



Anna Lahnakoski

# Maaperän ominaisresistanssin määrittäminen osana maadoitusra- kenteiden mitoitusta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

28.5.2024

# Tiivistelmä

Tekijä:	Anna Lahnakoski
Otsikko:	Maaperän ominaisresistanssin määrittäminen osana maadoitusrakenteiden mitoitusta
Sivumäärä:	50 sivua + 4 liitettä
Aika:	28.5.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat:	Suunnittelupäällikkö Joni Blom Lehtori Tuomo Heikkinen

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä jakeluverkon maadoitukseen erityisesti suunnittelun ja mitoituksen näkökulmista. Maakaapeloinnin seurauksena jakeluverkkojen maadoitusjärjestelmiä voidaan enenevässä määrin käsitellä yhteen liitettynä järjestelminä. Maaperän ominaisresistiivisyyden selvittäminen on oleellinen osa tällaisen järjestelmän määrittämisessä.

Työssä luotiin katsaus Suomen sähköjakelujärjestelmään, jonka osana Caruna on Suomen suurin jakeluverkkoyhtiö. Maadoitusteorian ohessa tutustuttiin Carunan verkonrakennustapaan maadoitusrakenteiden osalta. Opinnäytetyö tehtiin urakoitsijan näkökulmasta, jossa onnistunut suunnitteluprosessi on toteutuksen kannalta hyvin merkityksellinen. Yleisesti teoriaosuudessa perehdyttiin myös jakeluverkon vika- ja vaaratilanteisiin sekä maadoittamisen periaatteisiin. Maaperän ominaisresistiivisyyttä ja maadoitusten mitoitusta tutkittiin mittauksin ja laskelmin. Laskelmat suoritettiin Trimble NIS -verkkotietojärjestelmän laskentatyökalulla.

Maaperän ominaisjohtavuusmittaukset suoritettiin kolmelle Carunan työmaalla rakenteilla olevalle muuntamolle, joita voitiin käsitellä yhteen liitettynä maadoitusjärjestelmänä. Mittaustulosten avulla lasketuista muuntamokohtaisista maadoitusresistansseista määritettiin yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssit.

Tuloksista oli huomattavissa, että yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän kautta määriteltynä maadoitusimpedanssi oli selkeästi matalampi kuin muuntamoita yksittäin tarkastellessa. Maadoitusrakenteiden tarkoituksenmukaisessa mitoituksessa tämä olisi järkevää huomioida. Onkin mahdollista todeta, että jakeluverkon maadoitusrakenteiden yhdistäminen on kannattavaa sekä kustannus- että turvallisuusnäkökulmista katsottuna.

Avainsanat: maadoitus, maaperän ominaisresistiivisyys, maadoitusjärjestelmät

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Anna Lahnakoski  
Title: Defining Soil Resistivity as Part of Dimensioning Earthing Structures  
Number of Pages: 50 pages + 4 appendices  
Date: 28 May 2024

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering  
Professional Major: Electrical Power Engineering  
Supervisors: Joni Blom, Design Manager  
Tuomo Heikkinen, Senior Lecturer

---

The purpose of the thesis was to familiarize with distribution network's earthings, especially from the perspective of design and dimensioning. As a result of underground cabling, the earthing systems of the distribution network can increasingly be treated as combined systems. Determination of soil resistivity is an essential part of defining such a system.

The thesis gives an overview to the Finnish electricity distribution system, as part of which Caruna is the largest distribution network company in Finland. Caruna's network construction methods concerning earthing structures are introduced alongside earthing theory. The thesis focuses on the perspective of the contractor, in which successful designing process is very important in terms of implementation. The theory section also handles faults and hazards in the distribution network as well as the principles of earthing on a general level. The soil resistivity and dimensioning earthings were studied by measurements and calculations. The calculations were performed using the calculation tool Trimble Network Information System.

Soil characteristic conductivity measurements were performed to three transformers under construction at Caruna site. These transformer circuits could be treated as a combined earthing system. Transformer-specific earthing resistances could be calculated from the measurement results. After this, it was possible to define combined earthing system's earthing impedances.

From the results it was seen that the earthing impedance in the combined earthing system was clearly lower than earthing resistance of transformers viewed individually. In the appropriate dimensioning of earthing structures, this would be reasonable to take into consideration. It can be established that combining the earthing structures of the distribution network is profitable from both cost and safety perspectives.

Keywords: Earthing, Soil resistivity, Earthing systems

# Sisällys

## Käsitteet ja lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähköverkot	2
2.1	Sähkönjakelujärjestelmä	2
2.2	Jakeluverkkoyhtiöt	3
2.3	Sähkömarkkinalaki	5
3	Sähkönjakeluverkon suunnitteluprosessi	6
3.1	Verkostosuunnittelu	6
3.2	Maastosuunnittelu	7
4	Jakeluverkon maasulku ja vaarajännitteet	9
4.1	Maasulku maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa	9
4.2	Maasulun aikaiset vaarajännitteet	11
4.2.1	Maadoitusjännite	11
4.2.2	Askel- ja kosketusjännitteet	12
5	Maadoittamisen periaatteet	14
5.1	Maadoitusten pääkomponentit	15
5.2	Puistomuuntamon maadoitus haja-asutusalueella	17
5.3	Maadoitusjärjestelmät	22
5.3.1	Yksittäinen maadoitusjärjestelmä	22
5.3.2	Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä	23
5.3.3	Laaja maadoitusjärjestelmä	25
5.4	Maadoitusjänniteryhmät	27
6	Maaperän ominaisresistiivisyys ja maadoitusten mitoitus	31
6.1	Maaperän resistiivisyys	31
6.2	Maadoitusvastusmittaus	32
6.3	Maadoitusimpedanssi ja maadoitusresistanssi	34
6.4	Resultoiva maadoitusimpedanssi	35
7	Tutkittavat muuntopiirit	37

7.1	Mittauskohteiden ja -menetelmien kuvaus	37
7.2	Mittaukset	39
7.3	Mittaustulosten analyysi	42
8	Yhteenveto	46
	Lähteet	49
	Liitteet	
	Liite 1: Muuntamon A mittaustulokset	
	Liite 2: Muuntamon B mittaustulokset	
	Liite 3: Muuntamon C mittaustulokset	
	Liite 4: Muuntamokohtaiset maadoitusimpedanssit	

## Käsitteet ja lyhenteet

- F: Kerroin. Suuruus määräytyy muuntopiirin olosuhteiden ja toteutetun maadoitusasennuksen mukaan.
- $I_E$ : Maavirta. Maadoitusimpedanssin kautta maahan kulkeva virta.
- $I_f$ : Maasulkuvirta. Virta, joka kulkee pääpiiristä maahan tai maadoitettuihin osiin vikakohdassa.
- $R_E/R_m$ : Maadoitusresistanssi. Maadoitusimpedanssin reaaliosa.
- $R_f$ : Vikaresistanssi. Verkon resistiivinen häviö.
- $U_E/U_m$ : Maadoitusjännite. Maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välinen jännite.
- $U_{TP}$ : Sallittu kosketusjännite. Maksimijännite samanaikaisesti kosketeltavissa olevien johtavien osien välillä.
- $Z_E$ : Maadoitusimpedanssi. Järjestelmän tai asennuksen määrätyn kohdan ja neutraalimaan välinen impedanssi annetulla taajuudella.
- $\rho$ : Maaperän resistiivisyys. Tyypillisen maaperänäytteen ominaisvastus.
- $\Omega_m$ : *Ohmimetri*. Maaperän ominaisresistanssin yksikkö.
- AHXAMK-WP:  
20 kV:n erillisjohtimellinen keskijännitekaapeli, jossa ei ole keskusköyttä.
- Trimble NIS: Trimble *Network Information System*. Verkkotietojärjestelmä sähköyhtiöiden liiketoimintaan.

# 1 Johdanto

Jakeluverkot kehittyvät kovaa vauhtia verkonhaltijoiden pyrkiessä täyttämään asiakkaiden ja yhteiskunnan vaatimuksia. Sähkömarkkinalain 51. §:n laatuvaatimusten ohjaamana jakeluverkkoa rakennetaan ja on jo vuosia rakennettu säältä suojaan korvaamalla ilmalinjat maakaapelilla. Laaja-alainen maakaapeliverkosto on muuttanut sähköverkon rakennetta myös turvallisuusnäkökulmasta luoden uudenlaisia haasteita. Keskijänniteverkkojen maakaapelointi ja siitä aiheutuva maasulkuvirtojen kasvu vaatii jakeluverkkoyhtiöiltä perehtyneisyyttä kosketusjännitteiden hallintaan. Toisaalta maakaapeloinnin myötä maadoitusjärjestelmät ovat muuttuneet yksittäisistä maadoitusjärjestelmistä yhteen liitetyiksi järjestelmiksi jopa maaseudulla. Maadoitusten oikeanlainen mitoittaminen ja järjestelmien eheyden varmistaminen luovat pohjan jakeluverkon turvallisuusvaatimusten täyttämiseksi.

Tässä opinnäytetyössä perehdytään maadoituksen käsitteeseen monesta erilaisesta näkökulmasta. Tarkoituksena on kehittää ymmärrystä maadoitusrakenteiden tarkoituksenmukaiseen mitoittamiseen, asentamiseen ja todentamiseen, joilla luodaan edellytykset maadoitusjärjestelmien turvallisuudelle. Maadoitusjärjestelmien kehittyessä on maaperän ominaisresistiivisyyden selvittäminen osoittautunut todella tärkeäksi osaksi suunniteltaessa maadoitusten riittävyttä. Suomessa maaperä luo epäedulliset lähtökohdat maadoitusjärjestelmien toteuttamiselle. Siksi maadoitusjärjestelmien yhteen liittäminen ja mahdollisten lisämaadoitusten rakentaminen otollimpaan maaperään parantaa maadoitusolosuhteita koko maadoitusjärjestelmässä.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Omexom, joka on osa kansainvälistä Vinci Energies -konsernia. Lounais-Suomessa Omexom toimii sähkönjakeluverkkojen suunnittelu-, rakentamis- ja kunnossapitopalveluiden kokonaisvaltaisena tuottajana. Jakeluverkkoyhtiö Caruna on ollut viime vuodet suurin yhteistyökumppani.

Verkostosuunnittelun osalta Omexom tuottaa Carunalle rakennettavan tai saneerattavan sähköverkon kokonaisvaltaista suunnittelua toteutusvalmiisiin suunnitelmapaketteihin asti. Carunalla on tällä hetkellä työn alla ohjeistus suunnitteluvaiheessa tehtäville maaperän ominaisjohtavuusmittauksille, joihin maadoitusten suunnittelu tulisi uuden ohjeistuksen päivittymisen myötä perustamaan. Maaperän mittaustulosten ja maadoitusten rakennetietojen avulla käyttöönottovaiheen käännepistemittauksista olisi mahdollista luopua yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien osalta. Carunan ohjeistuksia ei siis ole käytössä tätä opinnäytetyötä tehdessä, mutta urakoitsijan näkökulmasta katsottuna koettiin tarpeelliseksi ja hyödylliseksi tarkastella, miten maaperän ominaisjohtavuusmittaukset pitäisi suunnittelussa huomioida. Osana tätä opinnäytetyötä suoritetaan myös maaperän resistiivisyysmittaukset Wenner- menetelmällä kolmelle Carunan verkonsaneeraustyömaalla rakenteilla olevalle muuntamolle. Tarkoitus on kerätä käyttökokemusta mittauksista ja toisaalta perehtyä mittaustulosten tulkintaan.

## **2 Sähköverkot**

Suomen sähköjärjestelmä koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista eli alueverkoista, jakeluverkoista ja sähkön kuluttajista. Suomen järjestelmä on yhtenäistä synkronialuetta Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan järjestelmien kanssa. Viroon Suomella on tasasähköyhteys. [1.]

### **2.1 Sähkönjakelujärjestelmä**

Kantaverkolla tarkoitetaan 400, 220 tai 110 kilovoltin suurjännitteistä sähkönsiirron runkoverkkoa, jonka toimivuudesta ja ylläpidosta huolehtii Fingrid. Silmukoitettuun runkoverkkoon on liitetty jakeluverkot, tehtaot sekä suuret voimalaitokset. Suomen kantaverkkoon kuuluvan voimajohdon pituus on yli 14 000 km ja sähköasemia on yli 120. Kantaverkonhaltija Fingrid vastaa kantaverkon valvonnasta, käytön suunnittelusta, tasepalvelusta, verkon ylläpidosta, rakentamisesta ja kehittämisestä. Vastuulla on myös sähkömarkkinoiden toiminnan edistäminen. [1.]



Sähkön jakelusiirrosta alue- ja jakeluverkoissa vastaavat verkonhaltijat. Suurin ero alue- ja jakeluverkkoyhtiöiden välillä on käytettävän jännitteen lisäksi verkkoluvan mahdollinen maantieteellinen vastuualue. Jakeluverkkoyhtiöillä on maantieteellinen vastuualue, jossa niillä on verkkomonopoli. Vastuualueen yksinoikeuteen liittyy liittämisen-, siirto- ja sähköverkon kehittämisvelvoite. Jakeluverkkoyhtiöt toimivat yleisesti joko 20, 10, 1 tai 0,4 kilovoltin jännitteellä. Alueverkkoyhtiöillä on käytössään vain suurjännitteistä 110 kilovoltin verkkoa, eikä niiden verkkolupaan kuulu maantieteellistä vastuualueita. Alueverkkoyhtiöt siirtävät pääasiallisesti sähköä 110 kilovoltin jännitteellä omistajiensa muuntoasemille. [2, s. 61–62.]

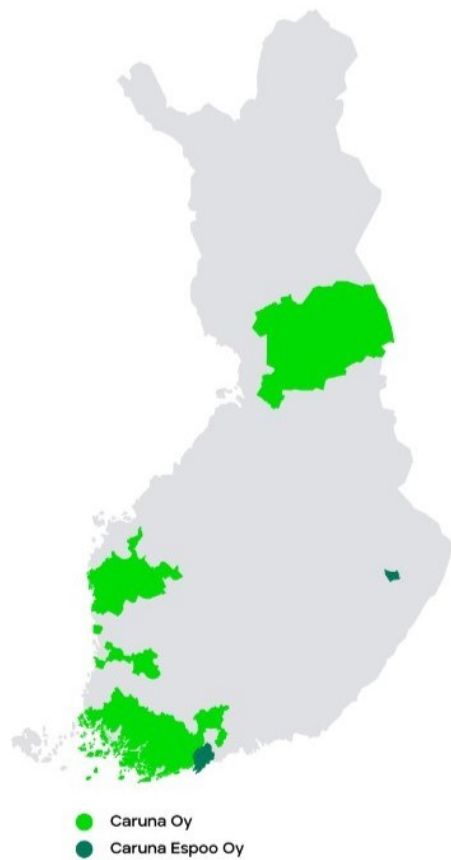
## 2.2 Jakeluverkkoyhtiöt

Sähköverkkoyhtiöitä, jotka ylläpitävät jakeluverkkoja, on hieman alle 80. Näistä yhteensä viisitoista suurinta sähkönjakeluverkkoyhtiötä kattavat noin 70 % jakeluverkoista, sähkön käyttäjistä ja yhtiöiden liikevaihdosta. Suurimmat jakeluverkkoyhtiöt ovat Caruna Oy, Elenia Verkko Oyj ja Helen Sähköverkko Oy. [3.]

Verkkoliiketoimintaa Suomessa valvoo työ- ja elinkeinoministeriön ohjauksessa toimiva Energiavirasto. Valvonta käsittää taloudellista ja teknistä valvontaa. Taloudellinen valvonta kohdistuu verkkoliiketoiminnasta syntyvään voittoon ja toisaalta verkkoyhtiöiden toimintojen tehostamiseen. Sähkön laadun valvonta ja erityisesti käyttövarmuuden valvonta liittyvät myös taloudelliseen valvontaan. Verkkoyhtiöiden näkökulmasta kehittämisstrategioilla ja niiden toteuttamisella on huomattava vaikutus sallittuun ja näin ollen myös toteutuvaan liiketaloudelliseen tulokseen. Tämä asettaa erityishaasteita kehityssuunnittelulle ja lopulta verkkoon tehtäville investoinneille. [4, s. 19–21.]

*Caruna* on tällä hetkellä Suomen suurin jakeluverkkoyhtiö vastaten 20 %:sta Suomen sähkönjakelusta. Vuonna 2023 Carunalla oli asiakkaita 737 000 ja jakeluverkkoihin kohdenetetut kokonaisinvestoinnit olivat 126,6 miljoonaa euroa. [5.] Carunaan kuuluu kaksi hyvin erilaista jakeluyhtiötä: pääosin kaupunkimaisissa olosuhteissa toimiva Caruna Espoo Oy ja pääasiassa haja-asutusalueilla

toimiva Caruna Oy [6]. Kuvassa 1 on esitelty Suomen kartta, josta näkee Caruna Oy:n ja Caruna Espoo Oy:n sähköverkon jakelualueet.



Kuva 1. Caruna Oy:n sähköverkon jakelualueet [6].

Carunan sähköverkon kokonaispituus on noin 89 250 kilometriä sisältäen ilma- ja maakaapelit. Vuonna 2023 rakennettiin maakaapeliverkkoa 1644 kilometriä ja vuoden loppuun mennessä sähköverkon kokonaiskaapelointiaste oli 65 %. [5.] Carunalle mennyt vuosi 2023 oli energiamurroksen näkökulmasta merkittävä, vaikka toimintaympäristö olikin kustannusnousun sävyttämää. Sähköverkot ovat keskeisessä asemassa energiamurroksen mahdollistajana. Energijärjestelmän sähköistäminen vaatii jakeluverkkoyhtiöiltä valtavia investointeja tulevien vuosien aikana. Sähkönkulutuksen arvioidaan kasvavan lähes 50 % vuoteen 2040 mennessä, mikäli Suomella on aikomus saavuttaa ilmastotavoitteensa asetussa aikataulussa. [7.]

## 2.3 Sähkömarkkinalaki

Sähkömarkkinalaki asettaa niin vaatimuksia kuin velvollisuuksiakin verkonhaltijoille. Sähköverkon suunnittelun kannalta yksi oleellisin verkonhaltijoita koskeva velvoite on sähköverkon kehittämisvelvoite. Tämä tarkoittaa, että verkko on suunniteltava ja rakennettava täyttäen toiminnan laatuvaatimukset ja toisaalta toimitettavan sähkönsäädin tekninen laatu on oltava hyvä. Oleellista on, että sähköverkko ja verkkopalvelut toimivat luotettavasti niin normaaliolojen häiriötilanteissa kuin myös ulkoisten häiriöiden vaikuttaessa. [8, 1. §.]

Sähkömarkkinalaki ohjaa painokkaasti verkkoyhtiöitä kehittämään verkkojaan ja huomioimaan sähköverkkojen säävarmuuden. Ajantasainen sähkömarkkinalaki ottaa kantaa jakeluverkkojen toiminnan laatuvaatimuksiin. Laki sanoo seuraavaa pykälässä 51 §

Jakeluverkko on suunniteltava ja rakennettava, ja sitä on ylläpidettävä siten, että:

- 1) verkko täyttää järjestelmävastaavan kantaverkonhaltijan asettamat verkon käyttövarmuutta ja luotettavuutta koskevat vaatimukset;
- 2) jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumikuorman seurauksena ei aiheuta asemakaava-alueella verkon käyttäjälle yli 6 tuntia kestävää sähkönsäädin jakelun keskeytystä;
- 3) jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumikuorman seurauksena ei aiheuta muulla kuin 2 kohdassa tarkoitettulla alueella verkon käyttäjälle yli 36 tuntia kestävää sähkönsäädin jakelun keskeytystä. [8, 51. §.]

Sähkömarkkinalain siirtymäsäännös, pykälä 119, antaa edellä luetelluille toiminnan laatuvaatimuksille sallitut siirtymäajat. Lain mukaan jakeluverkonhaltijoiden on vastuualueillaan täytettävä pykälän 51 vaatimukset päivitetyn siirtymäsäännöksen mukaan vuoden 2036 loppuun mennessä. Edellytyksenä on, että vastualueen keskijänniteverkon maakaapelointiasteen oli oltava enintään 60 % vuoden 2018 loppuun mennessä ja tällöin lain asettamat vaatimukset on täytettävä vuoden 2028 loppuun mennessä 75 %:lla jakeluverkon kaikista käyttäjistä luukuun ottamatta vapaa-ajan asuntoja. [8, 119. §.]

### 3 Sähköjakeluverkon suunnitteluprosessi

Jakeluverkon suunnittelu voi viedä aikaa vuosia, enimmillään jopa kymmeniä vuosia. Suunnittelu ja siihen liittyvät tehtävät voidaan jaotella pitkän aikavälin kehittämissuunnitteluun, verkostosuunnitteluun, maastosuunnitteluun, rakennesuunnitteluun ja työsuunnitteluun. Suunnitteluvaiheiden tavoitteena on saada aikaan teknisesti toimivia ratkaisuja mahdollisimman pienillä pitkän aikavälin kokonaiskustannuksilla. Pitkän aikavälin suunnittelun merkitys on suuri sähköjakeluverkon komponenttien teknistaloudellisten pitoaikojen ollessa pitkiä, noin 30–50 vuotta. [4, s. 63–64.]

Suunnitteluprosessin esittelyn osalta keskitytään vain pien- ja keskijänniteverkon verkosto- ja maastosuunnittelun käsittelyyn, johon rakennesuunnittelu on sisällytetty. Verkosto- ja maastosuunnitteluvaiheetkin käytännössä usein limittyvät toisiinsa hyvin vahvasti. Maadoitustarkastelun painopiste tulee jatkossa siirtymään verkosto- ja maastosuunnitteluvaiheeseen, jossa maadoitusverkon mitoituskennat ovat merkittävässä roolissa.

#### 3.1 Verkostosuunnittelu

Verkostosuunnittelu eli sähköinen suunnittelu luo pohjan suunnitelmapaketille. Suunnitelma toteutetaan verkonhaltijan verkkotietojärjestelmässä, josta Trimble NIS -verkkotietojärjestelmä on käytetyin. Sähköinen suunnittelu määrittää verkon rakentamisessa käytettävät komponentit, hahmottelee uuden maakaapeli-reitin sekä varmistaa sähkötekniisten reunaehtojen toteutumisen niin sähköverkko-suunnittelua ohjaavien standardien kuin myös jakeluverkkoyhtiön, jolle työ tehdään, tavoitteiden mukaisesti. Jakeluverkkojen osalta sähköisen suunnittelun yksi merkittävimmistä tehtävistä on määrittellä muuntopiirit sekä muuntamoiden määrä ja sijainti, sillä näillä on vaikutusta pienjänniteverkon muotoon sekä mitoitukseen. [4, s. 261].

Uuden verkostosuosituksen RJ 22.22 [9, s. 17–18] mukaan verkon maadoitusjärjestelmä on osa sähkötekniistä suunnittelua. Muuntamon maadoituslaskennan lähtötietoina voi käyttää maaperäkartasta saatua arviota maaperän ominaisresistiivisyydestä ja suunniteltujen maadoituselektrodien rakenne- ja geometriatietoja. Hyväksi voi myös käyttää jo tiedossa olevia maadoitusimpedanssitietoja, jotka on käännepestemenetelmällä mitattu esimerkiksi vanhalta pylväsmuuntamolta. [9, s. 17–18.]

Carunan verkostosuunnittelijana toimii urakoitsija tai vaihtoehtoisesti urakoitsijan aliurakoitsija. Suunnittelija ottaa huomioon verkkoyhtiön rakennustavat ja sähköverkoja koskevat ohjeistukset, määräykset ja standardit, jotta sähköverkosta tulee turvallinen. Myös olemassa olevan ilmajohtoverkon purku sisältyy olennaisesti sähköiseen suunnitteluun. Sähköinen suunnitelma hyväksytetään verkkoyhtiöllä. [10, s. 33–34.]

### 3.2 Maastosuunnittelu

Ajankäytöllisesti suurimman osan suunnittelutyöstä vie maastosuunnittelu. Yleistä on, että sama henkilö on vastuussa sekä verkosto- että maastosuunnittelusta. Tämä nopeuttaa ja helpottaa maastosuunnitteluvaiheen aloitusta. Maastosuunnittelussa on yksinkertaistettuna kyse sähköisen suunnitelman sijoittamisesta maastoon, kun huomioon otetaan todelliset olosuhteet maastossa sekä maankäyttöön oleellisesti liittyvä luvitus. Yksityisten maanomistajien ja etenkin viranomaislupien selvittämiseen ja hoitamiseen saattaa kulua huomattavan paljon aikaa. [10, s. 33–34.] Yksityisten maanomistajien ohella kiinteistöjä, alueita ja muuta huomioon otettavaa infrastruktuuria hallinnoivat esimerkiksi kunnat ja kaupungit, ELY-keskus, Väylävirasto, aluehallintavirastot, Museovirasto ja maakuntamuseot, tiehoitokunnat, vesiosuuskunnat ja muut verkkoyhtiöt. Eri virastojen ja tahojen lausunto- ja lupakäytänteet vaihtelevat, joten ne vaativat perehtymistä.

Maankäyttöasioissa on ensiarvoisen tärkeää, että yhteistyö maanomistajien, viranomaisten ja ympäristöjärjestöjen kanssa on sujuvaa. Verkon

reittisuunnittelussa ja rakennevalinnoissa otetaan huomioon ja sovitetaan yhteen eri sidosryhmien tarpeet. Maanomistajia kohdellaan tasapuolisesti ja sähköverkon sijoittamisesta maanomistajan kiinteistön alueelle sovitaan aina ensisijaisesti maanomistajan kanssa. [11.]

Maastosuunnitteluvaiheessa määritetään maakaapeleiden tarkka reitti sekä muuntamoiden, kompensointikelojen ja jakokaappien paikat. Maaperän ominaisuuksilla on vaikutusta reitti- ja paikkavalinnoissa. Esimerkiksi kalliot ja kiviset alueet kannattaa mahdollisuuksien mukaan välttää. [10, s. 34.] Maastosuunnitteluun kuuluu myös luontevasti rakennesuunnittelua jäävän ilmalinjan osalta. Pylväiden vaihdot, harukset, orsirakenteet ja mahdolliset pylväsnousut suunnitellaan kaapelireittien ohessa. Muuntamoiden ja kompensointikelojen sijoittelulla on suuri merkitys verkon toimivuuden ja turvallisuuden kannalta. Siksi maastosuunnittelussa ei välttämättä ole mielekästä lähteä niiden paikkoja siirtämään radikaalisti sähköiseen suunnitelmaan nähden.

Maastosuunnitteluvaiheeseen liittyy uuden verkostosuosituksen mukaan maaperän ominaisjohtavuuksien todentaminen mittaamalla. Mittauksilla tarkennetaan sähköisen suunnittelun arviota maadoituksista ja lopulliset maadoituselektrodien rakenteet mitoitetaan vasta maastosuunnitteluvaiheessa tehtyjen mitaustulosten perusteella. [9, s. 18.] Maadoituslaskenta, joka on tehty jo osana sähköistä suunnittelua, on tarkoitus toistaa maastosuunnitteluvaiheessa ja tarkistaa, että maadoitusjärjestelmälle asetetut raja-arvot täyttyvät tässäkin vaiheessa suunnittelua.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään sähköverkon maadoitukseen ja erityisesti jakeluverkon maadoitusten suunnitteluun maakaapeloidussa verkossa. Tästä näkökulmasta ajatellen verkko ja sen rakenteet, kuten muuntamot, tulisi sijoittaa maastollisesti ja verkon turvallisuuden kannalta sopiviin paikkoihin. Ylempänäkin mainittua sidosryhmien vaikutusta ei kuitenkaan voi jättää huomioimatta, ja siksi usein käykin niin, että muuntamon maadoitusolosuhteet eivät välttämättä ole kaikkein optimaalisimmat.

## 4 Jakeluverkon maasulku ja vaarajännitteet

Yleisimmät vikatyypit jakeluverkossa ovat oiko- ja maasulku. Maadoituksilla on merkityksellinen rooli maasulun ja etenkin maan potentiaalın kasvuun, jonka maasulku aiheuttaa, kannalta. Tässä luvussa perehdytään tarkemmin vain yksivaiheisten maasulkujen aiheuttamiin ilmiöihin.

### 4.1 Maasulku maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa

Maasulussa jännitteinen virtapiiriin johdin kytkeytyy maahan. Johdin voi joutua johtavaan yhteyteen suoraan maan kanssa tai vaihtoehtoisesti jonkin impedanssin kautta. Maasulun aiheuttajia ovat esimerkiksi ilmalinjalle kaatunut puu, salaman isku tai erilaiset verkon komponenttien hajoamiset. [12, s. 340.] Maakaapeleiden aikaansaama maasulkuvirta on kymmeniä kertoja suurempi kuin ilmajojoilla. Suomessa keskijänniteverkon maadoitustapa on joko maasta erotettu tai sammutettu.

Maasulun aiheuttaman maasulkuvirran vaihteluväli on yleensä 5–100 A. Maasulkuvirran suuruus on riippuvainen muuntajaan galvaanisesti yhdistetyn verkon laajuudesta. Vikaresistanssin  $R_f$  ollessa nolla, on viallisen vaiheenkin jännite nolla. Tällöin terveet vaiheet ovat pääjännitteen suuruisia ja nollajännite vastavasti vaihejännitteen suuruinen. Vikaresistanssin muutoksilla on vaikutusta maasulkuvirran ja nollajännitteen arvoihin. Keskijänniteverkon maasulun aiheuttamat voimakkaat jännitemuutokset eivät kuitenkaan aiheuta ongelmia jakelumuuntajan toisiopuolella eli pienjännitepuolella, kun jakelumuuntajan ensiökäämit ovat kolmiokytketyt niin kuin Suomessa yleisesti tapana on. [4, s. 186, 189.]

Maasta erotettu keskijänniteverkko on tähtipisteestään maasta erotettu. Maasulkuvirralla on paluureitti vikapaikasta johtojen maakapasitanssien ja vaihejohtimien impedanssien kautta vikapaikkaan. Huonot maadoitusolosuhteet ja maasulkuvirran suuruus aiheuttavat kosketusjänniteongelman. Niinpä huonot maadoitusolosuhteet ovatkin suurin syy maasta erotetun verkon käyttöön. [4, s.

182–183.] Ilmajohtoverkkojen maadoitustapana on perinteisesti käytetty maasta erotettua verkkoa.

Maakaapeliverkoissa on yleisesti käytössä sammutettu maadoitustapa, jossa verkon tähtipisteeseen kytketään induktiivinen sammutuskuristin eli kela. Sammutuskuristin kompensoi induktiivisella virralla johtimien maakapasitanssien aiheuttamaa kapasitiivista virtaa. Näin voidaan vikatilanteessa pienentää maasulkuvirtaa sekä kosketusjännitettä. Pienempi maasulkuvirta antaa hyvät mahdollisuudet valokaarimaasulun itsestään sammumiseen, jolloin lyhyiden sähkökatkojen määräkin vähenee. Pienempi maasulkuvirta pienentää myös maadoitusjännitteitä, jolloin pidemmät laukaisuajat ovat sallittuja. [4, s. 182–183, 189.]

Sammutettua verkkoa voidaan kutsua myös kompensoiduksi verkoksi ja sammutuskelasta saatetaan käyttää nimitystä Petersenin kela. Sammutuskelan induktanssin on oltava säädettävä, koska päämuuntajaan kytketyn yhtenäisen jakeluverkon pituus saattaa vaihdella erilaisissa käyttötilanteissa. Kelaa varten rakennetaan usein erillinen maadoitusmuuntaja, koska verkon tähtipistettä ei muuten useinkaan ole mahdollista saada esille päämuuntajan kolmiokytkentäisestä toisiokäämistä. [2, s. 210.] Sammutuskeloja sijoitetaan joko sähköasemille tai johtolähtöjen varsille. Keskitetystä kompensoinnista on kyse silloin, kun sammutuskela on sijoitettu sähköasemalle ja se kompensoi ainoastaan päämuuntajan alueen kapasitiiviset virrat. Johtolähtöjen varsille sijoitetut sammutuskelat kompensoivat johtolähtöjen maasulkuvirtoja ja tällöin kyseessä on hajautettu kompensointi. [13, s. 26.]



## 4.2 Maasulun aikaiset vaarajännitteet

Vaarajännitteitä ovat kosketus- ja askeljännitteet, joihin liittyy maadoitusjännitteen käsite. Harvinaisempia vaarajännitteitä ovat siirtyvät jännitteet ja takaperoiset kosketusjännitteet. [12, s. 428.] Tässä luvussa tutustutaan vain maadoitusjännitteen aiheuttamiin kosketus- ja askeljännitteisiin.

### 4.2.1 Maadoitusjännite

Maadoitusjännite kuvaa maadoitusjärjestelmän ja riittävän etäällä olevan referenssimaan välistä jännitettä. Referenssimaan sähköiseksi potentiaaliksi on sovittu nolla, joten normaalitilassa maadoitusjännitteenkin suuruus on lähellä nollaa. Maavirta  $I_E$  on maadoitusimpedanssin kautta maahan kulkeva virta eli juuri se osa maasulkuvirtaa, joka on maadoitusjännitteen aiheuttaja. Vikatilanteessa maavirta  $I_E$  aiheuttaa maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan potentiaalinnousun, jonka suuruus on riippuvainen maavirrasta  $I_E$  ja maadoitusimpedanssista  $Z_E$  Ohmin lain mukaisesti. [14, s. 17–22.] Maadoitusjännite voidaan laskea kaavalla 1.

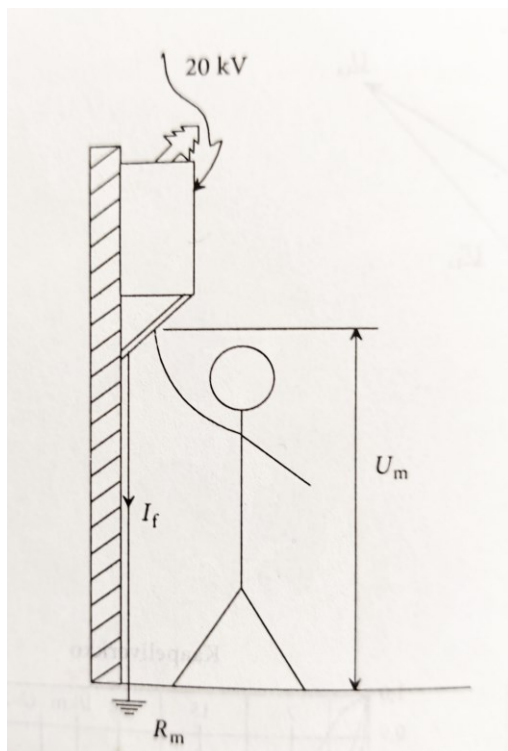
$$U_E = I_E \cdot Z_E \quad (1)$$

$U_E$  on maadoitusjännite

$I_E$  on maavirta

$Z_E$  on maadoitusimpedanssi

Seuraavalla sivulla kuvassa 2 näkyy tyypillinen salamaniskun aikaansaama maasulkutilanne. Salamaniskun aiheuttama ylijännite menee ylijännitesuojan kautta lopulta muuntamon maadoitukseen.



Kuva 2. Maadoitusjännitteen syntyminen. Kuvassa  $I_f$  on maasulkuvirta,  $R_m$  on maadoitusresistanssi ja  $U_m$  on maadoitusjännite. [4, s. 188.]

Maadoitusjännite on ihmisten ja eläinten kosketeltavissa olevan kosketusjännitteen aiheuttaja [4, s. 188].

#### 4.2.2 Askel- ja kosketusjännitteet

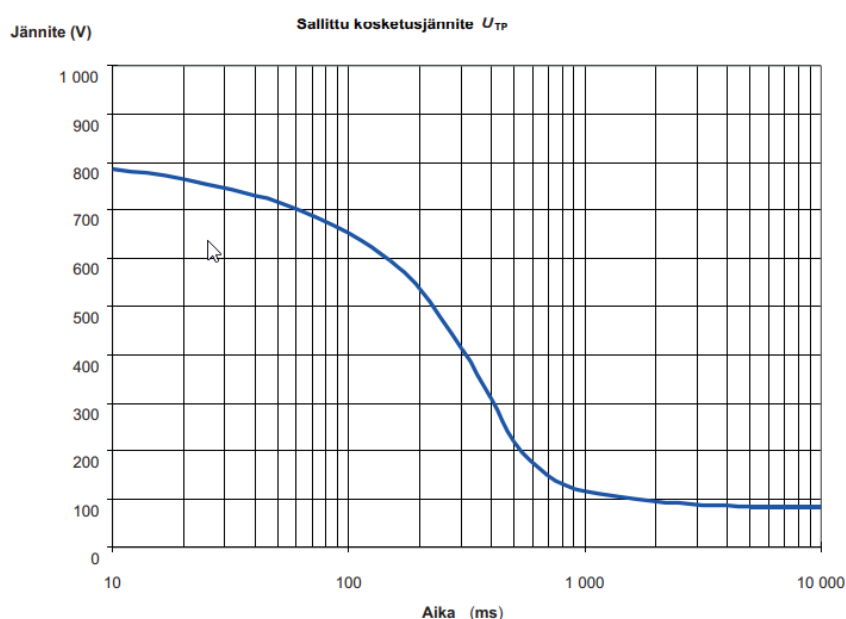
Kosketusjännite määritellään samanaikaisesti kosketeltavissa olevien johtavien osien väliseksi jännitteeksi. Askeljännite taas kuvaa kahden maanpinnalla olevan pisteen välistä jännitettä. Näiden pisteiden etäisyys toisistaan on määritetty yhden metrin pituiseksi, jonka oletetaan olevan askelpituuden mitta. [14, s. 19.]

Askeljännitteelle ei ole määritelty suurimpia sallittuja raja-arvoja standardissa. Yleisesti pätee, että jos kosketusjännitteelle asetetut vaatimukset täytetään, täytetään samalla myös askeljännitteelle annetut vaatimukset. Virtatie kehon läpi on erilainen, joten sallitut askeljännitteiden raja-arvot ovat paljon suurempia kuin kosketusjännitteiden raja-arvot. [14, s. 87.]

Standardi on asettanut ja määritellyt raja-arvot kosketusjännitteelle  $U_{TP}$ . Sallittu kosketusjännite on riippuvainen vian kestoajasta. Vian ylittäessä 10 sekuntia sallitun kosketusjännitteen arvo ei enää juurikaan laske tai muutu. Onkin sovittu, että vian kestoajan ollessa selvästi yli 10 sekuntia voidaan sallittuna kosketusjännitteen arvona käyttää 80 voltia. [14, s. 104.]

Sallittujen kosketusjännitteiden laskennan oletuksen mukaan virtatie on toisesta kädestä jalkoihin, kehon impedanssin todennäköisyys on 50 % ja sydänkammiövärinän todennäköisyys vastaavasti 5 %. Lisäresistansseja, kuten jalkineita, ei oteta huomioon. Mikäli lisäresistanssit halutaan huomioida, voidaan sallituille kosketusjännitteille sallia suurempia arvoja. Standardissa on lisäresistansseille määritellyt laskentamenetelmät. Maasulkutilanteiden aiheuttamia hyvin pitkäaikaisia tai rajoittamattomia kosketusjännitteitä ei esiinny, koska jokainen maasulku on standardin mukaisesti kytkettävä pois käsin tai automaattisesti. [14, s. 91, 103.] Kosketusjännitteiden hallinnan osalta onkin tärkeää pienentää maasulkuvirtoja kompensoimalla, lyhentää vian laukaisuaikoja relesuojauksella ja parantaa maadoituksia.

Kuvassa 3 esitetään sallittu kosketusjännite  $U_{TP}$  vian kestoajan funktiona.



Kuva 3. Vian kesto aika ja sitä vastaava sallittu kosketusjännite [15, s. 93].

Maadoitusten mitoituksen pohjana käytetään kuvan 3 mukaisia sallittujen kosketusjännitteiden arvoja, joiden monikertoja verrataan maadoitusjännitteisiin. Kosketusjännitteelle saadaan laskettua suurin sallittu arvo kaavan 2 avulla.

$$U_E \leq F \cdot U_{TP} \quad (2)$$

$U_E$  on maadoitusjännite

$F$  on kerroin, jonka suuruus määräytyy muuntopiirin olosuhteiden ja toteutetun maadoitusasennuksen mukaan

$U_{TP}$  on sallittu kosketusjännite (V)

Yhtälön kertoimen  $F$  suuruus on riippuvainen maadoitusjärjestelmän rakenteesta ja vallitsevista olosuhteista [14, s. 94]. Maadoitusjännitteen tavoitetaso  $U_{TP}$  ja siihen liittyvät ehdot pyritään täyttämään, kun maadoituksia suunnitellaan. Mikäli teknisistä tai taloudellisista syistä tavoitetasoa ei ole mahdollista saavuttaa, voidaan kertoimelle  $F$  käyttää arvoja 4 ja 5 määrätyin ehdoin. [15, s. 9–13.] Maadoitusryhmien rakenteellisiin vaatimuksiin perehdytään paremmin luvussa 5, jossa käsitellään maadoitusten mitoitusta ja suunnittelua.

## 5 Maadoittamisen periaatteet

Maadoitusten tehtävänä on mahdollistaa sähköjärjestelmän laitteen tai virtapiirin jonkin kohdan yhteys maahan maadoituselektrodin välityksellä [12, s. 427]. Maadoitusjärjestelmillä pyritään ennen kaikkea sähköjärjestelmien turvallisuuteen. Maadoituksilla luodaan toimintaedellytykset maasulku- ja vikasuojaukselle ja näin estetään vaarallisten kosketusjännitteiden syntyminen.

Maadoituksille on olemassa seuraavanlaisia standardin mukaisia rakenteellisia perusvaatimuksia:

- tarvittava mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys
- suurimman lasketun vikavirran vaikutusten terminen kestävyys
- omaisuudelle ja laitteille tapahtuvien vahinkojen estäminen
- maasulun aikaisen henkilöturvallisuuden varmistaminen kaikissa tilanteissa [12, s. 430].

Maadoitukset ovat joko käyttö- tai suojamaadoituksia. Käyttömaadoituksesta on kyse, kun virtapiiriin kuuluva osa, esimerkiksi pienjännitejärjestelmän nollakohta, maadoitetaan. Käyttömaadoituksen tehtävänä on pitää jännite-epäsymmetria ja maavirta pienenä sekä vaihejohtimen jännite maahan nähden sellaisena, ettei vaaratilanteita ja vaurioita pääse syntymään. Suojamaadoituksessa yhdistetään virtapiiriin kuulumaton jännitteelle altis osa maadoitukseen. Tällainen jännitteelle altis osa voi olla esimerkiksi muuntamon runko. Suojamaadoituksella on tärkeä tehtävä vaarallisten kosketusjännitteiden synnyn estämisessä. [12, s. 427.]

Tässä luvussa esitellään maadoituksen pääkomponentteja ja puistomuuntamon maadoitusten periaatteita tavanomaisissa olosuhteissa. Näistä rakentuu lopulta erilaisia maadoitusjärjestelmien kokonaisuuksia.

## 5.1 Maadoitusten pääkomponentit

*Maadoituselektrodeilla* luodaan johtava yhteys paikalliseen maaperään. Maadoituselektrodit ovat tyypillisesti metallisia vaaka-, pysty- tai vinoelektrodeja. Koska maadoituselektrodit ovat suoraan kosketuksissa maan kanssa, niiden tärkein mitoittava tekijä on korroosion kestävyys. Niiden on kestävä mekaanisia rasituksia sekä asentamisen että normaalin käytön aikana. Standardi SFS 6001 määrittelee maadoituselektrodien vähimmäispoikkipinnat. Kupari on yleisin jakeluverkoissa käytetty elektrodimateriaali. Kuparin vähimmäispoikkipinta- mitaksi on standardissa määritetty  $25 \text{ mm}^2$ , mutta  $16 \text{ mm}^2$ :n poikkipintaista kupariakin on Suomessa poikkeuksellisesti lupa käyttää korroosion ja mekaanisen

vaurioitumisen riskin ollessa vähäinen. [14, s. 88, 108.] Jakeluverkoissa maadoituselektrodeja löytyy koko verkon matkalta aina sähköasemilta asiakkaiden liittymille asti.

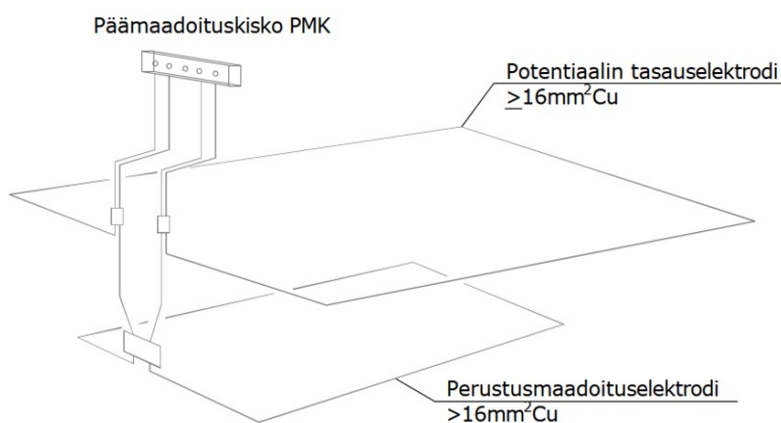
*Maadoitusjohtimilla* yhdistetään erilaisia asennuksia, laitteistoja ja järjestelmiä. Tyypillisinä maadoitusjohtimina toimivat kaapeleiden keskusköydet ja saattokuparit sekä keskijännitekaapeleiden kosketussuojat ja pienjänniteverkon PE- ja PEN-johtimet. Carunan jakeluverkkorakentamisessa hyvin tavanomainen 20 kilovoltin maakaapeli AHXAMK-WP eli Wiski Plain -maakaapeli koostuu kolmesta vesitiiviistä alumiinijohtimesta. Kyseisessä kaapelissa ei ole kuparista keskusköyttä, vaan johdinsuojan ja eristyskerrosten päällä on metallinen kosketussuoja. [16.] Riittävän suurella poikkipinnalla varustettuna tämä kosketussuoja yhdistää maadoitusjärjestelmiä. Maadoitusjohtimien tärkein mitoittava tekijä onkin terminen vikavirtakestoisuus. Mitoitusperusteena käytetään yleisesti tavoiteverkon kapasitiivista maasulkuvirtaa suhteessa ekvivalenttiseen poiskytkentäaikaan, mutta myös kaksoismaasulkukestoisuus tulee huomioida yhtenä suunnittelukriteerinä. Standardin määrittämät vähimmäispoikkipinnat maadoitusjohtimille ovat kupari 16 mm<sup>2</sup>, alumiini 35 mm<sup>2</sup> tai rauta 50 mm<sup>2</sup>. [9, s. 7–8, 17.]

*Potentiaalintasauksella ja -ohjauksella* pyritään tasapotentiaalilin luomiseen ja pääasiassa potentiaalilin ohjaukseen, eikä tietyn maadoitusresistanssin saavuttaminen ole varsinaisesti tarkoituksena. Potentiaalintasausjohtimien mitoitus on yhteneväinen maadoitusjohtimien vähimmäismitoituksen kanssa. Jos maadoitus- ja potentiaalintasausjohtimet on valmistettu teräksestä, ne pitää suojata korroosiolta. [14, s. 88.] Potentiaalintasauksessa on olennaista, että päämaadoituskiskoon liitetään potentiaalintasausjohtimien lisäksi maadoituksen muut johtimet. Standardin vaatimuksena on, että jokainen päämaadoituskiskoon liitetty johdin on oltava irrotettavissa yksitellen. [17, s. 337–338.]

## 5.2 Puistomuuntamon maadoitus haja-asutusalueella

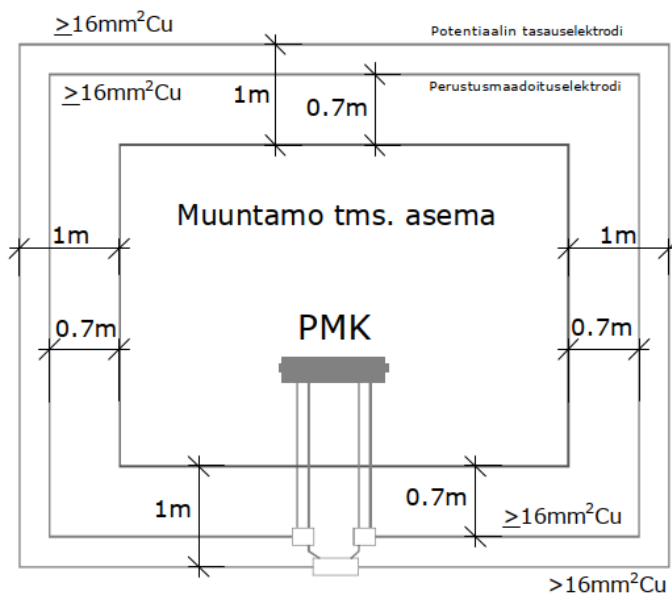
Muuntamot ovat jakeluverkon solmukohtia, ja niillä on keskijänniteverkon maasulkutilanteiden hallitsemisessa merkittävä rooli. Keskijänniteasennusten maadoituksilla on laaja vaikutus. Kun käytetään keski- ja pienjännitteellä yhdistettyä maadoitusta, maadoituksen vaikutukset näkyvät koko muuntopiirissä suojamaadoitettuja pienjännitelaitteita myöten. [18, s. 50.] Standardi edellyttääkin, että keskijännite- ja pienjänniteverkon maadoitukset tulisi yhdistää aina, kun se on mahdollista [14, s. 95].

Muuntamon perustuksiin tehtävä potentiaalintasaus asennetaan vakiorakenteisesti. Muuntamon perustuksia tehdessä poistetaan ensin maa-aines täytön ja routaeristyksen vaatimassa laajuudessa. Kaivannon pohjalle asennetaan perustusmaadoituselektrodi alimmaisiksi. Tämän päälle tulee suodatinkangas, routaeristeen alapuoliset täytöt, routaeristeet ja lopulta routaeristeen yläpuoliset täytöt. Kaivannon lopullisten täyttöjen yhteydessä asennetaan potentiaalintasaus-  
elektrodi. Perustusmaadoituselektrodi ja potentiaalintasaus-  
elektrodi yhdistetään puristusliitoksilla ennen kuin ne viedään päämaadoituskiskolle. Kuvassa 4 on nähtävillä periaatekuva muuntamon perustusmaadoituksista sivulta päin katsottuna.



Kuva 4. Aksonometrinen kuvanto perustusmaadoitus- ja potentiaalintasaus-  
elektrodista [19].

Kuvassa 5 havainnollistetaan muuntamon perustusmaadoituksia ylhäältä päin. Perustusmaadoituselektrodi asennetaan noin 1 metrin syvyyteen ja 0,7 metrin päähän oletetusta muuntamon seinälinjasta. Potentiaalintasauselektrodi vastaa- vasti asennetaan noin 0,3 metrin syvyyteen muuntamon tulevasta täyttötasosta ja 1 metrin päähän muuntamon seinälinjasta.



Kuva 5. Perustusmaadoituselektrodi ja potentiaalintasauselektrodi ylhäältä katsottuna [19].

Kaapeliyakohtaisella saattomaadoituksella eli vaakamaadoituksella voidaan täydentää muuntamon maadoituksen vakiorakenteita. Saattomaadoitus liitetään muuntamon päämaadoituskiskoon. Vaakamaadoituksen sijasta on mahdollista käyttää myös pysty- tai diagonaalimaadoitusta. Teknisesti ja taloudellisesti tämä saattaisi olla järkevää esimerkiksi tilanteessa, jossa maaperä on vahvasti kerrostunut eikä kontaktia johtavaan maaperään saavuteta ilman pysty- maadoitusta.



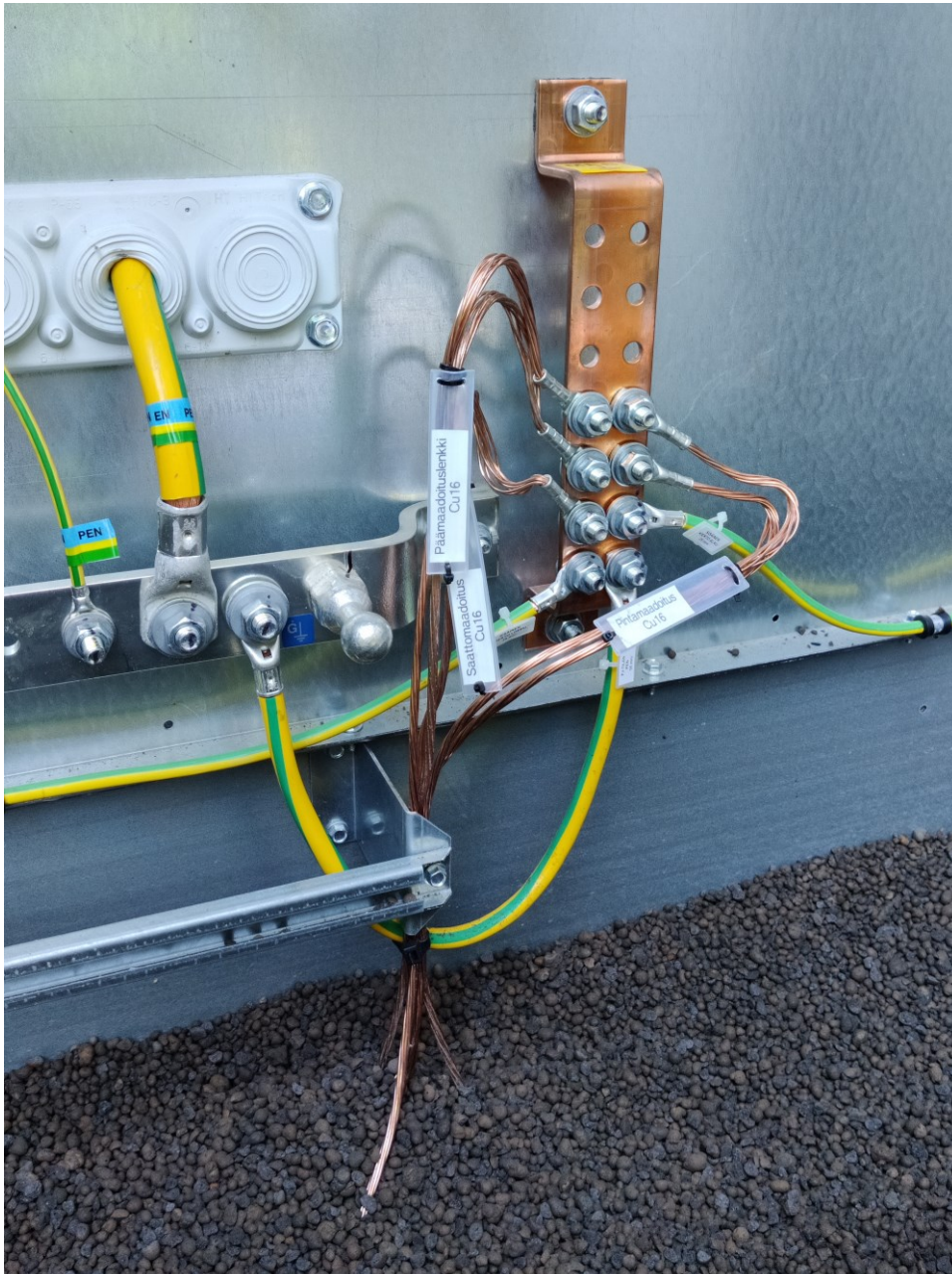
Kuvassa 6 on nähtävillä muuntamopaikan kaivanto, jonka pohjalle alimmaiseksi on levitetty perustusmaadoituselektrodi.



Kuva 6. Perustusmaadoituselektrodi levitettynä kaivannon pohjalle.

Muuntamon päämaadoituskiskoon kootaan ja liitetään koko muuntamon maadoitusjärjestelmä keski- ja pienjännitepuolelta sekä muuntajatilasta unohtamatta varsinaista muuntamon koppia. Kaikki päämaadoituskiskoon liitetyt maadoitusjohtimet jäävät näkyville, ja jokainen kiskoon liitettävä maadoituselektrodi on

voitava irrottaa erikseen. Kuvassa 7 on nähtävillä puistomuuntamon pienjännitepuolen johtimia ja päämaadoituskisko, johon on liitetty muun muassa perustusmaadoituselektrodit ja saattomaadoituselektrodi.



Kuva 7. Pienjännitepuolen johtimia ja päämaadoituskisko.

Muuntamon keskijännitepuolen yhden vaiheen avokaapelipääte ja sen maadoitukset ovat nähtävillä kuvassa 8.



Kuva 8. Keskijännitetilän 20 kilovoltin maakaapelin avopääte ja sen maadoitusjohtimet.

Vaihejohtimien alumiiniset kosketussuojat on kytketty keskijännitepuolen maadoituskiskoon, joka on yhteydessä muuntamon päämaadoituskiskoon. Keskijännitekaapelit kosketussuojineen yhdistävät erilliset maadoitukset laajemmiksi maadoitusjärjestelmiksi, joita käsitellään seuraavaksi.

### 5.3 Maadoitusjärjestelmät

Standardi SFS 6001:2018 määrittelee maadoitusjärjestelmän liitântöjen ja laitteiden välttämättömäksi järjestelmäksi, jotta laitteet tai järjestelmät voidaan maadoittaa yhdessä tai erikseen [14, s. 18]. Ilmajohtoverkkojen maadoitusjärjestelmät ovat perinteisesti olleet pylväsmuuntamoille rakennettuja paikallisia maadoitusjärjestelmiä, jotka ovat erillään toisista muuntopiireistä. Maakaapeloinnin yleistyessä paikalliset ja erillään olevat maadoitukset ovat ketjuuntuneet ja yhdistyneet maakaapeleiden kosketussuojien, keskusköysien ja erillisten maadoitusjohtimien välityksellä mahdollistaen galvaanisesti toisiinsa yhteydessä olevia maadoitusjärjestelmiä. [20, s.11.] Nykyään on tavallista, että yhä useampi jakeluverkon uudisrakennus- tai saneerauskohte on jollakin tavoin yhteen liittynyt maadoitusjärjestelmä. Tämä luo haasteita maadoitusjärjestelmien luotettavalle turvallisuuden varmistamiselle. [9, s. 6.]

#### 5.3.1 Yksittäinen maadoitusjärjestelmä

Yksittäinen maadoitusjärjestelmä tarkoittaa sellaista maadoitusjärjestelmää, jolla ei ole galvaanista yhteyttä muiden suurjännitejärjestelmien maadoitusten kanssa. Tällaisia ovat tyypillisesti jo aikaisemminkin mainitut ilmajohtoverkon jakelumuuntamoiden maadoitusjärjestelmät. Keskijännitteisen ilmajohtoverkon muuntamoiden välillä ei tyypillisesti ole maadoitusyhteyksiä, ja siksi maadoitusjärjestelmät ovat jääneet yksittäisiksi järjestelmiksi. Yksittäiseksi maadoitusjärjestelmäksi luokitellaan myös sellaiset maadoitukset, joissa on korkeintaan kahden suurjännitejärjestelmän maadoitukset galvaanisesti yhteydessä toistensa järjestelmiin. [14, s. 145.]

Yksittäisen maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssin suuruudelle on asetettu sallittu arvo [14, s. 145]. Maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssin suuruus on todennettava standardin vaatimien käyttöönottotarkastusten ja mitausten avulla. Maadoitusimpedanssin suuruus mitataan käytännössä käännepistemenetelmällä. Kunnossapidon osalta maadoitusjärjestelmien jatkuvuutta ja eheyttä suositellaan mitattavaksi suurivirtaisella DC-jatkuvuusmittauksella tai

muulla varmistetulla tavalla. [9, s. 16.] Yksittäisen maadoitusjärjestelmän toimivuus ja vaatimusten toteutuminen on varmistettava määräajoin uusimalla maadoitusimpedanssin mittaus. Suositeltu mittausväli maadoitusimpedanssille on 6 vuotta, kun maadoitus on vain yhden maadoitusjohtimen varassa. Mittausväliä voidaan oleellisesti kasvattaa 12 vuoteen, mikäli järjestelmän maadoitus on useamman kuin yhden maadoitusjohtimen varassa. [14, s. 145–146.]

Kasvavat maasulkuvirrat aiheuttavat ongelmia yksittäisille maadoitusjärjestelmille. Jakeluverkkoa saatetaan saneerata vain osittain maakaapeloimalla, ja osa käyttökelpoisesta ilmalinjaverkosta jää toimintaan. Tällaisessa tilanteessa verkoon jäävien yksittäisten maadoitusjärjestelmien kosketusjännitevaatimukset eivät enää välttämättä toteudu. Standardin SFS 6001:2018 opastavan liitteen NB.6 [14, s. 152] mukaan vanhoille asennuksille voidaan kosketusjännitetarkastelu tehdä noudattaen valmistumisajankohdan mukaisia määräyksiä. Toisaalta standardi muistuttaa, että maasulkuvirran kasvaminen ei saa johtaa minkään muuntamon maadoitusjännitteen sallitun arvon ylittymiseen [14, s. 152]. Yksittäisiä maadoitusjärjestelmiä pyritäänkin kytkemään galvaanisesti muihin maadoitusjärjestelmiin aina, kun se on teknisesti kannattavaa ja toisaalta mahdollista. Tällöin on muuttuvan verkon maadoitustilannetta tarkasteltava niin, että määräykset täyttyvät edelleen esimerkiksi maadoitusarvojen ja dokumentoinnin osalta.

### 5.3.2 Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä

Yhtenä maadoitusjärjestelmänä voidaan käsitellä maadoitusjärjestelmää, joka on luotettavasti galvaanisesti yhdistetty vähintään kahteen muuhun suurjännitejärjestelmään. Tällöin yhtenäisessä ketjussa on vähintään kolme maadoitusjärjestelmää, jotka tyypillisesti ovat jakelumuuntamoita. Maadoitusjärjestelmien yhdistäminen voidaan toteuttaa keskijännitekaapelin keskusköysien ja kosketussuojien avulla. Pienjänniteverkon PE- tai PEN-yhdistyksiä ei oteta huomioon maadoitusjärjestelmän kannalta yhdistävänä tekijänä. Laskennassa kuitenkin pienjänniteverkon maadoitukset, esimerkiksi AMKA-ilmajohdon PEN-maadoitukset, voidaan ottaa huomioon osana maadoituselektrodiverkkoa.

Keskijännitteisessä ilmajohtoverkossa maadoitusjärjestelmiä voidaan yhdistää toisiinsa myös pylväissä kulkevien erillisten maadoitusjohtimien avulla. Suomen olosuhteissa tyypillisiä yhteen liitettyjä maadoitusjärjestelmiä muodostuu taajamien ja maaseudun maakaapeloidun keskijänniteverkon jakelumuuntamoista tai sähköasemista, joiden maadoitusjärjestelmät ovat yhteydessä toisiinsa. Maadoitusjärjestelmät ovat ketjumaisesti tai silmukkamaisesti yhteydessä toisiinsa, mutta laajan maadoitusjärjestelmän ehdot eivät toteudu. Syynä on useasti muuntamoiden liian pitkä etäisyys toisistaan. [9, s. 17–19, 30.]

Kuvassa 9 on nähtävillä yksinkertainen periaatekuva yhteen liitetystä maadoitusjärjestelmästä. Keskellä oleva jakelumuuntamo on yhteydessä viereisiin suurjännitejärjestelmiin.



Kuva 9. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän muodostuminen [9, s, 17].

Yhteen liitetylle maadoitusjärjestelmälle tehdään aina käyttöönottotarkastus ja jokaisesta maadoitusjärjestelmästä määritetään resultoiva maadoitusimpedanssi. SFS 6001:2018 -standardin mukaan yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssin riittävän pieni arvo on mahdollista määrittellä monin eri tavoin. [14, s. 145.]

Maadoitusimpedanssi voidaan mitata käännepistemethodella käyttäen voltti- ampeerimethodää määrittämällä kosketusjännitteen suuruus. Käännepistemethoda on standardin mukaan todettu epäluotettavaksi mittaustavaksi mitattaessa etenkin laajoja yhteen liitettyjen maadoitusten resistansseja. Mittaus tuliksikin tehdä vain yhdelle suppealle järjestelmälle, kuten ilmajohtoverkon syötämälle puistomuuntamolle. [9, s. 21–22.]

Maadoitusimpedanssi voidaan määrittellä myös laskennallisesti. Kokonaisimpedanssin määrittäminen vaatii maadoitusjärjestelmien sijaintipaikkojen maaperän

resistiivisyyden mittaamisen. Maaperän ominaisresistiivisyys ja maadoituselektrodien rakenne- ja geometriatiedot määrittelevät maadoitusimpedanssin. Resultoivan maadoitusimpedanssin laskennassa huomioon otetaan lisäksi maadoitusjärjestelmien väliset yhdistymiset. Laskennassa ja mitoituksessa voidaan käyttää hyväksi aikaisempia mitattuja maadoitusimpedanssin arvoja, jos sellaisia tiedossa on. [9, s. 21–22.] Kaikki mittaukset ja laskelmat tuloksineen on dokumentoitava tarkasti [14, s. 145].

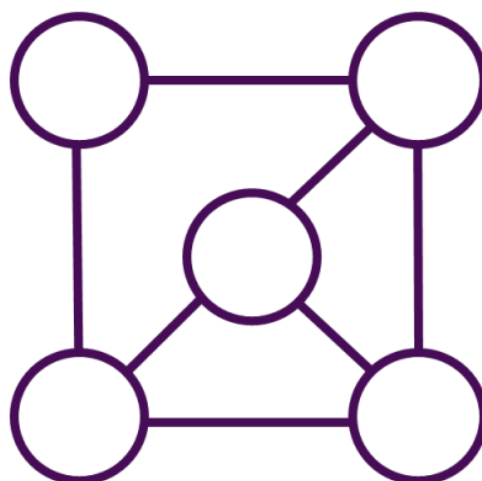
Tärkeä osa käyttöönottotarkastusta ja järjestelmien kunnossapitoa on todentaa maadoitusjärjestelmien eheys ja yhteys. Maadoitusten jatkuvuuden mittaus suurvirtaisella DC-jatkuvuusmittauksella on suositeltavaa, koska sillä voidaan varmistaa etenkin resultoivan kokonaisimpedanssin laskennassa käytettävien maadoitusten olemassaolo, maadoitusyhdistysten, ja -liitosten sekä kaapeleiden kosketussuojien luotettava jatkuvuus ja liitosten yhteys. [9, s. 6.] Maadoitusimpedanssien määrittäystä tai mittausta ei tarvitse tehdä, ellei lähtöarvoissa tai verkon rakenteessa ole muutoksia tapahtunut [14, s. 145]. Maaperän ominaisresistiivisyyden, maadoitusimpedanssin ja resultoivan maadoitusimpedanssin käsitteistä kerrotaan lisää luvussa 6.

### 5.3.3 Laaja maadoitusjärjestelmä

Laaja maadoitusjärjestelmä on laaja yhteen liitettyjen maadoitusten muodostama kokonaisuus. Tällaisella alueella potentiaalierot ovat hyvin vähäisiä tai niitä ei esiinny lainkaan. Järjestelmä muodostaa näin ollen tasapotentiaalipinnan. Tiheästi asutut kaupunkikeskukset ja suuret teollisuusalueet muodostavat galvaanisesti yhtenäisen maadoitusjärjestelmän, joka on verkkomainen, silmuoituva ja jossa muuntamoiden etäisyydet toisistaan ovat lyhyet. Perustana laajalle maadoitusjärjestelmälle toimii rengasmaisesti rakennettu keskijännitemaakaapeliverkko, joka takaa varayhteydet esimerkiksi viereisille sähköasemille. Pienjänniteverkon puolellakin pitää olla tarpeeksi yhdistäviä kaapeliyhteyksiä eri muuntopiireille. Standardi SFS 6001:2018 ei anna yksiselitteistä määritelmää laajan maadoitusjärjestelmän tunnistamiseksi. [9, s. 27–28.]

Verkostosuositus RJ 22:22 [9, s. 28] esittää yhdenlaisen tavan määritellä laaja maadoitusjärjestelmä, jonka katsotaan olevan tyypillinen laajan maadoitusjärjestelmän toteutumistapa Suomen olosuhteissa. Jokaisen muuntopiirin pitää olla galvaanisesti yhdistetty vähintään kahden muun muuntopiirin järjestelmien maadoituksiin keskijänniteverkon kautta. Yhdistys voi muodostua keskijännitekaapelin keskusköyden, kosketussuojan tai erillisen maadoitusjohtimen kautta. Lisäksi vähintään 20 %:lla laajan maadoitusjärjestelmän muuntopiireistä on oltava enemmän kuin kaksi keskijänniteverkon kautta muodostuvaa yhteyttä muiden laajojen maadoitusjärjestelmien muuntopiirien kanssa. Laajan maadoitusjärjestelmän kannalta on myös tärkeää, että muuntopiirien maadoituksia yhdistyy riittävästi pienjänniteverkon kautta. Yhdistävinä johtimina toimivat PEN-johtimet ja erilliset maadoitusjohtimet. Riittää, kun pienjänniteverkon kautta muodostuva galvaaninen yhteys ulottuu toiseen muuntopiiriin. Oleellista pienjänniteverkon kannalta kuitenkin on, että vähintään 70 % muuntamoista on kytketty vähintään kolmeen muuntopiiriin joko keski- tai pienjänniteverkon välityksellä. [9, s. 27–28.]

Kuvassa 10 esitellään laajan maadoitusjärjestelmän rakentuminen. Jokainen muuntopiiri on yhteydessä vähintään kahden muun muuntopiirin kanssa.



Kuva 10. Laajan maadoitusjärjestelmän muodostuminen [9, s. 28].



Muuntamoiden väliset etäisyydet ovat lyhyitä. Pääsääntöisesti muuntamoiden välisen yhdistävän keskijännitekaapelin pituus on alle 500 metriä, pisimmillään kuitenkin alle 1 kilometri. Pidemmät etäisyydet ovat yksittäistapauksina sallittuja. [9, s. 30.]

Laajan maadoitusjärjestelmän muuntopiirissä ei tarvitse tarkastella kosketusjännitteitä tai siirtyviä jännitteitä erikseen, koska sallittujen kosketusjännitearvojen mielletään toteutuvan. Maadoitusten suunnittelun kannalta on mahdollisuuksien mukaan huomioitava, että muuntopiiriyhteydet sijoittuvat eri reiteille. Sähköverkon muuttuessa ja muuntopiirien lisääntyessä on varmistuttava aina laajan maadoitusjärjestelmän vaatimuksien täyttymisestä. Maadoitusjärjestelmän dokumentaatio pitää olla ajantasaista ja tarkkaa. Dokumentaatiossa esitellään perusteet laajan maadoituksen käytöstä ja selvitetään järjestelmän komponentit ja yhdysjohtotopologia. [9, s. 30–31.] Verkostosuosituksen RJ 19:16 [15, s. 7] mukaan laaja maadoitusjärjestelmä on siitä syntyvien turvallisuus- ja taloudellisuusetujen vuoksi tavoiteltava.

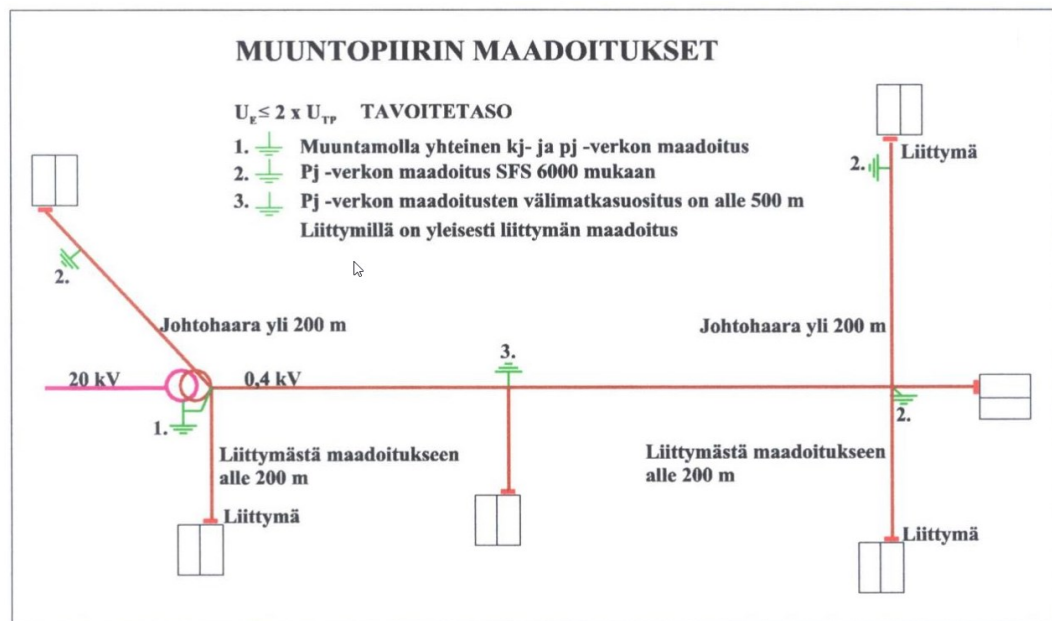
Käyttöönottotarkastus ja kunnossapitotarkastukset tehdään standardin mukaisesti myös aina laajoille maadoitusjärjestelmille. Maadoitusimpedanssia ei tarvitse mitata tai laskennallisesti määritellä, mutta maadoitusjärjestelmän jatkuvuus ja eheys on todennettava käyttöönoton yhteydessä. Kunnossapitotarkastusten yhteydessä jatkuvuusmittauksia suositellaan tehtävän pistokoeluontoisesti. Mittauksia kannattaa kohdentaa etenkin maadoitusjärjestelmän reunoille, joissa liittyminen ja yhdistyminen laajaan maadoitusjärjestelmään ovat kriittisimpiä. [9, s. 31–32.]

#### 5.4 Maadoitusjänniteryhmät

Jakeluverkon maadoitusten mitoitus perustuu maadoitusjännitteen ja sallitun kosketusjännitteen vertailuun aikaisemmin luvussa 4 esitetyn kaavan 2 mukaan. Epäyhtälön muuttuvan kertoimen avulla määritellään erilaisten maadoitustasojen erityiset reunaehdot ja määritellään maadoituselektroditopologia.

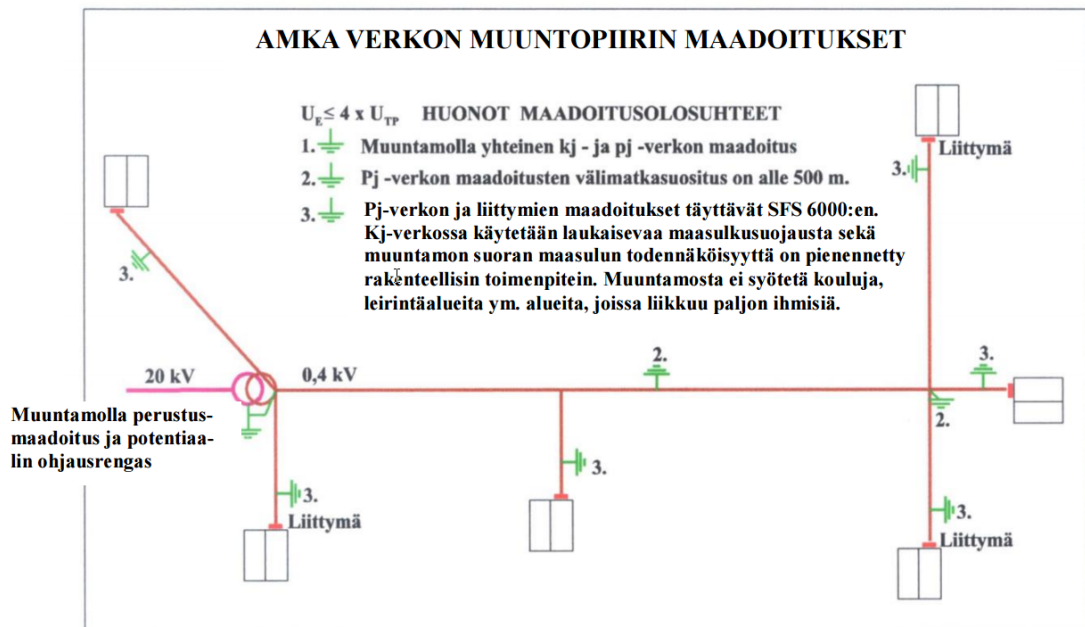
$U_E \leq 2 \times U_{TP}$  on maadoitusjännitteen tavoitetaso, ja sen reunaehdot ovat lähtökohtaisesti maadoitusten suunnittelun perusta. Rakenteellisesti maadoitusryhmä vaatii muuntamon maadoituksen lisäksi, että jokaiseen yli 200 metriä pitkään johtohaaraan on rakennettava SFS 6000:n mukainen pienjänniteverkon maadoitus. Vuoden 1974 jälkeen rakennetuille liittymille on rakennettu maadoitukset, ja näitä voidaan pitää johtohaaran pään maadoituksina. Johtohaaramaadoitukset tulee varmistaa yli 200 metriä pitkien liittymisjohtojen osalta. Jos maadoitusta ei ole liittymälle rakennettu, täytyy sellainen lisätä ja asentaa liittymisjohtoon ojaan. Mikäli muuntamolla on ainoastaan yksi johtohaara, on pienjänniteverkolle rakennettava maadoitus. Muuntopiiri ei saa jäädä vain muuntamon oman maadoituksen varaan, koska tämä voisi johtaa koko muuntopiirin irtoamiseen maadoituksista muuntamon maadoituksen vikaantuessa. [15, s. 10.]

Ilmalinjojen osalta AMKA-kaapelin ylijännitesuojauksen toiminnan kannalta pienjänniteverkon ilmalinjan maadoitusten välimatka ei saisi ylittää 500 metriä. Ukkosherkillä alueilla maadoituksia on kannattavaa rakentaa tätäkin tiheämmin. [15, s. 10.] Kuvassa 11 on nähtävissä maadoitustason  $U_E \leq 2 \times U_{TP}$  topologia.



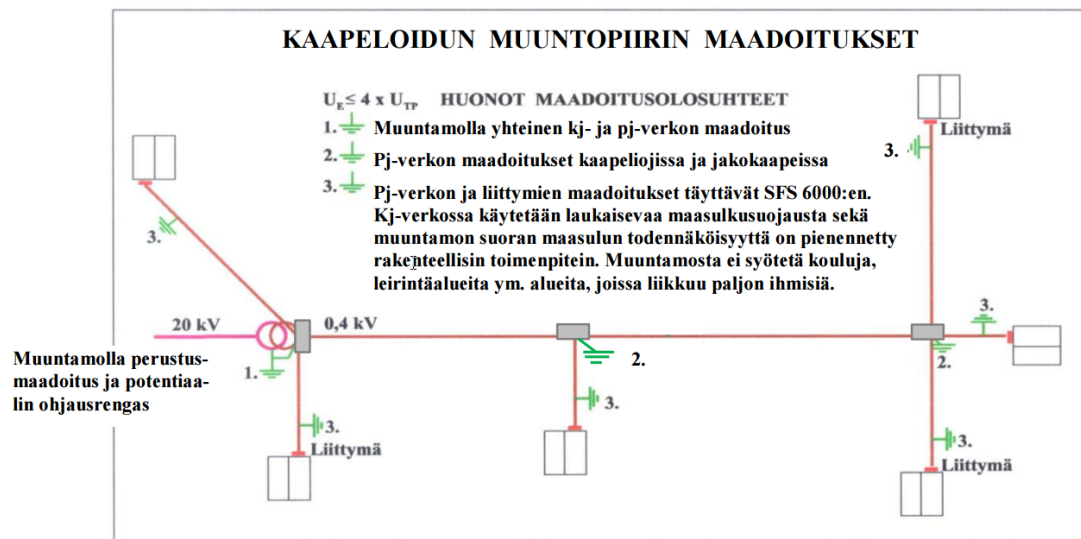
Kuva 11. Tavoitetaso  $U_E \leq 2 \times U_{TP}$  [15, s. 14].

Maadoitustasolle  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$  pätee tavoitetason lisäksi lisäehtoja. Taso  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$  käytetään silloin, kun teknisistä tai taloudellisista syistä ei voida saavuttaa tavoitetasoa  $U_E \leq 2 \times U_{TP}$ . Syynä saattaa olla esimerkiksi muuntopiirin alueen huonosti johtava hiekkainen maaperä. Muuntamolle on rakennettava potentiaaliohjaus ja vaaka- tai pystyelektrodeja tarpeen vaatiessa. Lisäksi tulee käyttää laukaisevaa maasulkusuojausta ja pyrkiä pienentämään suoran maasulun todennäköisyyttä esimerkiksi asentamalla virtaa rajoittavia ylijännitesuojia ki-pinäväljen sijasta. Pienjänniteverkossa liittymillä on oltava maadoitukset ja jokaisessa pienjänniteverkon haarassa on oltava ainakin yksi johtohaaran maadoitus. Runkoverkon jokaisessa jakokaapissa pitää olla maadoituselektrodi. Lisäksi mainitaan, että verkosta ei saa syöttää kouluja, leirintäalueita ja muita samantapaisia alueita, joiden ulkotiloissa oletetaan oleskelevan paljon ihmisiä. [14, s. 143–144.] Kuvassa 12 on kuvattu  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$ :n mukainen maadoitustopologia, kun pienjänniteverkko on ilmalinjaa.



Kuva 12. Maadoitustaso  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$  ja pienjännitteinen AMKA-ilmajohtoverkko [15, s. 15].

Kuvassa 13 on vastaavasti kuvattuna  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$ :n mukainen maadoitustopologia, kun muuntopiiri on maakaapeloitu.



Kuva 13. Maadoitustaso  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$  ja maakaapeloitu muuntopiiri [15, s. 15].

Maadoitustasoa  $U_E \leq 5 \times U_{TP}$  voidaan käyttää silloin, kun muuntopiirissä on ainoastaan yksittäinen sähkökäyttöpaikka. Kaikkien tason  $U_E \leq 4 \times U_{TP}$  mukaisen vaatimusten tulee täytyä seuraavaksi esiteltävien lisävaatimusten lisäksi. Sähkökäyttöpaikalla tulee olla pääpotentiaalintasaus, joka kytkeytyy maadoituselektrodiin. Maadoituselektrodina on mahdollista käyttää esimerkiksi rengasta, joka asennetaan rakennuksen perustusten ympärille. Lisäksi maaperän johtavuuden on oltava huono 50 metrin etäisyydellä kaikista kiinteistä sähköasennuksista. [14, s. 144.]

Carunan verkossa  $2U_{TP}$ -maadoitusryhmä on lähtökohtainen tavoitearvo puistomuuntamoille. Muuntopiirikohtaisissa eli yksittäisissä maadoitusjärjestelmissä voidaan huonojen maadoitusolosuhteiden vuoksi joutua käyttämään myös maadoitusryhmää  $4U_{TP}$ . Tällöin verkon maadoitusten osalta varmistetaan, että reunaehdot kyseisen maadoitusryhmän käytölle täyttyvät. Puistomuuntamoille rakennettava potentiaalintasaus mahdollistaa tarvittaessa maadoitusryhmän  $4U_{TP}$  käyttämisen. Kun kyseessä on galvaanisesti yhteen liitetyt maadoitusjärjestelmät, maadoitusryhmä on aina  $2U_{TP}$ . Maadoitusryhmä  $5U_{TP}$  on myös

mahdollinen, mikäli maadoitusryhmän  $4U_{TP}$  reunaehtoihin ei jostain syystä ole mahdollista päästä. Muuntopiirikohtainen maadoitustopologia arvioidaan tällöin tapauskohtaisesti. [21.]

## 6 Maaperän ominaisresistiivisyys ja maadoitusten mitoitus

Maadoitusjärjestelmiä mitoitettaessa tärkeimmät huomioon otettavat tekijät ovat vikavirran suuruus, vian kesto aika sekä maaperän ja maadoituselektrodin ominaisuudet. Laskettujen askel- ja kosketusjännitteiden vertailun mahdollistamiseksi standardissa on kehon kautta kulkevan virran raja-arvo muunnettu jännitteen raja-arvoksi. [14, s. 87.]

### 6.1 Maaperän resistiivisyys

Maaperän resistiivisyys  $\rho$  tarkoittaa yksikköpinta-alaisen maakuution resistanssia pituusyksikköä kohden. Maaperän ominaisresistanssin yksikkö on  $\Omega\text{m}$  eli ohmimetri. Maaperän resistiivisyyteen vaikuttaa muun muassa maalaji, maalajin tiiveys, raesuuruus ja sen jakautuma, maan kosteuspitoisuus, veteen liuenneiden suolojen kemiallinen koostumus ja maan lämpötila. [22.] Suomessa maaperällä on erittäin suuri ominaisresistanssi. Tämä johtuu lähelle maan pintaa ulottuvasta graniittisesta kallioperästä ja toisaalta usein myös erittäin huonosti sähköä johtavasta irtomaakerroksesta, joka on hiekkaa tai soraa. [12, s. 432.]

Maaperä on hyvin epähomogeeninen ja koostuu yleisesti monista kerroksista syvemmälle maaperään mentäessä. Maaperää ja sen rakennetta voidaan kuvata yksikerros-, kaksikerros- tai monikerrosmallilla. Yksinkertaisuuden vuoksi yksikerrosmalli on mallinnustavoista käytetyin. Sitä voidaan käyttää, kun maaperän ominaisjohtavuuden vaihtelut eri syvyyksillä oletetaan vähäisiksi. [23, s. 19.] Keskimääräisenä maaperän ominaisresistanssiarvona Suomessa pidetään  $2300 \Omega\text{m}$ :ä. Taulukossa 1 on esitetty eri maalajeja keskimääräisillä resistiivisyyden vaihteluväleillä.

Maaperän ominaisresistanssin määrittäminen on todella tärkeää maadoitusten suunnittelun kannalta, koska maadoitusresistanssi on suoraan verrannollinen maan ominaisresistanssiin [12, s. 432].

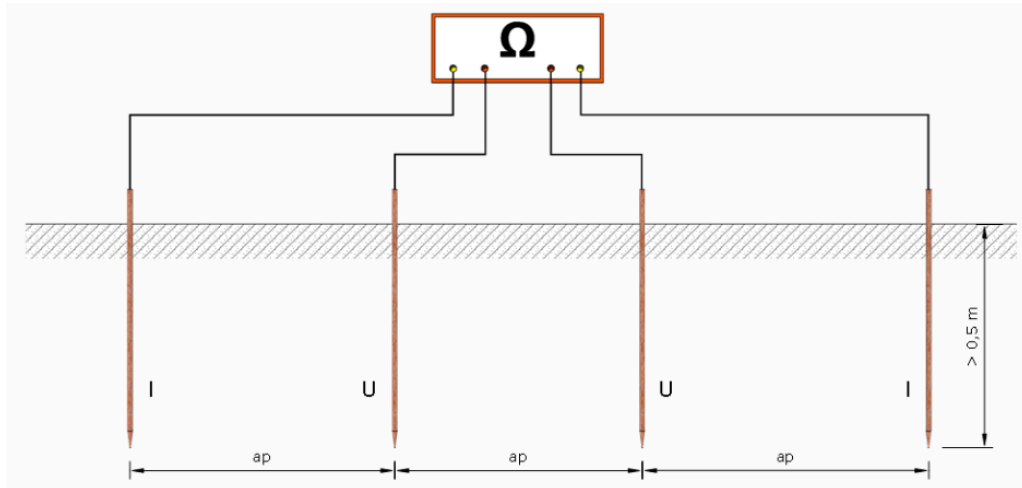
Taulukko 1. Maalajit ja resistiivisyyksien keskimääräiset vaihteluvälit [14, s. 147].

<b>Aine</b>	<b>Keskimäärin <math>\Omega\text{m}</math></b>	<b>Tavallisimmat vaihteluvälit <math>\Omega\text{m}</math></b>
Savi	40	25 ... 70
Saven sekainen hiekka	100	40 ... 300
Lieju, turve, multa	150	50 ... 250
Hiekka, hieta	2000	1000 ... 3000
Moreenisora	3000	1000 ... 10000
Harjusora	15000	3000 ... 30000
Graniittikallio	20000	10000 ... 50000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50 ... 500
Betoni kuivana	10000	2000 ... 100000
Järvi- ja jokivesi	250	100 ... 400
Pohja-, kaivo- ja lähdevesi	50	10 ... 150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1 ... 5

## 6.2 Maadoitusvastusmittaus

Maaperän ominaisvastuksen mittaamiseen on monia tapoja, jotka perustuvat yleensä olennaisin osin samaan mittaustekniikkaan. Yleisin käytetty mittaustapa on Wennerin menetelmä, jossa mittaus suoritetaan neljällä samanpituisella mitauselektrodilla. [22.] Tässä opinnäytetyössä käytetään nimenomaan Wennerin menetelmää, johon Carunankin maaperän ominaisjohtavuusmittausohjeistus tulee perustumaan. Muihin mittaustekniikoihin ei tämän työn puitteissa tutustuta.

Wennerin menetelmässä mittauselektrodit eli mittauspiikit upotetaan maahan riivin tasavälein suoraan linjaan. Uloimpien elektrodien välille syötetään mittausvirta ja sisempien elektrodien välille syntyvä jännite-ero mitataan. Tuloksena mittarista saadaan maadoitusvastusarvo  $R_E$  jännite-eron ja mittausvirran osamääränä. [12, s. 454–455.] Kuvassa 14 on nähtävillä Wennerin menetelmän mittausjärjestelyt.



Kuva 14. Wennerin menetelmä [22].

Maadoitusvastusarvon ja elektrodien välisen etäisyyden avulla saadaan laskettua maaperän ominaisresistanssi. Alla esitetystä kaavasta 3 saadaan tuloksena maaperän resistiivisyys, jonka määrittäminen on oleellista maadoitusresistanssin laskennassa [12, s. 455].

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R_E \quad (3)$$

$\rho$  on maaperän resistiivisyys ( $\Omega\text{m}$ )

$a$  on mittauselektrodien etäisyys (m)

$R_E$  on maadoitusvastus ( $\Omega$ )

Mittaus suoritetaan yleensä 2 m:n, 4 m:n, 8 m:n tai 2 m:n, 4 m:n, 16 m:n piikkiväleihin. Likimääräisenä sääntönä voidaan pitää, että valittu piikkiväli antaa maaperän keskimääräisen ominaisresistanssin vastaavassa syvyydessä [12, s. 455]. Kaavalla 3 lasketuista maaperän resistiivisyysarvoista lasketaan keskiarvo, joka dokumentoidaan maadoitustietoihin verkkotietojärjestelmään. Keskiarvo ottaa jossain määrin huomioon maaperän syvyysuuntaisen epähomogeenisuuden, vaikka pintamaan resistiivisyys keskiarvon myötä painottuukin muita maakerroksia enemmän. Mahdolliset vaakamaadoituselektrodit asennetaan yleisesti 0,7 metrin syvyyteen, joten pintamaan resistiivisyys merkitsee tässäkin mielessä eniten. [24, s. 20.]

Mittaukset tehdään sulan maan aikana. Huomion arvoista on myös, että kosteassa maassa tehdyt mittaukset antavat keskimääräistä arvoa pienemmät lukemat kuin kuivassa maassa tehdyt mittaukset. Yhtä lailla maan lämpötilan laskiessa maaperän ominaisresistanssi kasvaa ja on suurimmillaan jäätyneessä maassa. [22.] Maaperä mitataan tulevan muuntamon kohdalta tai, jos muuntamo on jo rakennettu, muuntamon läheltä kaivamattomasta maasta ja massanvaihtojen ulkopuolelta. Asennetut maadoitukset pitää myös ottaa huomioon ja valita mittaussuunta niin, ettei mittauksia tehdä suoraan maadoitusten päällä tai niiden välittömässä läheisyydessä.

### 6.3 Maadoitusimpedanssi ja maadoitusresistanssi

Maadoitusimpedanssi tarkoittaa maadoitusjärjestelmän ja neutraalimaan välistä impedanssia tietyllä taajuudella [14, s. 19]. Sillä on resistiivinen ja reaktiivinen komponentti. Suppeissa maadoitusjärjestelmissä ja 50 Hz:n sähkönsiirron taajuuksilla reaktiivinen komponentti ei ole merkitsevä, mutta tarkasteltaessa laajempia maadoitusjärjestelmiä täytyy reaktiivinen komponentti ottaa laskelmissa huomioon. [23, s. 20.]

Maadoitusresistanssi kuvaa maadoituselektrodin ominaisuuksia, jotka ovat riippuvaisia maaperän resistiivisyydestä, maadoituselektrodin mitoista ja asennustavasta. Standardin liitteessä NA.J.2 on taulukko, josta löytyy erityyppisten



maadoituselektrodien maadoitusresistanssien laskentakaavoja. [14, s. 148.] Seuraavaksi esiteltävä kaava 4 on maakaapeloidun maadoitusjärjestelmän käytetyin kaava. Kyseessä on vaakasuoran upotetun johtimen kaava.

$$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \cdot h \cdot d} \quad (4)$$

$R_E$  on maadoitusresistanssi ( $\Omega$ )

$\rho_E$  on maaperän resistiivisyys ( $\Omega\text{m}$ )

$L$  on elektrodin pituus (m)

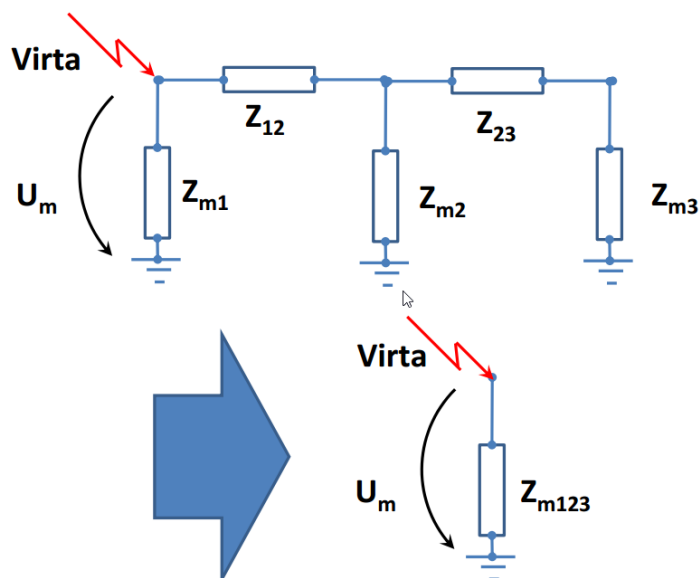
$h$  on elektrodin upotussyvyys (m)

$d$  on johtimen halkaisija (m)

Kaavasta 4 on selvästi nähtävissä, että ennen logaritmitermiä olevalla maaperän resistiivisyydellä ja johtimen pituudella on suuri vaikutus maadoitusresistanssin arvoon.

#### 6.4 Resultoiva maadoitusimpedanssi

Resultoivalla maadoitusimpedanssilla tarkoitetaan usean yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän impedanssien vaikutusta yhdessä. Resultoivan maadoitusimpedanssin laskemista varten on selvitettävä kaikkien maadoitusjärjestelmien maadoitusimpedanssit sekä järjestelmiä yhdistävien liitosjohtimien impedanssit. [23, s. 21.] Yksinkertaisimmillaan tilannetta voidaan ilmentää kuvan 15 avulla, jossa yksittäiset muuntamot kuvataan maadoitusimpedanssien ja näitä yhdistävien johtimien pitkittäisimpedanssien avulla. Tarkastelupisteen valinta ekvivalenttipiirissä vaikuttaa siihen, miten maadoitusimpedanssi muodostuu.



Kuva 15. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän resultoivan maadoitusimpedanssin muodostuminen [20, s. 17].

Kuvan 15 kaltaista yksinkertaistettua mallia voidaan tarkentaa, jos halutaan huomioida galvaanisesti yhdistettyjen maadoituselektrodien vaikutus toisiinsa nähden. Tällöin on kyse lisäpotentiaalien huomioimisesta. Lisäpotentiaalien vaikutusta voidaan kuitenkin käytännön jakeluverkkoja mallinnettaessa pitää vähäisenä. Suurimpana syynä tähän on pitkät etäisyydet yhdistettyjen maadoitusjärjestelmien välillä. [23, s. 21–22.]

Laskennan kannalta yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien piiriyhtälöt muodostuvat nopeasti työläiksi. Trimble NIS -verkkotietojärjestelmässä on mahdollista tarkastella resultoivia maadoitusimpedansseja laitteistokohtaisesti siihen räätälöidyn laskentatyökalun avulla.

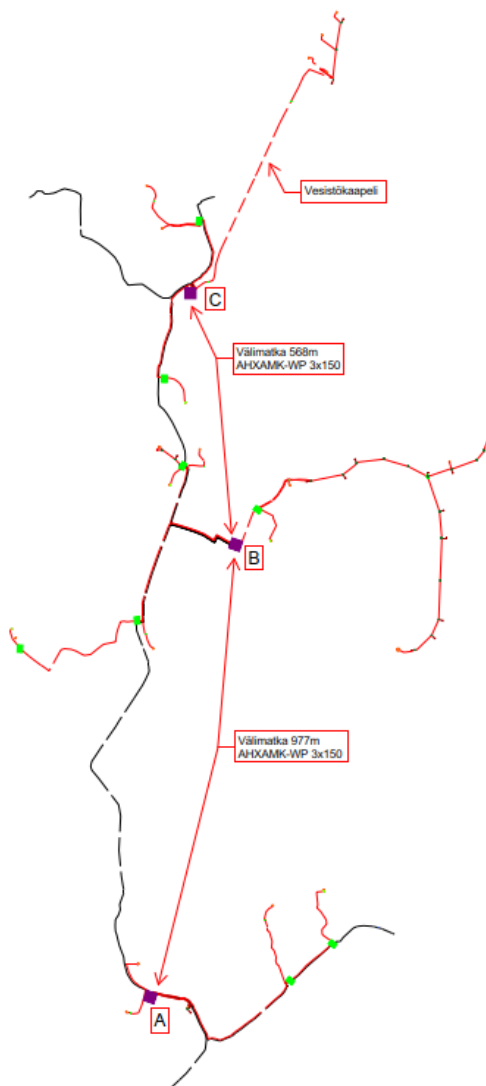
## 7 Tutkittavat muuntopiirit

Maadoitusten suunnittelun lähtökohtana laskennallisesti on selvittää komponenttikohtainen resultoiva maadoitusimpedanssi. Tämä on mahdollista selvittää 1-vaiheisen maasulkuvian automaattisen poiskytkentäajan avulla, jota verrataan sallittuun kosketusjännitteeseen. Aiempana työssä luvun 4.2.2 kuvassa 3 esiteltiin käyrä kosketusjännitteen määrittämiseen. Huomioon on otettava, että yleisin sallittu kosketusjännite on käyrästä saatu jännite kaksinkertaisena eli  $U_E \leq 2 \times U_{TP}$ . Kun tiedetään sähköaseman syöttämän alueen tavoiteverkon maasulkuvirta, voidaan komponenttikohtainen maadoitusimpedanssin tavoitearvo laskea maadoitusjännitteen  $U_E$  ja maasulkuvirran osamääränä. [9, s. 17–18.]

Käytännössä kuitenkin verkkoyhtiö antaa tarvittavat lähtöarvot urakoitsijan suunnittelulle. Verkkoyhtiön määrittämä resultoiva maadoitusimpedanssi on raja-arvo, johon suunnittelun maaperän mittaustuloksia, maadoituselektrodien rakennetietoja ja maadoitusjärjestelmien välisiä yhdistymisiä maadoituslaskennan avulla verrataan.

### 7.1 Mittauskohteiden ja -menetelmien kuvaus

Käytännön tutkimuskohteeksi tähän opinnäytetyöhön valittiin Carunan rakenteilla olevalta haja-asutusalueen projektityömaalta kolmen eri muuntopiirin muuntamot, joille tehtiin Wennerin menetelmää käyttäen maaperän ominaisresistiivisyysmittaukset. Muuntopiirit yhdistyvät toisiinsa AHXAMK-WP 3x150-keskijännitemaakaapelien välityksellä, eli muuntamot muodostavat yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän. Seuraavalla sivulla kuvassa 16 on mittaukseen valittujen muuntopiirien periaatteellinen topologia. Muuntamot on nimetty kirjaimin. Musta viiva kuvastaa keskijännitekaapelia ja punainen viiva kuvastaa pienjännitekaapelia. Vihreät pienet neliöt ovat jakokaappeja.



Kuva 16. Kolmen muuntopiirin yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä.

Muuntamolta A syötetään suoraan pienjänniteliittymiä, jotka ovat alle 100 metrin etäisyydellä muuntamosta. Kauempana oleville liittymille tulee syöttö jakokaappien kautta. Muuntamot B ja C syöttävät liittymiä jakokaappien kautta, ja verkko on osittain ilmalinjaa. Muuntamolta C on vesistökaapelisyöttö saareen, jossa on neljä liittymää. Mittaushetkellä muuntamo A on asennettu, mutta verkkoa ei ole kytketty käyttöön. Muuntamolle on asennettu 50 metriä lisämaadoitusta kaapeliojaan muuntamokohtaisesti arvioitujen huonojen maadoitusolosuhteiden vuoksi. Muuntamo B on asentamatta, mutta kaapelit on kaivettu lähelle muuntamon asennuspaikkaa. Muuntamolte C ei ole maanrakennustöitä tehty vielä ollenkaan.

Muuntamoilta mitattiin Wennerin menetelmää käyttäen maadoitusvastukset ja näistä laskettiin maaperän resistiivisyyksille muuntamokohtaiset arvot. Muuntamokohtainen maadoitusimpedanssi laskettiin Trimble NIS -verkkotietojärjestelmässä, jossa huomioon otettiin maadoituselektrodien geometria, poikkipinta-ala, kokonaispituus, asennussyvyys ja mitattu maan ominaisvastus. Muuntamon A kuparinen 16 mm<sup>2</sup>:n lisämaadoitus jätettiin muuntamokohtaista maadoitusimpedanssia laskettaessa huomioimatta. Ajatuksena oli tutkia, millaisiin rezultoiiviin maadoitusimpedanssiarvoihin päästäisiin otettaessa huomioon vain muuntamon vakiomaadoitukset ja toisaalta olisivatko ne riittävät ilman lisämaadoitusta. Kolmen ketjussa olevan muuntamon rezultoiva maadoitusimpedanssi laskettiin myös verkkotietojärjestelmän laskentaohjelmalla. Pienjänniteverkon maadoituksia ei huomioitu laskelmissa, vaikka niillä käytännössä on vaikutusta maadoitukseen parantaen rezultoivan maadoitusimpedanssin arvoa.

Tutkittavien muuntopiirien rezultoivan maadoitusimpedanssin tavoitearvoksi asetettiin  $Z_E \leq 5 \Omega$  ja maadoitusjänniteryhmäksi  $U_E \leq 2 \times U_{TP}$ :n mukainen vaatimus. Nämä lähtötiedot voisivat olla verkko-yhtiön toimittamia reunaehtoja suunnittelulle.

## 7.2 Mittaukset

Ennen mittauksia selvitettiin muuntamoiden sijoituspaikkojen vallitsevat maaperätiedot maaperäkartoista. Nämä tiedot antoivat käsityksen, minkä suuntaisia mittaustuloksia olisi odotettavissa. Maaperän ominaisresistiivisyysmittaukset tehtiin huhtikuun puolen välin tienoilla. Paikoin oli vielä pieniä määriä lunta varsinkin pohjoisen puoleisilla rinteillä. Maaperä oli mittaushetkellä yleisesti märkä. Muuntamon C mittaustaikalla pintamaa oli vielä jopa hieman jäässä, mutta mittaustaikka sijaitsikin aivan meren rannassa. Mittaukset tehtiin nelinapaisella Megger-maadoitusvastusmittarilla, joka on nähtävillä kuvassa 17. Mittauselektrodeina käytettiin noin 1 metrin pituisia poranteriä. Kaikki kolme mittausta suoritettiin 2 m:n, 4 m:n ja 8 m:n piikkiväleillä. Mittausteknisistä syistä piikkiväliä 16 m ei voitu käyttää, koska mittaussjohtimet eivät pituudeltaan tähän olisi riittäneet. Toisaalta maastollisesta näkökulmasta katsottunakaan ei 16 m:n piikkiväliä olisi

voitu kaikilla mittauspaikoilla käyttää. Mittaustuloksia avataan seuraavassa luvussa.



Kuva 17. Maadoitusvastusmittari Megger DET4TD2.

Muuntamo A oli sijoitettu loivaan metsäiseen rinteeseen. Maaperäkartan mukaan muuntamon sijoituspaikan maaperä oli kalliomaata ja savea. Kaivetut kaapeliojat menivät tien vierustassa muuntamon editse ja toisaalta yksi myös muuntamolta ylös rinnettä. Mittaussuunnaksi valittiin suora linja kaakkoon hie- man tien suuntaa mukailien poispäin kaivetuista kaapeleista. Tämä oli oikeas- taan ainoa suunta, mihin mittaukset oli mahdollista suorittaa. Ensimmäinen mit- tauselektrodi laitettiin muuntamon ympärille tehtyjen massanvaihtojen ulkopuo- lelle. Yhtenäisen linjassa olevan elektrodirivistön mittaus onnistui vielä hyvin 8 m:n piikkiväleinkin. Maaperä oli hyvin tasalaatuinen koko mittausmatkalla, ja mittauselektrodit saatiin kohtalaisen helposti 0,5 m:n syvyyteen. Kallio ei tullut vastaan tällä mittaussuunnalla. Tässä kohteessa 16 m:n piikkiväli olisi kuitenkin ollut jo hankala suorittaa rinte- en jyrkentyessä melko nopeasti.

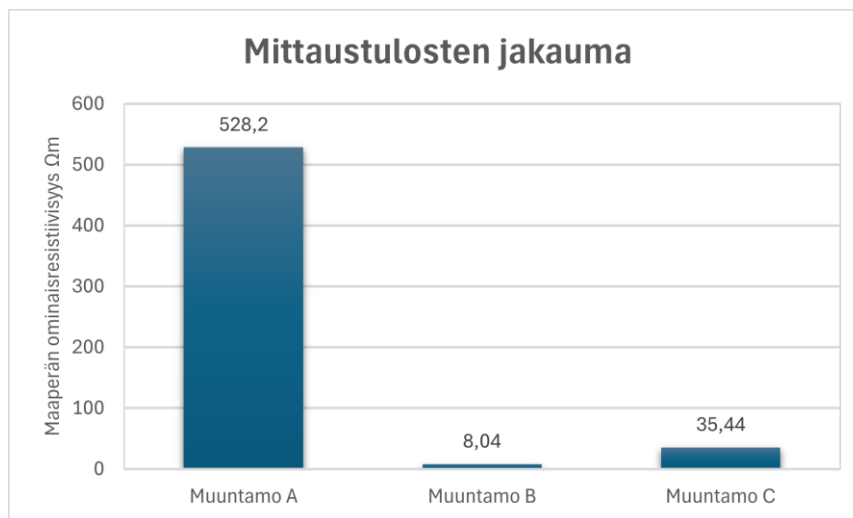
Muuntamo B oli asentamatta, mutta kaapelit oli kaivettu asennuspaikalle. Mittaussuunnan valinnassa piti jälleen huomioida kaivettujen kaapeliojien sijainnit. Muuntamon sijoituspaikka oli maaperältään vanhaa peltomaata, joka oli jo ajansaotossa metsittynyt. Maaperäkartan mukaan maa-aines oli liejusavea. Muuntamon sijoituspaikka oli myös tulva-alueen reunamilla, mutta mittaushetkellä ei tulvaimiötä ainakaan esiintynyt. Mittaussuunnaksi valittiin pohjoinen, jotta mittausolosuhteet maastollisesti pysyisivät tasalaatuisina koko mittausmatkalla. Nyt ensimmäinen mittauselektrodi voitiin laittaa tulevan muuntamokopin asennuspaikalle, joka oli sopivasti kepitetty. Mittauselektrodit upposivat helposti saviin maahan, mutta mittausvälit eivät kaikilla elektrodiväleillä olleet aivan tasapitkiä mittausreitillä sijaitsevien vetisten sarkaojien vuoksi. Maaston puolesta 16 m:n piikkivälikin olisi ollut mahdollinen mitata.

Muuntamon C sijoituspaikalle ei ollut vielä kaivettu kaapeleitaakaan, joten tämä antoi mittauksen suorittamiselle periaatteessa vapaat kädet. Maaperä vaikutti vanhalta vesijättömaalta, ja muuntamo sijoitettaisiin sen reunamille. Maaperäkartan mukaan maa-aines oli savea. Mittaussuunnan valintaan vaikutti vieressä kulkeva tie, läheinen kalliainen rinne ja meren läheisyys. Mittaussuunnaksi valikoitui pohjoisen ja koillisen välinen suunta, jotta mitattava maaperä olisi mahdollisimman tasalaatuinen ja elektrodit saataisiin suoraan linjaan. Ensimmäinen mittauselektrodi laitettiin keskelle tulevan muuntamon sijaintia, joka tarkastettiin suunnitelmakartoista. Tässä kohteessa pintamaa oli sen verran jäässä, että mittauselektrodit piti porata maahan. Näin ne menivätkin 0,8 m:n syvyyteen. 16 m:n piikkiväli olisi ollut hankala toteuttaa, koska mittaussuunta olisi nopeasti muuttunut vetiseksi kaislikoksi.

Mittausjärjestelyt sujuivat ongelmitta. Maadoituselektrodien piikkivälejä ei arvioitu, vaan piikkivälit mitoitettiin pitkän rullamitan avulla. Mittaustekniikka ei vaatinut aikaa vievää perehtymistä, mutta mittaussuunnan huolellisella valinnalla oli varmastikin vaikutusta mittaustekniikan sujuvuuteen. Itse mittauslaite oli yksinkertainen ja selkeä käyttää. Tiedossa olevat maaperän ominaisuudet ja mittarin antamat lukemat olivat hyvin linjassa keskenään, ja tältä osin mittaustulosten oikeellisuutta kohtaan ei tullut epäilystä.

### 7.3 Mittaustulosten analyysi

Muuntamokohtaiset mittauspöytäkirjat ovat nähtävillä liitteissä 1–3. Pöytäkirjoihin on kirjattu mittausarvot kaikilta mitatuilta piikkiväleiltä sekä mittauselektrodien syvyydet kullakin piikkivälillä. Alla kuvassa 18 on nähtävillä mittaustulokista laskettu muuntamokohtainen ominaisresistiivisyyden keskiarvo, joka huomioidaan laskettaessa muuntamon maadoitusresistanssia.



Kuva 18. Muuntamokohtaiset maaperän ominaisresistiivisyydet.

Muuntamoilta mitattuja ominaisresistiivisyysarvoja voi verrata taulukossa 1 esitettyihin erilaisten maa-ainesten resistiivisyysarvoihin. Kuvasta 18 on helposti nähtävillä, että muuntamon A maaperän ominaisresistiivisyys on aivan eri lukemissa verrattuna kahteen toiseen muuntamoon. Muuntamon A sijoituspaikka on kahden erilaisen maalajin rajamailla. Kalliomaan läheisyys huonontaa oleellisesti johtavuusarvoja, kun taas savi parantaa niitä. Maaperän ominaisresistiivisyysarvoa 528,2 Ωm voidaan pitää näiden kahden maalajin kompromissina. Saatu tulos on Suomessa maaperän ominaisresistiivisyyden keskiarvona pidettyä 2300 Ωm:ä reilusti matalampi. Muuntamon A mittaustulosta voidaan siis pitää keskiarvoa paljon parempana.

Muuntamon B maaperän ominaisresistiivisyysarvo taas on todella matala sen ollessa 8,04 Ωm. Liejusavi maalajina ei yksin asiaa selitä, mutta tulvaveden



noustessa maalle merivedestä on saattanut liueta maaperään suoloja, jotka entisestään ovat laskeneet maaperän ominaisresistiivisyysarvoja. Muuntamon C maaperän ominaisresistiivisyysarvo  $35,44 \Omega\text{m}$  on malliesimerkki savimaan resistiivisyydestä. Muuntamoiden B ja C maaperän resistiivisyysarvot ovat maadoitusten mitoittamisen kannalta todella hyvät.

Muuntamokohtaisten maadoitusresistanssien laskemiseksi kuvan 18 mukaiset maaperän resistiivisyysarvot vietiin Trimble NIS -verkkotietojärjestelmän maadoituselektrodin teknisiin tietoihin, joissa muuntamoiden maadoitusresistanssit laskettiin huomioiden maadoituselektrodin mitat ja asennustapa. Liitteestä 4 löytyy verkkotietojärjestelmän näkymät maadoitusresistanssin laskennasta jokaisen muuntamon osalta. Alla taulukossa 2 tulokset esitellään yksinkertaisessa taulukkomuodossa.

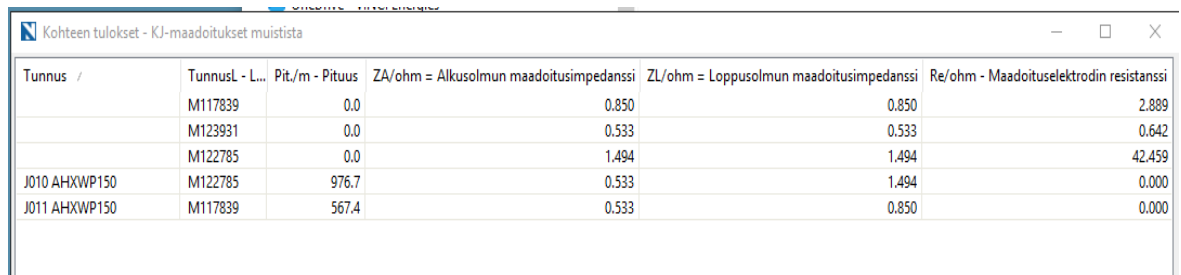
Taulukko 2. Verkkotietojärjestelmässä lasketut maadoitusresistanssit.

<b>Muuntamokohtaiset maadoitusresistanssit</b>	
Muuntamo A	42,5 $\Omega$
Muuntamo B	0,6 $\Omega$
Muuntamo C	2,8 $\Omega$

Muuntopiirien resultoivan maadoitusimpedanssin tavoitearvoksi asetettiin jo aiemmin  $Z_E \leq 5 \Omega$ . Taulukosta 2 voidaan nähdä, että muuntamoiden B ja C maadoitusresistanssit ovat jo muuntamokohtaisestikin tarkasteltaessa alle asetetun resultoivan tavoitearvon. Muuntamon A maadoitusresistanssi jää kuitenkin muuntamokohtaisessa tarkastelussa korkeaksi, mikä oli odotettavissa maaperän korkeampien resistiivisyysarvojenkin perusteella.

Vielä on todentamatta, miten yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän mukaisen resultoivan maadoitusimpedanssin laskeminen vaikuttaa maadoitusarvoihin. Resultoivan maadoitusimpedanssin laskenta tehtiin verkkotietojärjestelmän laskentatyökalulla rajaamalla kaikkien kolmen muuntopiirin maadoitukset laskettavaan alueeseen. Kuvassa 19 on näkymä Trimble NIS -verkkotietojärjestelmän

laskentatyökalun yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän mukaisen resultoivan maadoitusimpedanssin laskentatuloksista.



Tunnus /	TunnusL - L...	Pit./m - Pituus	Z <sub>A</sub> /ohm = Alkusalun maadoitusimpedanssi	Z <sub>L</sub> /ohm = Loppusalun maadoitusimpedanssi	Re/ohm - Maadoituselektrodin resistanssi
	M117839	0.0	0.850	0.850	2.889
	M123931	0.0	0.533	0.533	0.642
	M122785	0.0	1.494	1.494	42.459
J010 AHXWP150	M122785	976.7	0.533	1.494	0.000
J011 AHXWP150	M117839	567.4	0.533	0.850	0.000

Kuva 19. Trimble NIS -laskentatyökalun tulokset.

Taulukkoon 3 on koottu vielä selkeyden vuoksi kuvan 19 oleelliset resultoivat maadoitusimpedanssiarvot muuntamoittain.

Taulukko 3. Verkkotietojärjestelmässä lasketut resultoivat maadoitusimpedanssit.

Resultoivan maadoitusimpedanssin vaikutus muuntamokohtaisesti	
Muuntamo A	1,5 Ω
Muuntamo B	0,5 Ω
Muuntamo C	0,9 Ω

Taulukon 3 tuloksista on nähtävissä muuntamon A valtava maadoitusarvojen putoaminen 42,5 Ω:sta 1,5 Ω:iin. Muuntamoiden B ja C arvot olivat jo lähtökohdaisestikin niin matalat, että niissä ei suurta muutosta voinutkaan tapahtua. Resultoivan maadoitusimpedanssin arvoa osaltaan paransivat myös muuntamoiden väliset lyhyet välimatkat. Muuntamon A ja muuntamon B välinen matka on noin 980 m, kun taas muuntamon B ja muuntamon C välinen matka on vain noin 570 m. Välimatkojen pidentyessä suurenevat myös impedanssiarvot. Nyt kun kolmen muuntopiirin resultoiva maadoitusimpedanssi on laskettu, voidaan todeta maadoituselektrodijärjestelmien jäävän tavoitearvon  $Z_E \leq 5 \Omega$  alle ja täyttävän siltä osin vaatimukset. Myös maadoitusjänniteryhmän  $U_E \leq 2 \times U_{TP}$  mukainen vaatimus täyttyi tutkittavien muuntopiirien osalta. Muuntamoiden

maadoitusten lisäksi jokaisessa yli 200 m:n pituisessa johtohaarassa oli standardin mukainen pienjänniteverkon maadoitus. Ilmalinjan osalta maadoitusten välimatka ei ylittänyt 500 metriä.

Aina eivät kaikki yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään ketjuuntuneet muuntopiirien komponentit ja niiden resuloivat maadoitusimpedanssit alita tavoitearvoa pelkästään vakiorakentein. Tällöin on kannattavaa lisätä vaakamaadoituksia ensisijaisesti paremmin johtavan maaperän muuntamolle tai yleisesti parantaa ja lisätä yhteyksiä muihin muuntopiireihin. Mikäli pienjänniteverkon maadoitukset otetaan maadoitusmitoituslaskennoissa huomioon, pitää pienjänniteverkon maadoitusten sijainnit paikantaa ja mallintaa ne laskentaan mukaan. Kokonaisvaltainen maadoitusjärjestelmän tarkastelu on aina toiminnan lähtökohta, mikäli jokin samaan järjestelmään kuuluva komponentti ei täytä asetetun maadoitusimpedanssin tavoitearvoa.

Muuntamolle A asennettua 50 metrin pituista vaakamaadoitusta ei siis otettu huomioon laskettaessa muuntamokohtaista maadoitusimpedanssia. Edellä esitettyjen laskelmien ja päätelmien valossa voidaankin todeta, ettei saattomaadoitukselle olisi ollut tarvetta eikä ainakaan kyseiselle muuntamolle, jos maadoitusjärjestelmää tarkastellaan yhteen liitettynä. Myös pienjännitemaadoitukset jätettiin resuloivaa maadoitusimpedanssia laskettaessa huomioimatta. Jos ne olisi huomioitu, olisivat resuloivat maadoitusimpedanssit olleet solmupisteissä vieläkin matalammat. Mittausajankohdan osuessa alkukevääseen maaperä oli märkä, joten maaperän ominaisresistiivisyysarvot ovat saattaneet olla matalammat verrattuna mittauksiin, jotka tehtäisiin kuivaan maahan. Toisaalta kylmä alkukevät ja kylmän, osittain vielä jopa hieman jäässä olevan, maaperän ominaisresistanssi kasvaa, mitä kylmempi maaperä on.

## 8 Yhteenveto

Laaja-alainen jakeluverkon maakaapelointi on saanut aikaan suuria muutoksia maadoitusjärjestelmiin. Viimeisimpään standardiin SFS 6001:2018 on lisätty määritelmä galvaanisesti yhteen liitetystä maadoitusjärjestelmästä, joka muodostuu usein haja-asutusalueenkin maadoitusjärjestelmäksi yksinkertaisesti vain maakaapeloinnin seurauksena [14, s. 145]. Yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien osalta maadoitusten tavanomaisesta määräajoin tehtävästä mittauksesta, kuten käännepestemenetelmästä luopuminen olisi mahdollista. Verkkoyhtiöiden mielenkiinto maadoitusjärjestelmiä kohtaan onkin tällä hetkellä suurta.

Jatkossa yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusten suunnittelun perustana voidaan pitää maadoituslaskentaa. Maadoitusresistanssin määrittäminen on mahdollista, mikäli maaperän resistiivisyys on tiedossa ja toisaalta maadoituselektrodit asianmukaisesti dokumentoitu. Maadoitusten jatkuvuusmittauksilla voidaan käyttöönottoaiheessa varmistaa maadoitusyhdistykset ja maakaapelien vaippojen jatkuvuus ja liittyminen toisiinsa.

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin jakeluverkkojen maadoitukseen. Aihetta avattiin sähköverkon häiriötilanteista ja vaarajännitteistä lähtien. Maadoituskäsitettä tutkittiin suunnitteluprosessin, maadoittamisen periaatteiden ja maaperän ominaisresistiivisyyden todentamisen kautta. Osana maadoitusrakenteiden mitoittamista käytiin maastossa mittaamassa kolmelta muuntamolta maaperän ominaisresistiivisyydet. Tarkoitus oli selvittää maaperän ominaisresistiivisyyden merkitys laskettaessa maadoituselektrodiresistanssia ja toisaalta tutkia, miten yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän rakenne vaikuttaa lopullisiin maadoitusimpedansseihin.

Maaperän ominaisresistiivisyyden mittaukset tehtiin Wennerin menetelmällä ja tulokset analysoitiin Trimble NIS -verkkotietojärjestelmässä. Kyseistä mittausmenetelmää tullaan Carunan jakeluverkoissa lähitulevaisuudessa käyttämään, joten käyttökokemuksen kerryttäminen oli paikallaan. Maadoitusten suunnittelussa ja mitoituksessa tieto maaperän resistiivisyydestä osoittautui ensiarvoisen

tärkeäksi. Maaperän ominaisvastus- ja maadoituselektrodien rakennetiedoista verkkotietojärjestelmän laskentaohjelma laskee muuntopiirikohtaiset ja lopulta ketjuuntuneiden maadoitusjärjestelmien impedanssit. Suunnittelijan näkökulmasta maadoitusten mitoittaminen tulee jatkossa perustumaan mitattuihin ja laskettuihin todenmukaisiin arvoihin. Mitoitus ei siis enää perustuisi arvailuihin.

Mitattujen maaperän ominaisjohtavuuksien pohjalta lasketuista muuntamoiden maadoitusresistiivisyyksistä kävi selvästi ilmi, että galvaanisesti yhteen liitettyssä maadoitusjärjestelmässä yhden muuntamon heikot maadoitusolosuhteet eivät ole hallitsevat. Resultoiva maadoitusimpedanssi oli kaikkien mitattujen muuntamoiden kohdalla pienempi kuin muuntamokohtaisesti tarkasteltuna. Kahden muuntopiirin maadoituselektrodien maadoitusresistanssit olivat lähtökohtaisesti niin matalat, että niiden vaikutus yhdessä laski yhden korkean arvon alle tavoitearvon. Tulosta voi pitää merkittävänä ja suuntaa antavana yleisessä mielessä, vaikka tutkittava otos olikin pieni ja yksinkertainen. Referenssiä olisi voinut hakea mittaamalla ainakin toinen yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä.

Ylipäänsä mittaukset olisi varmastikin kannattanut tehdä myöhemmin keväällä, jolloin maaperä olisi ollut kuivempi. Tuolloin olisi ollut aikaa ottaa työhön mukaan enemmän mitattavia kohteita. Opinnäytetyön kiireinen aikataulu ei antanut tälle ajatukselle mahdollisuutta. Kolmen muuntamon yhteen liitetty maadoitusjärjestelmäkin antoi kuitenkin hyvän ymmärryksen siitä, mistä maaperän ominaisresistiivisyyden mittaamisessa on kyse maadoitusrakenteita mitoitettaessa.

Maadoituslaskentaa, joka perustuu maaperän ominaisresistiivisyydsmittauksiin, voisi jatkossa hyödyntää hyvin laajamittaisesti muuntopiirien maadoitusolosuhteita arvioitaessa. Maaperän mittaukset olisi todennäköisesti mahdollista suorittaa luotettavasti jälkikäteenkin käytössä olevaan verkkoon. Tarpeellista ja tärkeää olisi myös todentaa verkon maadoituselektrodien sijainnit ja dokumentoida ne asianmukaisesti. Soveltamalla yhteen liitettyä maadoitusjärjestelmää on mahdollista verkon saneeraustilanteissakin parantaa huonoissa maadoitusolosuhteissa sijaitsevien muuntamoiden maadoitusimpedansseja. On hyvä

kuitenkin muistaa, että etenkin haja-asutusalueilla saneerattava verkko on usein sekaverkkoa ja heikoimmat maadoitusolosuhteet löytyvät yleisesti ilmaverkkoista.

Maaperän ominaisresistiivisyysmittaukset ovat yksinkertainen tapa selvittää maaperän ominaisjohtavuus. Maadoituslaskenta luo hyvät edellytykset maadoitusjärjestelmien turvallisuuden arviointiin. Toisaalta myös turhista määräaikaismittauksista luopuminen mahdollistaa kustannustehokkuuden, joka on aina tavoiteltavaa.

## Lähteet

- 1 Suomen sähköjärjestelmä. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/suomen-sahkojarjestelma>>. Luettu 9.3.2024.
- 2 Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa. 2011. Sähköverkot I. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.
- 3 Sähköverkkoyhtiöt. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. <<https://energia.fi/energiatietoa/energiaverkot/sahkoverkot/sahkoverkkoyhtiot>>. Luettu 9.3.2024.
- 4 Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo. 2009. Sähkönjakelutekniikka. 2. uudistettu painos. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press.
- 5 Carunan vuosi 2023. Verkkoaineisto. Caruna. <<https://caruna.fi/sites/default/files/docs/Caruna%20vuosiraportti%202023.pdf>>. Luettu 8.3.2024.
- 6 Caruna lyhyesti. Verkkoaineisto. Caruna. <<https://caruna.fi/tietoa-meista/caruna-lyhyesti>>. Luettu 10.3.2024.
- 7 Yhteiskunnan sähköistyminen. Verkkoaineisto. Caruna. <<https://caruna.fi/tietoa-meista/caruna-lyhyesti/energiamurros/yhteiskunnan-sahkoistyminen>>. Luettu 8.3.2024.
- 8 Sähkömarkkinalaki. 2013. 9.8.2013/588.
- 9 Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen. 2022. Verkostosuositus RJ 22:22. Helsinki: Energiateollisuus ry.
- 10 Kenttämaa, Ville. 2018. Sähkönjakeluverkon rakentamisen laatu ja havaittujen virheiden kustannusvaikutukset verkkoyhtiöille ja urakoitsijoille. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUTPub -julkaisuarkisto.
- 11 Pien- ja keskijännitteisen sähköverkon johtojen ja laitteiden sijoittaminen. 2023. Yrityksen sisäinen aineisto. Caruna.
- 12 Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa. 2011. Sähköverkot II. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.
- 13 Pihlajamäki, Lauri. 2019. Yli-lin alueen maasulkuvirtojen kompensointi. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUTPub -julkaisuarkisto.

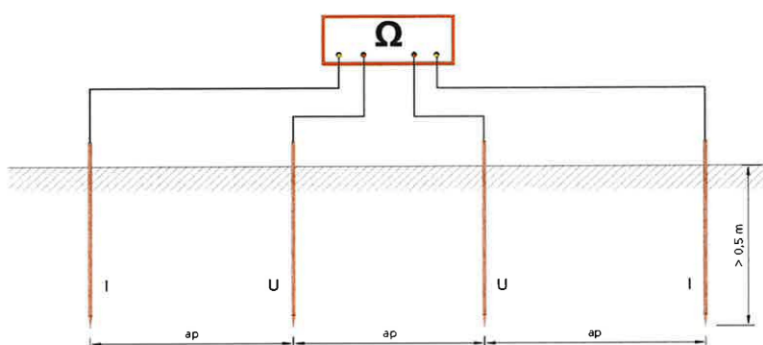
- 14 Suurjänniteasennukset ja ilmajohdot. 2018. SFS-käsikirja 601:2018. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 15 Muuntopiirien ja pylväserotinasemien maadoitukset SFS 6001 / 2015 mukaan. 2016. Verkostosuositus RJ 19:16. Helsinki: Energiateollisuus ry.
- 16 AHXAMK-WP 12/20 (24) kV 3-johdin. Verkkoaineisto. Reka. <<https://www.reka.fi/tuoteryhma/ahxamk-wp-12-20-24-kv-3-johdin>>. Luettu 22.3.2024.
- 17 Pienjännitesähköasennukset. 2022. SFS-käsikirja 600–1:2022. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 18 Ylinen, Timo; Koivisto, Pekka; Kauppila, Jenna; Tiainen, Esa & Nurmi, Tapani. 2019. Maadoituskirja. 7., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 19 Muuntamon perustaminen ja maadoitus. 2022. Yrityksen sisäinen aineisto. Caruna.
- 20 Mäkinen, Antti. 2016. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmästä. Verkkoaineisto. Tampereen teknillinen yliopisto. <[https://energia.fi/julkaisut/selvitys-keskijanniteverkon-maadoitusjarjestelmista\\_tty\\_sahkotutkimuspoolin-julkaisu](https://energia.fi/julkaisut/selvitys-keskijanniteverkon-maadoitusjarjestelmista_tty_sahkotutkimuspoolin-julkaisu)>. 20.2.2017. Luettu 28.3.2024.
- 21 Maadoitusten suunnitteluohje. 2019. Yrityksen sisäinen aineisto. Caruna.
- 22 Maan ominaisresistanssin mittaus. HeadPower -ohjeistot. Yrityksen sisäinen aineisto. HeadPower.
- 23 Ahonen, Pauli. 2020. Maadoitusten käsittelytavan soveltaminen jakeluverkkoyhtiössä. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Trepo -julkaisuarkisto.
- 24 Sähkönjakeluverkkojen maadoitusmittaukset. Verkostosuositus TJ 1:05. Helsinki: Energiateollisuus ry.



## Muuntamon A mittaukset

### Maaperän ominaisresistiivisyys ( $\rho$ ) $\Omega/m$

Muuntamo: *A*  
Mittauspäivä: *11.4. -24*



Piikkiväli $ap$ (m)	Mitattu maadoitusvastus $R$ ( $\Omega$ )	Piikkisyvyys $h$ (m)
2	<i>26,1</i>	<i>0,5</i>
4	<i>24,2</i>	<i>0,5</i>
8	<i>12,9</i>	<i>0,5</i>
<del>16</del>		

$\rho = 2 \cdot \pi \cdot ap \cdot R$ Maaperän ominaisresistiivisyys ( $\Omega m$ )
<i>327,98</i>
<i>608,21</i>
<i>648,42</i>

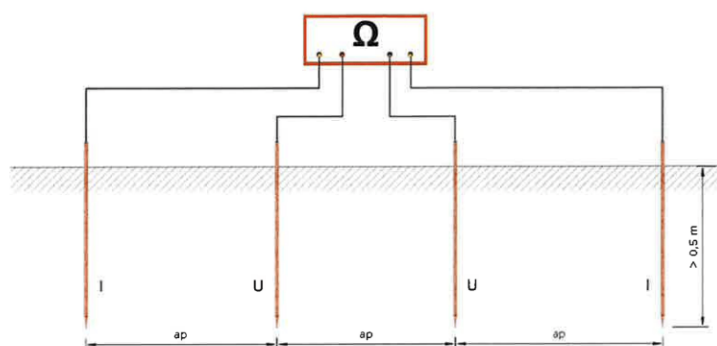
Keskiarvo kolmesta mittauksesta

<i>528,20 <math>\Omega m</math></i>
-------------------------------------

## Muuntamon B mittaukset

### Maaperän ominaisresistiivisyys ( $\rho$ ) $\Omega/m$

Muuntamo: *B*  
Mittauspäivä: *11.4. -24*



Piikkiväli $ap$ (m)	Mitattu maadoitusvastus $R$ ( $\Omega$ )	Piikkisyvyys $h$ (m)
2	<i>1,28</i>	<i>0,5</i>
4	<i>0,18</i>	<i>0,7</i>
8	<i>0,07</i>	<i>0,7</i>
<del>16</del>		

$\rho = 2 \cdot \pi \cdot ap \cdot R$ Maaperän ominaisresistiivisyys ( $\Omega m$ )
<i>16,08</i>
<i>4,52</i>
<i>3,52</i>

Keskiarvo kolmesta mittauksesta

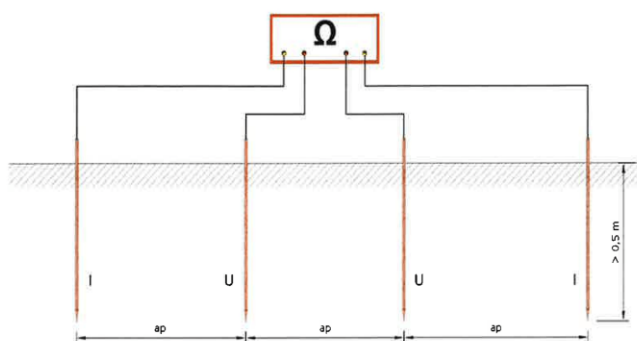
<i>8,04 <math>\Omega m</math></i>
-----------------------------------

## Muuntamon C mittaukset

Maaperän ominaisresistiivisyys ( $\rho$ )  $\Omega/m$ 

Muuntamo: C

Mittauspäivä: 11.4.24



Piikkiväli $a_p$ (m)	Mitattu maadoitusvastus $R$ ( $\Omega$ )	Piikkisyvyys $h$ (m)
2	2,62	0,8
4	1,22	0,8
8	0,85	0,8
<del>16</del>		

$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a_p \cdot R$ Maaperän ominaisresistiivisyys ( $\Omega m$ )
32,92
30,66
42,73

Keskiarvo kolmesta mittauksesta

35,44 $\Omega m$
------------------

## Muuntamokohtaiset maadoitusimpedanssit

Maadoituselektrodi, 230 - KJ-maadoituselektrodi, Uusi

Liitteet	Huomautus	Kohdehierarkia	Kunnossapitotiedot	Mittauseriä
Yleistiedot	Tekniset tiedot	Sijainti	Vapaat attribuutit	Vapaat attribuutit -lista
Maadoitusverkkolaskennassa käytetty resistanssi: Laskettu resistanssi				
Laskettu resistanssi				
Geometria: Rengas				
Maan ominaisvastus (ohmm)	529.000	Halkaisija (m)	0.000	
Poikkipinta-ala (mm <sup>2</sup> )	16	Välimatka (m)	0.000	
Kokonaispituus (m)	25.000	Syvyys (m)	0.700	
Laskettu resistanssi (ohm)	42.459	Laske	<input type="checkbox"/> Älä päivitä laskettua resistanssia	

Maadoituselektrodi, 230 - KJ-maadoituselektrodi, Uusi

Liitteet	Huomautus	Kohdehierarkia	Kunnossapitotiedot	Mittauseriä
Yleistiedot	Tekniset tiedot	Sijainti	Vapaat attribuutit	Vapaat attribuutit -lista
Maadoitusverkkolaskennassa käytetty resistanssi: Laskettu resistanssi				
Laskettu resistanssi				
Geometria: Rengas				
Maan ominaisvastus (ohmm)	8.000	Halkaisija (m)	0.000	
Poikkipinta-ala (mm <sup>2</sup> )	16	Välimatka (m)	0.000	
Kokonaispituus (m)	25.000	Syvyys (m)	0.700	
Laskettu resistanssi (ohm)	0.642	Laske	<input type="checkbox"/> Älä päivitä laskettua resistanssia	

Maadoituselektrodi, 230 - KJ-maadoituselektrodi, Uusi

Liitteet	Huomautus	Kohdehierarkia	Kunnossapitotiedot	Mittauseriä
Yleistiedot	Tekniset tiedot	Sijainti	Vapaat attribuutit	Vapaat attribuutit -lista
Maadoitusverkkolaskennassa käytetty resistanssi: Laskettu resistanssi				
Laskettu resistanssi				
Geometria: Rengas				
Maan ominaisvastus (ohmm)	36.000	Halkaisija (m)	0.000	
Poikkipinta-ala (mm <sup>2</sup> )	16	Välimatka (m)	0.000	
Kokonaispituus (m)	25.000	Syvyys (m)	0.700	
Laskettu resistanssi (ohm)	2.889	Laske	<input type="checkbox"/> Älä päivitä laskettua resistanssia	