kV, mutta myös esimerkiksi 10 kilovoltin siirtolinjat ovat mahdollisia. Näiden tehtävä on tuoda sähkö lähelle asuinkeskuksia ja muita kuluttajia riittävällä sähköteholla. Lähempänä loppukäyttäjiä, kuten kotitalouksia ja muita toimijoita, sähkön siirto tapahtuu pienjänniteverkossa. [5.]

### 3.3 Muuntaja ja jakelumuuntamo

Muuntaja on sähkömagneettiseen induktioon perustuva passiivinen laite, jolla voidaan muuttaa haluttua jännitetasoa erilaisissa vaihtosähköllä toimivissa järjestelmissä [6]. Muuntajien avulla sähköverkon jännitetaso saadaan säädettyä oikeaksi käyttötarkoituksen ja tehontarpeen mukaan taajuuden pysyessä muuttumattomana. Esimerkiksi tehtaille, junaverkkoon ja kotitalouksille syötetään sähköä eri jännitetasoissa erilaisen tarpeen vuoksi. Jännitetasoa voidaan nostaa korkeammalle tai laskea matalammalle kohdetarkoituksen mukaan. Muuntajia käytetään myös pienemmässä mittakaavassa esimerkiksi mittalaitteissa ja pienelektronikan virtalähteissä muuttamaan jännitettä sopivalle tasolle. [7.]

Sähköverkon jakelumuuntamo on rakennelma, jonka avulla KJ-verkon 20 kV:n jännite muutetaan loppukäyttäjälle soveltuvaksi pienjännitteeksi 400 volttiin, jolloin vaihejännite on laskennallisesti 230 V. Jakelumuuntamot voidaan luokitella ulkoisen rakenteensa mukaan pylväsmuuntamoihin, puistomuuntamoihin ja kiinteistömuuntamoihin. Pylväsmuuntamot ovat sähköpylväisiin sijoitettuja muuntajakoneita, joita on perinteisesti käytetty

maaseudulla ja muualla haja-asutusalueilla. Kiinteistömuuntamo on asennettu nimensä mukaisesti kiinteistön yhteyteen, usein pohjakerrokseen tai rakennuksen viereen. Puistomuuntamot ovat kuvan 1 kaltaisia maakaapeliverkkoon liitettyjä umpinaisia rakennelmia, jotka voidaan asentaa monipuolisesti eri ympäristöihin, mikäli tilaa vain on tarpeeksi. [8.] Muuntamot sisältävät muuntajan lisäksi usein erilaisia apulaitteita ja katkaisijoita, joiden tarkoituksena on varmistaa turvallinen sähkönjakelu kuluttajalle, säätää verkon ominaisuuksia sekä mahdollistaa erilaiset huoltotoimenpiteet vikatilanteissa [5].



Kuva 1: Puistomuuntamo [8].

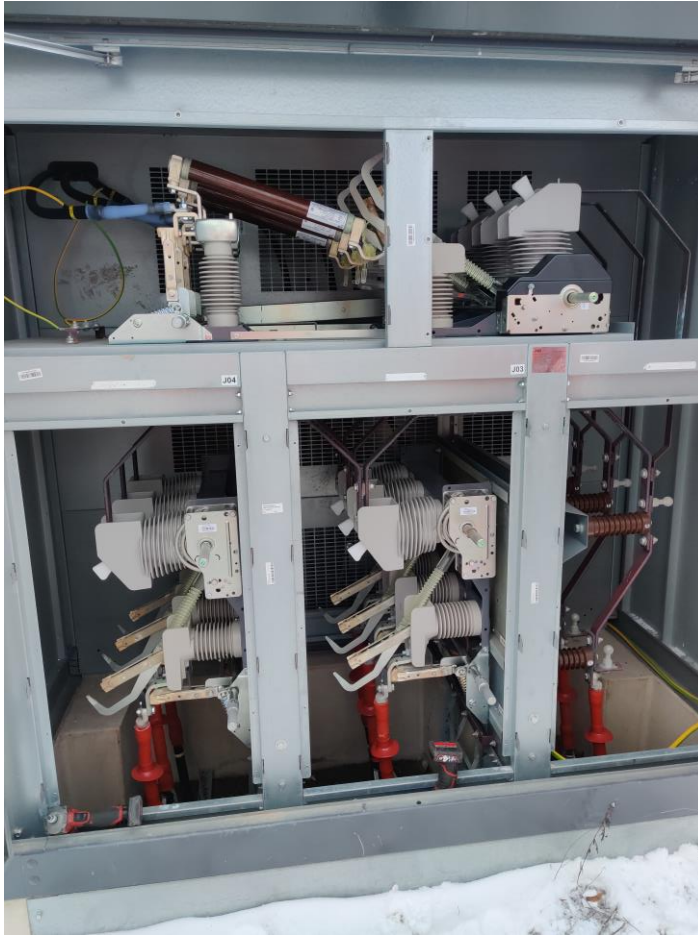
Vastaavanlaiset muuntamot ovat yleistyneet maakaapeloinnin ohella Suomen jakeluverkossa laajalti vuoden 2013 sähkömarkkinalain uudistuksen myötä, jolloin päätettiin sähkönjakelun toimitusvarmuusvaatimuksien kiristämisestä [9]. Maakaapelointi on luotettavampi tapa siirtää sähköä kuin ilmajohtoverkko, sillä se ei ole yhtä altis erilaisille sääilmiöille ja niiden seurauksille. Esimerkiksi lumi tai jää eivät pääse kasaantumaan johdinten eivätkä kaatuvat puut uhkaa maakaapeliverkon toimintaa yhtä paljon. Päätös uudistuksesta tehtiin piakkoin sen jälkeen, kun 2010-luvun alun poikkeuksellisen tuhoisat myrskyt riepottelivat Suomen ilmajohtoverkkoa, jättäen satoja tuhansia käyttäjiä ilman sähköä jopa useiden päivien ajaksi. [10, s. 19–21.] Vuoden 2022 lopussa Carunalla oli

jakelumuuntamoita verkossa noin 31 000, joista puistomuuntamoiden osuus oli yli 23 000 kpl, eli noin kolme neljäsosaa kaikista jakelumuuntamoista [11, s. 69].

## **4 Puistomuuntamoiden laitteet ja komponentit**

### **4.1 Tarkastelun kohteena olevat komponentit**

Tässä työssä tarkastellaan erityisesti puistomuuntamon keskijännitepuolen (KJ) komponentteja, joita ovat pääasiassa erotinkojeistot ja kaapelipäätteet sekä näihin liittyvät kiinnityskomponentit. KJ-puolen jännite on puistomuuntamoissa tavallisesti 20 kV suuruinen [12]. Kuvassa 2 on esitetty erään muuntamon KJ-puolen rakenne kokonaisuudessaan. Tarkastelussa keskitytään erityisesti tämäntyyppisiin vuosien 2014–2018 aikana asennettuihin muuntamoihin, sillä tällä välillä näitä on asennettu verkkoon suuria määriä maakaapeloinnin lisääntymisen yhteydessä. Kyseisiä muuntamoita ja niiden komponentteja on raportoitu huomattavan paljon vialliseksi muihin muuntamotyypeihin nähden, minkä vuoksi nämä otetaan tarkempaan tarkasteluun. Työssä keskitytään erityisesti komponenttien ei-mekaanisiin vikoihin, kuten jännitteisten osien hapettumiseen sekä läpilyön-teihin, sillä näiden havaittu määrä on kasvanut merkittävästi viimeisen vuosikymmenen aikana. [13.]



Kuva 2 Puistomuuntamon KJ-puoli [14].

#### 4.1.1 Erottimet

Erottimet ovat mekaanisia kytkinlaitteita, joilla irrotetaan jokin sähköverkon osa tai komponentti muusta verkosta ja pidetään se jännitteettömänä. Erottimen toimintaperiaate muistuttaa tavallista virtakytkintä; avaamalla ja sulkemalla voidaan muuttaa sähkövirran kulkua tietyssä virtapiirissä, tässä tapauksessa sähköverkossa, mikä mahdollistaa esimerkiksi korjaustoimenpiteiden toteuttamisen turvallisesti halutuille komponenteille tai verkon osille. Erottimilta ei yleensä vaadita suurijännitteisten virtojen katkaisua, vaan tämä tehtävä on ensisijaisesti korkeajännitekatkaisijoilla. Erottimien ensisijaisena tehtävänä on pitää irrotetut osat luotettavasti erillään toisistaan, minkä lisäksi ne toimivat visuaalisena indikaattorina erotetun osan jännitteettömyydestä. Kiinni ollessaan erotin on jännitteinen komponentti, jonka läpi kulkee sähkövirta. Erottimien

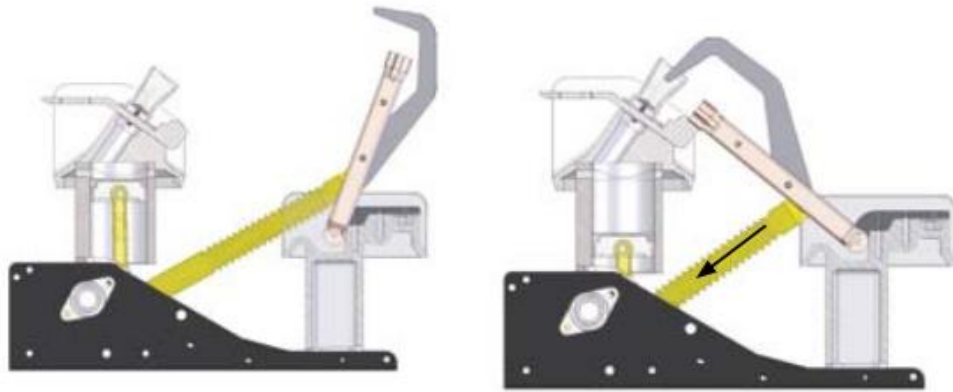
erotusvälin eristinaineena toimii usein ilma, mutta myös SF<sub>6</sub>-kaasua eli rikkiheksafluoridia käytetään yleisesti sen hyvän sähköneristävyuden vuoksi. [6, s. 190.] Puistomuuntamoista erottimia löytyy tyypillisesti 1–5 kpl, jokaiselle johtolähdölle erikseen ja ne muistuttavat rakenteeltaan kuvan 3 erotinta.



Kuva 3: Esimerkki puistomuuntamoon asennettavasta ilmaeristeisestä erottimesta auki-asennossa [15].

Erottimen toimintamekanismi on havainnollistettu kuvassa 4.

Ohjausmekanismia kääntämällä liikutetaan sähköä johtavia komponentteja, jotka erkanevat tai sulkeutuvat koskettimista, jolloin sähkövirta kulku komponentin läpi muuttuu. Erottimessa olevat veitset osallistuvat yhdessä koskettimien kanssa valokaaren sammuttamiseen, mikä syntyy kytkentää avattaessa. Ohjausmekanismi on jousiviritteinen, sillä erottimen on auettava tarpeeksi nopeasti valokaaren sammuttamiseksi. [6, s. 195.]



Kuva 4 Erottimen toimintamekanismi [16].

Erottimet voivat olla käsin tai moottoreilla ohjattavia tyyppistä ja asennuspaikasta riippuen. Käsin käytettävät erottimet ovat tavallisesti kampi- tai vipukäyttöisiä, ja ne vaativat aina asentajan operoimaan paikan päälle. Moottoroituja erottimia on usein mahdollista ohjata käsiajon lisäksi kaukokäytön avulla. Tämä on hyödyllistä, mikäli ohjattava erotin on hankalakulkuisessa paikassa tai haja-asutusalueella, jonne matkustaminen kestää kauan. Kaukokäyttöisten erottimien avulla pystytään myös reagoimaan nopeasti, jos verkon topologiaa pitää ylläpitäen muuttaa. [6, s. 197]

Erottimia on useaa tyyppiä eri käyttötarkoituksiin ja ympäristöihin, minkä lisäksi erilaiset teknologiset ratkaisut sekä materiaalivalinnat vaihtelevat valmistajien mukaan melko paljon. Näin ollen kaikki laitteet eivät ole suoraan vertailukelpoisia keskenään, vaikkakin toimintaperiaate on pohjimmiltaan samanlainen. [6, s. 190.] Puistomuuntamoissa Caruna käyttää pääasiassa kuormanerotimia eli eräänlaisia katkaisijan ja erottimen yhdistelmiä, jotka kykenevät katkaisemaan kuormitusvirrallisia osia sähköverkosta, mikä ei tavallisella erottimella ole mahdollista. Kuormitusvirralla tarkoitetaan virtaa, joka kulkee laitteeseen sen ollessa toiminnassa. Erotinlaitteisto usein myös sisältää maadoituserottimen, jonka avulla saadaan purettua kapasitiivisia varauksia ja vikavirtoja systeemistä verkosta erottamisen jälkeen. Käytännössä se on turvamekanismi, jolla voidaan välttää sähköiskujen riskiä. Lisäksi muuntamoissa

on yleensä yksi varokekuormaerotin, jonka yhteydessä olevat sulakkeet laukaisevat erottimen auki automaattisesti, jos virta nousee liian suureksi. [17.]

#### 4.1.2 Kaapelipäätteet

Kaapelipäätteiksi kutsutaan sähkökaapelin loppuun rakennettua päätöskappaletta, jonka avulla kaapeli voidaan liittää erilaisiin verkon komponentteihin, esimerkiksi muuntamoihin. Keskijännitteisten ilmajohto- ja maakaapeliverkon yhdistymiskohdissa saatetaan myös käyttää kaapelipäätteitä, kun avojohto muutetaan maakaapeliksi. [18.] Kaapelipäätteen vastuulla on kaapelin mekaaninen suojaaminen sekä estää kosteuden pääsyn kaapelirakenteisiin. Päätteillä pyritään lisäksi ohjaamaan kaapelin katkaisukohdassa muodostuva sähkökenttä kaapelin suuntaiseksi, jotta ulkoisen eristykseen kohdistuva sähkökentän voima jää vähäiseksi. [6, s. 327.] Epätasainen sähkökenttä saattaa aiheuttaa voimakasta vuotovirtaa, joka voi johtaa komponenttien vaurioitumiseen esimerkiksi läpilyöntien ja pienempien sähköpurkausten muodossa. Kaapelipäätteen kyky ohjata sähkökenttää riippuu pitkälti käytetyistä materiaaleista ja asennusmenetelmistä. [19, s. 63.]

Päätteiden eristeet on nykyään usein valmistettu erilaisista polymeerimuoveista. Kuvassa 5 on esimerkkejä erilaisista keskijänniteverkossa käytettävistä päätteistä, ja ne voidaan jakaa karkeasti sisä- ja ulkopäätteisiin eristeen ryömintäetäisyyden perusteella. Ryömintäetäisyydellä tai -matkalla tarkoitetaan eristeen pintamatkan pituutta kahden sähköä johtavan osan välillä. Pidempi ryömintäetäisyys suojaa kaapelia paremmin sähköiseltä kuormitukselta ja vähentää vuotovirran suuruutta erityisesti haastavissa olosuhteissa. [20.] Ryömintämatkaa voidaan pidentää esimerkiksi päätteeseen asennettavien laippojen avulla. Ilman laippaa olevat päätteet on tavallisesti tarkoitettu käytettäväksi sisätiloissa, kun taas laipalliset ulkopäätteet on nimensä mukaisesti suunniteltu kestävämmän paremmin esimerkiksi likaisia olosuhteita ja erilaisten sääilmiöiden vaikutuksia. [21.]



Kuva 5 Erilaisia kaapelipäätteitä [21].

Puistomuuntamoissa kaapelipäätteiden määrä riippuu pääasiassa keskijännitteisten 20 kV johtolähtöjen määrästä. Näiden määrä vaihtelee tavallisesti yhden ja neljän välillä. Kaapelipäätteiden sijainti voi vaihdella erityyppisissä muuntamoissa, mutta työssä tarkasteltavissa kohteissa näiden sijainti on melko lähellä maanpinnan tasoa. Päätteet kiinnitetään liitoskohdistaan muttereiden tai sisäänrakennettujen liittimien avulla muihin komponentteihin, kuten muuntamon kiskostoihin.

#### 4.2 Komponenttien oletettu toiminta-aika

Oletettu toiminta-aika keskijänniteverkon komponenteille on 20–40 vuotta valmistajasta ja tyypistä riippuen, mutta käyttöolosuhteet ja osien laatu vaikuttavat paljon siihen, kuinka pitkä elinikä näillä todellisuudessa on. Joissakin tapauksissa komponentit toimivat normaalisti vielä pitkään suunnitellun käyttöiän jälkeenkin, kun taas jonkin verran näistä hajoaa enneaikaisesti. Luonnollisesti tavoitteena olisi, että osia voitaisiin käyttää useita vuosia ennen kuin niitä pitäisi alkaa vaihtamaan uusiin. [22.] Caruna Oy:n havaintojen perusteella enneaikaisen vikaantumisen merkkejä on alkanut esiintyä tietyissä muuntamoissa poikkeuksellisen paljon jo 6–9 vuoden jälkeen asennuksesta, mikä on parhaimmassakin tapauksessa alle puolet toivotusta elinkaaresta [13]. Puistomuuntamon pitoaika kokonaisuudessaan on 40–50 vuotta [1].

## 5 Vikaantumiseen liittyvät ilmiöt

### 5.1 Kondensoituminen

Kondensoitumisella tarkoitetaan ilman sisältämän kosteuden tiivistymistä höyrystä vedeksi. Kondensoitumista voi tapahtua kahdella tavalla, joista ensimmäinen on ilman viilentymien kastepisteeseen ja toinen on kytköksissä vesihöyryn saturaatioon. Kummassakin tapauksessa ilman kyky sitoa itseensä vesihöyryä saavuttaa rajapisteen ja vesi alkaa tiivistymään. Kastepiste on lämpötila, jossa ilman sisältämä vesihöyry alkaa kondensoitua pisaroiksi erinäisille pinnoille. Ulkoilmassa tämä on yleistä öisin, jolloin ilman lämpötila laskee usein merkittävästi suhteelliseen kosteuteen verrattuna. Ilma voi myös saavuttaa kastepisteen, jos viileä kappale joutuu kosketuksiin lämpimämmän ilman kanssa, jolloin kappaleen läheisyydessä oleva ilman lämpötila alkaa laskea luonnollisen konvektion vaikutuksesta. [23.] Kastepisteelle ei kuitenkaan ole tiettyä yksittäistä lämpötilaa, vaan se muuttuu ilmanpaineen, lämpötilan sekä suhteellisen ilmankosteuden mukaan. Nyrkkisääntönä voidaan kuitenkin pitää, että mitä korkeampi paine ja pienempi suhteellinen kosteusprosentti ilmalla on, sitä alhaisemmaksi kastepisteen lämpötila laskee. [24.] Saturaatio kuvaa sitä, kuinka paljon jokin aine kykenee pitämään sisällään tai sitomaan itseensä jotain muuta ainetta. Esimerkiksi kun vesihöyry saavuttaa saturaatiopisteen, vesimolekyylejä on tällöin läsnä ylimäärin suhteessa ilman kapasiteettiin sitoa vesihöyryä. Tällöin vesimolekyylien väliset etäisyydet ovat riittävän lyhyitä, jotta vesi alkaa tiivistyä pisaroiksi. [23.]

### 5.2 Hapettuminen

Hapettuminen on kemiallinen ilmiö, jossa kaksi ainetta reagoi keskenään, jolloin ensimmäinen aine luovuttaa elektroneja toiselle ja hapettuu, kun taas elektroneja vastaanottanut aine puolestaan pelkistyy. Reaktion osapuolet ovat niin kutsuttuja elektrodereja, jotka on nimetty anodiksi ja katodiksi. Pelkistymisreaktio eli elektronien vastaanottaminen tapahtuu aina katodilla ja hapettuminen vuorostaan katodilla. Aineiden täytyy olla kosketuksissa toistensa

kanssa joko kemiallisesti tai sähkökemiallisesti, jotta elektroneilla on mahdollisuus siirtyä aineelta toiselle. Elektronien liikkeen mahdollistaa elektrolyytti, eli liikkumiskykyisiä ioneja sisältävä aine, joka on luonnollisessa ympäristössä useimmiten suoloja tai likaa sisältävä vesiliuos. Elektrodit muodostavat yhdessä elektrolyytin kanssa hapettumis-pelkistymisparin ja näiden välistä ilmiötä kutsutaan hapettumis-pelkistymisreaktioksi. Hapettuminen sekä pelkistyminen tapahtuvat samanaikaisesti ja ovat riippuvaisia toisistaan, joten molemmat ovat aina reaktiossa läsnä. [25.]

Jokaisella aineella on ominainen kyky vastaanottaa ja luovuttaa elektroneja, mitä kutsutaan myös normaalipotentialiksi  $E^\circ$ . Vedyn reaktio ( $2 \text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2$ ,  $E^\circ = 0,00 \text{ V}$ ) on määritelty olevan normaalipotentialien 0-arvo, johon muiden aineiden elektronien luovutuskykyä verrataan. Näistä arvoista voidaan muodostaa sähkökemiallisia jännitesarjoja, joiden avulla on helppo vertailla eri aineiden välisiä reaktiivisuuksia toisiinsa nähden. Esimerkiksi kahden aineen välinen hapettumisreaktio ja aineiden reaktiivisuus on useimmiten sitä voimakkaampaa, mitä suurempi normaalipotentialinen ero käsiteltävillä aineilla on. Hapettuminen on spontaania, mikäli hapettumis-pelkistymisparin normaalipotentialien erotus on positiivisella puolella nollaa suurempi. [25.]

Kuva 6 esittää metallien yksinkertaistettua jännitesarjaa, jossa normaalipotentiali kasvaa vasemmalta oikealle mentäessä. Jännitesarjan vasemmassa reunassa olevat metallit luovuttavat herkästi elektroneja, joten näin ollen reagoivat myös helpommin muiden aineiden kanssa ja ovat alttiita hapettumiselle. Jalommat metallit puolestaan ovat luonteeltaan pysyvämpiä eli ne vastustavat hapettumista ja korroosion muodostumista [26]. Epäjaloilla metalleilla normaalipotentialien arvot ovat negatiivisia, joten näihin kohdistuva hapettuminen sekä korroosion vaikutus ovat usein voimakkaita – varsinkin, jos toisella vuorovaikutuksessa olevalla aineella on korkean potentiaaliarvon [25].



metallien jalous kasvaa 

Kuva 6: Yksinkertaistettu metallien sähkökemiallinen jännitesarja [27].

### 5.3 Korroosio

Korroosiolla tarkoitetaan sitä, että jokin materiaali toimii kemiallisessa tai sähkökemiallisessa hapettumis-pelkistymisreaktiossa anodina. Tällöin materiaalin ominaisuudet muuttuvat ympäröivien olosuhteiden vaikutuksesta, mikä johtaa usein materiaalin hapettumiseen tai syöpymiseen. Ympäristön muuttujat, kuten lämpötila ja kosteus vaikuttavat merkittävästi korroosion syntyyn ja ovat yhtenä tärkeimpänä tekijänä korroosionopeuden kasvuun. Lisäksi erilaiset pölyn ja hiukkasten kaltaiset epäpuhtaudet kiihdyttävät usein korroosiota. [25; 28 s. 7] Korroosiota esiintyy monenlaista, mutta metallien yleinen- ja galvaaninen korroosio ovat keskeisimpiä ilmiöitä tämän insinööriyön kannalta.

Yleisessä korroosiossa materiaalin pinta syöpyy tasaisesti ja lähes yhtä nopeasti koko pinta-alalta. Yleinen korroosio on yleistä metalleilla, joita ei ole käsitelty tai suojattu millään tavalla. Tietyt metallit, kuten alumiini, kupari ja ruostumattomat teräkset, muodostavat pinnalleen passiivisen oksidikerroksen reagoidessaan ilman hapen kanssa. Tämä oksidikerros toimii suojaavana pintana, joka estää tai hidastaa yleistä syöpymistä etenemästä metallin pintaa syvemmälle. [29.]

Korroosiota, joka syntyy kahden eri metallin välisestä kosketusvuorovaikutuksessa samassa elektrolyytissä, kutsutaan galvaaniseksi korroosioksi. Sen ilmaantuvuus on sidoksissa metallien sähkökemialliseen jännitesarjaan, ja se ilmenee liitoskohdan alueella epäjalomman metallin kiihtyneenä korroosiona. Sopivan elektrolyytin läsnä ollessa esimerkiksi litium sekä natrium alkaisivat hapettua tehokkaasti joutuessaan kosketuksiin jalometallien, kuten platinan kanssa. Galvaaniseen korroosioon syntyyn ja nopeuteen vaikuttaa lisäksi mm. elektrolyytinä toimiva aine, kappaleiden pinta-alat sekä metallien välinen potentiaalieron suuruus. [29.]

#### 5.4 Sähköpurkaukset

Sähköpurkaukset ovat tapahtumia, joissa kahden kappaleen välinen sähkövarauksien epätasapaino nousee niin suureksi, että niiden välille syntyy hetkellinen sähkövirta. Ilmiössä kappaleiden välille muodostuva sähkökenttä kiihdyttää kentässä olevia vapaita elektroneja, jotka tietyn energian saavutettuaan alkavat ionisoimaan sähkökentässä olevia aineita kuten kaasuatomeja. Ionisoitumisen seurauksena lisää elektroneita pääsee vapaaksi, synnyttäen voimakkaan ketjureaktion. Tämä elektronien ja ionien liikkuminen sähkökentässä luo tilapäisen sähköä johtavan kanavan, joka havaitaan myös näkyvänä valona ja lämpönä. Sähkövaraukset tasoittuvat nopeasti purkauksen alkamisen jälkeen, jolloin ionisoituminen lakkaa ja sähköpurkaus pysähtyy. Sähköpurkauksia esiintyy useita erityyppisiä, ja niiden ilmenemismuoto riippuu esimerkiksi ympäröivistä olosuhteista ja -aineista sekä ja niiden mahdollisista pinnanmuodoista. [19, s. 63–64.]

Läpilyönnillä tarkoitetaan sitä, kun eristeen jännitelujuus ylittyy ja kahden elektrodin välisen eristeen läpi pääsee kulkemaan täydellinen suurivirtainen sähköpurkaus, joka samalla synnyttää polttavan kuumen valokaaren. Voimakas valokaari saattaa myös aiheuttaa paineaallon ja leimahduksen. Jos valokaari kulkee kiinteän eristeen läpi, se usein jättää jälkeensä polun, jolla jännitelujuus on alhaisempi kuin muulla ympäröivällä eristeellä. Tämä altistaa eristeen läpilyönneille sekä eristerakenteen laajemmalle vioittumiselle tulevaisuudessa.

Kaasumaiset eristeet, kuten ilma puolestaan palautuvat normaalitilaan valokaaren sammumisen jälkeen. [19, s. 63–64.]

Pintapurkaukset ovat kiinteän eristeen sekä kaasumaisen tai nestemäisen eristeen rajapinnalla tapahtuvia sähköpurkauksia, joissa sähköä johtava kanava muodostuu eristeen pinnalle. Erityisesti likaiset ja kosteat pinnat mahdollistavat pintapurkauksien syntymisen, sillä sähkönjohtavuus tällaisilla alueilla on suurempi kuin puhtaassa eristeessä. Pintapurkaukset lämmittävät purkauskohtaa ja voivat jättää jälkeensä pysyvän polun, jonka sähkölujuus jää pienemmäksi kuin muussa eristeessä, mikä voidaan havaita esimerkiksi sähköpuiden muodossa. Tällainen sähköä johtava kanava altistaa komponentin suuremmille vahingoille tulevaisuudessa, sillä seuraava sähköpurkaus ei vaadi yhtä suurta energiaa ylittääkseen jännitelujuuden. [19, s. 85; 30.]

## 5.5 Osittaispurkaukset

Osittaispurkaus tarkoittaa paikallista sähköpurkausta eristeessä, joka ei täysin ylitä kahden elektrodin välistä rakoja, vaan jää epätäydelliseksi.

Osittaispurkauksia tapahtuu tavallisesti yli 3 kV:n jännitteellä eli keski- ja suurijännitteisissä järjestelmissä sekä eristyksen sisällä, että pinnalla. Jatkuvat osittaispurkaukset rasittavat komponentteja ja voivat lyhentää osien käyttöikä huomattavasti. Osittaispurkaukset kehittyvät voimakkaammiksi ajan myötä, jolloin eriste kuluu hiljalleen, minkä vuoksi huoltamattomana ne voivat johtaa eristeen läpilyöntiin ja sitä kautta erittäin tuhoisiin vaurioihin. Purkausten etenemisvauhti on vaihtelevaa, joten vian havaitsemiseen tai eristeen läpilyöntilujuuden ylittämiseen voi toisinaan mennä jopa vuosia. Yleinen syy osittaispurkausten syntyyn on erilaiset poikkeamat eristerakenteessa, kuten lika, kosteus sekä mahdolliset pienet ilmakuplat ja raot, jotka ovat jääneet eristeen sisään esimerkiksi asennusvaiheessa. Tällaiset poikkeamat luovat pieniä häiriöitä ympäröivään sähkökenttään ja kasvattavat eristeen sähköistä rasitusta kyseisessä kohtaa. Poikkeamien kohdalla jännitelujuus on usein pienempi kuin muussa eristerakenteessa, minkä vuoksi osittaispurkaukset ovat usein toistuvia. [31.]

Koronapurkaus on eräänlainen osittaispurkauksen muoto, jossa kaasumainen aine altistuu voimakkaalle sähkökentälle johtimen läheisyydessä, jolloin pieni osa kaasuatomeista alkaa ionisoitumaan kaasun jännitelujuuden ylittyessä. Tämä on voimakkainta terävien reunojen tai ulokkeiden kohdalla, mutta sitä esiintyy myös pyöreillä muodoilla. Koronapurkauksia tapahtuu vain yhdellä elektrodilla, mutta sekä positiiviset, että negatiiviset purkaukset ovat mahdollisia. Tietyssä pisteessä sähkökentän voima ja sitä myötä elektronien kineettinen energia ei enää riitä ionisoimaan uusia atomeja, minkä vuoksi purkaukset esiintyvät usein hehkuna johtimen välittömässä läheisyydessä, mistä on esimerkki kuvassa 7. [32.]



Kuva 7 Koronapurkaus testiolosuhteissa [32].

## 6 Yleiset havaitut viat ja niiden seuraamukset

### 6.1 Vikojen havaitseminen

Puistomuuntamoiden keskijännitekomponenttien vikaantuminen havaitaan useimmiten suunniteltujen kuntotarkastusten aikana tai sähköjakelun häiriöiden selvitys- ja korjaustöiden yhteydessä. Yleisiä vikoja ovat sähköpurkaukset, metallipintojen hapettuminen ja värjäytyminen sekä erilaiset palojäljet erottimien ja kaapelipääteiden pinnoilla. Lisäksi piileviä vikoja on mahdollista havaita esimerkiksi lämpökameroiden ja radiotaajuuksien avulla [33]. Kentältä on raportoitu, että vikoja esiintyy enemmän kosteina vuodenaikoina eli käytännössä syksyn ja alkukevään kuukausina, jolloin lämpötila voi vaihdella suuresti vuorokauden aikana.

Muuntamoiden tavallinen tarkastusväli on noin kuusi vuotta [34], mikä tarkoittaa sitä, että vikojen havaitsemiseen saattaa kulua pitkiäkin aikoja. Pahimmassa tapauksessa vikoja ei huomata tai korjaavia toimenpiteitä ei keretä tehdä ajoissa, jolloin muuntamo saattaa ns. ”räjähtää” yllättäen. Tällöin rakennelman sisällä muodostuu epäedullisten olosuhteiden seurauksena valokaari, joka syttyessään höyrystää ympäröiviä aineita kuten metalleja ja kaasuja muodostaen hetkellisesti plasmata. Aineen salamannopean lämpölaajenemisen seurauksena syntyy myös paineaalto, jolloin muuntamon sisätila leimahtaa räjähdysmäisesti. Paineaalto ja leimahdus vahingoittavat komponentteja, mikä johtaa mahdollisesti koko muuntamon uusintaan. [13.] Esimerkki tällaisen tapauksen lopputulemasta on nähtävissä kuvassa 8, jossa muuntamon KJ-puoli on palanut pahasti seinämiä myöten ja erotin on vaurioitunut käyttökelvottomaksi. Valokaarien aiheuttamat räjähdykset voivat myös johtaa huonolla tuurilla vakaviin loukkaantumisiin tai ihmishenkien menetykseen [35].



Kuva 8 Räjähäntänyt muuntamo [36].

## 6.2 Osittaispurkausten ja läpilyöntien havaitseminen

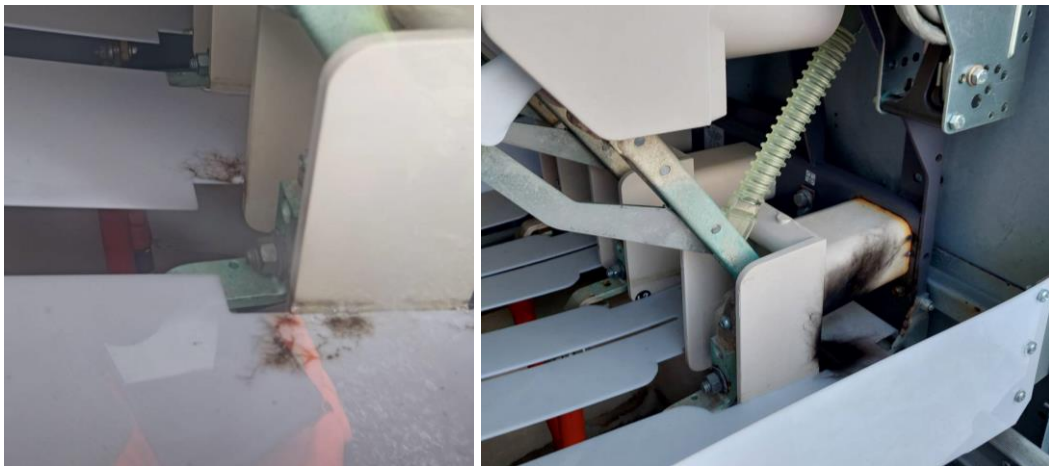
Monet asentajat ovat toistuvasti ilmoittaneet, että vikaantuneiden muuntamoiden läheisyydessä haisee voimakkaasti otsoni ( $O_3$ ) [37]. Otsonia muodostuu muuntamoissa, kun sähköpurkauksien energia erottaa ilman happikaasun atomeita toisistaan, jotka puolestaan reagoivat muiden happimolekyylien kanssa. Vaikka otsoni tavallisesti hajoaa nopeasti takaisin happikaasuksi ja muiksi yhdisteiksi, niin se pystytään havaitsemaan muuntamon läheisyydessä suurien pitoisuusmäärien vuoksi. [38.]

Muuntamokomponenttien sähköpurkaukset tuottavat myös korkeataajuisia ääntä, joka on mahdollista kuulla paljaalla korvalla muuntamon ulkoseinän vieressä ja se on erotettavissa muuntajakoneen hurinasta. Äänet esiintyvät heinäsiirkkää muistuttavana räätinänä tai surinana, ja ne voivat olla jatkuvia sekä ajoittaisia purkaustyyppistä riippuen. Rätinän voimakkuus usein kertoo, kuinka

pahassa kunnossa laitteisto on ja antaa osviittaa siitä, kuinka kauan kyseiset laitteet tulevat kestämaan. Sirinää ja rätinää esiintyy niin erottimissa kuin kaapelipääteissäkin. [37.] Mikäli muuntamosta kuuluu voimakasta sirinää ulkopuolelle, huoltotoimenpiteiden tekeminen ei välttämättä ole mahdollista turvallisuussyistä [39].

### 6.3 Palojäljet

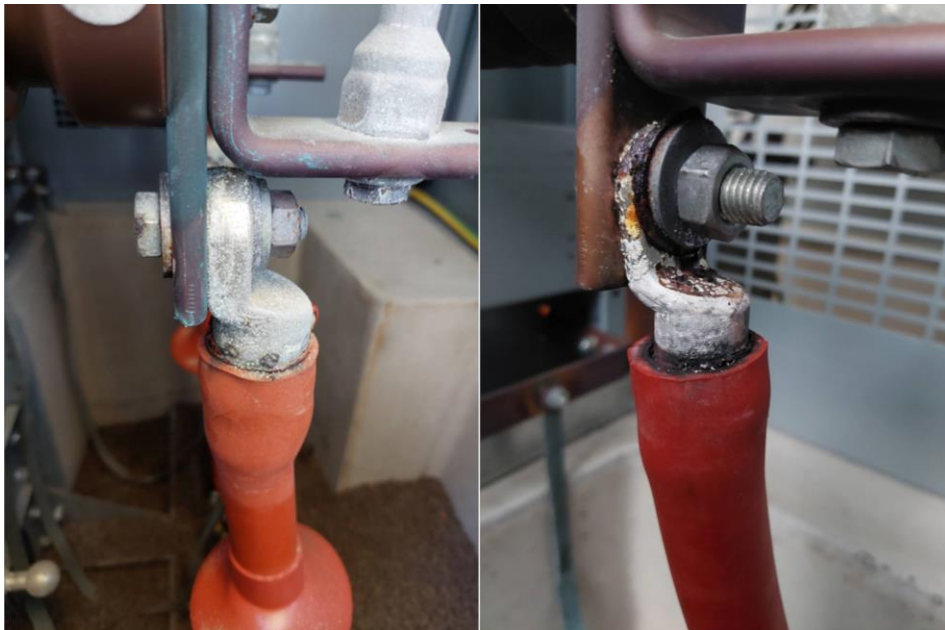
Sähköpurkauksien voimistuessa ajan myötä, todennäköisyys komponenttien pysyvälle vaurioitumiselle kasvaa. Tietyissä pisteissä erottimien eristerakenne pettää vuotovirran seurauksena ja purkaukset alkavat polttaa erotinrakenteita sekä niiden ympäröiviä osia sähkön etsiessä reittiä pienimmällä vastuksella. Kuvassa 9 on esitetty erottimia, joissa näkyy jo selkeitä sähköpurkausten aiheuttamia palojälkiä eristeessä ja ympäröivässä vaaleissa suojapleksissä. Tällainen havainto tarkoittaa usein sitä, että erottimet ovat jo vakavasti vialliset ja ne on uusittava lähiaikoina, sillä palojälkiä ei pitäisi esiintyä ollenkaan normaaleissa käyttöolosuhteissa. Suojapleksien poistamisella on todettu olevan hidastava vaikutus sähköpurkausten etenemiseen [37].



Kuva 9 Sähköpuita ja palojälkiä erotinrakenteissa [36]

## 6.4 Värjäytyminen & Hapettuminen

Erottimien ja kaapelipäätteiden hapettuminen sekä värjäytyminen ovat usein ensimmäisiä merkkejä siitä, että näiden osien elinkaari alkaa olemaan lähellä loppuaan. Kuvassa 10 on eräiden muuntamoiden vikaantuneita kaapelipäätteitä, jotka on jouduttu vaihtamaan huonon kunnon takia. Molempien kaapelipäätteiden kaapelikenkä eli liitososa on hapettunut voimakkaasti, ja niiden päälle on muodostunut selkeä valkea kerrostuma. Lisäksi oikeanpuoleisen päätteen kiinnitysliitoksessa on havaittu merkkejä galvaanisesta korroosiosta ja toisessa muuntamossa kuparista valmistetut kiinnityskiskot ovat alkaneet patinoitua huomattavasti. Tämänkaltaisen voimakas hapettuminen ei ole näille osille normaalia, varsinkaan kun komponentit ovat olleet alle kymmenen vuotta vanhoja. Kaapelipäätteet voidaan tarvittaessa puhdistaa huollon yhteydessä, mutta tästä saatu hyöty on rajallinen, eikä estä ongelman uusiutumista [37.]



Kuva 10 Hapettumisen ja korroosion merkkejä päätteissä [36]

Vaalean kerrostuman tarkkaa kemiallista koostumusta ei olla saatu selville, mutta kyseisissä olosuhteissa alumiinin ja sinkin oksidit sekä typpihapon suolat eli nitraatit ( $x\text{-NO}_3^-$ ), kuten alumiini- ja sinkkinitraatti ovat mahdollisia yhdisteitä,

joita johtimen pinnalle saattaa kertyä. Nitraatit ovat nitriitti-ionin sisältäviä suoloja, joilla on hyvä sähkönjohtokyky. [40.] Todennäköisin selitys nitraattien muodostumiselle on, että kun ilman typpi- ja happikaasu reagoivat keskenään korkeassa lämpötilassa, sähköpurkauksessa syntyvä lämpöenergia käynnistää reaktion, jossa muodostuu typen oksideja. Tätä ilmiötä hyödynnetään Birkeland-Eyde-prosessina tunnetussa menetelmässä, missä korkeajännitteisellä valokaarella tuotetaan typpioksideja. Typpidioksidin liuetessa veteen muodostuu typpihappoa ( $\text{HNO}_3$ ), joka on voimakas hapetin ja mahdollistaa nitraattien muodostumisen esimerkiksi metallien kanssa reagoidessaan. [41; 42.]

## 6.5 Vian leviäminen läheisiin komponentteihin

Carunalla on tehty havainto komponenttien vikaantumisiin liittyen: yhden komponentin alkaessa näyttää sähköpurkausten tai muiden vikojen merkkejä, muutkin läheiset komponentit kopissa ovat alkaneet oireilla pian ensimmäisen jälkeen, vaikka ensimmäinen olisi jo vaihdettu uuteen. Tämän vuoksi muuntamosta täytyy usein vaihtaa esimerkiksi useampia erottimia kerralla, mikä näkyy selvästi korjauskustannuksissa. Useita komponenttia vaihdettaessa ongelmaksi muodostuu myös osien saatavuus, sillä joissain tapauksissa saatavuus saattaa olla heikkoa ja toimitusaika pitkä. Vikaantumisen leviäminen on huonosti tunnettu ilmiö, joten sen ennaltaehkäisyyn ei ole vielä löydetty selvää ratkaisua. Yhtenä mahdollisena teoriana kuitenkin pidetään sähköpurkausten sivutuotteena syntyviä palamisen tuotteita, kuten kaasuja ja partikkeleita, jotka kiinnittyvät muiden komponenttien pinnalle. [43.] Tällöin esimerkiksi eristeen sähkönjohtavuus saattaa muuttua, mikä ajan myötä johtaisi uusiin purkauksiin [6, s. 59].

## 6.6 Asiakashaitta

Kun puistomuuntamo hajoaa tai alkaa näyttämään vikaantumisen merkkejä, paikalle kutsutaan urakoitsijan asentajat tekemään korjauksia ja tarpeellisia toimenpiteitä. Nämä korjaustoimenpiteet kuitenkin vievät vaihtelevan määrän

aikaa vahingon laajuuden mukaan, joten asiakkaat saattavat joutua odottamaan ilman sähköä pitkiäkin aikoja. Erityisesti yllättävät sähkökatkot ovat hyvin epäkäytännöllisiä kuluttajan kannalta, sillä useimmat arki- ja työelämässä käytettävät laitteet vaativat sähköä toimiakseen. Korjaukset voidaan kuitenkin usein suorittaa suunnitellusti sopivana ajanhetkenä, jolloin sähkönjakelun käyttökatkos tietyille alueelle pystytään minimoimaan. [44.]

Sähkömarkkinalain mukaan sähkön loppukäyttäjällä on oikeus vakiokorvaukseksi nimettyyn rahalliseen hyvitykseen pitkittyneen (yli 12 h) sähkönjakelun keskeytyksen vuoksi. Lyhempien katkoksen ajalta käyttäjän on myös mahdollista hakea vahingonkorvausta tai hinnanalennusta verkkoyhtiöltä. Korvaussummat ovat sidoksissa vuosittaisiin siirtopalvelumaksuihin. [45.]

Yhden muuntamon perään kuuluvaan muuntopiiriin eli jakelualueeseen saattaa kuulua kymmenistä jopa kolminumeroiseen määrään asiakkaita, minkä vuoksi pitkät sähkökatkot saattavat tulla kalliiksi verkkoyhtiön kannalta. Pitkittyneen ja laajamittaisen asiakashaitan välttämiseksi voidaan menetetty sähkönsyöttö korvata varavoimakoneiden avulla, mutta niiden käyttö ei ole myöskään vuokra- ja polttoainekustannusten vuoksi pitkillä ajanjaksoilla taloudellisesti kannattavaa, koska koneiden täytyy olla jatkuvasti toiminnassa vian korjaamisen aikana [46].

## **7 Vikaantumiseen vaikuttavat tekijät**

Selvityksessä tutkittiin muuntamoissa vallitsevia olosuhteita erilaisten mittalaitteiden avulla, vertailtiin komponenttien vikaantumismääriä sekä soveltuvuutta kyseisiin olosuhteisiin ja arvioitiin maantieteellisen sijainnin vaikutusta vikaantumiseen. Lisäksi tarkasteltiin lämmityksen ja lämpöhäviöiden vaikutusta muuntamoiden vikaantumisen sekä kondensaation ehkäisyyn. Näiden tekijöiden ymmärtäminen koettiin Carunalla oleelliseksi vikaantumisten syiden selvittämiseksi ja ei-toivottujen korjausten vähentämiseksi tulevaisuudessa.

Carunan kokemusperäisen oletuksen mukaan korkea ilmankosteus ja veden tiivistyminen komponenttien pinnoille on yksi merkittävimmistä vikaantumista aiheuttavista tekijöistä muuntamoissa [13]. Korkean kosteuden on myös tavallisesti todettu vaikuttavan sähkölaitteiden ja eristeiden toimintaan negatiivisesti, minkä lisäksi erilaiset saasteet ja partikkelit, joita muuntamokopin ilmassa on, saattavat vaikuttaa vikaantumisen nopeutumiseen ja leviämiseen [6, s. 59–60].

## 7.1 Puistomuuntamoihin asennetut mittalaitteet

Carunalla on noussut tarve tutkia tarkemmin puistomuuntamoiden sisällä vallitsevia olosuhteita. Tämän vuoksi muuntamoihin on alettu asentaa jonkin verran IoT-antureita, joiden avulla olosuhteita pystytään seuraamaan etänä. Valtaosa mittareista on varustettu tavanomaisilla olosuhdeanturien ominaisuuksilla, joita ovat esimerkiksi ilmankosteuden, lämpötilan ja kastepisteen mittaaminen. Näiden IoT-antureiden tuottama dataa on toistaiseksi hyödynnetty melko vähän, sillä konsepti on toiminnassa melko uusi, eikä antureita ole paljon puistomuuntamoiden määrään nähden.

Vikaantuvien muuntamoiden olosuhteita haluttiin ymmärtää hieman enemmän, mitä varten hankittiin pilottiluontoisesti 3 kpl monipuolisilla ominaisuuksilla varustettuja olosuhdemittalaitteita (AQ09 rugged, valmistaja Small Data Garden) asennettavaksi eri puistomuuntamoihin. Laitteiden asentamisen avulla pyrittiin ymmärtämään erilaisia ilmiöitä, jotka voisivat selittää vikaantumiset. Yhtenä tutkittavana kohteena oli, näkyvätkö mahdolliset osittaispurkausten synnyttämät yhdisteet tai partikkelit datassa ja voitaisiinko tämän avulla tehdä ennakoivaa huoltoa. Tällöin komponenttien elinikää olisi mahdollista pitkittää joitakin kuukausia tai vuosia. Olosuhdeantureiden tuottamaa dataa ei voida verrata laboratorio-olosuhteissa tehtyisiin mittauksiin, mutta niiden avulla voidaan esittää suuntaa antavia arvioita.

Kyseisillä AQ09-mittareilla pystytään tarkastelemaan lämpötilan ja ilmankosteuden lisäksi myös haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) sekä

PM2.5- ja PM10-partikkeleiden pitoisuutta ilmassa. Mitta-antureiden on suunniteltu toimivan vaativissa olosuhteissa, kuten rakennustyömailla ja konepajoilla, mutta myös esimerkiksi kovassa pakkasessa. Laite toimii pattereilla ja se on mahdollista asettaa tason päälle tai kiinnittää seinään. Mittausdata päivittyy puolen tunnin välein suoraan Digita Oy:n ylläpitämään pilvipalveluun, josta sitä on mahdollista tarkastella ja verrata eri antureiden välillä. [47.]

Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä syntyy esimerkiksi erilaisten muovien, kuten polymeerien epätäydellisestä palamisesta [48]. Sähköverkon varusteiden eristerakenteissa hyödynnetään monipuolisesti erilaisia polymeerejä, joten arveltiin, että muuntamoissa tapahtuvat sähköpurkaukset synnyttäisivät haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, kun eristeet altistuvat purkauksille. Aikaisempaa dataa tällaisten laitteiden käytöstä ei ollut, joten VOC-arvoja mittaavien antureiden hyödyntäminen tähän tarkoitukseen lähti aavistuksesta.

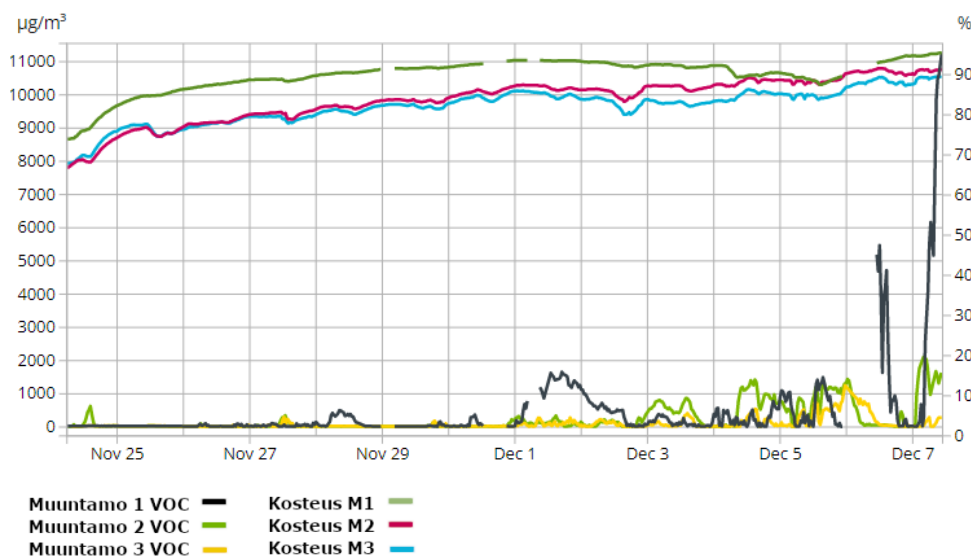
Mittarien asennus puistomuuntamoihin

Olosuhdemittarit päätettiin sijoittaa alueelle, jossa on havaittu poikkeuksellisen paljon hajonneita puistomuuntamoita. Paikaksi valikoitui alue A, joka sijaitsee Lounais-Suomen rannikolla. Alueelta A valittiin kolme muuntamo, joiden sisään asennettiin kuhunkin yksi mittalaite. Tutkimuksen otanta oli melko pieni, mutta pääasiallisena tarkoituksena oli tarkastella, olisiko vikaantuminen havaittavissa tällä menetelmällä. Anturit päästiin asentamaan marraskuun loppupuolella, ja ne asennettiin kohteisiin, joissa oli syksyllä tehtyjen tarkastusten yhteydessä todettu vikaantumisen merkkejä. Asennukset suoritettiin yhteistyössä Carunan urakoitsijan kanssa, joka on vastuussa kyseisen alueen sähköverkon kunnossapidosta. Seuranta jatkettiin aktiivisesti maaliskuun puoliväliin asti.

- Muuntamo 1 valittu koska erottimet uusittu vuonna 2021, mutta nyt vioittunut: Katsotaan selittääkö jokin nopeaa vioittumista.
- Muuntamo 2 valittu koska sirisee, mutta ei vielä ollut tarvetta vaihtaa. Oletuksena on, että tämä tulee vaihtaa tulevaisuudessa.

- Muuntamo 3 ei ole tehty korjaustoimenpiteitä, otettu muovit pois ns. ”pelastettu”. Odotettavissa, että hidastaa läpilyönnin alkamista.

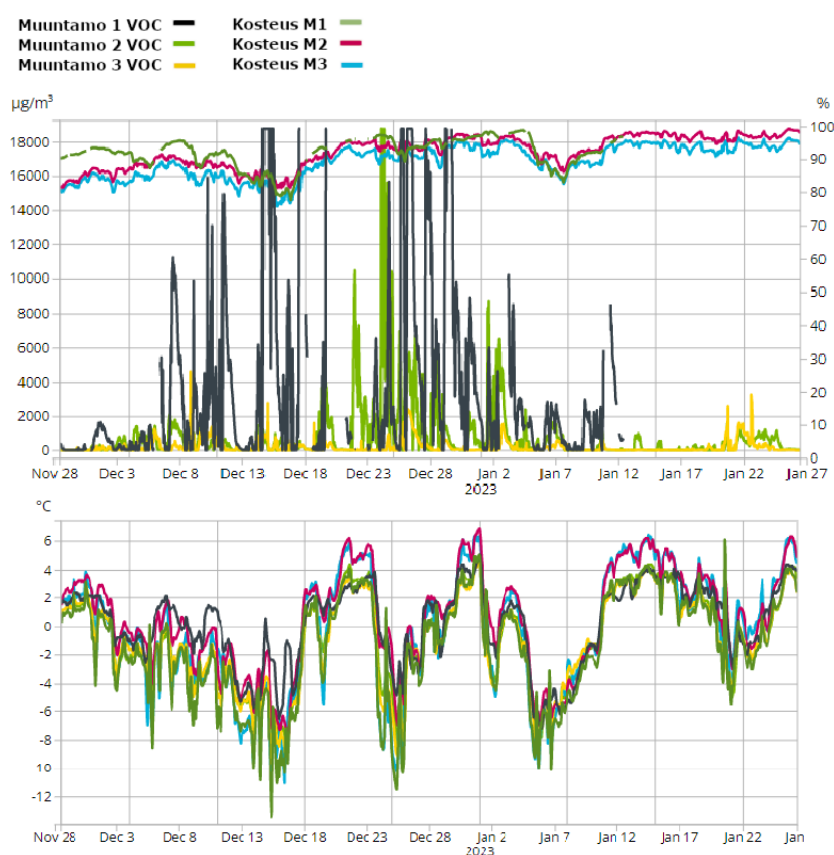
Kuvassa 11 on mittarien tuottamaa dataa noin kahden viikon ajalta asennuksesta. Kaaviossa vasemmalla on esitetty haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuus ja oikealla suhteellinen ilmankosteus. Kaaviosta voidaan huomata, että VOC-arvot ovat nousseet muuntamossa 1 rajusti, sillä pitoisuudet ylittivät  $10\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Urakoitsija oli joulukuun alussa käynyt kyseisellä kohteella ja todennut, että sähköpurkaukset muuntamon sisällä olivat silloin pahentuneet hieman asennushetkestä. Yleisesti ottaen on myös huomattavaa, että arvot ovat alkaneet muuttua muuntamon suhteellisen kosteuden noustessa korkeammaksi. Toistaiseksi havainnot tukevat teoriaa, jonka mukaan suhteellisen kosteuden nousu on merkittävässä roolissa vikaantumisen ilmenemiseen. Partikkelimittauksen (PM2.5 ja PM10) avulla ei löydetty korrelaatioita vikaantumiseen.



Kuva 11 Mittarien tuottama data asennuksen jälkeen [49].

Antureita ja niiden tuottamaa dataa seurattiin viikoittain. Kuvassa 12 on mittaridataa kahden kuukauden ajanjaksolta. VOC-arvot sekä kosteusprosentti ovat molemmat käyneet ajoittain hyvin korkeissa arvoissa, jopa lähellä

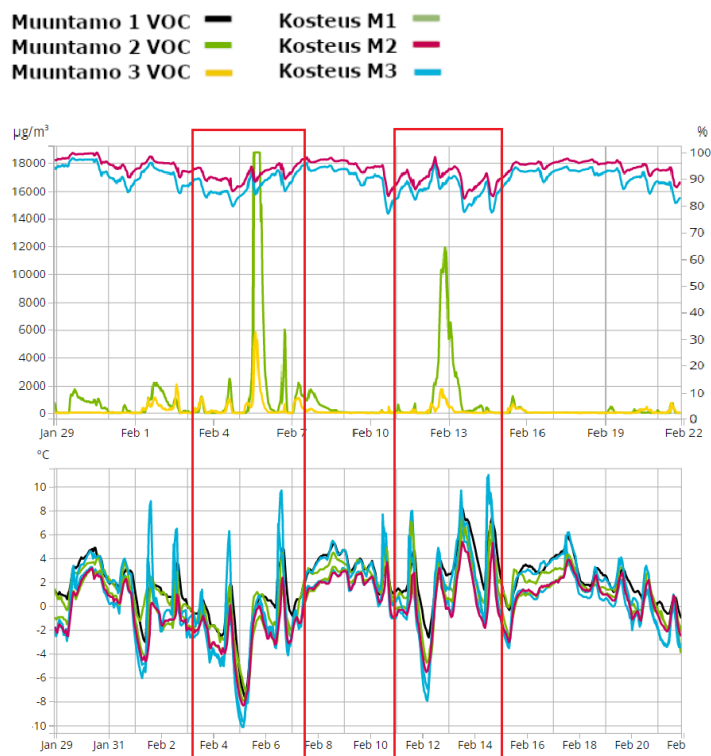
maksimia. Alkuperäisissä arvioissa korkea suhteellinen ilmankosteus olisi ollut merkittävin tekijä vikaantumisten ilmaantumisessa. Samalta ajanjaksolta otettiin tarkasteluun myös eri mittarien lämpötiladataa, jotta pystyttäisiin vertailemaan lämpötilan muutoksia suhteessa VOC-arvoihin minkä perusteella havaittiin, että nopeilla lämpötilavaihteluilla voisi olla merkittävämpi yhteys sähköpurkausten syntyyn ja VOC-arvojen nousuun. Tämä selittyy sillä, että suurilla lämpötilavaihteluilla muuntamon laitteistot altistuvat enemmän kondensoitumiselle, varsinkin kun lämpötilat käyvät 0 °C:n molemmilla puolilla.



Kuva 12 olosuhdeanturien mittadataa kahden kuukauden ajanjaksolta lämpötilojen kanssa [49].

Yksi mittareista (muuntamo 1) lopetti kommunikoinnin kokonaan tammikuun 2023 puolivälissä, mutta muuntamoiden 2 ja 3 laitteet kuitenkin toimivat odotetulla tavalla. Muuntamon 1 vikaantuminen oli jo edennyt niin pitkälle, että KJ-puolen komponentit tilattiin uusittavaksi. Tämä oli myös sama muuntamo, jossa VOC-anturin datakäyrä oli kaikkein aktiivisin ennen kuin kyseinen laite

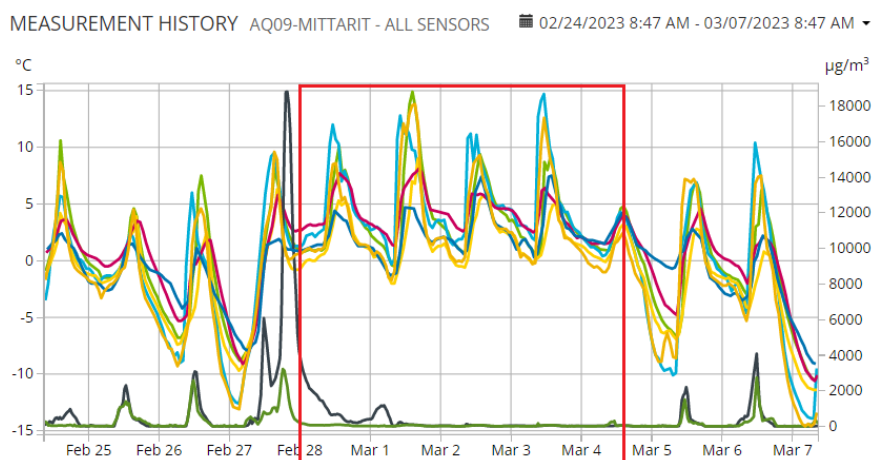
lakkasi toimimasta. Muuntamoiden 2 ja 3 senhetkisestä kunnosta ei ollut tietoa. Kuvassa 13 on AQ09-anturien mittadetaa helmikuulta. Suurimpana huomiona havaittiin edellistä tilanpäivitystä myötäillen, että VOC-pitoisuuden arvot kohosivat korkeisiin arvoihin pian sen jälkeen, kun ilman lämpötila alkoi nousemaan nopeasti pakkaseen puolelta yli 0 °C:n, jolloin vesihöyryn oli mahdollista alkaa tiivistyä nesteeksi pinnoille. Urakoitsija oli myös käynyt tarkistamassa muuntamoiden 1 ja 2 tilanteen ja todennut, että sähköpurkaukset olivat lisääntyneet ja voimistuneet edellisen tarkastuskerran jälkeen.



Kuva 13 IoT-anturien mittadetaa tammi-helmikuulta [49].

Kuvassa 14 on lämpötilojen ja VOC-arvojen kuvaaja maaliskuun alusta. Tällöin oli viiden päivän ajanjakso, jolloin lämpötila pysyi pääsääntöisesti nollan celsiusasteen yläpuolella. Lämpötilat on otettu eri muuntamoiden IoT-mittareilta, kuin missä VOC-anturit sijaitsevat, sillä näistä kohteista ei saatu luotettavaa dataa. Maantieteellisesti lämpötilamittarit ovat kuitenkin samalla alueella. Tänä aikana muuntamoiden 2 ja 3 VOC-arvot mittarien aktiivisuus oli hyvin vähäistä

ja pitoisuudet olivat käytännössä tavallista sisäilmaa vastaavalla tasolla. Ilman kosteusprosentti vaihteli kyseisellä ajanjaksolla 65–94 % [49].



Kuva 14 maaliskuun lämmin ajanjakso [49].

Keskimääräinen kosteusprosentti mittarien asennushetkestä maaliskuun alkupuolelle asti on ollut 89,5 %. Datasta löytyy ajankohtia, jolloin suhteellinen ilmakeuhuus on ollut pitkiäkin aikoja huomattavan korkea, mutta sen perusteella ei ole huomattu samanlaista korrelaatiota haihtuvien orgaanisten yhdisteiden esiintymiseen ja sähköpurkausten määrään, kuin nopeilla lämpötilanvaihteluilla. Partikkeleita mittaavan anturin tuottamassa datassa ei ollut edelleenkään merkittäviä poikkeamia normaalitilaan.

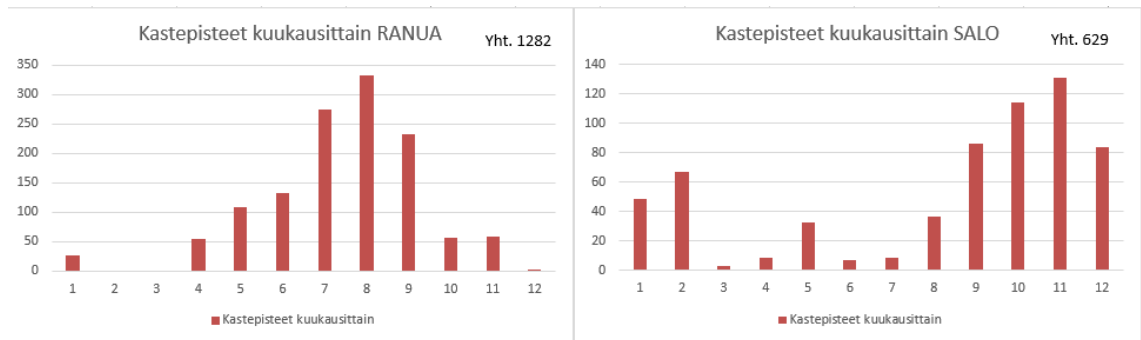
## 7.2 Säätilavertailu

Sen lisäksi, että vikaantumistapauksia tulee esiin erityisesti syys- ja kevätkausien aikana, niin on havaittu, että Koillismaalla vikailmoituksia ei tule juuri ollenkaan, kun taas esimerkiksi Lounais- ja Etelä-Suomessa tapauksia on huomattavasti enemmän. Näiden alueiden olosuhteita haluttiin verrata keskenään, jotta saataisiin ymmärrys vuodenaikojen vaikutuksesta pohjoisemman ja eteläisemmän Suomen sähköverkkojen kuntoon.

Ilmatieteen laitoksen avoimen datan avulla valittiin kaksi mittapistettä, joista tarkasteltiin alueiden lämpötiloja ja niiden vaihtelua vuoden 2022 ajalta.

Ensimmäinen datapiste valittiin Lounais-Suomesta Salosta ja toinen Koillismaalta Ranualta. Salon ja Ranuan alueelta valitut mittapisteeet eivät täysin edusta muuntamoiden sisätilaa vastaavaa ilmanlaatua, sillä muuntamoissa oleva laitteisto voi vaikuttaa jonkin verran esimerkiksi lämpötilaan ja partikkelien määrään ilmassa. Muuntamot eivät ole kuitenkaan ole täysin ilmatiiviitä rakennelmia, ja näiden sisätilojen olosuhteet ovat jossain määrin verrattavissa ulkoilmaan. Selvityksessä ei käytetty Carunan mittalaitteiden tuottamaa dataa, sillä tätä ei ollut kattavasti saatavilla halutuilta alueilta, ja sen käsittely pitkältä aikaväliltä tuotti haasteita. Liitteessä 2 on esitetty lämpötilavaihtelut vuoden ajalta Salon ja Ranuan alueilta. Lämpötilagraafit on luotu päivän minimi- ja maksimiarvojen avulla ja lisäksi näiden erotus on kuvattu samaan taulukkoon. [50.]

Datan perusteella voidaan havaita, että lämpötilojen vaihteluväli eli delta-arvo minimi- ja maksimiarvojen välillä on sekä pohjoisessa että etelässä samankaltainen eikä näissä ole havaittavissa suurta eroa, vaikka alueiden keskilämpötilat eroavat jonkin verran toisistaan. Vuoden keskilämpötila Ranualla on 2,3 °C, mikä oletuksen mukaisesti matalampi kuin Salon alueella, missä vastaava arvo on 5,8 °C. Kuvassa 15 on taulukoitu mittadatan kastepisteet vuoden ajalta. Niihin on laskettu kaikki ne hetket vuoden ajalta, jolloin lämpötila on ollut nolla celsiusastetta tai sen yli. Mitta-arvot ovat päivittyneet tunnin välein. Kastepistetilaston vertailussa todettiin, että vaikka Ranua sijaitsee hieman yli 600 km pohjoisemmassa kuin Salo, niin ilman lämpötila käy kyseisellä alueella kastepisteessä kaksinkertaisesti verrattuna Lounais-Suomeen. (Ranua: 1282, Salo: 629). Kastepistejakauma oli alueilla kuitenkin melko erilainen, sillä Ranualla valtaosa kastepisteistä mitattiin kesän aikana, kun taas Salon alueella kastepisteitä havaittiin eniten alku- ja loppuvuoden kosteiden kuukausien aikana eli syksyllä sekä talvella. [50.]



Kuva 15 Kuukausittainen kastepistejakauma Ranuan ja Salon alueilla [50].

Näiden tulosten perustella Lounais-Suomessa on havaittavissa korrelaatiota komponenttien vikaantumisten ajankohdalla ja kastepisteiden kuukausijakauman välillä. Päinvastaisesti Ranualla (Koillismaa), missä vikaantumisia ei ole juurikaan havaittu, ilman kastepisteet jäivät suhteessa paljon vähäisemmiksi samoihin vuodenaikoihin nähden. Tämä vahvistaa teoriaa siitä, että olosuhteilla on merkittävä vaikutus vikaantumisten alkamiseen ja että veden tiivistyminen pinnoille tiettyinä vuodenaikoina on erityisen haitallista keskijännitekomponenttien toiminnalle.

### 7.3 Käytettyjen komponenttien valinta

Yhtenä vaikuttavana tekijänä muuntamoiden vikaantumisessa arvioitiin asennettujen laitteiden ja osien soveltuvuutta kyseisiin kohteisiin. Tietyn tyyppisiä erottimia ja päätteitä on alkanut vikaantua huomattavia määriä, minkä vuoksi heräsi kysymys käytettyjen komponenttien olosuhdeluokituksesta. Caruna oy käyttää puistomuuntamoissaan sekä sisä, että ulkotiloihin tarkoitettuja erottimia ja päätteitä. Muuntamot voidaan teknisesti ottaen määritellä sisätilaksi, mutta todellisuudessa olosuhteet tarkastelussa olevien puistomuuntamoiden sisällä muistuttavat auringonvaloa ja sateita lukuun ottamatta usein melko paljon ulkotiloja, sillä ilma pääsee kiertämään kopin ulkoseinän ja sisätilan välillä. Kentältä on myös raportoitu havaintoja siitä, että muuntamoiden operointiolosuhteet ovat toisinaan melko haastavat, mikä on havaittavissa lisäksi olosuhdetarkastelun tulosten perusteella. Useissa

vikaantuneissa muuntamoissa näkyy esimerkiksi selkeitä merkkejä runsaasta kosteudesta, eikä kaikkia osia ole välttämättä suunniteltu tätä varten [37].

### Erottimien luokittelu

Valtaosa Caruna Oy:n kohdetyypin muuntamoihin vuosina 2014–2018 asennetuista erottimista on tiettyä tyyppiä, jonka on huomattu vikaantuvan huomattavasti useammin, kuin on oletettu [13]. Vikaantumisprosentti tämän kategorian erottimille oli tutkimushetkellä noin 12 % [51]. Poikkeuksellisen vikaantumismäärien vuoksi haluttiin selvittää, millaisia olosuhteita komponentit on suunniteltu kestämään ja vastaako Suomen ilmasto näitä olosuhteita. Standardi SFS-EN 62271-1 määrittelee sisä- ja ulkotiloihin asennettävien erotinlaitteiden vaatimukset olosuhdekestävyyden osalta sekä näiden normaalit käyttöolosuhteet. Sisätiloihin tarkoitettujen erotinlaitteiden normaaleihin käyttöolosuhteisiin kuuluu muun muassa seuraavat kohdat [52, s. 28]:

- a) Laitteiden ympäröivä lämpötila pysyy -5 ja +40 celsiusasteen välillä.
- b) Ympäröivä ilma ei ole merkittävästi saastunut pölyn, savun, hapettavien/palavien kaasujen ja höyryjen tai suolojen vaikutuksesta.
- c) Suhteellisen kosteuden keskiarvo ei ylitä 95:tä prosenttia vuorokauden aikana eikä 90:tä prosenttia kuukauden ajanjaksolla.

Lisäksi standardi IEC/TS 62271-304 määrittelee vielä erikseen erotinlaitteistolle tehtävät rasitustestit sekä käyttöluokituksen ilmansaasteiden ja kondensaation määrän perusteella. Liitteessä 3 on selitetty luokitteluasteet 0–2 ja niiden selitykset [53, s. 6–7]. Tutkinnan perusteella kävi ilmi, että suuri osa puistomuuntamoihin asennetuista erottimista vastaavat määritelmältään sisätiloihin tarkoitettua luokkaa 0. Käytännössä tämä tarkoittaa, että laitteet on suunniteltu kestämään vain hyvin kevyttä saastemäärää ja kondensaatiota ei oleteta syntyvän kuin muutaman kerran vuodessa [54]. Standardin IEC 62271-304 mukaan erottimia rasitetaan ikääntymistesteissä 20 asteen lämpötilavaihteluilla korkeassa suhteellisessa ilmankosteudessa, jotta vesihöyry

saadaan tiivistymään pinnoille [53, s. 9]. IoT-anturien mittausdatan perusteella lämpötila saattaa muuttua realistisessa ympäristössä aamun ja keskipäivän välillä yli 20 °C, mikä ylittää testin lämpövaihteluvälin.

Nämä seikat ovat olisi hyvä huomioida, kun Caruna Oy:lle hankitaan uusia erottimia. Puistomuuntamoiden sisällä vallitsevat olosuhteet on mahdollisesti arvioitu lievemmiksi, kuin ne toisinaan ovat todellisuudessa, ja tämän vuoksi hankittujen erottimien on aikanaan luultavasti uskottu olevan tarpeeksi korkean luokituksen omaavia. Caruna Oy on alkanut vuodesta 2019 alkaen vaihtaa viankorjausten yhteydessä muuntamoihin olosuhdeluokan 2 erottimia, joissa esimerkiksi eristimen ryömintäetäisyydet ovat pidemmät, kuin aiemmin käytetyssä mallissa. Toistaiseksi näiden uusien erottimien on todettu kestävän hyvin haastavissakin olosuhteissa [55].

#### Päätteiden vertailu

Päätteiden osalta todettiin, että sisä- ja ulkopäätteissä käytetään hieman eri materiaaleja sillä eristeen sähkölujuusvaatimukset vaihtelevat näiden välillä. Myös ryömintämatkat ovat näissä lähtökohtaisesti eripituiset, sillä ulkopäätteet on tehty kestävämpään haastavampia olosuhteita. Carunan käyttämistä kaapelipäätteistä valittiin kaksi valmistajaa, joiden päätteitä on määrällisesti eniten kohdetyypin muuntamoissa. Haluttiin selvittää, kuinka paljon eri valmistajien kaapelipäätteiden vikaantumisprosentit eroaisivat toisistaan. Lisäksi pystyttiin vertailemaan sisä- ja ulkopäätteiden eroja, sillä molempia on asennettu puistomuuntamoiden sisään. Urakoitsijan arvion mukaan ulkopäätteet ovat kestäneet paremmin kenttäolosuhteissa [37].

Liitteessä 4 on esitetty kohdetyypin muuntamoissa olevien kaapelipäätteiden ja vikaantumismäärät kahden eri valmistajan osalta. Valmistajan E päätteitä on ollut verkossa vuoden 2023 alussa noin 4 600, joista noin 4 000 oli sisäpäätteitä. Valmistajan R -päätteiden osuus puolestaan oli noin 10 900, joista sisäpäätteitä oli hieman yli 10 700. Ulkopäätteitä oli kokonaisuudessaan 820, mikä on huomattavan pieni otanta, kun yhteensä tarkastelussa olevia päätteitä

oli noin 15 600. Tulosten hankkimisessa käytettiin Carunan ajankohtaista verkkotietodataa. Data perustuu sähköverkon kunnossapitotietoihin, jotka päivitetään manuaalisesti, vaatii lähes aina kohteessa käyntiä. Ihmisten tekijöiden vuoksi osa havainnoista tai komponenteista saatetaan kirjata virheellisesti verkkotietojärjestelmään joko epähuomiossa tai informaation puutteen vuoksi, mikä voi vääristää lopputulosta jonkin verran.

Tutkimushetkellä vikaantumisprosentti valmistajan E päätteiden osalta oli 6,3 % ja valmistajan R vastaava lukema oli 1,3 %. Vaikka valmistajan R päätteitä oli verkossa yli kaksinkertaisesti enemmän, niin tutkimushetkellä näitä oli vikaantuneena määrällisesti vähemmän valmistajan E päätteisiin verrattuna. Kaikista tarkastelluista päätteistä vikaantuneita sisäpäätteitä oli 341 ja ulkopäätteitä 81 kappaletta. Lukumäärällisesti sisäpäätteitä oli vikaantunut yli nelikertainen määrä ulkopäätteisiin nähden, mutta asennettuun kokonaismäärään verrattuna tulos oli kuitenkin varsin erilainen: Ulkopäätteiden tulisi kestää oletuksen mukaan paremmin haastavia olosuhteita, mutta tässä tutkimuksessa ulkopäätteitä ilmeni prosentuaalisesti violliseksi huomattavasti enemmän kuin sisäpäätteitä. Sisäpäätteistä vikaantuneita oli tutkimushetkellä 2,3 % kohteista ja ulkopäätteistä puolestaan viollisia oli 9,9 %. Huomattavaa oli kuitenkin, että selkeä enemmistö (79 kpl) vikaantuneista ulkopäätteistä oli valmistajan E päätteitä.

Tutkimustulos vaikutti kyseenalaiselta, minkä takia viollisille ulkopäätteille tehtiin 13 kappaleen erillistarkastus hyödyntäen Carunan valokuvamateriaalia. Tarkastuksesta kävi ilmi, että 12 kpl päätteistä oli todellisuudessa sisäpäätteitä ja yhden päätteen tyyppi oli epäselvä. Tämä todennäköisimmin tarkoittaa sitä, että monet muutkin sisäpäätteet on aikoinaan virheellisesti dokumentoitu Carunan verkkotietojärjestelmään ulkopäätteiksi, eikä tutkimuksen data ollut luotettavaa niiden osalta. Tulosta saattoivat vääristää muutkin tekijät, mutta suurin näistä liittyy mitä ilmeisimmin datan laatuun. Verkkotietojärjestelmä päivittyy muuntamoiden osalta luonnostaan myös melko hitaasti ilman erityisiä toimenpiteitä, sillä normaali tarkastuskiikeli näille on noin kuusi vuotta [34]. Kaapelipäätteiden vikaantumistasetta sekä dokumentoinnin oikeellisuutta voisi

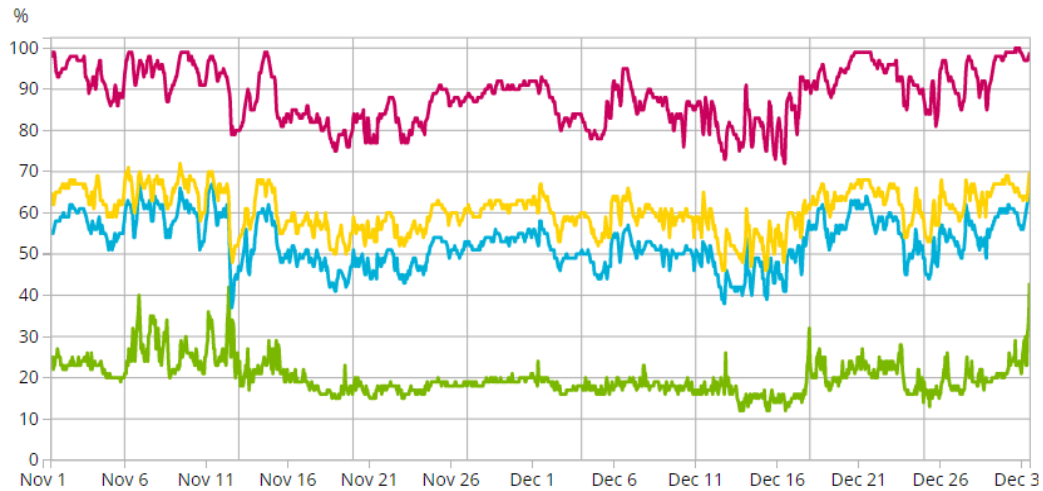
olla kannattavaa seurata tietyin väliajoin, jotta saadaan laajempi ymmärrys siitä, kuinka paljon päätetyypillä on todellisuudessa vaikutusta vikaantuvuuteen.

#### 7.4 Lämmityksen vaikutus sähköpurkausten esiintyvyyteen

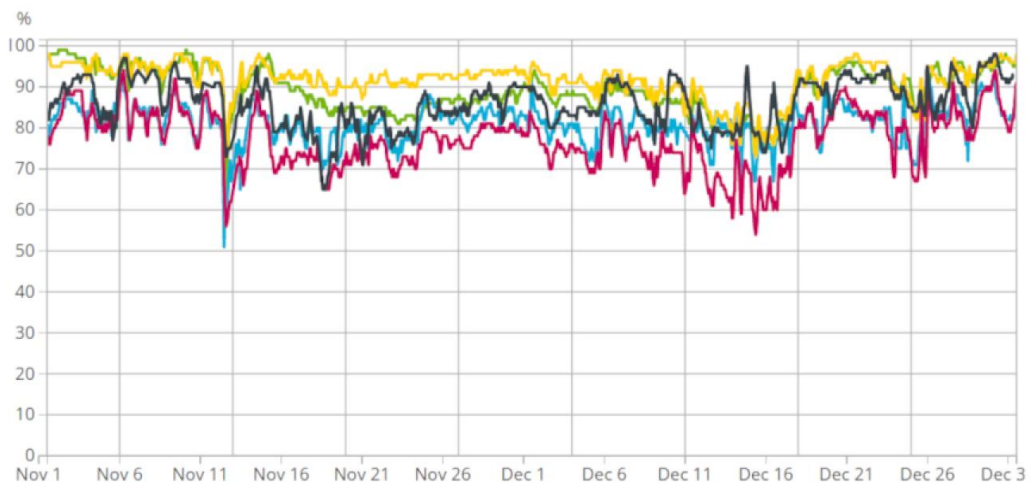
Muuntamoiden kosteusongelmien syyt ovat mahdollisesti kytköksissä siihen, että muuntajakopit eivät ole sisäpuolelta tarpeeksi lämpimiä estämään kondensaation syntymistä. Yhdessä Tampereen yliopiston tutkimuksessa selvitettiin lisälämmityksen vaikutusta osittaispurkausten määrään puistomuuntamoiden erottimissa laboratorio-olosuhteissa. Tämän tutkimuksen perusteella lämmityksen hyödyt olivat merkittävät ja osittaispurkausten aktiivisuutta saatiin heikennettyä vähäiselläkin lämmitysteholla. Tällöin erotinpintojen pintalämpötilaa saatiin nostettua, jotta ne eivät laske kastepisteeseen, jotta pinnoille tiivistyi vähemmän tai ei olleenkaan kosteutta. Tulokset viittasivat siihen, että lämmityksellä saatiin laskettua osittaispurkausten määrää ja hidastamaan erotinlaitteiston ikääntymistä. [56.]

Carunalla on ollut pilottiprojekti vuoden alkupuolella 2022, jossa asennettiin muutamien muuntamoiden sisään 200 W:n lisälämmittimiä, joiden avulla pyrittiin vähentämään muuntamoiden sisätilan kosteuden tiivistymistä. Toistaiseksi näissä kohteissa ei ole lämmittimen asentamisen jälkeen havaittu vikoja, jotka olisivat kytköksissä kosteuteen. Pilottiprojektin muuntamot varustettiin IoT-mittareilla myöhempää seuranta varten. Kuvassa 16 on vertailtu muutamien lämmittimillä varustettuja sekä lämmittämättömiä muuntamoiden IoT-mittarien dataa vuoden 2022 kahdelta viimeiseltä kuukaudelta. Kuvaajasta voidaan huomata, että suhteellinen kosteusprosentti laskee lämmityksen seurauksena.

MEASUREMENT HISTORY  
MUUNTAMOT LÄMMITTIMILLÄ



MEASUREMENT HISTORY  
MUUNTAMOT JOISSA VIKAANTUNEITA EROTTIMIA

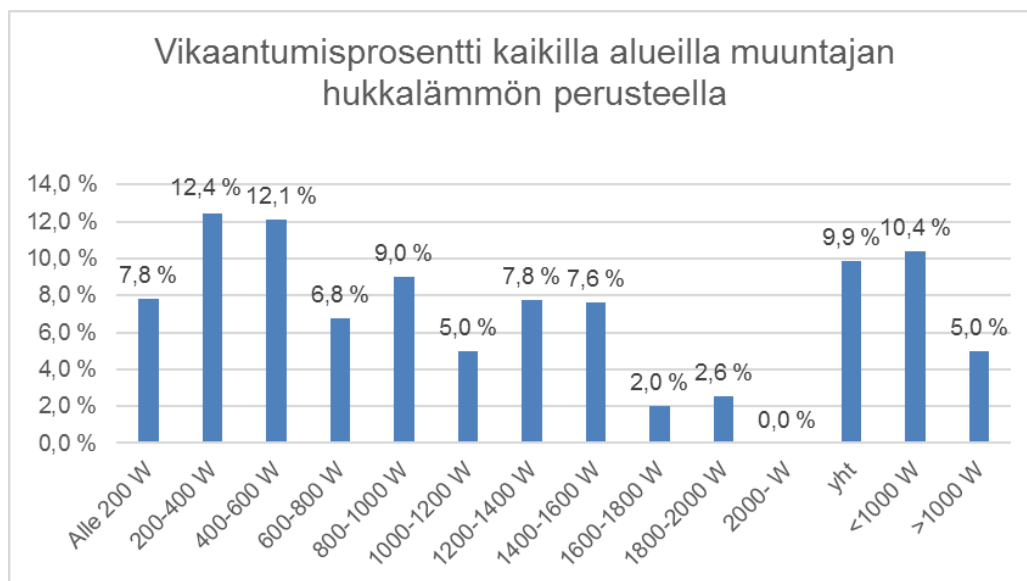


Kuva 16 Lämmityksen vaikutus suhteelliseen kosteuteen muuntamoissa [49].

Liitteessä 5 on lisäksi vastaavanlaiset graafit lämpötiloille samalta ajanjaksolta. Näistä graafeista huomataan, että lämmitetyissä muuntamoissa ilman lämpötila on n. 5–15 astetta lämpimämpää, kuin muuntamoissa, joihin lämmittimiä ei ole asennettu. Suhteellinen kosteus myös laskee kääntäen verrannollisesti lämpötilan noustessa. Pienen otannan ja lyhyehkön käyttöajan vuoksi lisälämmittimien tuottamia hyötyjä on vaikea arvioida todellisissa käyttöolosuhteissa, minkä vuoksi lämmittimien asentaminen useisiin muuntamoihin ei ole vielä taloudellisesti kannattavaa ennen kuin käytössä on enemmän dataa aiheeseen liittyen [57].

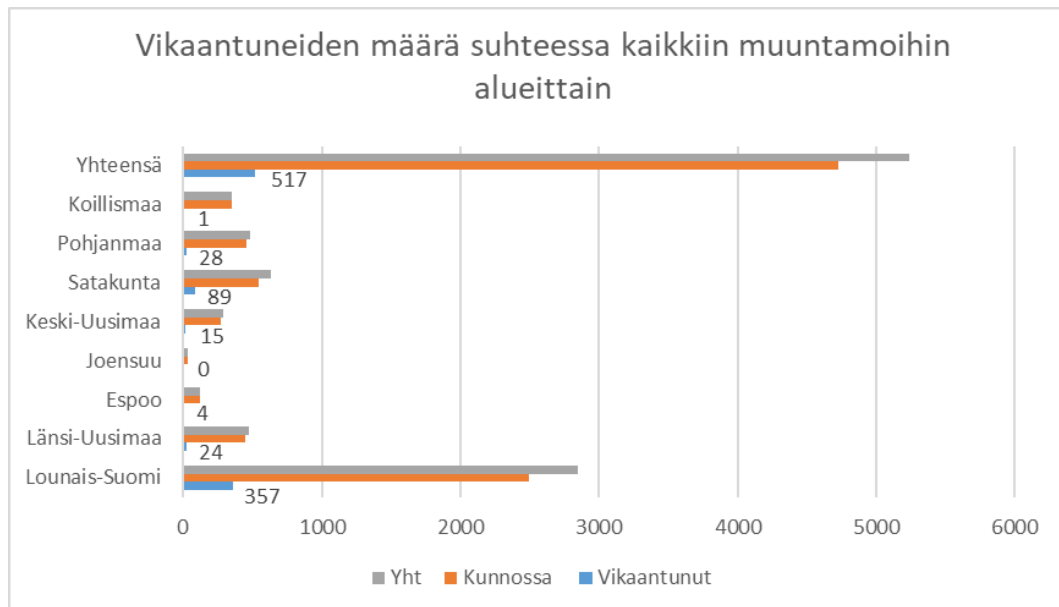
## Muuntamoiden lämpöhäviöt

Muuntamoissa syntyvien lämpöhäviöiden yhteyttä haluttiin verrata vikaantumisen ilmaantuvuuteen, minkä lisäksi pyrittiin tutkimaan sähköisten vikojen ilmaantuvuutta maantieteellisen sijainnin mukaan. Teorian mukaan joissain puistomuuntamoissa kosteus ei pääse toistuvasti tiivistymään pinnoille, sillä muuntajakoneen lämpöhäviöt lämmittävät tarpeeksi muuntamon sisätilaa. Lämpöhäviöt ovat verrannollisia muuntajan mitoitettuun näennäistehoon, joka puistomuuntamoissa on tavallisesti 50–800 kVA. Tavoitteena oli selvittää, onko vikaantuminen yleisempää, kun lämpöhäviöt ovat alhaisemmat. Häviöiden raja-arvoksi otettiin 1000 wattia (W), jonka alittavia ja ylittäviä muuntamoita verrattiin toisiinsa. Tarkasteluun otettiin kaikki kohdemallin puistomuuntamot, joiden kuormitustiedot saatiin haettua Carunan verkkotietojärjestelmästä. Kuvassa 17 on havainnollistettu muuntamoiden vikaantumisprosenttia suhteessa muuntamoiden sisällä syntyvään hukkalämpöön. Lisäksi liitteessä 5 on tarkkoja lukuja vikaantumisen ilmaantuvuudesta muuntajakoneen lämpöhäviöihin verrattuna.



Kuva 17 Muuntamoiden vikaantumisprosentti hukkalämmön suuruuden perusteella [51].

Kuvassa 18 on esitetty vikaantuneet kohdemallin muuntamot Carunan sähköverkossa vuoden 2022 alussa. Muuntamoiden vikaantumismäärät jaoteltiin maantieteellisten huoltoalueiden mukaan, jolloin vikaantumisen ilmaantuvuutta voitiin arvioida alueittain. Tarkasteluun otettiin mukaan myös kunnossa olevat muuntamot, jotta ehjien ja vikaantuneiden muuntamoiden suhdeluku oli mahdollista laskea.



Kuva 18 Muuntamoiden vikaantumismäärät alueittain [51].

Tämän datan perusteella olisi viitteitä siitä, että vikaantumisprosentti olisi noin 5 % korkeampi, silloin kun kuormitushäviöt olisivat alle 1000 W. Lisäksi vahvistettiin jo aikaisemmin tehtyjä havaintoja vikaantumisen yleisyydestä eri maantieteellisillä alueilla. Lounais-Suomessa ja Satakunnassa vikaantuminen oli merkittävästi todennäköisempää kuin muilla alueilla: Lounais-Suomessa luku oli noin 13 ja Satakunnassa noin 14 %, kun taas muiden alueiden vikaantumisprosentit olivat maksimissaan 7 %. Joensuun ja Koillismaan alueilla puolestaan ei tässä otannassa havaittu vikaantuneita kohteita yhtä muuntamoalukuun ottamatta. On kuitenkin huomioitavaa, että datan laadussa saattaa paikoitellen olla puutteita tai virheitä, mikä saattaa vaikuttaa tuloksiin hieman suuntaan tai toiseen.

## 7.5 Asennusvaiheessa vaikuttavat seikat

Kaapelipäätteiden rakentaminen sähkökaapeleiden päähän on monivaiheinen prosessi, joten niiden kanssa on mahdollista tehdä useita erilaisia asennusvirheitä, joiden seurauksena komponentit saattavat olla alttiimpia osittaispurkausten syntymiselle. Mahdollisia virheitä ovat esimerkiksi työkalujen jättämät urat ja naarmut, kerroksien väliin jääneet raot, epätasaisuudet ja ilmakuplat, pöly ja muut epäpuhtaudet, sekä teräväksi jätetyt reunat. Pienetkin tämäntyyppiset poikkeamat kaapelipäätteen eristerakenteessa voivat lyhentää osan elinkaarta huomattavasti ja aiheuttaa ajan myötä vakavia seurauksia. [58, s. 1.] Erottimien kohdalla olennaisia tekijöitä ovat liitoskohtien huolellinen puhdistaminen sekä sopivat kiinnitystarvikkeet. Asennusvirheiden todennäköisyys on pienempi, sillä erottimet toimitetaan asennusvalmiina paikan päälle ja välivaiheita, joissa virheitä voisi tapahtua on asennusvaiheessa näin ollen vähemmän [59.]

Asennusvirheiden syynä voi olla muun muassa väärät tai huonokuntoiset työkalut, haastavat asennusolosuhteet ja huolimattomuus. Tämän insinööriyön puitteissa komponenttien asennustapojen ja -virheiden tutkiminen jäi melko pienelle painoarvolle, sillä muuntamoissa vallitsevien olosuhteiden ymmärtämistä painotettiin enemmän. Erityisesti kaapelipäätteiden asennusmenetelmät sekä erilaiset kenttäolosuhteiden riskitekijät, jotka saattavat vaikuttaa päätteiden elinkaareen negatiivisesti, ovat huomionarvoisia tarkastelukohteita, kun tehdään jatkotutkimusta vikaantumisen juurisyiden selvittämiseksi. [58.]

Kaapelipäätteiden ja erottimien kiinnityskappaleet on usein valmistettu monesti alumiinista tai tinatusta kuparista. Alumiiniliitokset ovat alttiita erilaisille ympäristötekijöille, kuten korroosiolle, jota muuntamoissa on esiintynyt. Korroosion ehkäisemiseksi alumiini-kupariliitosten asentamisen yhteydessä tulisi käyttää liitosrasvaa suojaamaan komponentteja [60, s.144–145]. Liitosrasvan hyödyntämistä ei ole määritelty Carunan virallisissa ajantasaisissa ohjeistuksissa eikä sen käyttöä vaadita urakoitsijoilta tällä hetkellä [34].

Myöskään päätevalmistajien E ja R asennusohjeissa ei ole viittauksia liitosrasvan käytöstä [61; 62].

Lounais-Suomessa työskentelevän Carunan verkostoasentajan mukaan liitosrasvaa on käytetty entisaikaan enemmän, mutta nykyään sitä ei käytetä enää samassa laajuudessa ja ilmeisesti toimintamallit ovat vaihtuneet vuosien saatossa jonkin verran [37]. Tällä hetkellä ei ole tietoa siitä, kuinka yleistä rasvan käyttö liitoksissa on Carunan verkkoalueella, sillä jokaisella alueella ja urakoitsijalla on työskentelytavoissa pieniä eroja. Rasvauksen vaikutusta kaapelipääteiden elinkaareen tulisi tutkia enemmän, sillä sen avulla voisi mahdollisesti ainakin hidastaa vikaantumisten alkamista. Samalla selviäisi, miksi liitosrasvan käyttö on vähentynyt ajan myötä, vaikka tämä todennäköisesti olisi yhä tarpeellista.

## **8 Tulosten tarkastelu**

Insinööriyössä saatiin selville erilaisia tekijöitä, jotka vaikuttavat muuntamoiden keskijännitekomponenttien sähköiseen vikaantumiseen. Suurimpina tekijöitä olivat olosuhteet, käytettyjen komponenttien valinta ja asennusvaiheessa huomioon otettavat seikat. Lisäksi tunnistettiin erilaisia seikkoja ja tutkimusmenetelmiä, joita olisi hyvä ottaa huomioon jatkotutkimuksissa. Selvittämättä jäi myös jonkin verran asioita, joita voidaan mahdollisesti tarkastella tulevaisuudessa, mikäli Caruna Oy kokee niille tarvetta.

Opinnäytteen tutkimuksen aikana saatiin parempaa ymmärrystä muuntamon sisällä vallitsevista olosuhteista. IoT-anturien avulla saadun datan avulla huomattiin, että olosuhteet muuntamoissa muistuttavat toisinaan enemmän ulko- kuin sisäilmaa ja ovat näin haastavammat, kuin on aikaisemmin oletettu. näin ollen kuormittavat käyttöolosuhteet ovat yksi todennäköisistä syistä sille, että muuntamoissa alkaa esiintymään sähköpurkauksia. Esimerkiksi lämpötilavaihtelut saattavat paikoittain melko rajuja erityisesti kylmien kuukausien aikana, minkä vuoksi kondensaatiota esiintyy useammin, kuin olisi toivottavaa. Myös komponenttien likaantuminen saattaa kiihdyttää erilaisia

sähköpurkauksia. VOC-antureilla varustetuilla olosuhdemittareilla pystyttäisiin tutkimuksen datan perusteella arvioimaan suuntaa antavasti muuntamon keskijännitepuolen komponenttien kuntoa. Datan perusteella ei voida vielä täysin varmistaa, että VOC-mittareilla voitaisiin ennustaa osittaispurkausten tai muiden sähköpurkausten määrää muuntamoissa, mutta tutkimus kuitenkin antoi viitteitä siitä, että eristeiden epätäydellinen palaminen sähköpurkausten seurauksena olisi havaittavissa kyseisillä mittalaitteilla. Tämän menetelmän hyödyntämistä kannattaa harkita tulevaisuudessa esimerkiksi muiden mittalaitteiden ohella. Partikkelimittaus (PM2.5 & PM10) ei tuottanut tässä selvyksessä selkeitä tuloksia.

Muuntamoissa käytetyissä KJ-komponenteissa havaittiin vaihtelevuutta suorituskyvyssä ja vika-alttiudessa. Erityisesti kahden eri päätevalmistajan tuotteissa oli merkittävä eroavaisuus sähköisten vikojen ilmaantuvuudessa, sillä valmistajan E päätteet nimittäin vikaantuivat selvästi useammin kuin valmistajan R päätteet. Ulko- ja sisäpäätteiden vikaantumisprosentit erosivat toisistaan yllättävästi. Ulkopäätteiden kuului kestää paremmin sähköisiä kuormituksia pidemmän ryömintämatkan vuoksi, mutta näitä oli prosentuaalisesti hajonnut reilusti enemmän kuin sisäpäätteitä. Huomionarvoista kuitenkin on se, että Carunan muuntamoissa ulkopäätteitä vain lähes 1100, kun taas sisäpäätteitä on noin 15000 kappaletta. Tämä tarkoittaa sitä, että sisäpäätteiden tarkasteluotanta on noin 14 kertaa suurempi kuin ulkopäätteiden, mikä saattaa vääristää tuloksia jonkin verran. Kohdemallin muuntamoissa olevista erottimista valtaosa on suunniteltu käytettäväksi sisätiloihin, mikä saattaa selittää korkeaa vikaantumisprosenttia. Vaativampiin olosuhteisiin luokitellut erottimet ovat näyttäneet kestävän lupaavan hyvin.

Muuntamoiden kuormituksesta syntyvillä lämpöhäviöillä oli havaittavissa suora vaikutus suhteellisen kosteuden määrään ja vikaantuvuuden ilmaantuvuuteen. Vikaantumisaste oli n. 5 prosenttiyksikköä suurempi, kun muuntajakoneen kuormitushäviöt olivat alle 1000 W verrattuna yli 1000 W:n häviöihin. Myös muuntamoihin asennetut lämmittimet ovat antaneet alustavia viitteitä siitä, että lämmityksellä on positiivinen vaikutus osien vikaantumisen hidastumiseen.

Lisälämmityksen hyödyistä tarvitaan silti enemmän tutkimusta, sillä otanta oli tällä kertaa melko pieni. Alueellisessa tarkastelussa vahvistettiin alkuperäistä arvioita siitä, että erityisesti Lounais-Suomen ja Satakunnan alueilla muuntamot ovat alttiimpia vikaantumiselle kuin muualla maassa. On mahdollista, että esimerkiksi rannikkoseudun ilmasto kuormittaa komponentteja enemmän sisämaahan ja pohjoisen seutuun verrattuna.

Erilaiset asennusvirheet ja asennusvaiheessa vaikuttavat tekijät, kuten kenttäolosuhteet ja työkalujen kunto voivat vaikuttaa suuresti käytettyjen osien lopulliseen elinkaareen. Laajempaa tutkimusta mahdollisista asennusvirheistä Carunan verkossa ei toteutettu tämän insinööriyön yhteydessä. Tässä insinööriyössä tarkasteltiin myös pintapuolisesti mahdollisia muita tutkimuskohteita, jotka päätettiin lopulta jättää tarkastelun ulkopuolelle aiheen rajaamisen vuoksi. Selvittämättömiin aiheisiin kuului käytettyjen asennusmenetelmien lisäksi korroosion esto, muuntamoiden ilmastointi, kustannustehokkuus, osittaispurkausmittaukset (PD-mittaukset) sekä muuntamokomponenttien syvempi elinkaaritarkastelu. Näitä aiheita voidaan tarvittaessa lähteä tutkimaan myöhemmin.

## **9 Löydetyt ratkaisut ja toimenpide-ehdotukset**

Työn tutkimusosuuden perusteella mietittiin erilaisia ratkaisuja ja toimenpide-ehdotuksia, joita Caruna Oy voisi toteuttaa muuntamoiden vikaantumisen ennaltaehkäisemiseksi. Selkeää yksiselitteistä ratkaisua ongelmien estämiseksi ei löytynyt, mutta ilmiöön vaikuttavat monet tekijät, minkä vuoksi toimenpide-ehdotuksia on tarkasteltu useita. Monet ilmiöistä vaativat kuitenkin lisätutkimusta ennen, kuin varsinaisia päätöksiä toimenpiteistä voidaan tehdä.

Erottimien ympärillä olevien muovipleksien poistolla on todettu olevan hidastava vaikutus sähköpurkausten syntyyn. Tämä ei pelasta komponentteja, vaan toimenpiteellä saadaan hankittua hieman lisää aikaa ennen kuin osat päätyvät vaihtokuntoon. Päätteiden ja erottimien kunnossapidolla saadaan myös hidastettua vikaantumisen etenemistä. Erilaiset kerrostumat ja hapettumisen

jäljet päätteissä ja erottimissa saadaan puhdistettua, jolloin jännitelujuus palautuu lähemmäs normaalia. Komponenttien puhdistaminen ei kuitenkaan poista ongelmaa, vaan on ennemminkin tilapäinen ratkaisu, jolla vikaantumisen leviämistä saadaan hillittyä.

Päätteiden osalta olisi suositeltavaa tehdä lisätutkimuksia laboratorio-olosuhteissa vahvistamaan tässä työssä saatuja tuloksia. Eri valmistajien kaapelipäätteitä tulisi vertailla niin sisä- ja ulkopäätteidenkin osalta, jotta saadaan parempi käsitys komponenttien suorituskyvystä ja mahdollisista heikkouksista. Tämän lisäksi ryömintämatkan kasvattamisen, eli päätteisiin asennettavien lisälaippojen asentamisen hyötyjä olisi hyvä tarkastella, sillä yhden, kahden tai kolmen laipan asentaminen päätteeseen olisi yksinkertainen voisi nimittäin olla yksinkertainen ja edullinen ratkaisu sähköisten vikojen ehkäisemiseksi. Ryömintämatkan kasvattamisen yhteydessä yhtenä tutkimuksen kohteena voisi myös olla päätteen jännitelujuuden mahdollinen kasvattaminen pinnoittamisen avulla. Lisätutkimuksien perusteella pystyttäisiin arvioimaan tiettyjen päätteiden hankkimisen kannattavuutta viankorjauksen ja kustannusten näkökulmasta.

Muuntamoiden lämmityksellä sekä suurilla lämpöhäviöillä huomattiin olevan positiivinen vaikutus suhteellisen kosteuden määrään ja vikaantuvuuden ilmaantuvuuteen. Lämmityksen merkitystä kondenssin muodostumisen ja sähköpurkausten alkamiseen muuntamoissa voisi tutkia enemmän, sillä tässä yhteydessä tutkimustietoa on melko rajallisesti. Lämmittimillä varustettuja muuntamoita voisi esimerkiksi tarkastaa useammin kuin tavallisen kuuden vuoden syklissä, jotta saataisiin ajantasaista informaatiota lämmityksen vaikutuksesta vikaantumismääriin. Tiheämpi tarkastusväli tai satunnaistarkastukset voisivat yleisesti ottaen myös olla harkittavia toimenpiteitä alueilla, missä vikaantuminen on yleisempää. Lämmityksen yhteydessä myös ilmavaihdon tehostamisen vaikutuksia kondensaatioon voitaisiin tarkastella lisää, sillä tutkimustieto tämän osalta on toistaiseksi vielä hieman vajavaista. Tämän lisäksi erilaiset kosteutta imevät materiaalit pystyisivät ehkäpä vähentämään suhteellista kosteutta jonkin verran, jos niitä

asetettaisiin tarpeeksi muuntamoiden sisään. Kosteuden vähentäminen materiaalien avulla voi tosin olla haastavaa puistomuuntamoiden koon vuoksi.

VOC-antureilla pystyttäisiin tutkimuksen datan perusteella arvioimaan jonkin verran muuntamon keskijännitepuolen komponenttien kuntoa. Lisäksi IoT-anturien tuottama data on hyödyllistä, kun tarkastellaan vikaantumisen juurisyitä. Muitakin mittalaitteita, kuten sähköpurkausten havaitsemiseen tarkoitettuja instrumentteja voisi olla syytä tutkia yhdessä IoT-datan kanssa. Mitä parempi ymmärrys vikaantuvien muuntamoiden olosuhteista saadaan kokonaisuudessaan, sitä paremmin ongelmia saadaan mitigoitua tulevaisuudessa.

Liitosrasvan laajempi hyödyntäminen keskijännitekomponenttien asennusvaiheessa olisi suositeltavaa tulevaisuudessa. Tällöin liitoskohdat olisivat paremmin suojassa esimerkiksi kosteudelta ja liialta, mikä saattaisi jonkin verran ennaltaehkäistä sähköisiä vikoja. Lisäksi muiden suojaavien aineiden, kuten pinnoitteiden käyttöä eristinpinoilla voisi harkita ainakin kontrolloidun tutkimuksen muodossa, jos vain sopiva tuote löytyy. Pinnoitteiden avulla voisi olla mahdollista nostaa eristeen jännitelujuutta jonkin verran, mikä ainakin teoriassa hidastaisi eristepinoilla tapahtuvia sähköpurkauksia.

## 10 Yhteenveto

Puistomuuntamoiden merkitys Suomen sähköverkossa on noussut 2010-luvun jälkeen. Carunan verkkoalueella puistomuuntamot ovat niin ikään korvaamassa vanhoja pylväsmuuntajia nopeaan tahtiin. Tietyissä muuntamoissa on kuitenkin havaittu viime aikoina huolestuttavan paljon erilaisia ongelmia, erityisesti kaapelipäätteiden sekä erottimien tavallista nopeampaa ikääntymistä ja sähköisiä vikoja. Viat ja ongelmat sekä niiden korjaaminen aiheuttavat toisinaan katkoksia sähkönjakeluun, mikä ei ole toivottavaa asiakkaan, eikä verkkoyhtiönkään kannalta. Insinööriyössä selvitettiin näiden vikaantumisten syitä ja pyrittiin löytämään keinoja, joilla niitä voitaisiin välttää ja vähentää.

Insinööriyön avulla oivallettiin erilaisia tekijöitä, jotka vaikuttavat puistomuuntamoiden keskijännitekomponenttien vikaantumiseen ja käyttöiän lyhenemiseen. Huomioitavaa on se, että ongelmiin ei ole yksittäistä aiheuttajaa, vaan syitä voi olla useita. Erilaiset muuttujat, kuten komponenttien valinta, asennusmenetelmät, ympäröivät olosuhteet, muuntamoiden sisälämpötila ja maantieteellinen sijainti voivat kaikki vaikuttaa negatiivisesti komponenttien elinkaareen.

Lisäksi havaittiin monia aihealueita, joita olisi kannattavaa lähteä tutkimaan tulevaisuudessa. Erityisesti kaapelipäätteissä havaittiin datan perusteella paljon vaihtelevuutta valmistajien ja päätetyypin välillä. Päätteet ovat huomionarvoisia tarkastelukohteita, kun tehdään jatkotutkimusta vikaantumisen juurisyiden selvittämiseksi sekä vähentämiseksi. Datan perusteella näissä on nimittäin paljon vaihtelevuutta eri valmistajien ja päätetyyppien välillä. Myös erilaiset vikojen havainnointimenetelmät, kuten muuntamoihin asennetut mittalaitteet voisivat auttaa ongelmien tunnistamisessa ja arvioinnissa.

Tutkimuksen perusteella Caruna Oy pystyy päättämään mahdollisista toimenpiteistä, jolla muuntamoiden vikaantumista pyritään vähentämään tulevien vuosien aikana. Jatkotutkimusten avulla on mahdollista parantaa sähkönjakelun luotettavuutta ja sitä myötä asiakaskokemusta. Myös puistomuuntamoiden korjauskustannuksia saadaan alhaisemmaksi, kun ilmiöitä ymmärretään paremmin, ja vikaantumista voidaan ennaltaehkäistä.

## Lähteet

- 1 Verkkokomponentit-ja-yksikköhinnat-2016-2023. 2015. Verkkoaineisto. Energiavirasto.  
<<https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12766832/Verkkokomponentit-ja-yksikk%C3%B6hinnat-2016-2023.xlsx/7bd40be6-7486-fa81-fbef-3363c71d008e?t=1553093040000>> Luettu 19.4.2023.
- 2 TechTrainerNJ. 2018. 3 Phase Power Explanation. Verkkoaineisto; video. <[https://www.youtube.com/watch?v=CBiUOQ2WX2I&ab\\_channel=TechTrainerNJ](https://www.youtube.com/watch?v=CBiUOQ2WX2I&ab_channel=TechTrainerNJ)>. Katsottu 22.3.2023.
- 3 Physics Ninja. 2017. Why do Power Lines use High Voltage. Verkkoaineisto; video. <<https://www.youtube.com/watch?v=xIJ1-h6en4A>>. Katsottu 6.4.2023.
- 4 Sähkönsiirto ja Jakelu. Säteilyturvakeskus. Verkkoaineisto <<https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/sahkonsiirto-ja-jakelu>>. Päivitetty 20.1.2021. Luettu 17.10.2023.
- 5 Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Espoo: Otatieto.
- 6 Haarla, Liisa & Elovaara Jarmo. 2011. Sähköverkot II. Espoo: Otatieto.
- 7 Hietalahti, Lauri. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. AMK-kustannus Oy Tammertekniikka.
- 8 Jakelujohdot ja muuntamot. Säteilyturvakeskus. Verkkoaineisto <<https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/jakelujohdot-ja-muuntamot>>. Päivitetty 4.2.2020. Luettu 17.10.2022.
- 9 Lahti, Tuomas. 2022. Kunnossapidon projektipäällikkö. Caruna Oy, Espoo. Keskustelu 7.10.2022.
- 10 Sähkönsiirtohinnot ja toimitusvarmuus. 2018. Työ- ja elinkeinoministeriö. Julkaisu. <[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161178/43\\_18\\_Sahkonsiirtohinnot\\_ja\\_toimitusvarmuus.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161178/43_18_Sahkonsiirtohinnot_ja_toimitusvarmuus.pdf)>. Luettu 7.10.2022.
- 11 Caruna Vuosiraportti 2022. 2022. Julkaisu. Caruna Oy. <<https://caruna.fi/vuosiraportti2022>>. Luettu 3.4.2023
- 12 Energian tie kotiin. Energiamaailma. Verkkoaineisto. <<https://energiamaailma.fi/energiasta/energian-tie-kotiin/>>. Luettu 19.10.2022.
- 13 Palmumaa, Petteri. Kunnossapitopäällikkö. Caruna Oy. Keskustelu. 20.9.2022.

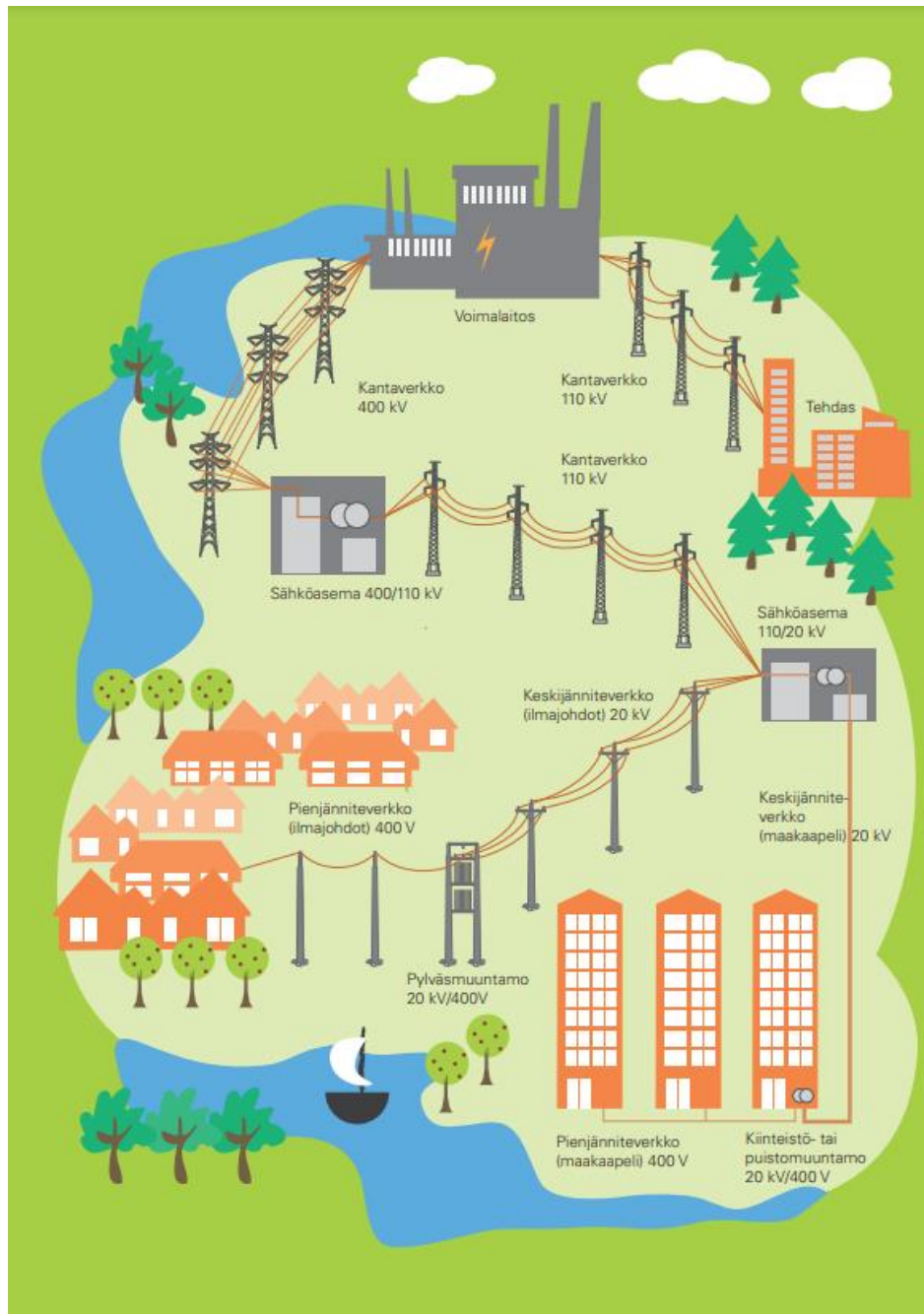
- 14 Työmaakäynti. Alue A. Caruna Oy. Valokuva 23.10.2022.
- 15 NAL/NALF – H versions for 12&24 kV New indoor air load break switch and switch-fuse combination for compact substations. 2015. ABB. Verkkoaineisto. <[https://library.e.abb.com/public/3f160b4a8ac2c809c1257e0a00485fec/ABB\\_Broszura%20NAL\\_en\\_hi-res\\_25022015.pdf](https://library.e.abb.com/public/3f160b4a8ac2c809c1257e0a00485fec/ABB_Broszura%20NAL_en_hi-res_25022015.pdf)>. Luettu 10.2.2023.
- 16 Air insulated switch disconnectors type NAL, NALF, VersaRupter. 2010. Verkkoaineisto. ABB. <[https://library.e.abb.com/public/174c1ba3588f86d2c1257b1300574335/NAL%20NALF%20VersaRupter\\_3405PL201-W1-en\\_Edition%2007-2010.pdf](https://library.e.abb.com/public/174c1ba3588f86d2c1257b1300574335/NAL%20NALF%20VersaRupter_3405PL201-W1-en_Edition%2007-2010.pdf)>. Luettu 10.2.2023.
- 17 What is Earthing switch? Working, Symbol, Installation & Function. ElectricalWorkbook. Verkkoaineisto. <<https://electricalworkbook.com/what-is-earthing-switch-working-symbol-installation-function/>>. Luettu 13.2.2023
- 18 Sähkönjakeluverkkojen ilmajohtoratkaisut. Ensto. Verkkoaineisto. <<https://www.ensto.com/globalassets/brochures/brochures/overhead-lines/finnish/sahkonjakeluverkkojen-ilmajohtoratkaisut.pdf>>. Luettu 22.12.2022
- 19 Aro, Martti; Elovaara, Jarmo; Karttunen, Matti; Nousiainen, Kirsi & Palva, Veikko. 2015. Suurjännitetekniikka. Espoo: Otatieto. Neljäs painos
- 20 Mikä on eristeen ryömintäetäisyys ja suojattu ryömintäetäisyys? 2021. Jecsany. Verkkoaineisto. <<https://fi.jecsany.com/news-show-1031755.html>>. Luettu 23.3.2023.
- 21 Shrink Polymer Systems. Thorne & Derrick International. Verkkoaineisto. <<https://www.powerandcables.com/tag/heat-shrink-cable-terminations/>>. Luettu 1.3.2023.
- 22 Rauhalampi, Iris. 2022. Verkkodata-asiantuntija. Caruna Oy. Chatkeskustelu. 25.10.2022.
- 23 Condensation. National Geographic. Verkkoaineisto. <<https://education.nationalgeographic.org/resource/condensation>>. Luettu 5.11.2022.
- 24 Mikä on kastepiste, ja miten sitä mitataan? 2019. Vaisala. Blogi. <<https://www.vaisala.com/fi/blog/2019-11/mika-kastepiste-ja-miten-sita-mitataan?>>. Luettu 5.11.2022.
- 25 Hänninen, Hanna; Karppinen, Maarit; Leskelä, Markku; Pohjakallio Maija. 2018. Tekniikan kemia. Luku 7. Edita. 14. painos.
- 26 What Are Noble Metals? – Definition and list. 2021. Science Notes. Verkkoaineisto. <<https://sciencenotes.org/noble-metals/>>. 27.2.2021. Päivitetty 6.5.2021. Luettu 10.11.2022.

- 27 Metallien jännitesarja. 2012. Opetus.tv. Verkkoaineisto; video. <<https://youtu.be/1T2WlrT490o>>. Julkaistu 1.6.2023.
- 28 Aromaa, Jari. 2013. Korroosion ja korroosioneston historia. Julkaisu. Kemia tekniikan korkeakoulu. Aalto-yliopiston julkaisusarja. <<https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/10907/isbn9789526052878.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Julkaistu 9/2013.
- 29 Korroosionesto: Esiintymismuodot. Opetushallitus. Verkkoaineisto. <[http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_f2\\_korroosionesto\\_esiintymismuodot.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_f2_korroosionesto_esiintymismuodot.html)>. Luettu 12.11.2022.
- 30 Tracking in Electrical insulation. Electrotechnik. Verkkoaineisto. <[https://www.electrotechnik.net/2015/07/tracking-in-electrical-insulation\\_19.html](https://www.electrotechnik.net/2015/07/tracking-in-electrical-insulation_19.html)>. Luettu 22.11.2022.
- 31 What Is Partial Discharge (PD). HVPD. Verkkoaineisto. <[https://www.hvpd.co.uk/pd/?gclid=Cj0KCQiAnsqdBhCGARIsAAyjYjTtxJ\\_zhd0nA4zP2MNssHA0p\\_rELb2AARWZO4Ql-KOb2ITIQaL6jvoaAvkUEALw\\_wcB](https://www.hvpd.co.uk/pd/?gclid=Cj0KCQiAnsqdBhCGARIsAAyjYjTtxJ_zhd0nA4zP2MNssHA0p_rELb2AARWZO4Ql-KOb2ITIQaL6jvoaAvkUEALw_wcB)>. Luettu 2.1.2023.
- 32 Understanding Electric Discharges. 2022. See the Pattern. Verkkoaineisto; video. YouTube. <[https://www.youtube.com/watch?v=0PI5qBajPLk&ab\\_channel=SeethePattern](https://www.youtube.com/watch?v=0PI5qBajPLk&ab_channel=SeethePattern)>. Julkaistu 10.7.2022.
- 33 How to Detect Partial Discharge (PD)? On-line Partial Discharge Detection Methods - IPEC. 2021. IPECLTD. Verkkoaineisto; video. YouTube. <<https://www.youtube.com/watch?v=WRi0-N5bSWE>>. Julkaistu 12.5.2021
- 34 Carunan kunnossapitokäsikirja. Caruna Oy. 2023. Sisäinen dokumentti.
- 35 What Is Arc Flash? Electrical SafetyUK. Verkkoaineisto. <<https://elecsafety.co.uk/what-is-arc-flash/>>. Luettu 29.10.2022.
- 36 Rantala, Markus. 2023. Verkostoasentaja. TLT Connection. Valokuva. Chat-keskustelu.
- 37 Rantala, Markus. 2022. Verkostoasentaja. TLT Connection. Keskustelu. 23.11.2022.
- 38 Ozone production from Corona Discharge. Verkkoaineisto. Oxidation Technologies, LLC. <<https://www.oxidationtech.com/ozone/ozone-production/corona-discharge.html>>. Luettu 29.1.2023.
- 39 Lähestymis- ja paikallisojhauskielto muuntamon vikatilanteissa. 2021. Caruna Oy. Sisäinen dokumentti.
- 40 MV Cables & Causes of MV Cable failures. 2020. Verkkoaineisto. Thorne & Derrick International. <<https://www.powerandcables.com/mv-cables-causes-of-mv-cable-failures/>>. Julkaistu 10.1.2020. Luettu 14.2.2023.

- 41 Conductivity. Verkkoaineisto. United States Environmental protection agency. <<https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/vms59.html#:~:text=Conductivity%20in%20water%20is%20affected,that%20carry%20a%20positive%20charge>>. Päivitetty 6.3.2012. Luettu 14.2.2023.
- 42 Birkeland-Eyde process. Chemeurope.com. Verkkoaineisto. <[https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Birkeland-Eyde\\_process.html](https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Birkeland-Eyde_process.html)>. Luettu 14.2.2023.
- 43 Kaerla, Petri. 2022. Sähköverkon kunnossapitoasiantuntija. Caruna Oy. Keskustelu. 7.12.2022.
- 44 Heine, Pirjo; Järventausta, Pertti; Kivikko, Kimmo; Lehtonen, Matti & Silvast, Antti. 2005. Sähkönjakelun keskeytyksestä aiheutuva haitta. Raportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Otamedia Oy.
- 45 Sähkökatkokset. Kilpailu- ja kuluttajavirasto. Verkkoaineisto. <<https://www.kkv.fi/kuluttaja-asiat/asuminen/sahko/sahkokatkokset/>>. Luettu 20.12.2022.
- 46 Kaerla, Petri. 2022. Sähköverkon kunnossapitoasiantuntija. Caruna Oy. Keskustelu. 10.11.2022.
- 47 IOTSU® Rugged AQ09 Combo for LoRaWAN®. Small Data Garden. Verkkoaineisto. <<https://smalldatagarden.com/devices/air-quality/iotsu-rugged-aq09-combo-for-lorawan/>>. Luettu 15.11.2022.
- 48 Noguchi, Miyuki & Yamasaki, Akihiro. 2020. Volatile and semivolatile organic compound emissions from polymers used in commercial products during thermal degradation. Verkkoaineisto. Heliyon. Sciencedirect. Tutkimusraportti. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020301596>>. Luettu 26.1.2023.
- 49 Digita IoT. Mittadatan seurausjärjestelmä. Verkkoaineisto. <[iot.digita.fi](http://iot.digita.fi)>. Digita Oy.
- 50 Havaintojen lataus. Ilmatieteen laitos. Verkkoaineisto; avoin säätietokanta. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>>.
- 51 Verkkotietojärjestelmä. Caruna Oy.
- 52 SFS-EN 62271-1:2017. High-voltage switchgear and controlgear. Part 1: Common specifications for alternating current. 2017. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 53 IEC/TS 62271-304. High-voltage switchgear and controlgear - Part 304: Design classes for indoor enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV up to and including 52 kV to be used in severe climatic conditions. 2015. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

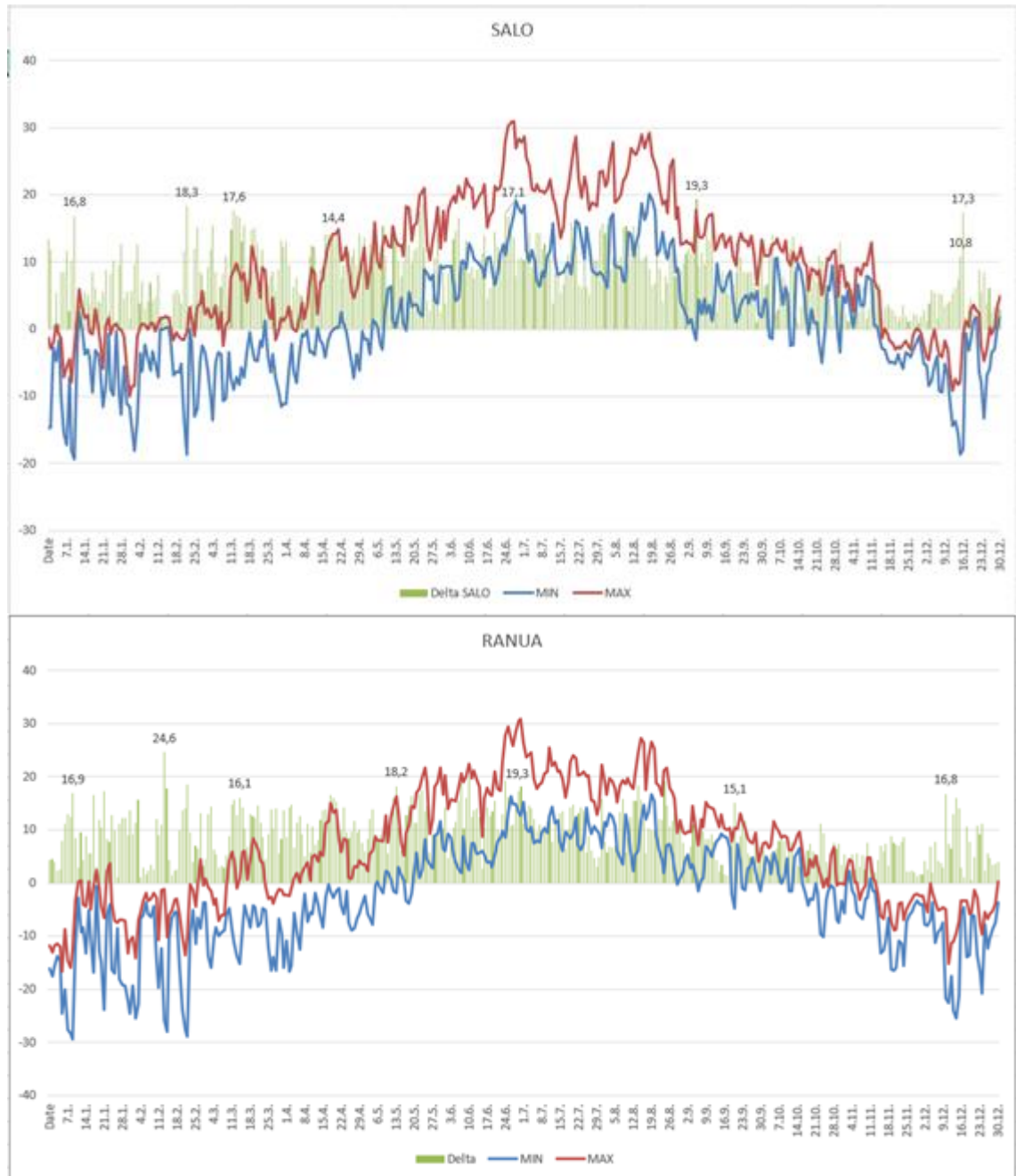
- 54 NAL/NALF MV Indoor switch-disconnector and switch-fuse combination. ABB. Verkkoaineisto. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107680A7753&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 12.3.2023.
- 55 Kaerla, Petri. 2022. Sähköverkon kunnossapitoasiantuntija. Caruna Oy. Keskustelu. 22.2.2022.
- 56 Lahti, Kari. 2017 Kari Lahti. NAL-erottimien eristysominaisuuksien tutkiminen. Tampereen teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti.
- 57 Kaerla, Petri. 2022. Sähköverkon kunnossapitoasiantuntija. Caruna Oy. Chat-keskustelu. 20.2.2022.
- 58 Eilo, Aleksi. 2018. Asennusvirheiden vaikutus keskijännitekaapelipääteiden toimintakuntoon. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. Julkaistu 19.11.2018.
- 59 Erotinvalmistajan suorittama tutkimus. 2018. Ei-julkinen lähde.
- 60 Ylinen, Timo (toim.) 2019. Maadoituskirja. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 7. painos.
- 61 Päätteiden asennusohje. 2022. Valmistaja E.
- 62 Päätteiden asennusohje. 2022. Valmistaja R.

### Liite 1: Suomen sähköverkon rakenne



Kuva 1: Suomen sähköjakoalue [4]

**Liite 2: Vuoden lämpötilavaihtelut Salon ja Ranuan alueilla**



Kuva 2: Vuoden 2022 lämpötilavaihtelut Ranuan ja salon alueilla [50]

### Liite 3: Erotinlaitteiston luokittelu ilmansaasteiden ja kondensaation määrän perusteella

- $C_o$ : Condensation does not normally occur (not more than twice a year)
- Equipment to be used in locations with humidity and/or temperature control in order to avoid condensation. The building or room provides protection from daily variations of outside climate.
- $C_L$ : Non-frequent condensation (not more than twice a month)
- Equipment to be used in locations without humidity and/or temperature control. The building or room provides protection from daily variations of outside climate, but condensation cannot be excluded.
- $C_H$ : Frequent condensation (more than twice a month)
- Equipment to be used in locations without temperature control. The building or room provides only minimal protection from daily variations of outside climate, so that frequent condensation may occur.
- $P_L$ : Light pollution (as given in 2.1.1, item d) of IEC 62271-1) (see note 2 below)
- In order to reach light pollution in heavy polluted locations precautions may be necessary.
- $P_H$ : Heavy pollution (any value exceeding  $P_L$ )  
 $P_H$  does not include areas subject to conductive dust and/or to industrial smoke, producing thick conductive deposits.
- The location has no special precautions to minimize the presence of deposits, or the equipment is situated in close proximity to pollution sources.

NOTE 1 Absence of pollution is considered as unrealistic. At least light pollution is assumed.

NOTE 2 IEC 62271-1, 2.1.1, item d): "The ambient air is not significantly polluted by dust, smoke, corrosive and/or flammable gases, vapours or salt. The manufacturer will assume that, in absence of specific requirements from the user, there are none."

NOTE 3 Precautions to minimize the amount of deposits inside the enclosure of the equipment may be taken by the choice of an appropriate degree of protection of the enclosed switchgear and controlgear.

TS 62271-304 © IEC:2008

– 7 –

- Degree 0:  $C_oP_L$   
 Degree 1:  $C_LP_L$  or  $C_oP_H$   
 Degree 2:  $C_LP_H$  or  $C_HP_L$  or  $C_HP_H$

NOTE 4 Degree 0 correspond to normal service condition as described in 2.1.1 of IEC 62271-1.

Kuva 3: Erottimien olosuhdeluokittelua [52].

**Liite 4: Kahden valmistajan vikaantuneet päätteet**

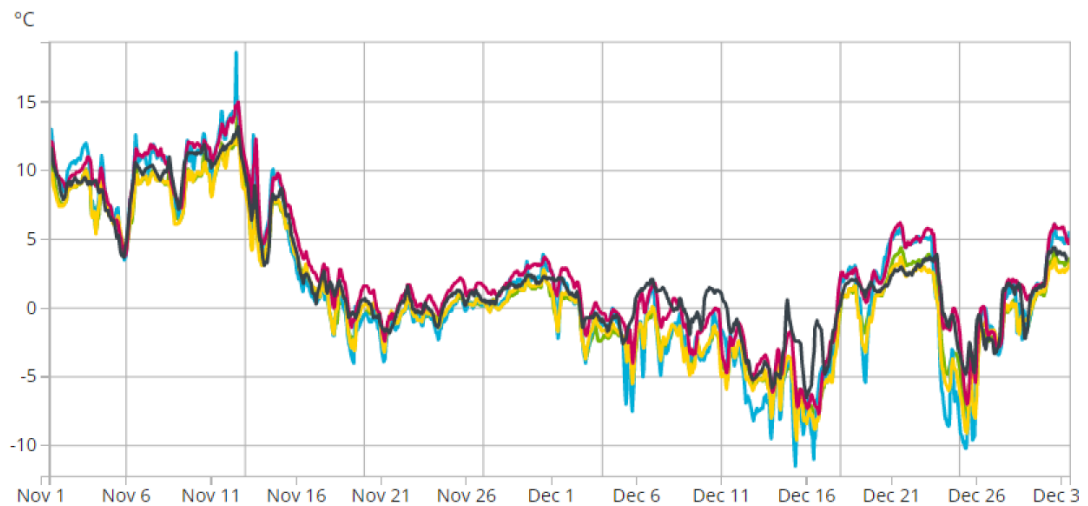
Taulukko 1: Vialliset päätteet [51].

<b>Vikaantuneet / päätetyyppi</b>	<b>Valmistaja E</b>	<b>Valmistaja R</b>	<b>Yht.</b>
Sisäpäätte 1	120		120
Sisäpäätte 2	93		93
Sisäpäätte 3		0	0
Sisäpäätte 4		0	0
Sisäpäätte 5		6	6
Sisäpäätte 6		14	14
Sisäpäätte 7		30	30
Sisäpäätte 8		15	15
Sisäpäätte 9		14	14
Sisäpäätte 10		25	25
Sisäpäätte 11		12	12
Sisäpäätte 12		3	3
Sisäpäätte 13		9	9
Sisäpäätte 14		0	0
Ulkopäätte 1	77		77
Ulkopäätte 2	2		2
Ulkopäätte 3		0	0
Ulkopäätte 4		3	3
Ulkopäätte 5		0	0
Ulkopäätte 6		0	0
Ulkopäätte 7		6	6
Ulkopäätte 8		4	4
Ulkopäätte 9		0	0
Ulkopäätte 10		0	0
Ulkopäätte 11		0	0
<b>Yhteensä</b>	<b>292</b>	<b>141</b>	<b>433</b>
<b>Kaikki tarkastelun päätteet</b>	<b>4618</b>	<b>10939</b>	<b>15557</b>

### Liite 5: Lämpötilan vertailu lämmittämättömien ja lämmitettyjen muuntamoiden välillä

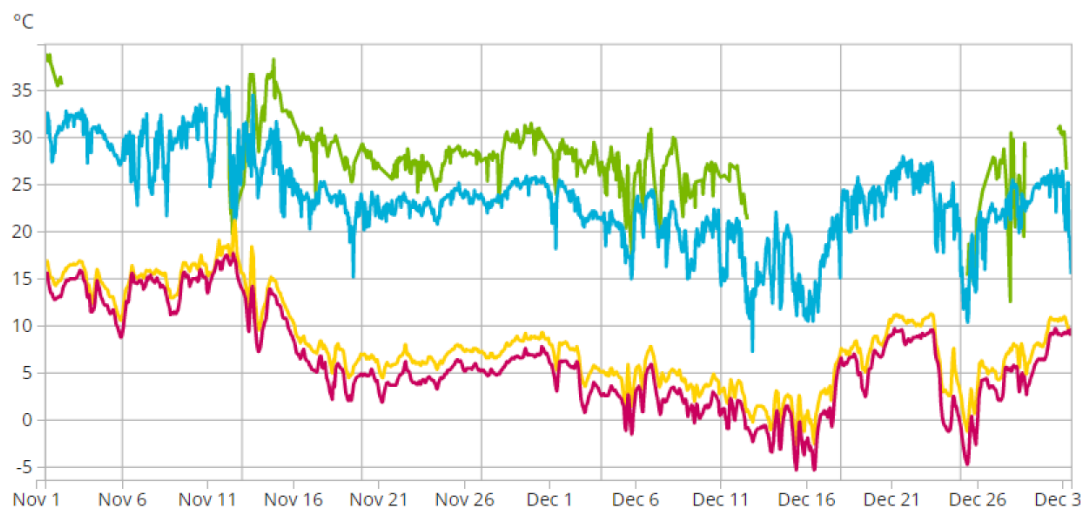
#### MEASUREMENT HISTORY

MUUNTAMOT JOISSA VIKAANTUNEITA EROTTIMIA



#### MEASUREMENT HISTORY

MUUNTAMOT LÄMMITTIMILLÄ



Kuva 4: Lämpötilavaihtelut marraskuusta joulukuuhun vuonna 2022 lämmitetyissä ja lämmittämättömissä muuntamoissa [49].

## Liite 6: Taulukko muuntajien lämpöhäviöistä

Taulukko 2: Vikaantumismääriä muuntamoille hukkalämmön määrän mukaan luokiteltuna [51].

	Kaikki		
Hukkalämpö W	Vikaantunut	Kunnossa	yhteensä
Alle 200	92	1084	1176
200-400	230	1619	1849
400-600	108	786	894
600-800	33	455	488
800-1000	28	282	310
1000-1200	10	191	201
1200-1400	8	95	103
1400-1600	6	73	79
1600-1800	1	49	50
1800-2000	1	38	39
2000-	0	52	52
yht	517	4724	5241
Alle 1000 W	491	4226	4717
Alle 1200 W	501	4417	4918
Yli 1000 W	26	498	524
	Vikaantumisprosentti		
Alle 200 W	7,8 %		
200-400 W	12,4 %		
400-600 W	12,1 %		
600-800 W	6,8 %		
800-1000 W	9,0 %		
1000-1200 W	5,0 %		
1200-1400 W	7,8 %		
1400-1600 W	7,6 %		
1600-1800 W	2,0 %		
1800-2000 W	2,6 %		
2000- W	0,0 %		
yht	9,9 %		
Vikaantimis- % <1000 W hukkalämmöllä	10,4 %		
Vikaantumis-% >1000 W hukkalämmöllä	5,0 %		