



Sähkönjakeluverkon maadoi- tukset haja-asutusalueen keski- jänniteverkossa

Juho Perämäki

OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2021

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

PERÄMÄKI, JUHO:

Sähkönjakeluverkon maadoitukset haja-asutusalueen keskijänniteverkossa

Opinnäytetyö 76 sivua, joista liitteitä 6 sivua
Kesäkuu 2021

Opinnäytetyön tavoitteena oli määritellä maadoitusverkon rakenne sähköverkkoyhtiölle. Taustalla oli verkkoyhtiön tarve saneerata haja-asutusalueen keskijänniteverkko säävarmaksi. Saneerauksesta aiheutuvat muutokset vaikuttivat maadoitusverkonkin rakenteeseen. Tarkoituksena oli löytää teknistaloudellisesta näkökulmasta järkevä maadoitusverkon rakenne aiemman tarpeettoman kalliin rakenteen tilalle siten, että standardin muuttuneet vaatimukset ja maadoitusimpedanssin tavoitearvot täyttyvät. Ensin selvitettiin standardien ja ohjeistusten sen hetkiset vaatimukset tarkasti. Työn aikana teetettiin muun muassa maaperän resistiivisyysmittauksia, joiden tulkitsemiseen haettiin verkkoyhtiön kannalta parasta mahdollista ratkaisua. Lisäksi maadoituselektrodin maadoitusimpedanssin laskentaan etsittiin tapaa, joka ottaisi huomioon elektrodireitin maaperän epähomogeenisuudet.

Selvitysten perusteella haja-asutusalueen maadoitusverkon tyyppinä aletaan käyttää yhteen liitettyä maadoitusjärjestelmää. Maadoitusjärjestelmän vaatimustenmukaisuus tullaan todentamaan lähtökohtaisesti maaperän resistiivisyysmittauksilla ja niiden perusteella tehtävällä laskennalla. Valittu tapa todettiin käyttökelpoisimmaksi ja kustannustehokkaimmaksi toteutustavaksi uutta verkkoa rakennettaessa. Maaperän resistiivisyysmittausten tulkitsemiseen ja maadoituselektrodin maadoitusimpedanssin laskentaan löydettiin käyttökelpoiset menetelmät.

Opinnäytetyössä tehtyjen laskelmien ja simulointien johtopäätöksenä voidaan todeta, että maadoituksia ei kannata rakentaa huonosti johtavaan maaperään. Elektrodin asentaminen hyvin johtavaan maaperään parantaa verkon maadoitusimpedanssia koko yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän alueella. Aiemmin verkkoyhtiössä asennettiin jokaisen 20 kV kaapelin rinnalle erillinen maadoituselektrodi. Jatkossa maadoitussuunnittelu toteutetaan aiempaa tarkemmin ja yksityiskohtaisemmin työstä saatujen tulosten perusteella. Erillistä maadoituselektrodia ei enää asenneta kuin tarpeen vaatiessa. Elektrodin pois jättämisestä seuraava taloudellinen säästö on merkittävä. Jatkossa olisi hyvä pohtia, millä toimenpiteillä aiemmin rakennettu maadoitusverkko voidaan tulkita yhteen liitettyksi maadoitusjärjestelmäksi, jos verkon rakenne muuten vastaa vaatimuksia.

Asiasanat: maadoitus, yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä, maaperä, resistiivisyys, epähomogeenisuus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Power Engineering

PERÄMÄKI, JUHO:

Earthing of the Medium Voltage Distribution Network in a Sparsely Populated Area

Bachelor's thesis 76 pages, appendices 6 pages
June 2021

The objective of the thesis was to define the structure of the earthing network for a distribution network company. The idea behind this project was the network company's need to revise the medium voltage network in a sparsely populated area to make it weatherproof. The changes caused by the revision affected the structure of the earthing network as well. The aim was to find a reasonable earthing network structure from a techno-economic point of view to replace the previous unnecessarily expensive structure so that the changed requirements of the standard and the target values of the impedance to earth would be met. First, the current requirements of the standards and guidelines were investigated carefully. During the work, soil resistivity measurements were commissioned, and the best possible solution for interpreting the measurement results were sought. In addition, a way was sought to calculate the earth electrode impedance to earth that would take the soil inhomogeneities of the electrode path into account.

Based on the studies, a connected earthing system will be used as the type of the earthing network in a sparsely populated area. The compliance of the earthing system will be verified primarily by soil resistivity measurements and calculations based on them. The chosen method was found to be the most useful and cost-effective implementation when building a new network. Useful methods were found for the interpretation of soil resistivity measurements and the calculation of earth electrode impedance to earth.

As a conclusion of the calculations and simulations made in the thesis, it can be stated that it is not worthwhile to build earthings in poorly conductive soils. Installing the electrode in highly conductive soil improves the network impedance to earth throughout the whole area of the connected earthing system. Previously, the network company installed a separate earth electrode alongside each 20 kV cable. In the future, the designing of earthings will be carried out more accurately and, in more detail, based on the results obtained from the thesis. A separate earth electrode will not be installed anymore unless necessary. The economic saving resulting from the omission of the electrode is significant. In the future, it would be useful to consider what measures can be taken to interpret a previously built earthing network as a connected earthing system, if the structure of the network otherwise meets the requirements.

Key words: earthing system, connected earthing system, electric resistivity of soil, non-homogeneous soil

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	MAASULKU KESKIJÄNNITEVERKOSSA	9
	2.1 Maasulkuvirta sammutetussa keskijänniteverkossa	9
	2.1.1 Maavirta	10
	2.2 Maasulun aikana vaikuttavat jännitteet	11
3	KESKIJÄNNITEVERKON MAADOITUSJÄRJESTELMÄT	14
	3.1 Maadoitusjärjestelmälle asetettuja perusvaatimuksia	14
	3.2 Maadoitusjärjestelmien mitoittaminen	15
	3.3 Maadoitusjärjestelmien jaottelu	18
	3.4 Maadoituselektrodit	21
4	MAADOITUSTEN MITOITUS JA TODENTAMINEN TEISKOSSA	23
	4.1 Haja-asustusalueen keskijänniteverkon saneeraus	23
	4.2 Maakaapeloinnin vaikutukset maadoitusvaatimukseen	25
	4.3 Maadoitusverkon rakennustapa Teiskossa	28
	4.4 Maadoitusten suunnittelutapa ja vaiheet	30
5	MAAPERÄN RESISTIIVISYYDEN MÄÄRITTÄMINEN	35
	5.1 Maaperän resistiivisyys	35
	5.2 Kaksikerrosmaa	36
	5.3 Keskiarvomenetelmät	40
	5.4 Resistiivisyysmittausten tulkintamenetelmien arviointia	41
6	MAADOITUSELEKTRODIN MAADOITUSIMPEDANSSIN MÄÄRITTÄMINEN	48
	6.1 Maaperän vaakasuuntainen epähomogeenisuus	48
	6.2 Siirtojohtojen yhtälöt (homogeeninen maaperä)	49
	6.2.1 Ekvivalenttisäde	50
	6.2.2 Resistanssi, reaktanssi ja maadoituskonduktanssi	51
	6.2.3 Maadoitusimpedanssi	53
	6.3 Nelinäpämenetelmä epähomogeenisessa maaperässä	53
	6.4 Maadoitusimpedanssin laskentamenetelmien analysointia	56
7	MAADOITUSVERKON MAADOITUSIMPEDANSSIN MÄÄRITTÄMINEN	60
	7.1 Resultoiva maadoitusimpedanssi	60
	7.1.1 Laskentamalli	63
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	66
	LÄHTEET	69
	LIITTEET	71

Liite 1. Maadoitusjärjestelmän suunnittelu (SFS 6001 2018, 94)	71
Liite 2. Maadoitusresistanssin laskentakaavoja (SFS 6001 2018, 148)	72
Liite 3. Elektrodimuodon vaikutus maadoitusresistanssiin (SFS 6001 2018, 149).....	73
Liite 4. Maaperän, betonin ja veden resistiivisyydet (SFS 6001 2018, 147).....	74
Liite 5. Maadoituselektrodin tyypillisiä resistanssiarvoja pituuden ja maaperän resistiivisyyden funktiona (SFS 6001 2018, 124)	75
Liite 6. Vaakamaadoituselektrodin maadoitusimpedanssin laskentatyökalu	76

LYHENTEET JA TERMIT

I_C	kapasitiivinen maasulkuvirta
I_E	maavirta
I_F	maasulkuvirta
I_H	harmoninen virta
I_L	rinnakkaisten sammutuskelojen virtojen summa
I_{RES}	maasulun jäännösvirta
I_0	vaihejohtimen nollavirta
r	reduktiokerroin
R_E	maadoitusresistanssi
U_E	maadoitusjännite
U_S	askeljännite
U_T	kosketusjännite (tehollinen)
U_{Tp}	sallittu kosketusjännite
U_{vS}	suurin askeljännite
U_{vT}	prospektiivinen kosketusjännite
Z_E	maadoitusimpedanssi
ρ_E	maaperän sähköinen resistiivisyys
maadoituselektrodi (paikallinen) maa	maahan sähköisessä yhteydessä oleva johtava osa maadoituselektrodiin yhteydessä oleva maan johtava osa, jonka potentiaali ei välttämättä ole nolla
referenssimaa	maan johtava osa, jonka sähköiseksi potentiaaliksi missä tahansa kohdassa on sovittu nolla
resultoiva maadoitus- impedanssi	yhdistysjohtimilla toisiinsa liitetyn usean maadoitus- elektrodin järjestelmän maadoitusimpedanssi

1 JOHDANTO

Tämän työn tavoitteena oli määritellä haja-asutusalueen maadoitusverkon (keskijänniteverkko) rakenne Tampereen Sähköverkko Oy:lle (myöhemmin TSV). Tehtävänä oli selvittää ja tutkia erilaisia vaihtoehtoisia maadoitusverkon toteutustapoja. Tarkoituksena oli löytää teknistaloudellisesta näkökulmasta järkevä rakenne siten, että standardissa asetetut vaatimukset ja maadoitusimpedanssin tavoitearvot täyttyvät. Lisäksi tuli laatia ohjeistus maadoitusten suunnittelusta ja suunnittelutyökalujen käytöstä TSV:n verkonsuunnittelua varten.

Aiheen tutkimiselle verkkoyhtiössä oli tarvetta, koska haja-asutusalueen sähköverkkoa saneerataan säävarmaksi muun muassa sähkömarkkinalain (588/2013) muutosten vuoksi. Kyseisessä laissa muun muassa asetetaan laatuvaatimuksia jakeluverkon toiminnalle; miten se on suunniteltava, rakennettava ja kuinka sitä on ylläpidettävä. Asemakaava-alueella jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumikuorman seurauksena ei saa aiheuttaa käyttäjälle yli 6 tuntia kestävästä sähköjakelun keskeytystä. Vastaavasti muulla alueella keskeytys ei saa yleensä olla yli 36 tunnin pituinen. Vaatimusten tulee täytyä vuoden 2028 loppuun mennessä. Vuoden 2019 lopussa 50 prosenttia käyttäjistä on oltava säävarman verkon piirissä, vuoden 2023 lopussa luku on 75 prosenttia (pl. vapaa-ajan asunnot). Täytäntöönpanoaikaa voidaan painavista syistä jatkaa. Hallituksen esityksessä (HE 265/2020) toimitusvarmuusvaatimusten täytäntöönpanoaikaa on esitetty jatkettavan vuoteen 2036 pääasiassa haja-asutusalueella toimiville jakeluverkonhaltijoille samalla kun muista poikkeuslupamenettelyistä luovuttaisiin. Jatkoaika ei todennäköisesti koskisi Tampereen Sähköverkkoa. (Sähkömarkkinalaki 588/2013.)

Suurjännitestandardin SFS 6001 ja muiden ohjeiden, kuten uuden verkostosuosituksen RJ 22:20 uudet tarkemmat ohjeistukset, määritelmät ja muuttuneet vaatimukset ovat vaikuttaneet maadoitusten suunnitteluun. Työssä esitelläänkin maadoituksiin liittyviä keskeisiä standardin muutoksia, erityisesti yhteen liitettyä maadoitusjärjestelmää. Merkittäväksi osaksi työtä muodostui myös maaperän epähomogeenisen resistiivisyyden vaikutusten huomioiminen maadoitusten suunnittelussa ja laskennassa.

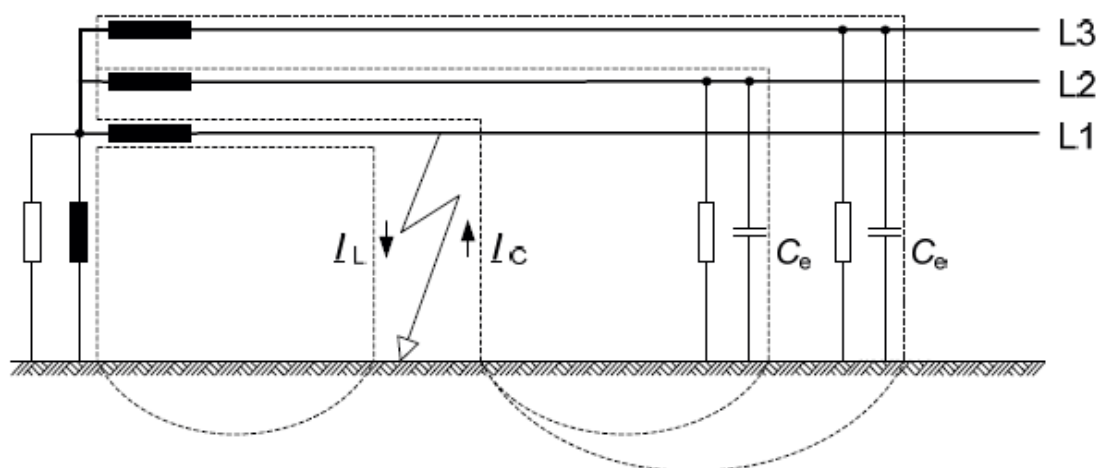
Moni verkkoyhtiö rakentaa säävarmaa jakeluverkkoaan maakaapeloimalla ilma-johtoverkkoa. Maakaapeloinnin avulla toimitusvarmuus parantuu, kun luonnonilmiöt eivät enää vaikuta sähkölinjoihin. Lisääntyvän maakaapeloinnin takia tulee kuitenkin kiinnittää entistä enemmän huomiota siihen, miten sähköverkolle asetetut turvallisuusvaatimukset täyttyvät. Maakaapelointi kasvattaa maasulkuvirtaa merkittävästi kilometriä kohti laskettuna verrattuna ilmajohtoon. Seurauksena kosketusjännite nousee, jos kasvanutta maasulkuvirtaa ei kompensoida, maasulun laukaisuaikaa ei lyhennetä tai maadoitusimpedanssin arvoa ei pienennetä maadoituksia lisäämällä. Maasulkuvirran kasvamisesta ei saa seurata maadoitusjännitteen sallitun arvon ylittymistä millään verkon muuntamalla (SFS 6001 2018, 152). Tässä työssä keskityttiin tarkastelemaan sähköverkon turvallisuutta vain maadoitusten näkökulmasta. Maasulkuvirran kompensoinnin sekä maasulun laukaisuajan teoriaa käsitellään vain sen verran, kun maadoitusimpedanssin arvon muodostumisen kannalta on tarpeellista.

2 MAASULKU KESKIJÄNNITEVERKOSSA

Maasululla tarkoitetaan tilannetta, jossa jännitteinen johdin kytkeytyy maahan, tai johtimen ja maan välinen eristysresistanssi pienentyy alle määrätyn raja-arvon. Seurauksena pääpiiristä maahan tai maadoitettuihin osiin kulkee maasulkuvirta, jonka suuruuteen verkon tähtipisteen maadoitustapa vaikuttaa merkittävästi. Suomessa on yleensä joko jätetty muuntajan tähtipiste kytkemättä maahan (maasta erotettu järjestelmä) tai tähtipiste on maadoitettu sammutuskelan kautta (sammutettu järjestelmä). Tarkasteluun on otettu vain kompensoitu eli sammutettu verkko, koska maasta erotettua verkkoa ei Tampereen Sähköverkolla ole käytössä. (SFS 6001 2018, 21, 28.)

2.1 Maasulkuvirta sammutetussa keskijänniteverkossa

Maasulkuvirralla I_F tarkoitetaan vikakohtassa pääpiiristä maahan tai maadoitettuihin osiin kulkevaa virtaa. Sammutetussa järjestelmässä verkon tähtipiste on maadoitettu sammutuskelan kautta (kuva 1). Sammutuskelan aikaansaaman induktanssin on tarkoitus kompensoida verkon maakapasitansseja, jolloin vikapaikassa vaikuttava maasulkuvirta pienenee. (SFS 6001 2018, 21.)



$$|I_F| = |I_{RES}| = \sqrt{|I_C + I_L|^2 + |I_H|^2}$$

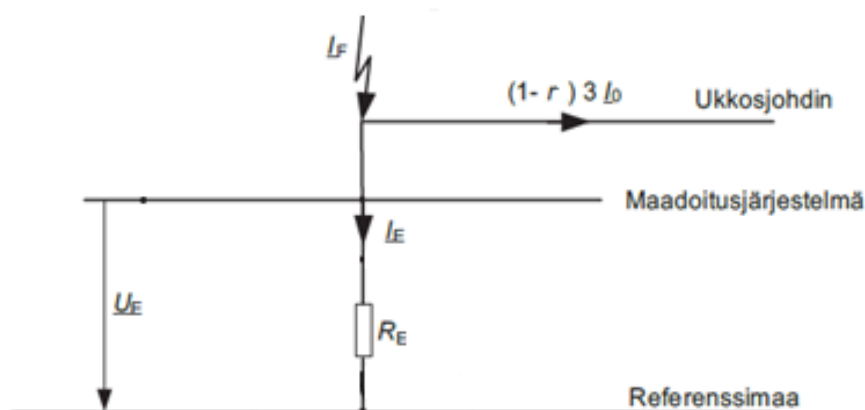
KUVA 1. Maasulkuvirta sammutetussa järjestelmässä (SFS 6001 2018, 25)

TSV:lla verkko on täysin kompensoitu, teoriassa vikapaikan kautta kulkee vain jäännösvirta I_{RES} , joka muodostuu kelan ja verkon häviöistä sekä kelan toisiovas-
tuksen aiheuttamasta pätövirrasta ja yliaaltojen aiheuttamasta harmonisesta vir-
rasta I_H . Maasulkuvirran kompensointi voidaan tehdä joko keskitetysti sähköase-
malla tai hajautetusti sijoittamalla sammutuskeloja verkolle johtojen varsille. (ABB
2000, 7.)

TSV:lla keskitetty kompensointi on kytketty päämuuntajan tähtipisteeseen ja
kompensoinnin vikaantuessa koko päämuuntaja korvataan toiselta sähköase-
malta, jossa on oma kompensointikelansa. Tämä tehdään siitä syystä, ettei maa-
sulkuvirta kasvaisi sallittua suuremmaksi edes poikkeuksellisissa kytkentätilan-
teissa (SFS 6001 2018, 144). Näin toimittaessa johtolähtöjen suojausasetteluissa
ei tällä hetkellä tarvita erillistä asettelua maasta erotetulle verkolle tilanteessa,
jossa maasulun sammutuskela ei ole verkossa.

2.1.1 Maavirta

Maavirralla I_E tarkoitetaan sitä osaa maasulkuvirrasta I_F , joka kulkee maadoi-
tusimpedanssin Z_E (tai maadoitusresistanssin R_E) kautta maahan. Maavirta ai-
heuttaa maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välille maadoitusjännitteen U_E .
Kuten kuvasta 2 nähdään, ilmajohtojen ukkosjohtimet, maakaapeleiden metalli-
vaipat ja keskusköysi voivat johtaa osan maasulkuvirrasta muualle maadoitus-
verkkoon, jolloin vikapaikan maadoituksen kautta kulkee vain osa maasulkuvir-
rasta, toisin sanoen maavirta. (SFS 6001 2018, 22.)



KUVA 2. Maavirran muodostuminen (SFS 6001 2018, 24, muokattu)

Maasulkuvirran ja maavirran suhdetta kutsutaan reduktiokertoimeksi r , joka voidaan laskea jakamalla maavirta I_E päävirtapiirin vaihejohtinten noljavirtojen I_0 summalla (SFS 6001 2018, 22). Maasta erotetussa 20 kV ilmajohtoverkossa ei yleensä käytetä ukkosjohtimia, jolloin reduktiovaikutustakaan ei pääse muodostumaan (reduktiokerroin on tällöin 1). Sammutetussa maakaapeliverkossa reduktiokerroin voi olla esimerkiksi 0,2–0,6 välillä kaapelin ominaisuuksista ja maaperän resistiivisyydestä riippuen (SFS 6001 2018, 119–120).

Maavirtaa ei voi suoraan mitata, joten se on määritettävä laskemalla (SFS 6001 2018, 22, 24). Maavirta I_E voidaan määrittää esimerkiksi standardista löytyvällä kaavalla 1, jota voidaan käyttää määrittelemään maadoitus- ja kosketusjännitteisiin liittyvä virta maadoitusjärjestelmissä, joissa on maasulun sammutuskela (SFS 6001 2018, 90).

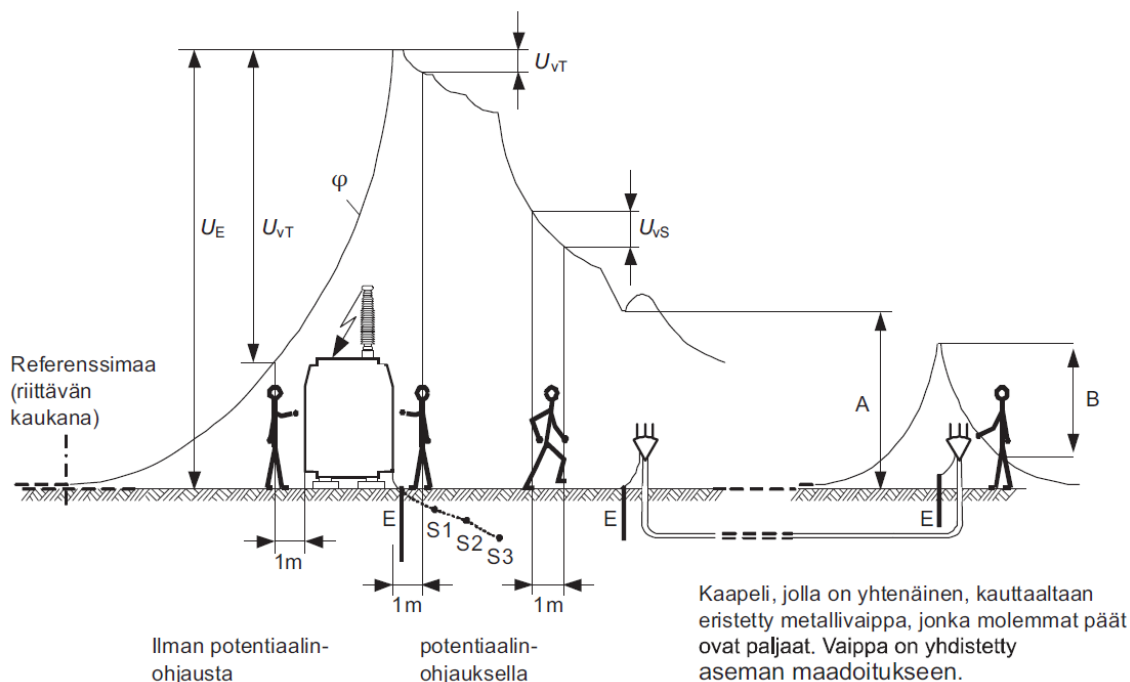
$$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{RES}^2} \quad (1)$$

Kaavassa 1 r on reduktiokerroin, I_L on tarkasteltavana olevan sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa ja I_{RES} on maasulun jäännösvirta. Jos tarkkaa arvoa maasulun jäännösvirralle ei ole käytettävissä, arvoksi voidaan olettaa 10 % arvosta I_C , joka on laskettu tai mitattu kapasitiivinen maasulkuvirta. Vian sattuessa sähköasemalla, pitää ottaa huomioon myös kapasitiivinen vikavirta. Lisäksi sähköaseman ulkopuolisessa verkossa mahdollisesti olevat muut sammutuskelat tulee ottaa huomioon. (SFS 6001 2018, 90.)

2.2 Maasulun aikana vaikuttavat jännitteet

Maavirran I_E aiheuttama potentiaalinen nousu on ihmiselle vaarallinen. Suuren potentiaalieron piiriin joutumisen seurauksena ihmisen kautta voi alkaa kulkea vikavirtaa. Virran vaikutuksesta voi aiheutua erilaisia ja eriasteisia vammoja, esimerkiksi sydämen alueen kautta kulkiessaan tarpeeksi suuri virta voi aiheuttaa ihmiselle hengenvaarallisen sydänkammiovärinän. (SFS 6001 2018, 87.)

Kuva 3 esittää tilannetta, jossa maadoituselektrodeissa E kulkee virta esimerkiksi pääpiirin ja maadoitetun osan välisessä maasulussa. Käyrä φ esittää maan potentiaaliprofiilia, U_E on maadoitusjännite, U_{VS} suurin askeljännite, U_{VT} suurin kosketusjännite (prospektiivinen kosketusjännite) ja S1, S2 sekä S3 ovat maadoituselektrodiin E yhdistetyt potentiaalinohjaus-elektrodit. (SFS 6001 2018, 23.)



KUVA 3. Maan potentiaaliprofiili maasulussa (SFS 6001 2018, 23)

Maadoitusjännitteellä U_E tarkoitetaan maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välistä jännitettä, kun referenssimaa (neutraalimaa/kaukana oleva maa) tarkoittaa maan johtavaa osaa, jonka sähköiseksi potentiaaliksi missä tahansa kohdassa on sovittu nolla, ja joka on kaikkien tarkasteltavien maadoitusjärjestelmien vaikutusalueen ulkopuolella. (SFS 6001 2018, 17, 19.)

Kuvasta 3 nähdään maadoitusjärjestelmän ja potentiaalinohjaus-elektrodien merkitys vikatilanteessa. Hyvä maadoituselektrodi pienentää maadoitusjännitettä. Jos maadoituselektrodiä ei olisi, vikapaikan ja referenssimaan välinen potentiaaliero olisi suurempi ja täten vielä vaarallisempi, koska samanaikaisesti kosketeltavissa olevien johtavien osien välinen jännite U_{VT} (kun osia ei siis kosketeta) olisi suurempi. Potentiaalinohjaus-elektrodit tasaavat vikapaikan ympärillä vaikuttavaa potentiaaliero, jolloin maan ja viallisen laitteen välinen prospektiivinen kosketus-

jännite pienenee. Maadoitusten tarkoituksena onkin johtaa häiriö- ja vikatilanteissa syntyvä virta maahan ja siten poistaa ympäristöön syntyvät vaaratilanteet (Nieminen 1979, 1).

Suurin askeljännite U_{vs} kuvaa kahden toisistaan 1 metrin (oletettu askelpituus) etäisyydellä olevan maanpinnan pisteen välistä jännitettä. Tämäkin suure on kuormittamattomasta tilanteesta (ts. molemmat jalat eivät ole maassa). Henkilön impedanssi (kehon impedanssi, virtatie, millaiset kengät, yms.) vaikuttaa ihmisen kokeman askeljännitteen U_s ja kosketusjännitteen U_T (tehollinen kosketusjännite) suuruuteen. (SFS 6001 2018, 19, 23.)

3 KESKIJÄNNITEVERKON MAADOITUSJÄRJESTELMÄT

SFS 6001 suurjännitestandardissa on esitetty vaatimuksia, jotka tulee ottaa maadoitusten suunnittelussa huomioon. Opinnäytetyössä tarkastellaan suurimmaksi osaksi vain turvallisuuden kannalta tärkeitä kosketusjännitevaatimuksia. SFS 6001 standardista löytyy vaatimuksia ja mitoitusohjeita myös maadoitusten korroosionkestävyydelle, mekaaniselle ja termiselle lujuudelle, mutta tässä työssä niiden perusteellisempi tarkastelu jätetään vähemmälle huomiolle ja viitataan vain standardista löytyvään tarkempaan ohjeistukseen. Luvussa esitellään myös erilaiset standardista löytyvät maadoitusjärjestelmätyypit, erityisesti keskitytään vuoden 2018 standardiin tulleeseen uuteen yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään.

3.1 Maadoitusjärjestelmälle asetettuja perusvaatimuksia

Standardissa SFS 6001 asetetaan maadoitusjärjestelmän suunnittelulle vaatimukseksi, että askel- ja kosketusjännitteet sekä siirtyvät potentiaalit pysyvät sallituissa jänniterajoissa suojareleiden ja katkaisijoiden normaalien toiminta-aikojen puitteissa. Yleensä kosketusjännitteelle annettujen vaatimusten täytyessä, täytyvät myös askeljännitteelle annetut vaatimukset. Lisäksi maadoitusjärjestelmän on pystyttävä jakamaan ja purkamaan vikavirta ilman, että varasuojauksen toiminta-aikaan perustuvat termiset ja mekaaniset suunnitteluraja-arvot eivät ylitä. (SFS 6001 2018, 88.)

Maadoitusjärjestelmän pitää olla tarpeeksi suorituskykyinen estämään maadoitusjännitteen noususta, maadoitusjärjestelmässä esiintyvistä potentiaalieroista ja suurista hajavirroista aiheutuvat laiteviat. Lisäksi maadoitusjärjestelmän on pystyttävä toimintakuntoisena koko asennuksen odotettavissa olevan eliniän ja korroosion sekä mekaanisten rasitusten vaikutukset tulee riittävässä määrin ottaa huomioon. Kansallisena lisätietona on esitetty, että yhden maadoitusjohtimen katkeaminen ei saa tehdä koko järjestelmää tehottomaksi. (SFS 6001 2018, 88, 142.)

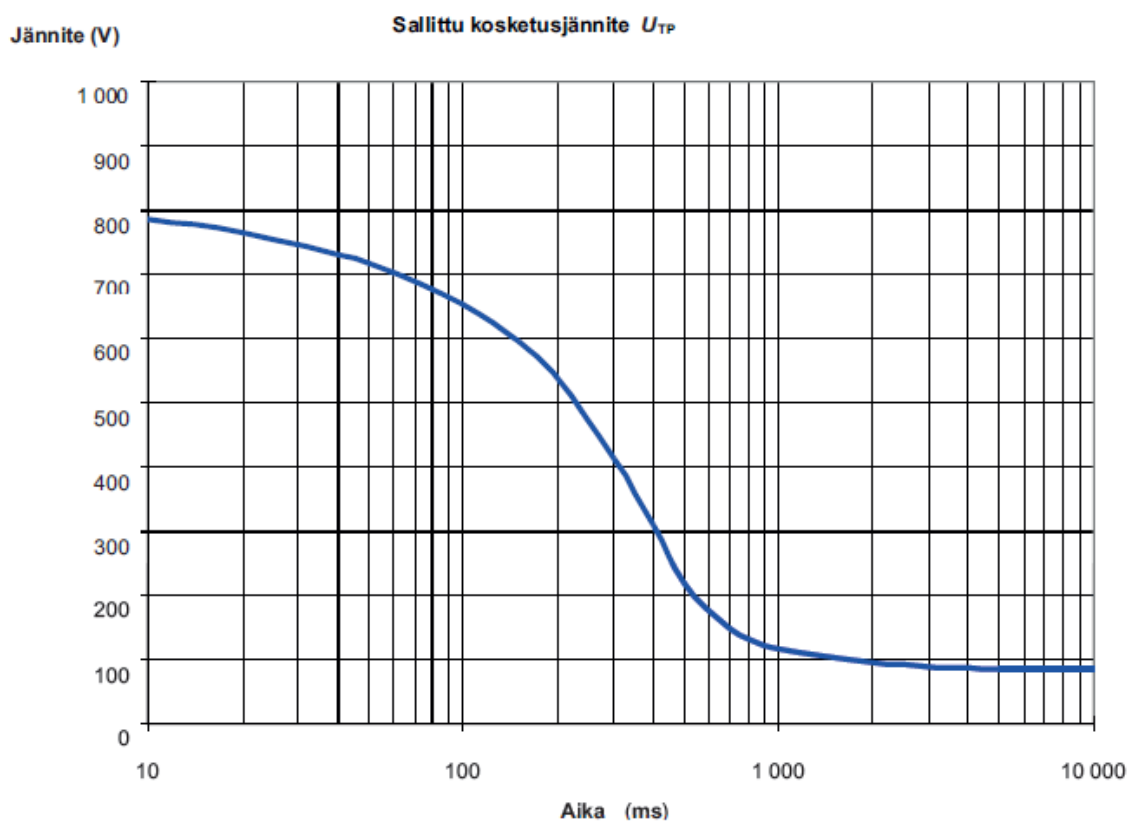
Suurjännitejärjestelmästä pienjännitejärjestelmään siirtyvien jännitteiden osalta standardissa suositellaan pääasiassa kyseisten järjestelmien maadoitusten yhdistämistä, mikäli se on mahdollista (SFS 6001 2018, 95). Maadoitusten toisistaan erottamiset on tarkasteltava tarkemmin tapauskohtaisesti. Maadoitusten erillään pitäminen saattaa olla haastavaa, sillä kokemuksen mukaan erillisiksi tarkoitettut maadoitukset pyrkivät yhdistymään verkon maasulkujen vaikutuksesta (SFS 6001 2018, 142).

3.2 Maadoitusjärjestelmien mitoittaminen

Olenneisimmat tekijät maadoitusjärjestelmien mitoituksessa ovat vikavirran suuruus, vian kestoaika ja maaperän sekä maadoituselektrodin ominaisuudet. Standardissa kehon kautta kulkevan virran raja-arvo on muutettu jännitteen raja-arvoksi, jotta sitä voidaan verrata laskettuihin askel- ja kosketusjännitteisiin. (SFS 6001 2018, 87.)

Käytännössä maadoitusjärjestelmiä suunniteltaessa määritetään kuinka suurilla maadoitusimpedansseilla, maasulkuvirroilla ja maasulkuvirtojen poiskytkentäajoilla kosketusjännitevaatimukset saadaan täytettyä. Näiden kolmen suureen suhde pyritään saamaan sellaiseksi, ettei minkään yksittäisen tekijän vaatimukset kasva niin suuriksi, ettei niitä pystyttäisi täyttämään. Esimerkiksi poiskytkentäajat määritetään mahdollisuuksien mukaan tarpeeksi lyhyiksi, jotta maadoitusimpedanssivaatimukset eivät kasva kohtuuttomiksi.

Maadoitusjärjestelmän suunnittelun ja mitoituksen onnistuminen sekä vaatimusten täytyminen todetaan vertaamalla maadoitusjännitteen U_E tai kosketusjännitteen U_T suuruutta sallittuun kosketusjännitteeseen U_{Tp} . Kuva 4 esittää standardissa määritetyt kosketusjänniterajat vian kestoajan suhteessa siten, että turvallisuuskriteerit täyttyvät. (SFS 6001 2018, 91, 93–94.)



KUVA 4. Sallittu kosketusjännite (SFS 6001 2018, 93)

Kuvassa 4 esitettyjen sallittujen kosketusjännitteiden U_{Tp} arvojen katsotaan toteutuvan, jos kyseessä oleva asennus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää tai mittauksin tai laskennallisesti määritetty maadoitusjännite U_E ei ole suurempi kuin sallitun kosketusjännitteen U_{Tp} arvo kaksinkertaisena. Vaihtoehtoisesti voidaan toteuttaa standardin liitteessä E esitetyt erityistoimenpiteet M, jotka riippuvat maadoitusjännitteen suuruudesta ja vian kestoajasta (SFS 6001 2018, 113–114). Näitä ovat esimerkiksi johtamattomien materiaalien käyttö, potentiaalinhjaus, käyttöpaikan eristäminen ym. toimenpiteet. Jos mainitut ehdot eivät toteudu eikä erityistoimenpiteitä M tehdä, sallittujen kosketusjännitteiden U_{Tp} toteutuminen pitää osoittaa muulla tavalla, yleensä mittaamalla ($U_T \leq U_{Tp}$). Liitteessä 1 on vielä esitetty laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattoman maadoitusjärjestelmän suunnitteluprosessin lohkokaavio. Sen avulla voidaan varmistaa maadoitussuunnitelman vaatimusten mukaisuus vertaamalla maadoitusjännitteen U_E tai kosketusjännitteen U_T suuruutta sallittuun kosketusjännitteeseen U_{Tp} . (SFS 6001 2018, 91, 94, 113–114.)

Maasulkuvirran poiskytkentäajan perusteella saadaan kuvasta 4 määritettyä sallittu kosketusjännite U_{Tp} . Jakelumuuntamoissa, joissa suur- ja pienjännitemaadoitukset on yhdistetty sekä pienjänniteverkko on TN-järjestelmä, maadoitusjännitteen U_E arvo voidaan oletusarvoisesti määrittää enintään kaksinkertaiseksi sallitusta kosketusjännitteen arvosta ($U_E \leq 2 \times U_{Tp}$). Tällöin sallitun kosketusjännitteen arvon voidaan vielä katsoa toteutuvan. Jos muuntopiirin alueella maaperän johtavuus on huono ja siitä syystä arvon 2 saavuttaminen on erityisen vaikeaa, voidaan käyttää suurempia kertoimia kuten 4 tai 5. Tällöin täytyy kuitenkin täyttää standardin kansallisen liitteen lisävaatimukset, joita ovat esimerkiksi laukaisevan maasulkusuojauksen käyttäminen, tarvittaessa virtaa rajoittavien ylijännitesuojien käyttäminen, potentiaalinhjaus, pienjänniteverkon lisämaadoitukset ym. toimenpiteet. (SFS 6001 2018, 143.)

Käytännössä maadoituksia suunniteltaessa maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssille Z_E pyritään määrittelemään tavoitearvo, jonka alittuessa voidaan todeta kosketusjännitteiden pysyvän sallituissa rajoissa. Tavoitearvo voidaan laskea yleistetyllä Ohmin lailla maadoitusjännitteestä U_E ja maavirrasta I_E . Maadoitusimpedanssin Z_E reaaliosa on maadoitusresistanssi R_E , jonka arvo voidaan laskea esimerkiksi yksittäiselle maadoituselektrodille. Liitteen 2 taulukossa on esitetty suurjännitestandardista löytyviä laskentakaavoja, joita voidaan käyttää apuna maadoitusten suunnittelussa. Lisätietoa kaavoihin liittyen löytyy esimerkiksi kirjallisuuslähteestä (Valjus 1979, 11–12). Lisäksi liitteen 3 taulukon avulla voidaan arvioida erilaisten elektrodimuotojen vaikutusta maadoitusresistanssin suuruuteen. (SFS 6001 2018, 148–149.)

Maadoitusresistanssin suuruus riippuu maaperän resistiivisyydestä, maadoituselektrodin mitoista ja asennustavasta. Maadoitusresistanssin kannalta merkittävin vaakamaadoituselektrodin ominaisuus on elektrodin pituus, elektrodin poikkipinta-alan vaikutuksen jäädessä pienemmäksi. Myös maaperän resistiivisyys vaikuttaa ratkaisevasti maadoitusresistanssin ja maadoitusimpedanssin arvon suuruuteen. (SFS 6001 2018, 148.)

3.3 Maadoitusjärjestelmien jaottelu

Keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmät jaetaan suurjännitestandardin SFS 6001 vuoden 2018 versiosta eteenpäin kolmeen erityyppiseen järjestelmään; paikalliseen maadoitusjärjestelmään, yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään ja laajaan maadoitusjärjestelmään. Standardissa esitellään jokaiselle järjestelmälle vaatimukset, joiden perusteella tietty maadoitusjärjestelmä voidaan luokitella.

Paikallinen maadoitusjärjestelmä

Paikallinen maadoitusjärjestelmä on yksittäinen maadoitusjärjestelmä, joka ei ole maadoitusten kannalta galvaanisesti yhteydessä muihin suurjännitejakelujärjestelmiin. Tällainen järjestelmä voi olla esimerkiksi ilmajohtoverkkoon liittyvän jakelumuuntamon maadoitusjärjestelmä tai vastaava järjestelmä, jonka etäisyydet muihin järjestelmiin ovat pitkät. Myös korkeintaan kahden paikallisen maadoitusjärjestelmän ollessa yhteydessä toisiinsa, paikallisen maadoitusjärjestelmän vaatimuksia tulee noudattaa. (SFS 6001 2018, 145.)

Paikallisen maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin suuruudelle on yleensä annettu sallitun kosketusjännitteen perusteella vaadittu arvo, joka tulee alittaa. Maadoitusresistanssin suuruus on mitattava ennen käyttöönottoa tai sen jälkeen viimeistään vuoden kuluessa. Vaatimusten toteutuminen pitää varmistaa jatkossakin, standardista löytyy suositellut mittausvälit eri tapauksille. (SFS 6001 2018, 145–146.)

Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä

Sähkönjakeluverkkojen maakaapelointiasteen kasvaessa on herännyt tarve määritellä uusi maadoitusjärjestelmä tyyppi. Erityisesti maaseudulla maadoitusjärjestelmien rakenne on laajentunut, kun keskijänniteverkon maakaapeloinnin yleistyessä aiemmin paikalliset maadoitusjärjestelmät korvautuvat muihin maadoitusjärjestelmiin galvaanisesti yhdistyville järjestelmille. Tällöin on jo kyse laajemmasta kuin paikallisesta maadoitusjärjestelmästä. Uudet järjestelmät eivät kuitenkaan täysin täytä laajan maadoitusjärjestelmän vaatimuksia; niistä toki löytyy yhdistyksiä muihin muuntopiireihin, mutta usein eri muuntamoiden välit ovat liian pitkät tai riittävän useita yhteyksiä muihin järjestelmiin ei ole, jotta kyseinen

järjestelmä voitaisiin määritellä laajaksi. Standardissa mainitaankin kansallisena lisäyksenä, että kyseessä on yhtenäinen maadoitusjärjestelmä, jossa paikalliset maadoitusjärjestelmät on kytketty yhteen, mutta kaikki laajan maadoitusjärjestelmän ehdot eivät täyty. (SFS 6001 2018, 20.)

Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä voi olla esimerkiksi usean muuntopiirin ketju, jossa yhdistykset on toteutettu riittävän suurella poikkipinnalla varustetulla kaapelin kosketussuojalla/metallivaipalla ja/tai keskusköysien ja/tai erillisen johtimen avulla. Myös lisäyhdistykset pienjänniteverkon suoja- tai PEN-johtimien kautta voivat olla mahdollisia. Lisäksi jakelumuuntamon tai vastaavan maadoitusjärjestelmä tulee olla yhdistettynä vähintään kahteen muuhun suurjännitemaadoitusjärjestelmään. Esimerkiksi vähintään kolme ketjussa olevaa muuntamo täyttävät ehdon. Myös ketjun päässä oleva muuntamo luetaan osaksi järjestelmää. (SFS 6001 2018, 20, 145, 150; Verkostosuositus RJ 22:20 2020, 13.)

Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän turvallisuus voidaan varmistaa ja todentaa standardin mukaan neljällä eri tavalla. Yhden erillisen maadoitusjärjestelmän (esimerkiksi yksi tai useampi yhteen liitetty jakelumuuntamo) maadoitusresistanssin suuruus voidaan mitata ja todeta vaatimukset täyttäväksi. Mittausta ei tulisi kuitenkaan suorittaa normaalilla käännepistemenetelmällä, jos kyseessä on laaja yhteen liitetty maadoitus tai yksittäistä maadoitusta mitattaessa syöttökaapeleita ei irroteta. Molemmissa tapauksissa mittaustulos on epäluotettava. Jos maadoitusten mittaaminen yhteen kytketyissä maadoitusjärjestelmissä ei ole kohtuullisilla mittausjärjestelyillä mahdollista, voidaan maadoitusresistanssin arvo laskea maadoituselektrodin rakenteen ja maadoitusjärjestelmän sijaintipaikan maaperän sähköisen resistiivisyyden avulla. Tämän lisäksi maadoitusten toteutuminen suunnitelman mukaisesti tulee dokumentoida esimerkiksi valokuvamalla. Maadoitusten turvallisuus voidaan varmistaa myös muulla tavoin, esimerkiksi mittaamalla kosketusjännitteen suuruus. Tai jos uusi maadoitus yhdistetään aikaisemmin rakennettuun maadoitukseen, jonka maadoitusresistanssin arvo on ennestään tiedossa, voidaan mitoituksessa käyttää apuna tätä tietoa. Jos vaatimukset täyttävä maadoitusresistanssin arvo saadaan jollain edellä mainituista tavoista, voidaan kyseiseen järjestelmään liittää muita maadoitusjärjestelmiä (yhteen liittyminen varmistettava). (SFS 6001 2018, 145.)

Maadoitusten todentamisen osalta vaatimuksena on, että dokumentoinnin tulee sisältää kaikkien mittausten ja laskemien tulokset. Lisäksi järjestelmään liittyvät sähköasemat, jakelumuuntamot ja niiden väliset maadoitusten yhdistämiset on dokumentoitava. Jatkossakin järjestelmien eheys ja yhteys toisiinsa on varmistettava kunnossapitoon liittyvien tarkastusten yhteydessä, kuitenkin maadoitusresistanssin mittausta ei edellytetä, ellei lähtöarvoissa tai verkon rakenteessa ole tapahtunut olennaisia muutoksia. Myös tiedot näistä tarkastuksista on dokumentoitava. (SFS 6001 2018, 145, 150.)

Laaja maadoitusjärjestelmä

SFS 6001 suurjännitestandardi antaa laajalle maadoitusjärjestelmälle seuraavanlaisen määritelmän: ”yhtenäinen maadoitusjärjestelmä, joka on toteutettu kytkemällä yhteen paikalliset maadoitusjärjestelmät. Yhteen kytkettyjen paikallisten maadoitusjärjestelmien läheisyys varmistaa sen, ettei vaarallisia kosketusjännitteitä esiinny.” (SFS 6001 2018, 20.) Lisähuomiona kerrotaan, että laajan maadoitusjärjestelmän tapauksessa järjestelmän voidaan sanoa muodostavan näennäisen tasapotentialipinnan. Tämä oletamus voidaan tehdä usean yhdistyksen ja yhdistettyjen paikallisten järjestelmien läheisyyden perusteella. Tästä syystä maasulkutilanteessa maasulkuvirrat jakautuvat suuremmalle alueelle, ja näin ollen pienentävät paikallisen maadoitusjärjestelmän potentiaalin nousua. (SFS 6001 2018, 20.)

Tyypillisesti kaupunkien keskustat sekä kaupunki- ja teollisuusalueet, joilla on laajalle alueelle rakennettu galvaanisesti yhtenäinen suur- ja pienjännitemaadoitus, voivat kuulua rakenteensa puolesta laajaan maadoitusjärjestelmään. Yleisesti järjestelmä on verkkomaisesti silmukoituva ja muuntamoiden väliset etäisyydet ovat lyhyet. Vaatimuksena on, että jokainen muuntopiiri on yhdistetty vähintään kahden muun muuntopiirin maadoitukseen, lisäksi yhdistyksiä muihin muuntopiireihin tulee olla riittävin välein enemmän kuin kaksi. Yhdistäminen voidaan toteuttaa erillisellä johtimella, kaapelin keskusköydellä tai riittävän suurella poikkipinnalla varustetulla kaapelin kosketussuojalla, PEN- tai PE-johtimella tai vastaavalla tavalla. Uusia maadoitusjärjestelmiä liitettäessä laajaan järjestelmään, on niiden yhdistyminen todennettava mittaamalla. Maadoitusjännitteen tai maadoitusresistanssin todentaminen ei kuitenkaan ole tarpeellista. (SFS 6001 2018, 20, 132, 146, 149.)

Laajan maadoitusjärjestelmän dokumentaatiosta tulee käydä ilmi perusteet laajan maadoituksen käytöstä sisältäen järjestelmään liittyvät sähköasemat, jakelumuuntamot ja niiden väliset maadoitusten yhdistämiset. Jatkossakin järjestelmien eheys ja yhteys toisiinsa on varmistettava kunnossapitoon liittyvien tarkastusten yhteydessä ja tiedot näistä tarkastuksista on dokumentoitava. Myös uusien järjestelmän osien liittyminen järjestelmään on varmistettava mittaamalla, nämäkin tulokset on dokumentoitava. (SFS 6001 2018, 146, 149.)

3.4 Maadoituselektrodit

Verkostosuositus RK 1:16 suosittelee keskijänniteverkon maadoituselektrodiksi käytettävän 25 mm² kuparijohdinta, jonka lankakoko on vähintään 1,8 mm (Verkostosuositus RK 1:16 2016, 17). Vuonna 2018 ilmestyneen suurjännitestandardin kansallisessa liitteessä kerrotaan, että Suomessa voidaan pitkäaikaisen kokemuksen perusteella käyttää maadoitusjohtimena pienimmillään 16 mm² kupariköyttä, jonka yhden langan halkaisija on 1,6 mm (SFS 6001 2018, 146). Lisäksi suurjännitestandardissa suositellaan, että jakelumuuntamoita syöttävissä maakaapeliverkoissa asennetaan maadoituselektrodina toimiva johdin suurjänniteverkon kaapelin rinnalle (SFS 6001 2018, 144).

Kuten SFS 6001-standardissa määritellään, maadoituselektrodi on maahan sähköisessä yhteydessä oleva johtava osa (SFS 6001 2018, 18). Tyypillisen 20 kV Wiski-maakaapelin (AHXAMK-W) kuparinen keskusköysi ei täytä tätä vaatimusta, sillä sen ympärille kerratut kolme vaihejohdinta muodostava niin tiiviin kokonaisuuden, ettei keskusköyden ja maaperän välille jää luotettavaa sähköistä yhteyttä. Kyseistä keskusköyttä ei olekaan varsinaisesti tarkoitettu maadoituselektrodiksi, vaan lähinnä vikavirtojen ohjaukseen (Verkostosuositus RK 1:16 2016, 18). Wiski-kaapelityypissä on käytetty jokaisessa vaiheessa kosketussuojana alumiini-muovilaminaattia, joka osallistuu vikatilanteessa myös vikavirtojen ohjaukseen, jos kosketussuojat ja keskusköysi on kytketty yhteen kaapelin molemmissa päissä.

Laajan sekä yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän määrittelyissä vaaditut muuntamoiden väliset yhdistykset voidaan toteuttaa erillisellä johtimella, kaapelin keskusköydellä tai riittävän suurella poikkipinnalla varustetulla kaapelin vaipalla (SFS 6001 2018, 145, 149–150). Kaapelin keskusköysi ja kosketussuojat ovat sähköisessä yhteydessä maaperään ainoastaan muuntamoilla sijaitsevilla päillä, joten ne toimivat vain yhdistyksenä kahden muuntamon maadoitusten välillä. Jos kaapelin rinnalla on vielä käytetty kuparista maadoituselektrodiä, kahden muuntamon välillä saattaa olla monta 'erillistä' maadoitusyhteyttä, joista ainoastaan kaapelin rinnalle asennettu maadoituselektrodi toimii sekä yhdistyksenä, että koko matkaltaan maadoituselektrodina.

4 MAADOITUSTEN MITOITUS JA TODENTAMINEN TEISKOSSA

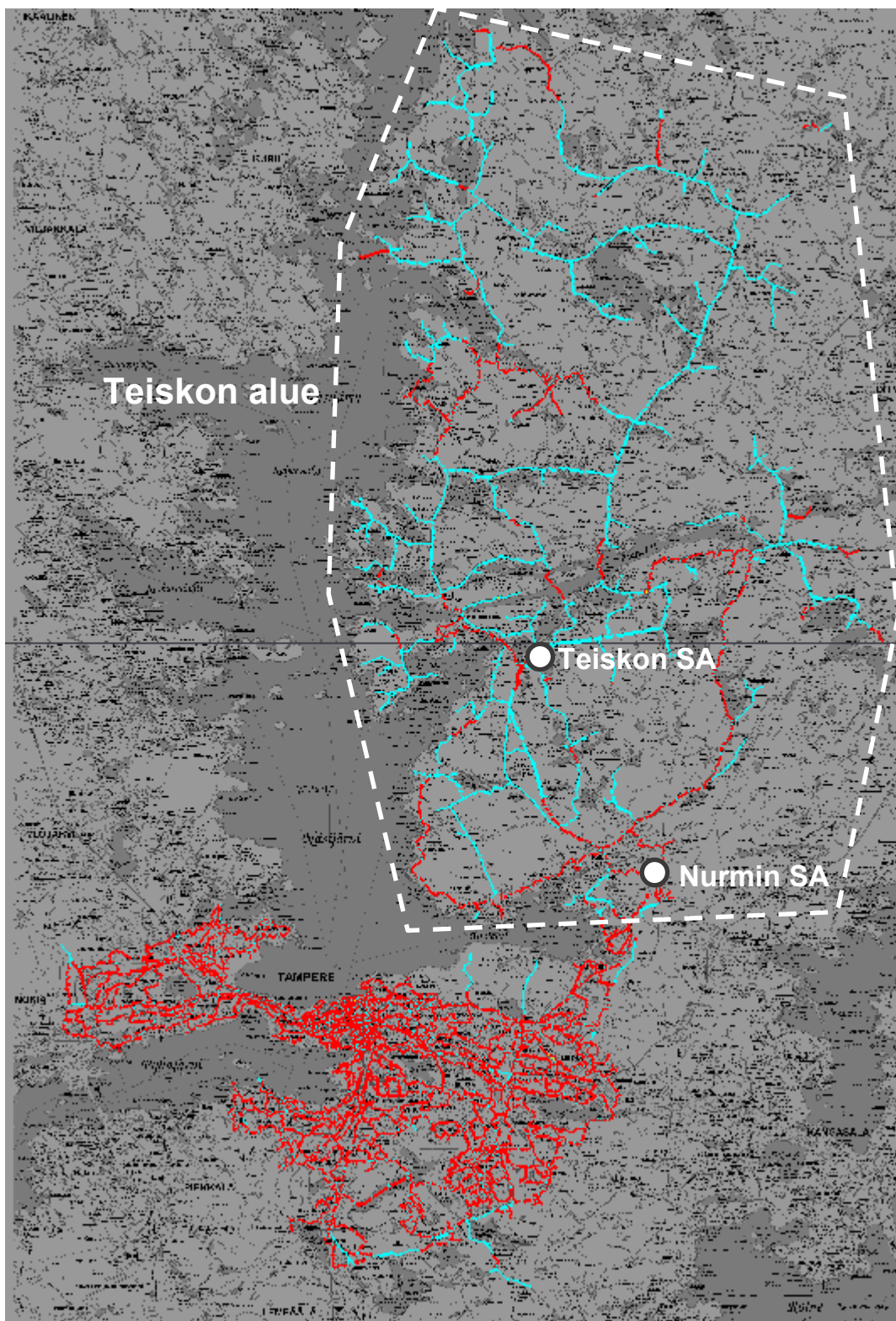
Sähkömarkkinalain (588/2013) tiukentuneiden sähkön laatuvaatimusten takia myös Tampereen Sähköverkko saneeraa jakeluverkkoaan säävarmaksi. Pääasiallisena toteutustapana on maakaapelointi, jonka ansiosta verkko tulee tulevaisuudessa sietämään paremmin haitallisia sääilmiöitä. Mittava maakaapelointi tuo mukanaan eräitä asioita, jotka täytyy huomioida. Tässä luvussa esitelläänkin kyseiset asiat ja tämän opinnäytetyön tausta, sekä minkä perusteella aihetta alettiin tutkia. Lisäksi kerrotaan muut työhön vaikuttaneet lähtötiedot. Tarkastelut on tehty maadoitusvaatimusten näkökulmasta.

4.1 Haja-asustusalueen keskijänniteverkon saneeraus

Tampereen Sähköverkon alueella sähköverkko on jakautunut selkeästi kahteen hyvin erilaiseen verkkoon, kuten kuvasta 5 nähdään. Kantakaupungin alueella 20 kV keskijänniteverkko on pääosin kaapeloitu (maakaapelit merkitty kuvassa punaisella), sen sijaan Teiskon haja-asustusalueella keskijänniteverkko muodostuu vielä suurimmaksi osaksi ilmajohdoista (ilmajohdot merkitty kuvassa turkoosilla). Käytännössä kantakaupungin alue on jo säävarman verkon piirissä, kun suurta osaa käyttöpaikoista syötetään maakaapeliverkosta. Lisäksi verkon rengasmainen ja silmukoitu rakenne takaa nopean sähköjen palauttamisen asiakkaille, mahdollisen vian sattuessa, korvauskytkentöjen (keskijännite tai pienjännite) kautta.

Teiskon haja-asustusaluetta (kuvassa 5 merkitty katkoviivalla) syötetään normaalissa verkon kytkentätilanteessa kahdelta eri sähköasemalta, Teiskosta ja Nurmista. Teiskon sähköaseman syöttämän verkon maakaapelointiaste vuonna 2020 on noin 17 % ja vuoden 2030 tavoiteverkon arvioitu maakaapelointiaste on 58 %. Myös haja-asustusalueella sähköverkon säävarmuus pyritään toteuttamaan erityisesti keskijänniteverkon maakaapeloinnilla. Pienjänniteverkkoakin kaapeloidaan soveltuvin osin, erityisesti keskijänniteverkon kaapelireiteillä ja niiden lähei-

syydessä. Koska suurin osa TSV:n asiakkaista on kantakaupungin maakaapeloidun verkon alueella, on TSV:n verkko kokonaisuutena tarkasteltuna erittäin suurelta osin valmiiksi säävarma jo ennen Teiskon alueen kaapelointia.



KUVA 5. 20 kV verkkokartta, tilanne 5/2021

TSV on suunnitellut Teiskon alueen tulevat saneeraukset siten, että aluksi maakaapeliverkko käsittää vain renkaan muotoisen rungon, johon vielä ilmaan jäävät haarajohdot voidaan liittää. Lisäksi Teiskon sähköaseman ja Pohjois-Teiskon väliselle alueelle saneerataan muutama maakaapelilla toteutettava runkoverkkoon silmukoita lisäävä väliyhteys, joilla saavutetaan parempi korvattavuus mahdollisissa vikatilanteissa. Maakaapeloidun runkoverkon on suunniteltu valmistuvan vuoteen 2028 mennessä. Vielä ilmaan jäävien johto-osuuksien mahdollisimman lyhyet ja suppeat sähkökatkot varmistetaan esimerkiksi lisäämällä verkkokatkaisijoita sähköasemalla sijaitsevien katkaisijoiden tueksi. Myös kauko-ohjattavat erottimet sopivissa verkon kohdissa auttavat vian rajaamisessa nopeasti pienemmälle alueelle. Teiskon sähköaseman saneeraus lähitulevaisuudessa tulee myös parantamaan sähkön jakelun varmuutta ja laatua.

4.2 Maakaapeloinnin vaikutukset maadoitusvaatimuksiin

Verkon maakaapelointiasteen kasvaessa toimitusvarmuus lisääntyy, mutta haittapuolena on maasulkuvirtojen kasvaminen aiempaan verrattuna. Nykyään uudet keskijännitekaapelit ovat useimmiten 20 kV AHXAMK-W Wiski-kaapelityyppiä. Esimerkiksi TSV:n verkossa asennetaan lähes poikkeuksetta 3x185Al+35Cu poikkipinta-alaista Wiski-kaapelia, jonka tuottama maasulkuvirta on noin 3,0 A kilometriä kohti (Prysmian Group 2018). Arvo on merkittävästi suurempi kuin ilmajohdon keskimääräinen 0,067 A/km (käyttökapasitanssi 6 nF/km/vaihe) (Lakervi & Partanen 2008, 186). Teiskon ja Nurmin sähköasemien alueella on jo ennestään 20 kV kaapelia noin 130 kilometriä, vuoteen 2028 mennessä kaapelia asennetaan vielä lisää noin 140 km. Ilmajohdoverkolla 140 km johtoa tuottaa noin 10 A maasulkuvirtaa, maakaapelointi siis lisää alueen maasulkuvirtaa entisestään yli 400 A.

Maasulkuvirran suuruus määräytyy galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituudesta, käytännössä normaalissa kytkentätilanteessa sähköaseman yhden päämuuntajan alajännitepuolen (20 kV) kaikki lähdöt ovat galvaanisesti yhteen kytketyt (Elovaara & Haarla 2011, 428). Maasulkuvirran kasvaminen voidaan ottaa huomioon esimerkiksi maasulkuvirran kompensointilaitteiston säätämällä tai tarvittaessa lisäämällä kompensointikapasiteettia. Maadoitusten suunnittelussa

on myös hyvä ottaa huomioon tulevaisuuden verkolle arvioidut kohonneet maasulkuvirran arvot. Tämä auttaa ennakoimaan ja hallitsemaan maasulkuvirran kasvamisesta aiheutuvia ongelmia. TSV onkin teettänyt vuonna 2017 opinnäytetyön, jonka perusteella resultoivan maadoitusimpedanssin Z_E tavoiteltu arvo tiukentui $3,8 \Omega$:in ($2 \times U_{Tp}$) (Keränen 2017, 24).

Teiskon jakeluverkon saneerauksen takia maasulkuvirran suuruutta on jouduttu tutkimaan uudelleen toisessa työssä, joka sisälsi keskijänniteverkon suojausten, maasulkuvirran suuruuden ja sen kompensoinnin sekä jäännösmaasulkuvirran suuruuden tutkimista. Meneillään olevan verkon rakenteen voimakkaan muutoksen takia tilannetta on tarkasteltu erityisesti tulevaisuuden tavoiteverkon kannalta ja jäännösmaasulkuvirralla sekä maasulun laukaisujalle on määritetty mitoittavat arvot tulevaisuuden verkon perusteella. Työn perusteella päädyttiin kompensoimaan maasulkuvirran kasvua esimerkiksi lisäämällä hajautettua kompensointia verkolle siten, että jäännösmaasulkuvirran taso pysyisi suunnilleen nykyisellä tasolla. (Tyni 2020, 2, 94–95.)

Resultoivan maadoitusimpedanssin Z_E tavoitearvoksi jäi edelleen sama, suhteellisen vaativa arvo $3,8 \Omega$. Arvon vaativuus johtuu muun muassa siitä, että TSV:lla maadoitukset on päätetty mitoittaa riittäviksi myös poikkeuksellisissa verkon kytkentätilanteissa, vaikka suurjännitestandardi ei sitä varsinaisesti edellyttäkään. Standardin mukaan on kuitenkin huolehdittava siitä, että verkkoa käytettäessä vaatimukset täytetään myös poikkeuksellisissa kytkentätilanteissa, esimerkiksi kun maasulun sammutuskela on pois käytöstä tai yhteen on liitetty normaalia laajempi maakaapeliverkko (SFS 6001 2018, 144). Kytkentätilanteet, joita ei ole huomioitu suunnittelussa eivät siten välttämättä ole mahdollisia käyttää, tämä pitää kuitenkin huomioida verkon käytön aikana. Voikin olla viisasta ottaa myös riittävässä määrin poikkeuksellisia kytkentätilanteita huomioon jo suunnitteluvaiheessa, jotta käytölle jää mahdollisuus tehdä kytkentöjä tarpeen mukaan. Kytkentätilanteiden muutokset vaikuttavat maasulkuvirran suuruuteen, esimerkiksi jos normaalisti yhden sähköaseman (tai päämuuntajan) verkkoa siirretään toisen sähköaseman (tai päämuuntajan) perään. Maadoitusten fyysisiin kytkentöihin tai liittymisiin verkkokytkennät eivät vaikuta.

Maakaapeloinnista aiheutuva maasulkuvirran kasvu vaikuttaa koko galvaanisesti yhteen kytkettyyn verkkoon, myös kaapeloituun runkoverkkoon liittyviin ilmajohtohaaroihin, vaikka verkon saneeraus ja maakaapelointi ei näennäisesti ilmajohtohaaroihin kohdistuisikaan. Koska minkään vanhan muuntamon maadoitusjännite ei saa nousta yli sallitun tason maakaapeloinnin seurauksena, voidaan myös ilmajohtohaaroilla joutua tarkastelemaan vaatimusten täyttymistä, eikä voida automaattisesti olettaa ilmajohtoksi jäävien verkon osien täyttävän turvallisuusvaatimuksia maasulkuvirran kasvaessa (SFS 6001 2018, 152).

Jos huomataan, että jollakin muuntamolla vähintään rakentamisen aikaiset vaatimukset eivät enää täyty maasulkuvirran kasvun seurauksena, tulee ryhtyä korjaustoimenpiteisiin. Eri aikakausina on ollut käytössä erilaisia määräyksiä tai standardeja, joiden vaatimukset ovat käytännössä kasvaneet koko ajan. Tällaiset määräykset tai standardit ovat harvoin taannehtivia, eivätkä ne siten välttämättä velvoita tekemään muutoksia jo olemassa olevaan verkkoon kuin harvoissa tärkeissä turvallisuuteen liittyvissä asioissa. Jos olemassa olevan muuntamon rakennetta muutetaan, voidaan joutua käyttämään joko uusia standardeja ja ohjeita tai vanhoja määräyksiä, tilanteesta ja korjaustyön laajuudesta ja laadusta riippuen (SFS 6001 2018, 151). Esimerkiksi maadoitusvaatimustarkastelut voidaan tehdä rakentamisen aikaisten määräysten mukaan, mutta muuntamoiden väliset maadoitusten yhdistämiset uusien määräysten mukaan.

Todennäköisesti TSV:n verkolta löytyy joitain muuntamoita, jotka eivät enää täytä rakentamisen aikaisia vaatimuksia nykyisillä tai tulevaisuudessa kohoavilla maasulkuvirran arvoilla. Tällaisia ongelmallisia muuntopiirejä, joiden maadoitusresistanssi on liian suuri kohonneeseen maasulkuvirtaan nähden, saattaa löytyä esimerkiksi ilmajohtoverkolta, jossa maadoituksia voi olla vähän tai ne ovat huonosti johtavassa maaperässä. Näiden muuntamoiden maadoitusvaatimusten täyttyminen tulee varmistaa ja tarvittaessa ryhtyä korjaustoimenpiteisiin. Korjaukset voidaan tehdä esimerkiksi parantamalla maadoituksia paikallisesti tai yhdistämällä ilmajohtoverkon muuntamon maadoitukset esimerkiksi pylväissä kulkevalla johtimella kaapeloidun runkoverkon maadoituksiin. Jälkimmäisessä tapauksessa voi olla jopa mahdollista, että ilmaan jäävän haarajohdon huonot maadoitusolosuhteet asettavat maakaapeloidun runkoverkon liittymispisteeseen tiukemmat maadoitusvaatimukset, kuin mitä pelkälle runkoverkolle olisi muuten asetettu. Tämä

on hyvin tapauskohtaista ja esimerkiksi TSV:n verkossa joitain haarajohtoja joudutaan yhdistämään runkoverkkoon, ja samalla tarkastelemaan maadoitusvaatimuksia tarkemmin.

4.3 Maadoitusverkon rakennustapa Teiskossa

Teiskon haja-asutusalueelle muodostuu kaapeloinnin seurauksena yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä käytetyn 20 kV kaapelityypin keskusköyden sekä vaiheiden kosketussuojina olevien alumiini-muovilaminaattien kautta. Kaapelien keskusköydet ja kosketussuojat liitetään molemmista päistään muuntamoiden maadoitukseen, joten maadoitukset ketjuuntuvat koko kaapeliasennuksen matkalle. Laajaa maadoitusjärjestelmää ei kuitenkaan saada muodostettua, sillä muuntamoiden väliset etäisyydet kasvavat liian suuriksi, järjestelmä ei ole verkkomaisesti silmukoituva vaan ketjumainen eikä tarpeeksi useita yhdistyksiä muihin muuntamoihin pystytä tekemään. Laajan maadoitusjärjestelmän käytöstä saatavia etuja, kuten maadoitusresistanssien mittausten tai laskennan poisjättämistä ei päästä hyödyntämään. Ilmajohtoverkon muuntopiirit jäävät edelleen omiksi erillisiksi paikallisiksi maadoitusjärjestelmikseen, ellei niitä ole yhdistetty yhtä useampaan (ts. yhteensä kolme muuntamoa ketjussa) toiseen muuntopiiriin esimerkiksi pylväissä kulkevien maadoitusjohtimien avulla.

Ennen vuotta 2018, kun suurjännitestandardiin esiteltiin uusi yhteen liitetty maadoitusjärjestelmätyyppi, TSV:n haja-asutusalueella maakaapeloidun verkon maadoituksia rakennettiin samaan tapaan kuin TSV:n laajan maadoitusjärjestelmän alueellakin. On kuitenkin tiedetty muuntamoiden välisten etäisyyksien olevan liian pitkät, jotta laajan maadoitusjärjestelmän vaatimukset olisivat täysin täyttyneet. Tästä syystä haja-asutusalueen kaapeliverkossa on varmuuden vuoksi tehty myös muuntamoiden maadoitusresistanssin käännepestemittauksia, kuten ilmajohtoverkon paikallisissa maadoitusjärjestelmissäkin.

Opinnäytetyötä aloittaessa oli tarkoituksena löytää teknistaloudellisessa mielessä paras maadoitusverkon rakenne Teiskon haja-asutusalueelle. Maadoitusjärjestelmän muodostuessa kaapeloinnin seurauksena automaattisesti standardin määrittelemäksi uudeksi yhteen liitettyksi maadoitusjärjestelmäksi, tuli tarpeen

määritellä TSV:lle sopiva kyseisen järjestelmän rakenne sen vielä puuttuessa. Muuntamoilla rakenteeksi valittiin HeadPower Oy:n ohjeistuksista puistomuuntamoiden perustuksen ja maadoituksen vakiorakenteet. Käytännössä muuntamon perustuskaivannon pohjalle asennetaan maadoituselektrodirengas, jonka kulmiin liitetään 4 kpl:tta pysty maadoitussauvoja. Lisäksi rakenteeseen kuuluu lähelle maan pintaa ja samalla muuntamon seinistä 1 metrin etäisyydelle asennettava potentiaalinhojausrengas. Muuntamoiden maadoitukset siis yhdistyvät toisiinsa 20 kV kaapelin kosketussuojien ja 35 mm² kuparisen keskusköyden kautta. Yhdistäminen liittää muuntamoita vikavirran kannalta rinnakkain, jolloin vikavirta jakautuu useamman muuntamon maadoitukseen ja yksittäisen muuntamon resuloiva maadoitusimpedanssi pienenee. Jo 2–3 yhdistyksellä ketjun päässä olevan muuntamon maadoitusimpedanssi paranee huomattavasti (Mäkinen 2016, 19).

Pelkät muuntamoille asennetut maadoituselektrodirenkaat pysty maadoitussauvoineen sekä muuntamoiden maadoitusten yhdistämiset toisiinsa ei TSV:n haja-asutusalueen verkossa riitä. Maadoitusimpedanssin sallituksi arvoksi asetettu 3,8 Ω on niin vaativa, että 20 kV kaapelin rinnalle täytyy paikoitellen asentaa 25 mm² kuparinen lisämaadoituselektrodi resuloivaa maadoitusimpedanssia pienentämään. TSV:lla on myös päätetty, että jos vaakasuuntainen lisämaadoituselektrodi täytyy asentaa, se asennetaan kahden muuntamon väliin koko matkalle sekä liitetään molempien muuntamoiden maadoituskiskoihin. Tehdyllä valinnalla on haluttu helpottaa ja nopeuttaa suunnittelua sekä asennusta. Pitkällä vaakamaadoituselektrodilla voidaan hyvin johtavassa maaperässä saavuttaa erittäin pieni maadoitusimpedanssin arvo.

TSV:lla onkin perinteisesti asennettu 25 mm² kuparinen lisämaadoituselektrodi maakaapelin rinnalle kaikkialla. Siitä on erityisesti hyötyä kaupungin laajassa maadoitusjärjestelmässä, mutta rakenne oli jäänyt käyttöön myös haja-asutusalueen verkolle. Opinnäytetyön selvitysten perusteella haja-asutusalueen verkolla se jää jatkossa oletusarvoisesti asentamatta. Haittapuolena oli suuri kuparielektrodin menekki ja siitä seuraavat kustannukset, erillisen kuparielektrodin pois jättämisellä voidaankin säästää merkittäviä summia. Lisäksi rinnakkaiskuparia ei saada sisällytettyä verkkoarvon laskelmiin, joten senkään perusteella elektrodia ei kannata asentaa kuin tarpeen vaatiessa. Uusi suurjännitstandardin ver-

sio asettaa kuitenkin merkittäviä vaatimuksia yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän todentamiselle. Vaatimukset kasvattavat suunnittelu- ja mittauskustannuksia, joten voidaan ajatella, että osa saavutetuista säästöistä käytetään kompensoimaan kasvaneita suunnittelu- ja mittauskustannuksia. Erillisen elektrodin asentaminen ei olisi poistanut tarkan maadoitussuunnittelun ja mittausten tekemisen tarvetta, vaan ne olisi jouduttu joka tapauksessa tekemään yhteen liitetyn järjestelmän vaatimusten mukaisesti.

Toinen TSV:lla aiemmin käytössä ollut rakenne oli muuntamoille lähes poikkeuksetta lisätyt yksi tai kaksi 25 metrin kuparielektrodia, joihin oli kiinnitetty 5 pysty-maadoitussauvaa kuhunkin. Myös tämä rakenne todettiin laskelmien avulla lähtökohtaisesti turhaksi ja liian kalliiksi saatavaan maadoitusvaikutukseen nähden. Vastaavan hintaisella vaakamaadoituselektrodilla saavutetaan pienempi maadoitusresistanssi samanlaisessa maaperässä. Joten jatkossa lisäpysty-maadoitukset jätetään oletuksena asentamatta. Pysty-maadoituksia kannattaa kuitenkin käyttää, jos tiedetään maaperän resistiivisyyden pienenevän syvemmälle mentäessä (SFS 6001 2018, 97).

Kolmas tarkasteltu potentiaalisesti kustannuksia säästävä muutos olisi ollut 20 kV kaapelityypin vaihto keskusköydellisestä Wiski-kaapelista keskusköydettömään Wiski Plain vaihtoehtoon. Tästä muutoksesta kuitenkin luovuttiin ja jatkosakin käytetään tavallista keskusköydellistä Wiski-kaapelia niin taajamassa kuin haja-asutusalueellakin. Tavallisen Wiski-kaapelin todettiin soveltuvan teknisiltä ominaisuuksiltaan TSV:n verkkoon parhaiten.

4.4 Maadoitusten suunnittelutapa ja vaiheet

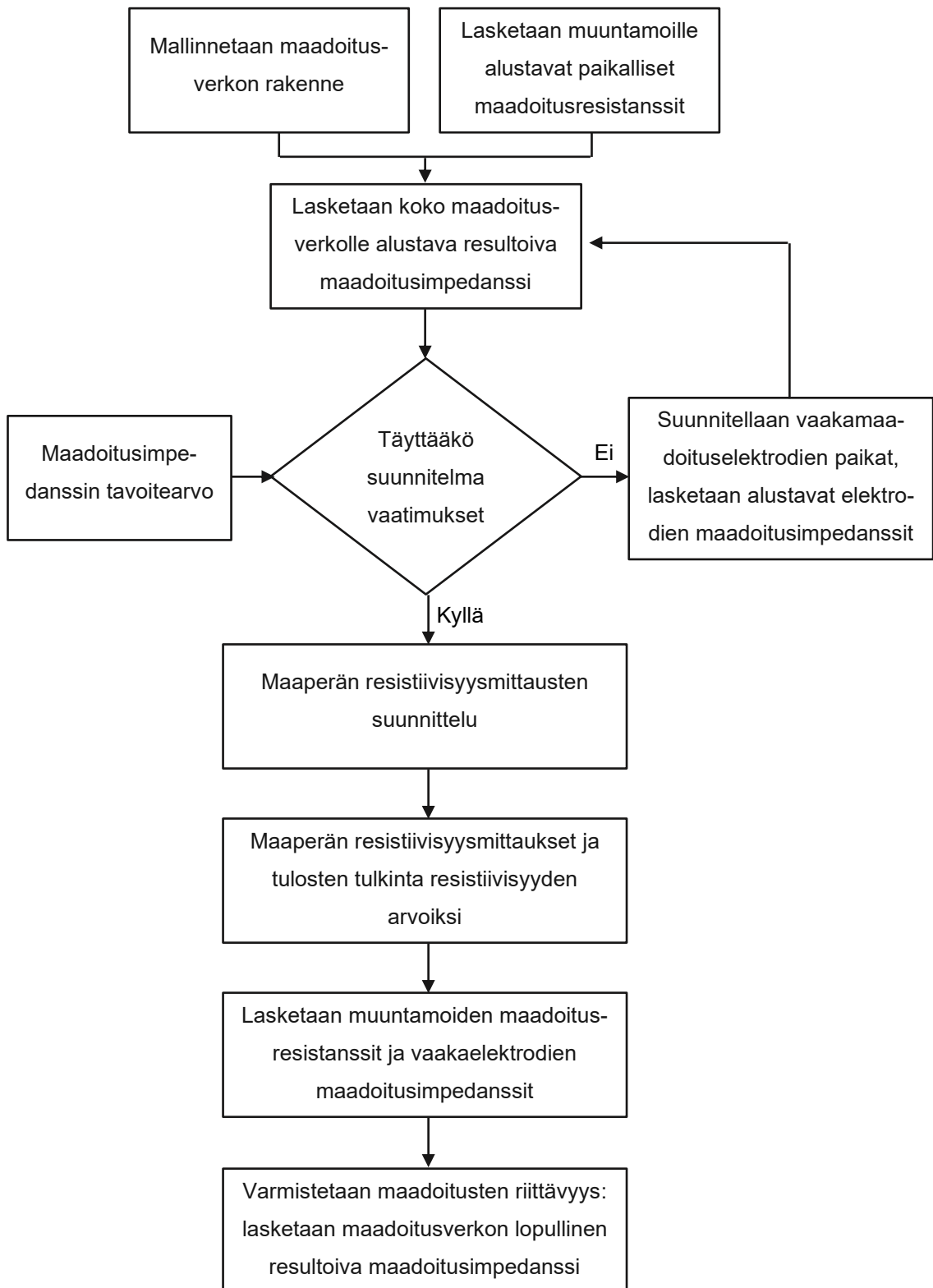
Kun Teiskon haja-asutusalueella jatkossa käytettävä maadoitusjärjestelmätyyppi sekä maadoitusverkon tarkempi rakenne oli valittu, täytyi vielä määritellä maadoitusten todentamis- ja suunnittelutavat. Suurjännitestandardi SFS 6001:2018 antaa yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän todentamiseen neljä erilaista vaihtoehtoa (esitely työn luvussa 3.3.). Työssä tehtyjen alkututkimusten perusteella päädyttiin vaihtoehtoon, jossa maadoitusten riittävyys todennetaan maaperän re-

sistiivisyysmittausten avulla. Tästä syystä työssä onkin keskitytty pääasiassa kyseiseen todentamistapaan, resistiivisyysmittausten teoriaan ja mittaustulosten tulkintaan sekä tulosten perusteella tehtäviin resuloivan maadoitusimpedanssin laskelmiin. Työn aikana teetettiin resistiivisyysmittauksia ja varmistettiin tehtyjen tulkintojen sekä laskentatapojen oikeellisuutta ja toimivuutta käytännön suunnittelutyössä.

Myös muita annettuja todentamisvaihtoehtoja harkittiin. Yhteen kytketyn maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssin mittaukseen perustuvaa todentamistapaa tutkittiin teettämällä yksi V/A-menetelmällä tehty maadoitusimpedanssin mittausta. Mittauksessa mitattiin äskettäin rakennetun 11 muuntamoan yhteen liittävän maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi. Mittauksen todettiin olevan suhteellisen tarkka, luotettava ja varma tapa todentaa maadoitusvaatimusten täyttyminen. Lopulta kuitenkin todettiin mittauksen olevan haastava toteuttaa jo käyttöönotetussa verkossa ja joissain tapauksissa vaativan perusteettoman mittavat ja vaikeat mittausjärjestelyt. Todentamiseen valittu maaperän resistiivisyysmittausmenetelmä vaikutti kustannustehokkaammalta toteutustavalta. Lisäksi resistiivisyysmittauksen avulla saadaan tietoa suunnitteluun ja laskentaan vaikuttavista alueen olosuhteista jo ennen verkon rakentamista, kun taas maadoitusimpedanssimittaus todentaa olosuhteiden tulkinnan vasta rakentamisen jälkeen.

Kosketusjännitemittaus on toinen standardissa mainittu laajempi mittausmenetelmä, joka oli myös harkinnassa. Lopulta senkään ei todettu soveltuvan TSV:n pääasialliseksi maadoitusten todentamistavaksi. Syyt olivat käytännössä samat kuin V/A-menetelmällä tehtävässä maadoitusimpedanssimittauksessakin. Viimeinen standardin todentamistapa, jossa liitytään maadoitukseen, jonka maadoitusresistanssi tunnetaan, soveltuu hyvin myös TSV:n käyttöön. Tätä tapaa ei voida kuitenkaan yksistään käyttää, sillä tässä menetelmässä jokin maadoitusresistanssi täytyy olla ennestään selvitetty jollain muulla tavalla. Menetelmä soveltuukin käytännössä joihinkin yksittäisiin tapauksiin, jos esimerkiksi liitetään yksi uusi muuntamo pidempään muuntamoiden ketjuun, jonka tunnettujen maadoitusimpedanssiarvojen perusteella uudelle muuntamolle voidaan laskea vastaavat arvot.

Pääasialliseksi maadoitusten todentamistavaksi valittiin siis maaperän resistiivisyydsmittaukset ja mittaustulosten perusteella tehtävät laskennat. Maadoitus-suunnittelun vaiheet muodostuivat kuvion 1 mukaisiksi:



KUVIO 1. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän suunnittelun vaiheet TSV:lla

Tulevan maadoitusverkon rakenne mallinnetaan laskentaa varten suunnitellun jakeluverkon tietojen pohjalta, huomioon otetaan mm. maadoitusten yhdistymiset kaapelien pituuksien ja sähkötekniisten ominaisuuksien perusteella sekä muuntamoiden väliset maantieteelliset etäisyydet. Muuntamoille lasketaan alustavat maadoitusresistanssit muuntamomaadoitusten vakiorakenteiden sekä maaperäkartaan, standardiin ja kokemukseen perustuvilla maaperän resistiivisyyksillä. Alustavassa suunnittelussa voidaan tarpeen mukaan huomioida lisäksi mahdolliset liittynät muihin maadoitusjärjestelmiin, onko muista maadoitusjärjestelmistä apua maadoitusvaatimuksen täyttämiseen vai asettavatko ne tiukemmat vaatimukset uuden verkon maadoituksille. Lopuksi koko suunnitellulle maadoitusverkolle lasketaan alustava resuloiva maadoitusimpedanssin arvo ja verrataan sitä maadoitusimpedanssin tavoitearvoon. Jos pelkät muuntamoiden paikallismaadoitukset eivät riitä maadoitusvaatimuksen täyttämiseksi, suunnitelmaan lisätään maaperäkartan perusteella hyviksi arvioiduille reiteille vaakamaadoituselektrodeja tarpeen mukaan.

Kun maadoitusverkon suunnitelma täyttää maadoitusimpedanssin tavoitearvon, voidaan maaperän resistiivisyydsmittaukset suunnitella maaperäkartan avulla. Mittaukset tehdään valituilta elektrodireiteiltä (muutama mittaus yhtä reittiä kohden, lukumäärä vaihtelee reitin pituuden ja reitin eri maalajien lukumäärän sekä vaihtelun mukaan) sekä muutamilta muuntamoilta, joiden maadoitusresistanssin arvo on tärkeä koko maadoitusverkolle muodostuvan resuloivan maadoitusimpedanssin kannalta. Muuntamopaikoille, jotka jätetään mittaamatta niiden vähäisen merkityksen takia, arvioidaan maaperäkartan perusteella resistiivisyyden keskimääräinen arvo, jonka suuruutta voidaan vielä korjata varmuuskertoimen avulla. Mittausten jälkeen tuloksista tulkitaan maaperän resistiivisyyden paikalliset vallitsevat arvot. Näitä arvoja käytetään edelleen laskennassa, kun muuntamoiden maadoitusresistanssit ja vaakaelektrodien maadoitusimpedanssit lasketaan todellisten resistiivisyys arvojen mukaan. Lopuksi vielä varmistetaan maadoitusten riittävyys laskemalla uudelleen koko maadoitusverkon resuloiva maadoitusimpedanssi mitatut resistiivisyysarvot huomioiden.

Maaperän resistiivisyyden ilmoittavat maaperäkartat (esimerkiksi Geologian Tutkimuskeskus GTK:n karttapalvelu Maankamara) ovat hyödyllisiä apuvälineitä eri-

tyisesti maadoitusten esisuunnitteluvaiheessa. Maaperäkartan perusteella voidaan suunnitella resistiivisyysmittausten paikat arvioimalla vallitsevat resistiivisyydet jokaisella reitin osuudella. Mittaukset tehdään pääasiassa reitin parhaista kohdista, joilla onkin eniten merkitystä hyvien maadoitusresistanssi ja maadoitusimpedanssi arvojen saavuttamiseksi. Erittäin huonosti johtaviin maaperiin, kuten kalliolle tai soramaalle, ei lähtökohtaisesti asenneta maadoituksia. Lopulliset tarkat maadoitussuunnitelmat ja maadoitusimpedanssilaskelmat tehdään resistiivisyysmittauksista saatujen tulosten perusteella. Pelkän maaperäkartan perusteella maadoituksia ei voida suunnitella luotettavasti, koska kartan näyttämän maalajin sisällä resistiivisyyden vaihtelu voi olla suurta.

Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän käyttöönottoaminen ja maadoitusten tarkempi suunnittelu on TSV:lle merkittävä muutos aiempaan verrattuna. Aiemmin jakeluverkolla ei ollut tarvetta maaperän resistiivisyystutkimuksille eikä laajoille maadoitusimpedanssimittauksille. Uusien sähköasemien maadoitusimpedansseja on toki mitattu aina, jos se on ollut mahdollista. Mittauskustannukset ovat jääneet kuitenkin suhteellisen pieniksi uuden sähköaseman rakentamiskustannuksiin verrattuna, lisäksi sähköasemien määrä jakelumuuntamoihin verrattuna on merkittävästi pienempi. Haja-asutusalueen verkolla yksittäisten muuntamoiden maadoitusresistansseja on aiemminkin mitattu paikallisesti käännepestemelmällä suurjännitestandardin edellyttämällä tavalla. Kyseinen mittaus onkin verraten helppo ja edullinen toteuttaa.

5 MAAPERÄN RESISTIIVISYYDEN MÄÄRITTÄMINEN

Maaperän resistiivisyyden määrittäminen mittausten avulla on luotettavan maadoituslaskennan edellytys, sillä kirjallisuudesta löytyvät maalajien resistiivisyydet ovat vain karkeita arvioita yhden maalajin keskimääräisestä resistiivisyydestä tai resistiivisyyden vaihteluvälistä. Ne eivät ota maalajin sisällä tapahtuvaa paikallista resistiivisyyden vaihtelua tai maaperän epähomogeenisuutta huomioon, siten kyseisiä arvoja ei voida käyttää tarkkojen suunnitelmien tekoon.

5.1 Maaperän resistiivisyys

Maaperän resistiivisyys ρ_E eli ominaisvastus (ja sen vaihtelut) on yksi merkittävimmistä asioista, joka vaikuttaa maadoituselektrodin maadoitusresistanssiin (Nieminen 1979, 1). Silti se on edelleenkin yksi epämääräisimmistä ja haasteellisimmista asioista, joka täytyy määrittää ennen kuin voi tarkasti laskea elektrodille maadoitusresistanssia. Haastetta maaperän resistiivisyyden tulkitsemiseen tuo erityisesti maaperän mahdollinen epähomogeenisuus. Jos maa on suhteellisen tasalaatuista eli homogeenista, resistiivisyyden tulkitsemisesta ei muodostu juurikaan ongelmaa. Valitettavasti näin asia ei useinkaan ole, vaan esimerkiksi Suomessa maaperän resistiivisyys voi vaihdella lyhyelläkin matkalla suhteellisen paljon, sekä syvyys- että vaakasuunnassa (Nieminen 1979, 1). Saman maalajin sisälläkin resistiivisyys vaihtelee paikallisten olosuhteiden ja vuodenajan mukaan (Nieminen 1979, 1).

Maaperän resistiivisyyteen vaikuttavat esimerkiksi seuraavat tekijät: maalaji ja sen tiiveys, raesuuruus ja sen jakautuma, maan kosteuspitoisuus, maan sisältämän veteen liuenneiden suolojen kemiallinen koostumus sekä lämpötila. Maaperä itsessään muodostuu huonosti johtavista tai jopa eristävistä ainesosista. Kosteus kuitenkin parantaa maaperän johtokykyä ja kosteuspitoisuus sekä maalajin sisältämän veden resistiivisyys ovatkin merkittäviä tekijöitä maalajin resistiivisyyden muodostumisessa. Myös virran leviäminen maaperässä laajalle alalle pienentää maan todellista resistanssia. (Nieminen 1979, 1–2)

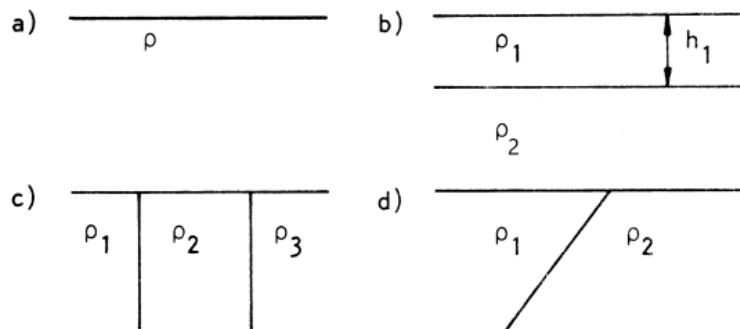
Liitteen 4 taulukossa on esitetty Suomessa esiintyviä resistiivisyyksiä. Edellä mainitun kosteuspitoisuuden muutos saattaa aiheuttaa tilapäisiä vaihteluja resistiivisyydessä aina muutaman metrin syvyyteen saakka (SFS 6001 2018, 147). Yleisesti keskimääräisenä maaperän resistiivisyyden arvona Suomessa pidetään $2300 \Omega\text{m}$ ($2000 \dots 2300 \Omega\text{m}$). Maadoitusten suunnitteluun tätä arvoa ei kuitenkaan tulisi käyttää, sillä resistiivisyys voi vaihdella paikallisesti suurestikin. (Nieminen 1979, 2)

Maaperän resistiivisyyden mittaamista ja mittausrvojen tulkitsemista on tutkittu Suomessa sekä maailmalla jonkin verran ja erilaisia tapoja asian ratkaisemiseen on esitetty (esim. laskenta, graafiset menetelmät, tietokonemallinnukset). Aihe on kuitenkin haasteellinen, eikä yhtä tiettyä sekä tarkkaa kaikkialle ja jokaiseen maaperään soveltuvaa tulkintatapaa ole löydetty. Eri tulkintatapoja valitessa täytyisi aina ottaa huomioon vallitsevat maaperän olosuhteet, sillä eri menetelmät voivat antaa hyvinkin erilaiset tulokset. Tapa, joka toimii yhdessä paikassa, voi olla käytökelvoton toisessa paikassa. Suuntaa antavia laskentoja voi toki tehdä, mutta tietyn tulkinta- tai laskentatavan rajoitukset on hyvä tietää epäluotettavien tulosten ja väärin johtopäätösten ehkäisemiseksi.

5.2 Kaksikerrosmaa

Maaperä voi siis olla epähomogeeninen niin syvyys- kuin vaakasuunnassakin. Teoreettisissa tarkasteluissa tällainen maaperä saatetaan kuitenkin kuvata täysin homogeenisena esimerkiksi laskennan helpottamiseksi. Jos halutaan kuvata epähomogeenista maaperää hieman tarkemmin, voidaan olettaa maaperän muodostuneen homogeenisistä osista. Kuvasta 6 nähdään esimerkkejä, miten nämä osat voivat sijoittua toisiinsa nähden. (Nieminen 1979, 5)

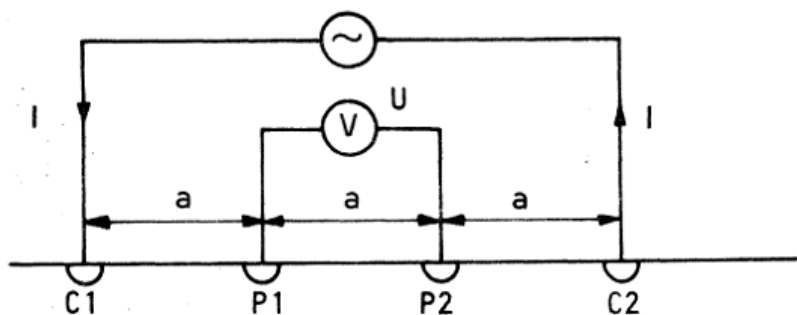
Maaperän kuvaaminen
 a) homogeeninen maa
 b) kaksikerrosmaa
 c) sivusuuntainen vaihtelu
 d) muutokset kulmittain



KUVA 6. Maaperän kuvaaminen (Nieminen 1979, 5, muokattu)

Kaksikerrosmaalla tarkoitetaan maaperämallia, jonka pintakerroksen resistiivisyys on ρ_1 ja paksuus h_1 . Pintakerroksen alla on äärettömän syvälle ulottuva toinen kerros, jonka resistiivisyys on ρ_2 . Useampia maaperäkerroksia lisäämällä voidaan parantaa mallin tarkkuutta, teoria kuitenkin monimutkaistuu ja laskenta muuttuu työläämmäksi. (Nieminen 1979, 5)

Maaperän resistiivisyyttä voidaan mitata eri tavoin. Eräs käytetyimmistä tavoista on nk. Wennerin neljän piikin menetelmä, jossa neljä mittapiikkiä (elektrodia) sijoitetaan tasavälein samalle suoralle. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 7.



KUVA 7. Wennerin menetelmän periaate (Nieminen 1979, 6)

Menetelmässä uloimpiin elektrodeihin syötetään virtaa ja sisempien elektrodien väliltä mitataan jännite, jolloin saadaan laskettua maadoitusvastus ja edelleen

maan ominaisresistanssi eli resistiivisyys (Nieminen 1979, 8). Resistiivisyydelle saadaan johdettua kaava 2:

$$\rho = 2\pi aR, \quad (2)$$

jossa ρ on resistiivisyys, a on kahden mittapiikin välinen etäisyys ja R on mitattu maadoitusvastus. Yhtälö 2 antaa eräänlaisen resultoivan ominaisvastuksen syvyyteen a saakka, joten haluttaessa tarkempi kuva maaperän eri kerrosten resistiivisyyden vaihteluista joudutaan mittausta suorittamaan usealla eri piikkivälillä (Elovaara & Haarla 2011, 455).

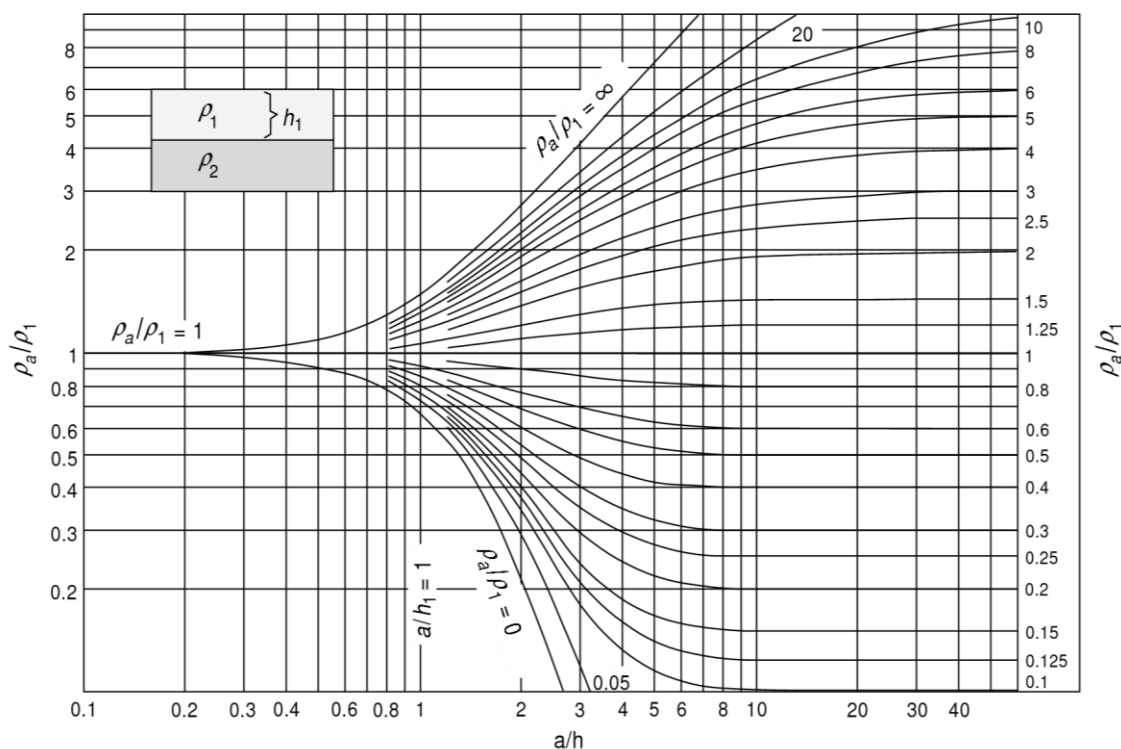
Homogeenisessa maassa yhtälöllä 2 saadaan sama ρ arvo elektrodivälistä riippumatta, kun taas epähomogeenisessa maassa eri elektrodiväleillä saadaan erisuuruisia resistiivisyyden arvoja ρ_{ma} (Nieminen 1979, 5). Kaksikerrosmaassa mitatulle resistiivisyydelle onkin johdettu yhtälöä 2 vastaava yhtälö 3:

$$\rho_{ma} = \rho_1 + 4\rho_1 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh_1}{a}\right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh_1}{a}\right)^2}} \right), \quad (3)$$

jossa

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4)$$

on taittumiskerroin. Yhtälön 3 perusteella on laadittu kuvan 8 mukainen Wennerin mallikäyrästä (Wenner array master curve), jonka avulla mittaustuloksista voidaan päätellä, onko mitattu maaperä kaksikerrosmaa. Käyrästä voidaan selvittää kaksikerrosmaan perussuureet ρ_1 , h_1 ja ρ_2 . (Nieminen 1979, 5–6)

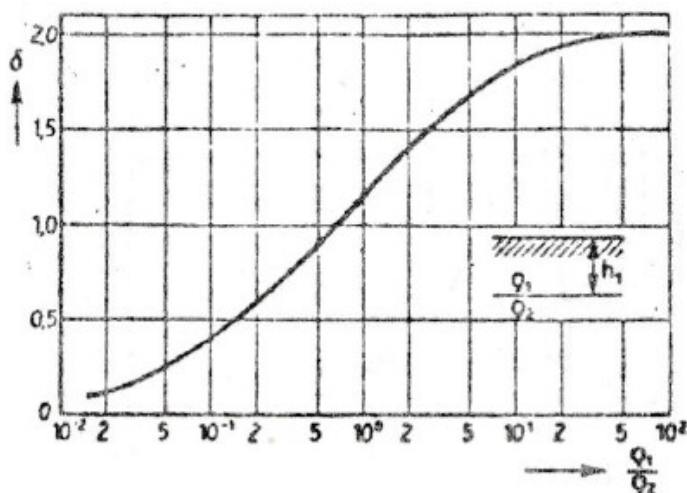


KUVA 8. Wennerin mallikäyrästä (Marshall 2006, 37)

Jos maa on epähomogeeninen ainoastaan syvyysuunnassa, Wennerin menetelmällä mitatut resistiivisyysarvot noudattavat yhtälöä 5 (Nieminen 1979, 8–9):

$$\rho_{ma} = \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1) e^{-ab} (2 - e^{-ab}), \quad (5)$$

jossa b on epähomogeenisuusvakio. Sen arvon laskemiseksi voidaan ensin määrittää kuvan 9. avulla muuttuja δ , johon tarvitaan pinta- ja pohjamaan resistiivisyyksien suhde.



KUVA 9. Epähomogeenisuusvakioiden b määrittäminen (Nieminen 1979, 9)

Muuttujan δ ja pintamaan kerrospaksuuden h_1 avulla saadaan lopulta epähomogeenisuusvakio b kaavan 6 avulla:

$$b = \frac{\delta}{2h_1} \quad (6)$$

Esitelty graafinen maaperän resistiivisyyden ratkaisutapa saattaa olla työläs, kuten muutkin graafiset ratkaisutavat. Kaksikerrosmaan resuloiva näennäinen resistiivisyys syvyydessä a saadaan laskettua suhteellisen helposti sarjakehitelmän kaavalla 3, jos käytössä on tietokone ja taulukkolaskentaohjelma. Niiden avulla sarjakehitelmälle voidaan helposti antaa tarpeeksi $n:n$ arvoja, jotta yhtälö alkaa lähestyä raja-arvoaan.

5.3 Keskiarvomenetelmät

Jos maaperä on syvyysuunnassa resistiivisyydsmittausten perusteella suhteellisen tasalaatuista, voidaan maadoitusresistanssin laskennassa käyttää mittausten keskiarvoa. Likimääräinen arvio maaperän resistiivisyydestä voidaan saada ottamalla aritmeettinen keskiarvo mitatuista näennäisistä resistiivisyyksistä kaavalla 7:

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n}, \quad (7)$$

jossa $\rho_{a(1)} \dots \rho_{a(n)}$ ovat eri piikkiväleillä mitatut näennäiset resistiivisyydet ja n on mittausten kokonaislukumäärä. Suuri osa maaperästä on kuitenkin niin epähomogeenista, että yhtälöä 7 ei voida käyttää tai sitä tulee käyttää vakaasti harkiten. (IEEE 80-2013 2013, 59–60.)

Toisella keskiarvomenetelmällä otetaan mitattujen näennäisten resistiivisyyksien maksimi ja minimi arvoista keskiarvo kaavalla 8:

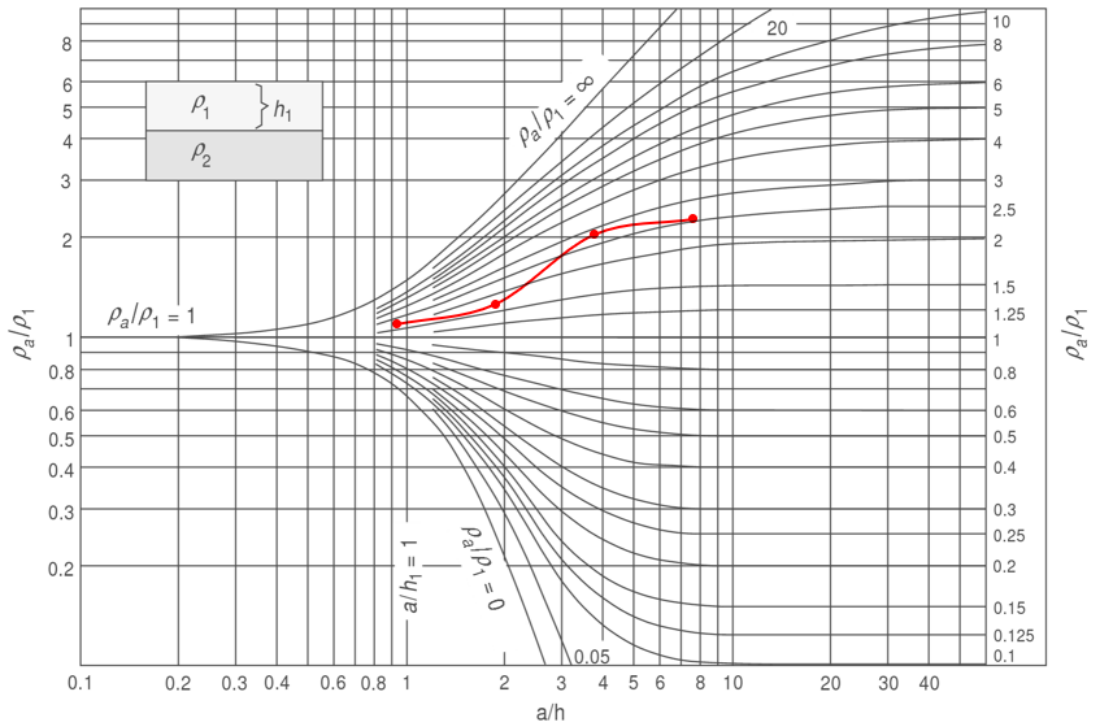
$$\rho_{a(av2)} = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2}, \quad (8)$$

jossa $\rho_{a(max)}$ on mitattujen resistiivisyyksien maksimi arvo ja $\rho_{a(min)}$ on vastaava minimi arvo. Kaavalla 8 saatuihin tuloksiinkin täytyy kuitenkin suhtautua hyvin varovaisesti. (IEEE 80-2013 2013, 60.)

5.4 Resisttiivisyyssmittausten tulkintamenetelmien arviointia

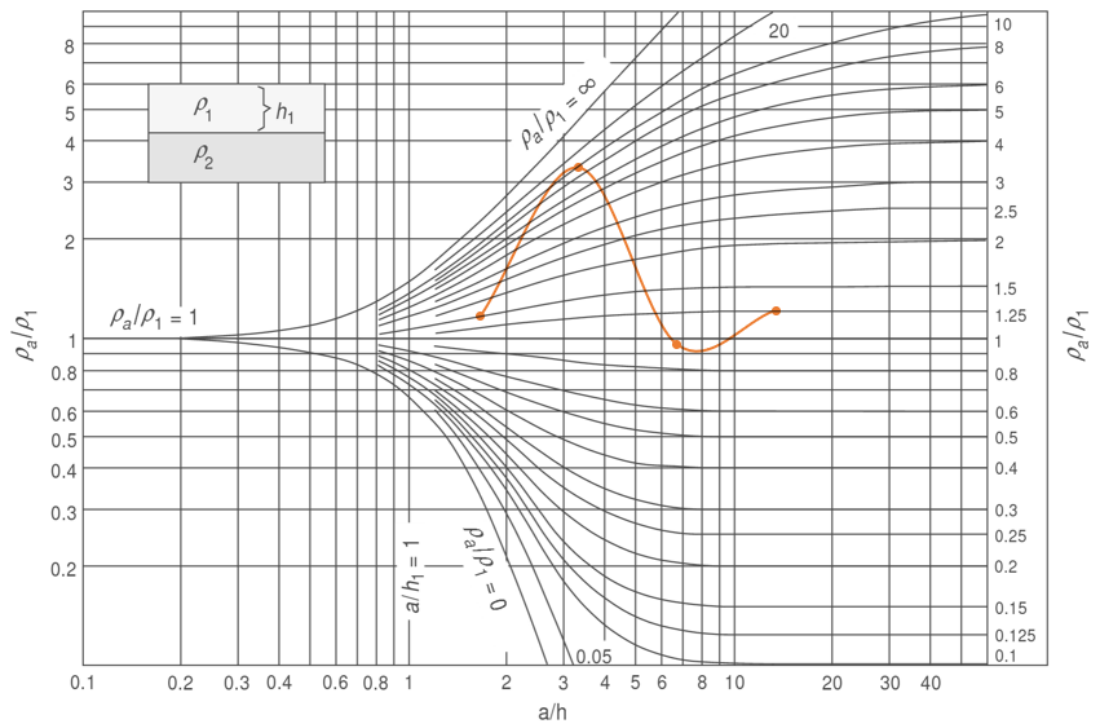
TSV on teettänyt Teiskon haja-asutusalueella maaperän resistiivisyyssmittauksia Wennerin, eli neljän piikin menetelmällä. Jokaisessa mittauspisteessä on käytetty neljää eri piikkiväliä: 2, 4, 8 ja 16 metriä. Mittauksen piikkiväli vastaa syvyyttä, jolta maaperän resistiivisyys saadaan selville, toisin sanoen maaperästä saatiin resistiivisyysarvot 2, 4, 8 ja 16 metrin syvyyksiltä. Mittaustulosten analysointiin haluttiin löytää verkkoyhtiön käyttöön soveltuva ja hyvin perusteltavissa oleva menetelmä, jotta maaperän syvyyssuuntainen epähomogeenisuus ja muut vaihtelut saataisiin luotettavasti tulkittua. Koska maadoituselektrodin maadoitusresistanssin laskentaan käytettävät laskentakaavat ottavat yleensä huomioon vain yhden maaperän resistiivisyysarvon, täytyy yhden mittauspisteen useista mittausarvoista muodostaa yksittäinen koko mittauspistettä hyvin edustava resistiivisyyden näennäisarvo, jolla laskenta voidaan suorittaa.

Ensimmäiset Teiskossa tehdyt resistiivisyyssmittaukset suoritettiin vaihtelevissa maaperän olosuhteissa. Mittausarvojen vaihtelua oli havaittavissa niin yksittäisten mittauspisteiden sisällä kuin eri mittauspisteiden välilläkin. Tämä kertoo siitä, että mittausalueella maaperän maalajit olivat vaihtelevia ja yksittäisen maalajin esiintymäalueet saattoivat olla suppeita. Yksittäisen mittauspisteen resistiivisyyssmittaustuloksia yritettiin ensin tulkita kaksikerrosmaateoriaan perustuen ns. graafisella menetelmällä eli Wennerin mallikäyrästä (kuvio 2). Käyrästä sijoitettiin yhden mittauspisteen resistiivisyysarvot eri syvyyksiltä ja yritettiin tulkita tuloksia.



KUVIO 2. Terälahdentie mittausjana 4 sovitettu Wennerin mallikäyrästään

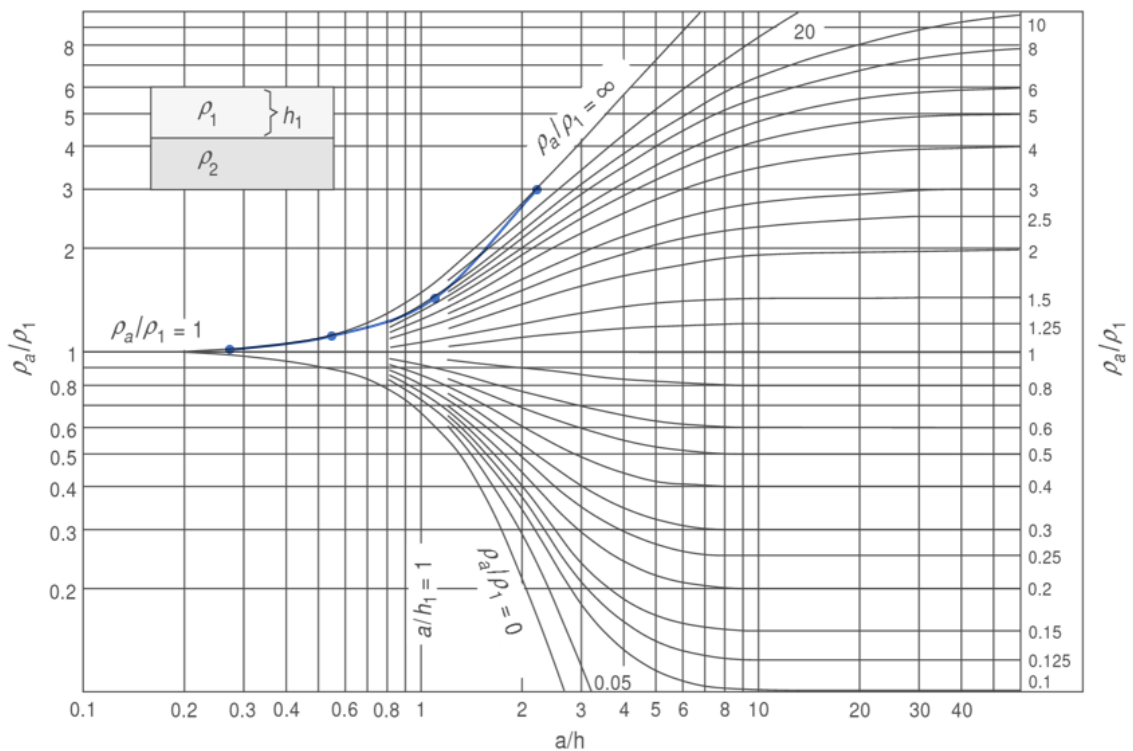
Kuten kuvio 2 huomataan, löytyi mittauspisteitä, joihin voitiin soveltaa kaksikerrosmaan teoriaa. Mittausdatasta löytyi myös pisteitä (kuvio 3), joissa maaperä ei vastannut kaksikerrosmaata, vaan kyseisen kohdan maaperässä saattoi olla useampiakin kerroksia.



KUVIO 3. Kuorannantie mittausjana 6 sovitettu Wennerin mallikäyrästään

Useampi kuin kaksi kerrosta näkyi käyrällä heittelehtivinä mittausarvoina eri syvyyksillä, eikä tällaisten mittauspisteiden resistiivisyyksiä saatu aseteltua sopivasti mallikäyrästölle. Sen vuoksi ei myöskään pystytty määrittämään luotettavaa näennäisresistiivisyyden arvoa tarkastelussa olleella graafisella menetelmällä.

Monessa mittauspisteessä, joissa mittausarvot voitiin sovittaa kaksikerrosmaan mallikäyrästölle, huomattiin, että toisen maakerroksen eli syvällä olevan maaperän resistiivisyyden arvo ρ_2 olisi vaikea tulkita. Mittausarvoista piirretty käyrä ei välttämättä tasaantunut vaakasuoraan vaan jatkoi kohoamista (kuvio 4), jolloin laskennan parametreja oli vaikea määrittää.



KUVIO 4. Niemikyläntie mittausjana 4 sovitettu Wennerin mallikäyrästöön

Käytännössä tällaisessa tilanteessa maastossa tehtyjen mittausten mittaussuora ja piikkivälit jäivät liian lyhyiksi pohjamaan tarkan resistiivisyysarvon tulkinnan kannalta. Mittaus olisikin täytynyt suorittaa vielä pidemmällä piikkiväleillä, jotta mitaustuloksia olisi saatu entistä syvemältä ja olisi voitu havaita käyrän mahdollinen tasaantuminen vaakasuoraan. Mittausjanan pidentäminen entisestään ei kuitenkaan teknisessä ja taloudellisessa mielessä olisi ollut enää järkevää, sillä mittaussuora oli jo nyt 48 metriä pitkä (piikkivälit 3 kertaa 16 metriä). Lisäksi usein

tällaisissa tapauksissa maaperä syvällä oli todennäköisesti kalliota, joten mittaus-
ten ottaminen sellaisesta huonosta maaperästä olisi jo sinänsä ollut turhaa. Kirjalli-
suuslähteen menetelmää käsittelevässä esimerkissä maaperän resistiivisyys-
arvot olivat erittäin pienet verrattuna Suomen keskimääräisiin olosuhteisiin (Nie-
minen 1979, 13). Myös piikkivälit olivat erittäin pitkät, esimerkissä käytetty 100
metrin piikkiväli on liian pitkä verkkoyhtiön käyttöön tässä tarkoituksessa. Kirjalli-
suuslähteen myönteisestä arviosta huolimatta Suomen kallioisen maaperän ku-
vaamiseen menetelmä voi olla haastava (Nieminen 1979, 5). Huomattiin myös,
että graafisten menetelmien käyttö on erittäin aikaa vievää, jopa yksittäisen mit-
tauspisteen tuloksien arvioimiseen saattaa kulua huomattava määrä työaika.
Verkolle tulevaisuudessa asennettavat pitkät elektrodit aiheuttavat sen, että re-
sistiivisyysmittausten määrä voi muodostua suurehkoksi. Tällöin jokaista mit-
tausta ei ehditä analysoida graafisen menetelmän vaatimalla tarkkuudella. Sup-
peilla sähköasematonteilla graafisen menetelmän käyttö voisi olla kokeilun ar-
voista.

Wennerin mallikäyrästä perustuu jo aiemmin esiteltyyn kaavaan 3, jota yritettiin
käyttää yksistään vaihtoehtona aikaa vievälle graafiselle tulkinntalle. Kyseisen
sarjakehitelmän käyttö itsessään on helppoa nykyisten taulukkolaskentaohjel-
mien avulla. Ongelmaksi muodostui kuitenkin sarjakehitelmän lähtötietojen hank-
kiminen, joka jouduttiin tekemään mallikäyrästä käyttäen. Pintamaan resistiivi-
syyden ja paksuuden, sekä pohjamaan resistiivisyyden selvittämiseen kului liikaa
aikaa mallikäyrästä käyttäen. Niiden lisäksi täytyi vielä antaa syvyys, jolle maa-
perän näennäinen resistiivisyys haluttiin määrittää. Mittauksista ja useista simu-
loinneista saatujen resistiivisyysarvojen perusteella sarjakehitelmä vaikutti anta-
van melko optimistia näennäisresistiivisyyden arvoja syötettyihin lähtötietoihin
nähdessä. Lisäksi suurempi ajankäyttö lopulta valituksi tulleeseen tulkintatapaan
verrattuna aiheutti sen, että tätäkään menetelmää ei otettu käyttöön.

Maaperän resistiivisyysmittausten analysointiin arvioitiin myös kahta eri keskiar-
vomenetelmää. Keskiarvomenetelmistä on varoitettu, että niitä voidaan käyttää
vain, jos maaperä on mittausperusteella suhteellisen tasalaatuista (IEEE 80-
2013 2013, 60). Koska suuri osa maaperästä on kuitenkin epähomogeenista,
tietty varovaisuus ja skeptisyys tulosten luotettavuuteen tulee aina säilyttää. Yk-

sinkertaisimmillaan yhden mittauspisteen tuloksista voidaan valita resistiivisyyden suurin ja pienin mitattu arvo, laskea ne yhteen ja jakaa tulos kahdella (kaava 8). Tällä tavalla laskettuna tulos voi poiketa todellisesta näennäisresistiivisyyden arvosta merkittävästi, kun usean resistiivisyydsarvon joukosta otetaan ainoastaan välin äärimmäiset arvot laskennan lähtötiedoiksi. Analyysin tulos voi helposti vääristyä kumpaan suuntaan tahansa, kun osa mittaustuloksista jätetään käytännössä kokonaan huomiotta. Kyseisen kaavan käyttöä missään tilanteessa onkin vaikea suositella.

Edustavampi otos tutkittavan maaperän resistiivisyydestä saadaan, kun käytetään normaalia keskiarvon kaavaa ja otetaan jokainen mitattu arvo huomioon. Teiskon resistiivisyydsmittauksissa käytettiin 2, 4, 8 ja 16 metrin mittapiikkivälejä. Koska piikkivälin pituus vastaa mittauksessa syvyyttä, jolta maaperän resistiivisyys saadaan selville, saatiin jokaisesta mittauspisteestä neljä maaperän resistiivisyydsarvoa: 2, 4, 8 ja 16 metrin syvyyksiltä. Itse asiassa mitatut maaperän resistiivisyydet ovat resuoltoivia arvoja mittauksessa käytettyyn syvyyteen saakka; 2 metrin mittaustulos sisältää maaperän keskimääräisen resistiivisyyden maan pinnalta aina 2 metrin syvyyteen saakka, 4 metrin mittaustulos sisältää maaperän keskimääräisen resistiivisyyden maan pinnalta aina 4 metrin syvyyteen saakka jne (Sandholm 1968, 4; Verkostosuositus TJ 1:05 2015, 20; Corrosion Doctors n.d.). Voidaan siis ajatella, että 4 metrin mittaustulokseen sisältyy 2 metrin mitaus uudelleen (maakerros välillä 0–2 metriä), eikä pelkästään 2–4 metrin välinen maakerros. Oletuksena on kuitenkin, että maaperä on vaakasuunnassa homogeeninen.

Muodostettaessa yhden mittauspisteen eri syvyyksien resistiivisyyksistä keskiarvoa, huomataan, että esimerkiksi 0–2 metrin maakerros lasketaan lopulliseen keskiarvoon yhteensä 4 kertaa, kerran jokaisessa eri syvyydessä. Vastaavasti 2–4 metrin välinen maakerros lasketaan keskiarvoon yhteensä 3 kertaa. Lyhyempien piikkivälien merkitys kuitenkin pienenee pidempien piikkivälien mittaustuloksissa siten, että esimerkiksi 16 metrin mittaustuloksessa 0–2 metrissä oleva maakerros ei ole merkittävimmissä roolissa, kyseinen 2 metrin maakerros on karkeasti vain 1/8 osa koko mitatusta syvyydestä. Käytännössä keskiarvosta muodostuukin eräänlainen painotettu keskiarvo, jossa pintamaan resistiivisyys painottuu muita maakerroksia enemmän, kun se otetaan itsestään huomioon muidenkin

syvyyksien mittaustuloksissa. Pintamaan resistiivisyydellä on siten eniten merkitystä lopullisen laskennassa käytettävän resistiivisyysarvon muodostumisessa.

Pintamaan kerroksilla painottuva resistiivisyyden keskiarvo vaikuttaisi sinänsä olevan ihan käyttökelpoinen laskentatapa, kun määritetään maaperän näennäisresistiivisyyden arvoa. TSV:n asentamat vaakamaadoituselektrodithan sijaitsevat yleensä suhteellisen pinnassa, suositellussa noin 0,7–1 metrin syvyydessä. Kirjallisuuslähteissä on lisäksi esitetty, että maadoituselektrodin maadoitusresistanssin suuruuteen vaikuttaa eniten elektrodia lähimpänä oleva maa (Verkosto-suositus TJ 1:05 2005, 20). Erityisesti mitä suppeampi elektrodi on, sitä vähemmän syvemmällä olevan maan resistiivisyydellä on merkitystä elektrodin maadoitusresistanssiin (Nieminen 1979, 11–12). Kuvan 10 taulukossa on esitetty asiaa vielä tarkemmin.

etäisyys elektrodin pinnasta m	maadoitusresistanssista ao. etäisyyden ulkopuolella (%)				
	3,6 mm johdin L=20 m	1" putki L=100 m	1" putki L=2 m	puolipallo D=1 m	
	sivusuuntaan, alaspäin	sivusuuntaan, alaspäin	sivusuuntaan, alaspäin	sivusuuntaan, alaspäin	sivusuuntaan, alaspäin
0,1	59	65	69	36	91
0,5	41	50	40	22	67
1	34	44	28	16	50
5	16	28	8	6	17
10	10	22	4	3	9
50	2	9	1	1	2
100	1	5	0,5	0,5	1
200	0,5	3	0,0	0,0	0,5

KUVA 10. Maadoitusresistanssin jakautuminen pinnassa olevan elektrodin läheisyydessä (Nieminen 1979, 12)

Taulukon arvot on laskettu olettaen maaperä homogeeniseksi, epähomogeenisuudet muuttavat jakaumaa (Nieminen 1979, 11). Esimerkiksi halkaisijaltaan 3,6 mm ja 100 m pitkän johtimen maadoitusresistanssista jopa puolet muodostuu vain 0,5 metrin etäisyydellä elektrodin pinnasta.

Maaperän resistiivisyysmittausten eri tulkintatapojen vertailun jälkeen laskennassa päädyttiin lopulta käyttämään tavallista keskiarvon kaavaa, joka muodos-

taa eri syvyyksien mittausarvoista eräänlaisen pintamaata painottavan keskiarvon. Alun varovaisesta suhtautumisesta ja hienoisesta epäilyksestä huolimatta keskiarvolaskennan käyttämiseen löydettiin riittävät perusteet. Muut tarkastelussa olleet menetelmät veivät joko liian paljon suunnittelijan työaikaa saavutettuihin hyötyihin nähden tai menetelmiä ei koettu tarpeeksi luotettaviksi. Verkko-yhtiön ja suunnittelijan kannalta ei myöskään koettu järkeväksi pitää valikoimassa useaa erilaista resistiivisyyden tulkintamenetelmää ja tehdä valinta käytettävästä menetelmästä erikseen jokaisen mittauspisteen kohdalla.

Luotettavan keskiarvomenetelmällä tehtävän resistiivisyyslaskennan kannalta on tärkeää, että tutkittava maa on tasalaatuista pinnalta syvälle saakka. Teiskon toisia maaperän resistiivisyysmittauksia tehtäessä huomattiin, että suunnittelemalla mittaukset huolellisesti hyvin johtaviin maaperiin maaperäkarttaa käyttäen, keskiarvomenetelmää pystytään hyödyntämään. Tehtyjen mittausten perusteella hyvin johtavissa maaperissä maan tasalaatuisuus on todennäköistä syvemmällekin mentäessä, jolloin vain tällaisista maaperistä mitattaessa pystytään kiertämään epätasaisista mittaustuloksista aiheutuvat ongelmat keskiarvolaskennassa. Jatkossakin on toki oltava tarkkana, pitääkö päätelmä maan tasalaatuisuudesta paikkansa muuallakin TSV:n verkolla, kun uusista resistiivisyysmittauksista saadaan mittausdataa. Lisäksi voidaan olettaa, että esimerkiksi yhden mittausarvon poiketessa muista kokonaisvirhe ei lopulta ole merkittävä, jos yhteen on liitetty suuri maadoitusverkko.

6 MAADOITUSELEKTRODIN MAADOITUSIMPEDANSSIN MÄÄRITTÄMINEN

Maaperän syvyys suunnassa esiintyvän epähomogeenisuuden ja resistiivisyyden analysoinnin lisäksi on huomioitava, että maaperä voi olla myös vaakasuuntaisesti epähomogeeninen. Vaakasuuntainen epähomogeenisuus täytyy huomioida erityisesti pitkien vaakamaadoituselektrodien maadoitusresistanssia ja -impedanssia laskettaessa.

6.1 Maaperän vaakasuuntainen epähomogeenisuus

Kun maaperän vaakasuuntainen resistiivisyyden vaihtelu tarkasteltavalla elektrodireitillä on hyvin pientä, voidaan näennäisresistiivisyys laskea keskiarvolla, samalla tavalla kuin syvyys suunnassakin. Usein maaperä on vaakasuunnassakin epähomogeenista; yleensä mitä pidempi maadoituselektrodi on kyseessä, sitä todennäköisemmin maaperän resistiivisyydessä esiintyy paikallista vaihtelua. Epähomogeenisessa maaperässä keskiarvolaskentaa täytyisi välttää virheiden minimoimiseksi.

Eräs kirjallisuudesta löytyvä tapa maaperän vaakasuuntaisen epähomogeenisuuden huomioimiseksi on nelinapamenetelmä, jossa hyödynnetään matriisilaskentaa sekä siirtojohtojen yhtälöitä. Menetelmän teoreettinen pohja on suhteellisen laaja ja se onkin haluttu esitellä kattavasti tässä työssä. Menetelmässä käytettävä laskenta on myös suhteellisen haastavaa ja todella paljon aikaa vievää käsin laskettaessa. Laskenta on kuitenkin mahdollista mallintaa taulukkolaskentaohjelmaan siten, että käytännön maadoitussuunnittelussa laskennan lähtöarvoiksi tarvitsee antaa vain elektrodireitillä olevien eri maalajien resistiivisyydet ja maalajien esiintymispituudet. Yhdelle elektrodireitille voidaan mallintaa esimerkiksi 10 eri resistiivisyyden ja pituuden omaavaa jaksoa. Jos laskenta on osattu mallintaa taulukkolaskentaohjelmaan järkevästi, näitä jaksoja voidaan tarpeen vaatiessa lisätä helposti niin monta kuin halutaan.

Nelinapamenetelmällä ei saada selvitettyä maaperän vaakasuuntaista näennäisresistiivisyyttä, toisin sanoen yhtä koko tarkasteltavana olevaa reittiä kuvaavaa resistiivisyyden arvoa, jonka perusteella maadoituselektrodin maadoitusresistanssi tai -impedanssi laskettaisiin. Sen sijaan menetelmän avulla saadaan laskettua suoraan maadoituselektrodin maadoitusimpedanssi. Erityisesti pitkillä vaakamaadoituselektrodeilla, kuten muillakin laajoilla elektrodirakenteilla, maadoitusimpedanssi pitäisikin huomioida pelkän maadoitusresistanssin sijaan (Valjus 1979, 15).

6.2 Siirtojohtojen yhtälöt (homogeeninen maaperä)

Pitkän epähomogeenisessa maaperässä sijaitsevan vaakamaadoituselektrodin maadoitusimpedanssia lähdetään ratkaisemaan homogeenisessa maaperässä määriteltyjen laskentatapojen kautta. Homogeenisessa maaperässä, jonka resistiivisyys on ρ , voidaan käyttää hyväksi siirtojohtojen yhtälöitä:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_b \cosh(\underline{\gamma}x) + \underline{Z}_a \underline{I}_b \sinh(\underline{\gamma}x), \quad (9)$$

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_a} \sinh(\underline{\gamma}x) + \underline{I}_b \cosh(\underline{\gamma}x), \quad (10)$$

joissa \underline{U}_a on elektrodin alkupään jännite, \underline{U}_b on elektrodin loppupään jännite, \underline{I}_a on elektrodin alkupään virta, \underline{I}_b on elektrodin loppupään virta, \underline{Z}_a on elektrodin aaltoimpedanssi, $\underline{\gamma}$ on etenemiskerroin ja x on etäisyys elektrodin loppupäästä lukien. Yhtälöstä 9 saadaan johdon alkupään jännite johdon loppupään virran ja jännitteen funktiona. Vastaavasti yhtälöstä 10 saadaan johdon alkupään virta loppupään arvojen funktiona. Siirtojohtojen yhtälöissä esiintyvien aaltoimpedanssin \underline{Z}_a ja etenemiskertoimen $\underline{\gamma}$ yhtälöt ovat:


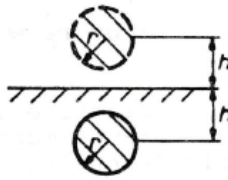
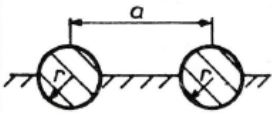
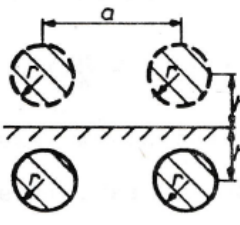
$$\underline{Z}_a = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g_e}}, \quad (11)$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{g_e(r + j\omega l)}, \quad (12)$$

joissa r on elektrodin resistanssi suhteessa pituuteen, ωl on elektrodin reaktanssi suhteessa pituuteen ja g_e on elektrodin maadoituskonduktanssi suhteessa pituuteen. Kirjallisuuslähteen mukaan elektrodin susceptanssin pituutta kohden voi olettaa merkityksettömäksi. (Valjus 1979, 15–16)

6.2.1 Ekvivalenttisäde

Vaakamaadoituselektrodin reaktanssia ja maadoituskonduktanssia laskettaessa voidaan hyödyntää niin sanottua ekvivalenttisädettä r_e . Siinä korvataan maanpinnassa tai maahan upotettuna kulkeva yksittäinen tai kaksi samaan suuntaan kulkevaa vaakamaadoituselektrodia yhdellä maan pinnassa kulkevalla elektrodilla, jonka säde on em. ekvivalenttisäde. Jotta ekvivalenttisädettä voidaan käyttää, on elektrodien oltava samanlaisia ja niiden upotussyvyyden oltava sama. Kuvassa 11 on esitetty eräitä yleisimpiä ekvivalenttisädeiteitä. (Valjus 1979, 16–17)

Elektrodi	r_e	
	Reaktanssi	Maadoituskonduktanssi
	r	r
	r	$\sqrt{2rh}$
	\sqrt{ra}	\sqrt{ra}
	\sqrt{ra}	$\sqrt[4]{2rah\sqrt{a^2 + (2h)^2}}$

KUVA 11. Vaakamaadoituselektrodien ekvivalenttisädeiteet (Valjus 1979, 17)

Tarkasteltaessa erityisesti kahta ylintä tapausta huomataan, että elektrodin mahdollisia peilikuvia ei oteta huomioon reaktanssia laskettaessa. Maadoituskonduktanssia laskettaessa ne täytyy ottaa kuitenkin huomioon, kuten upotetun elektrodin tapauksesta huomataan. Peilikuvan aiheuttamalla lisäpotentiaalilla huomioidaan maanpinnan läheisyys. Jatkossa reaktanssia laskettaessa elektrodin ekvivalenttisäteelle käytetään merkintää r_e' ja maadoituskonduktanssia laskettaessa vastaava merkintä on r_e'' . (Valjus 1979, 9, 17)

6.2.2 Resistanssi, reaktanssi ja maadoituskonduktanssi

Aaltoimpedanssin ja etenemiskertoimen yhtälöissä tarvittava vaakamaadoitus-
elektrodin resistanssi suhteessa pituuteen r saadaan kaavasta 13:

$$r = \frac{r_j}{n} + r_M, \quad (13)$$

jossa r_j on elektrodin johtimen resistanssi suhteessa pituuteen, n on rinnan kytkettyjen johtimien lukumäärä ja r_M on maan resistanssi suhteessa pituuteen. Vaakamaadoituselektrodin kokonaisresistanssi suhteessa sen pituuteen muodostuu siis itseasiassa elektrodin ominaisresistanssista (riippuu esimerkiksi materiaalista ja pinta-alasta) ja virran paluutienä toimivan maan resistanssista. Elektrodista poistuvalla virralla voidaan ajatella olevan eräänlainen paluujohdin syvällä maassa, jonka kautta maasulkuvirta palaa takaisin syöttökohtaansa (Valjus 1979, 15). Virran paluutienä toimivan maan resistanssi suhteessa pituuteen r_M saadaan kaavan 14 avulla:

$$r_M = \frac{\omega\mu_0}{8}, \quad (14)$$

jossa ω on kulmataajuus ja μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti. Maan resistanssi suhteessa pituuteen on 50 Hz taajuudella noin 50 mΩ/km. (Valjus 1979, 18)

Edellä mainittua paluujohdin ajattelua voidaan käyttää myös magneettisten vaikutusten, kuten reaktanssin kohdalla. Paluuvirran voidaan ajatella keskittyneen

syvyydessä H kulkevaan paluujohtimeen. Tunkeutumissyvyys H saadaan kaavalla 15:

$$H = 1,85 \sqrt{\frac{\rho}{\omega\mu_0}}, \quad (15)$$

jossa ρ on maan resistiivisyys, ω on kulmataajuus ja μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti. Edelleen vaakamaadoituselektrodin reaktanssi suhteessa pituuteen ωl saadaan kaavalla 16:

$$\omega l = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{H}{r_e'} + \frac{\mu_r}{4n} \right), \quad (16)$$

jossa ω on kulmataajuus, μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, H on tunkeutumissyvyys, r_e' on elektrodin ekvivalenttisäde reaktanssia laskettaessa, μ_r on suhteellinen permeabiliteetti (kuparielektrodilla käytännössä $\mu_r = 1$) ja n on rinnan kytkettyjen johtimien lukumäärä. (Valjus 1979, 18)

Pituutta kohti lasketun maadoituskonduktanssin g_e ratkaisemiseksi on valittu yhtälö 17:

$$g_e = \frac{\pi}{\rho \ln \frac{H}{r_e''}}, \quad (17)$$

jossa ρ on maan resistiivisyys, H on tunkeutumissyvyys, r_e'' on elektrodin ekvivalenttisäde maadoituskonduktanssia laskettaessa. Yhtälöllä 17 saatava tulos on likimääräinen ja antaa lyhyillä elektrodipituuksilla pessimistisiä maadoituskonduktanssi arvoja. Yhtälön 17 sijasta maadoituskonduktanssin laskentaan voisi käyttää standardissa esitettyä vaakamaadoituselektrodin maadoitusresistanssin kaavaa käänteisenä lausekkeena (SFS 6001 2018, 148). Tämä aiheuttaisi kuitenkin ongelmia jatkossa käytettäessä siirtojohtojen yhtälöitä, sillä maadoituskonduktanssi suhteessa pituuteen jäisi edelleen riippuvaiseksi pituudesta. (Valjus 1979, 19)

6.2.3 Maadoitusimpedanssi

Vaakamaadoituselektrodin maadoitusimpedanssia määritettäessä, voidaan olettaa reunaehtona, että elektrodin loppupään virta $I_b = 0$. Tämä tarkoittaa, että elektrodi loppuu avoimena. Tällöin siirtojohtojen yhtälöt 9 ja 10 sieventyvät muotoon (elektrodin pituus on L):

$$\underline{U}_a = \underline{U}_b \cosh(\underline{\gamma}L), \quad (18)$$

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_a} \sinh(\underline{\gamma}L), \quad (19)$$

jolloin maadoitusimpedanssi \underline{Z}_e saadaan kaavalla 20:

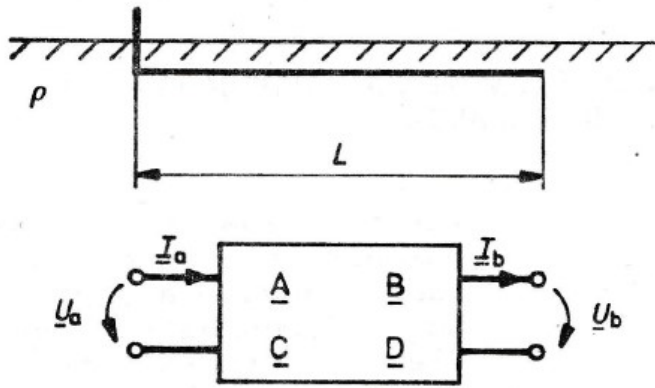
$$\underline{Z}_e = \frac{\underline{U}_a}{\underline{I}_a} = \frac{\underline{U}_b \cosh(\underline{\gamma}L)}{\frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_a} \sinh(\underline{\gamma}L)} = \underline{Z}_a \coth(\underline{\gamma}L) \quad (20)$$

Jos vaakamaadoituselektrodi liittyy hyvin pieneen maadoitusresistanssiin esimerkiksi maadoitusruudukkoon, elektrodin loppupäässä voidaan ajatella olevan ”oikosulku” ($\underline{U}_b = 0$). Tällöin siirtojohtojen yhtälöt sieventyvät maadoitusimpedanssia laskettaessa yhtälöksi 21. (Valjus 1979, 19–20)

$$\underline{Z}_e = \frac{\underline{U}_a}{\underline{I}_a} = \underline{Z}_a \tanh(\underline{\gamma}L) \quad (21)$$

6.3 Nelinapamenetelmä epähomogeenisessa maaperässä

Vaakamaadoituselektrodia voidaan tarkastella myös niin kutsuttuna nelinapana (kuva 12). Kyseistä menetelmää voidaan hyödyntää erityisesti tilanteessa, jossa vaakamaadoituselektrodin reitillä maaperä muodostuu syvyysuunnassa resistiivisyydeltään homogeenisista, mutta vaakasuunnassa vaihtelevista maalajeista. (Valjus 1979, 22)



KUVA 12. Vaakamaadoituselektrodi nelinapana (Valjus 1979, 21)

Aiemmin esitetyt siirtojohtojen yhtälöt 9 ja 10 voidaan esittää yhtälöiden 22 ja 23 muodossa, jos tunnetaan elektrodin pituus L , aaltoimpedanssi \underline{Z}_a ja etenemiskerroin $\underline{\gamma}$.

$$\underline{U}_a = \underline{A} \underline{U}_b + \underline{B} \underline{I}_b \quad (22)$$

$$\underline{I}_a = \underline{C} \underline{U}_b + \underline{D} \underline{I}_b \quad (23)$$

Tällöin yhtälöissä 9 ja 10 esitetyt muuttujat on vaihdettu yhtälöissä 22 ja 23 seuraaviin:

$$\underline{A} = \cosh(\underline{\gamma}L), \quad (24)$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_a \sinh(\underline{\gamma}L), \quad (25)$$

$$\underline{C} = \frac{\sinh(\underline{\gamma}L)}{\underline{Z}_a}, \quad (26)$$

$$\underline{D} = \cosh(\underline{\gamma}L). \quad (27)$$

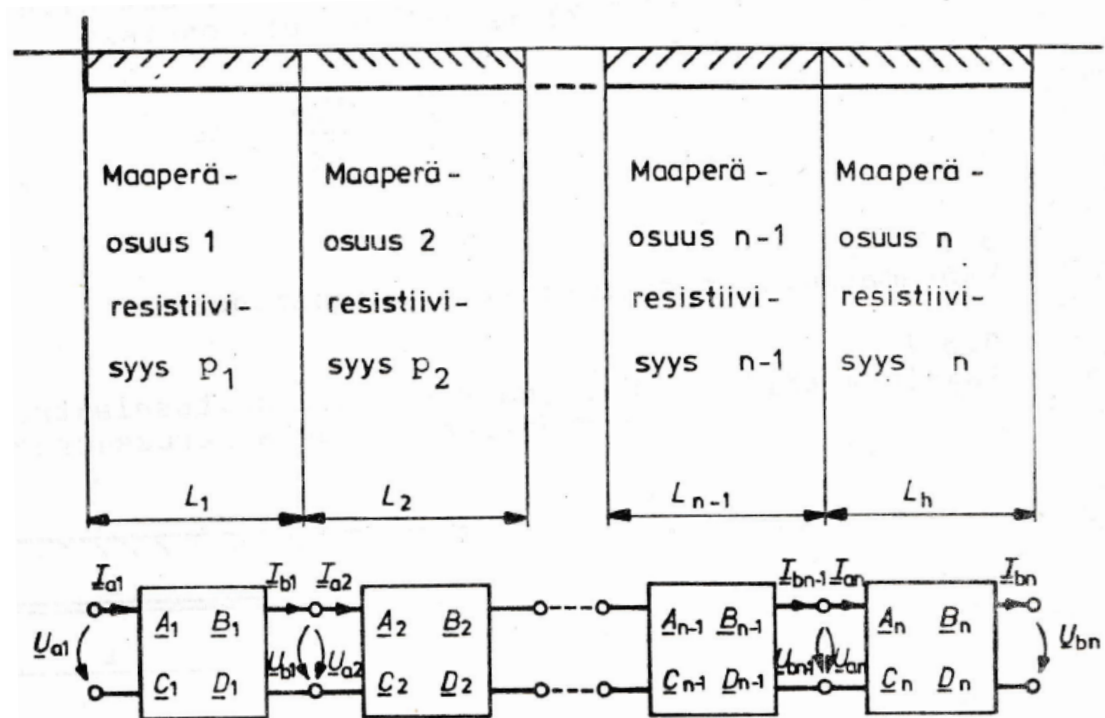
Yhtälöt 22 ja 23 voidaan yhdistää matriisiyhtälöksi 28, joka esittää kuvan 12 mukaista nelinapaa.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{I}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{C} & \underline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_b \\ \underline{I}_b \end{bmatrix} \quad (28)$$

Otettaessa reunaehdoksi $\underline{I}_b = 0$ kuten aiemminkin, maadoitusimpedanssin yhtälöksi saadaan yhtälö 29, joka vastaa yhtälöä 20. (Valjus 1979, 20–21)

$$\underline{Z}_e = \frac{\underline{U}_a}{\underline{I}_a} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}} \quad (29)$$

Nelinapamenetelmää voidaan käyttää kuvan 13 kaltaisissa tilanteissa, joissa on n kappaletta syvyysuunnassa homogeenista, mutta vaakasuunnassa erilaista maaperää.



KUVA 13. Nelinapojen sarjaankytkentä (Valjus 1979, 23)

Kuvassa 13 on asetettu erillisiä nelinapoja sarjaankytkentään. Maaperäosuuksien rajapinnoissa on voimassa seuraavat rajapintaehdot ($i = 2 \dots n$): $\underline{U}_{bi-1} = \underline{U}_{ai}$ ja $\underline{I}_{bi-1} = \underline{I}_{ai}$. Ehtojen nojalla vaakamaadoituselektrodille muodostetaan yhtälö 30:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{a1} \\ \underline{I}_{a1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_1 & \underline{B}_1 \\ \underline{C}_1 & \underline{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{A}_2 & \underline{B}_2 \\ \underline{C}_2 & \underline{D}_2 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \underline{A}_n & \underline{B}_n \\ \underline{C}_n & \underline{D}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{bn} \\ \underline{I}_{bn} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Jos vaakasuunnassa on esimerkiksi 2 kappaletta erilaista maaperää, saadaan matriisikertolaskujen ja reunaehdon $\underline{I}_{bn} = 0$ perusteella maadoitusimpedanssin yhtälöksi 31:

$$\underline{Z}_e = \frac{\underline{U}_a}{\underline{I}_a} = \frac{\underline{A}_1 \underline{A}_2 + \underline{B}_1 \underline{C}_2}{\underline{C}_1 \underline{A}_2 + \underline{D}_1 \underline{C}_2} \quad (31)$$

Useamman erilaisen maaperän tapauksessa maadoitusimpedanssi voidaan laskea vastaavalla tavalla. (Valjus 1979, 23–24)

6.4 Maadoitusimpedanssin laskentamenetelmien analysointia

Maadoituselektrodin maadoitusresistanssin laskemiseen löytyy esimerkiksi suurjännitestandardista SFS 6001 erilaisia laskentakaavoja (esitely liitteessä 2). Näiden laskentakaavojen rajoitteena on, että ne ottavat huomioon vain yhden resistiivisyysarvon, jolloin epähomogeenisessa maaperässä koko elektrodireitin maaperä pitäisi pystyä kuvaamaan luotettavasti yhdellä näennäisresistiivisyysarvolla. Erityisesti pitkiä vaakamaadoituselektrodeja käytettäessä ja maaperän ollessa resistiivisyydeltään vaihtelevaa, maaperän epähomogeenisuus tulisi ottaa hyvin huomioon. Epähomogeenisuuden vaikutus maadoitusresistanssin ja -impedanssin suuruuteen voi tällaisissa tapauksissa olla merkittävä. Koska pitkät vaakamaadoituselektrodit ovat tärkeässä roolissa TSV:n keskijänniteverkon maadoitusimpedanssin muodostumisessa, oli tärkeää löytää toimiva ja luotettava menetelmä vaakasuuntaisen epähomogeenisuuden huomioimiseen.

Työn alkuvaiheessa kokeiltiin, voisiko vaakasuuntaisen epähomogeenisuuden ottaa huomioon esimerkiksi tavallisella keskiarvolla. Keskiarvon käyttämisessä houkutteli laskennan helppous ja nopeus. Aiemmasta maaperän syvyysuuntaisen resistiivisyyden tutkimisesta tiedettiin, että jos maaperän resistiivisyyden vaihtelu on hyvin pientä, löytyy keskiarvon käyttämiseen riittävät perusteet. Tarkemmin asiaa käytännössä tutkittaessa huomattiin, että maaperän resistiivisyyden vaihtelu saattaa olla merkittävämpää pitkällä vaakasuuntaisella matkalla kuin

verrattain lyhyessä syvyysuunnassa. Vaakasuunnassa resistiivisyydeltään vaihtelevassa maaperässä voi reitin maadoitusolosuhteista olla haastavaa muodostaa edustavaa näennäisresistiivisyyden arvoa keskiarvolaskennalla.

Jos elektrodireitistä esimerkiksi puolet on hyvin johtavaa savimaata ja puolet huonosti johtavaa harjusoraa, näiden eri osien resistiivisyyksien keskiarvon perusteella maadoitusolosuhteet ovat koko reitillä vain keskinkertaiset ja tällöin elektrodille laskettu maadoitusresistanssi ja -impedanssi jää todellista huonommaksi. Hyvin johtavassa maaperässä elektrodin maadoitusresistanssi ja -impedanssi pienenee verrattain nopeasti elektrodipituuden kasvaessa, jos verrataan tilannetta esimerkiksi keskinkertaiseen maaperään. Liitteessä 5 on havainnollistettu tarkemmin maaperän resistiivisyyden ja elektrodin pituuden vaikutusta maadoitusresistanssin suuruuteen.

Jos 1 kilometrin mittaisen maadoituselektrodin reitistä 500 metriä on resistiivisyydeltään $200 \Omega\text{m}$ savimaata ja 500 metriä resistiivisyydeltään $10000 \Omega\text{m}$ harjusoraa, elektrodi johtaa suurimman osan maasulkuvirrasta hyvin johtavaan savimaan. Elektrodin savimaan osuudelle maadoitusresistanssiksi R_E muodostuu liitteen 2 vaakasuoran upotetun johtimen kaavalla noin $1,1 \Omega$. Vastaavasti soraiselle osuudelle asennetun elektrodiosan maadoitusresistanssi R_E on noin 55Ω , eikä kyseisen elektrodiosa enää juurikaan pienennä koko elektrodin maadoitusresistanssia. Koko elektrodin maadoitusresistanssin voidaan arvioida olevan alle 2Ω , kun osat on laskettu erikseen. Jos taas koko 1 kilometrin reitille lasketaan maadoitusresistanssi resistiivisyyden keskiarvolla $5100 \Omega\text{m}$, tulokseksi saadaan todellista huonompi noin 15Ω arvo. Erittäin huonosti johtavat maaperät voi jopa jättää kokonaan pois laskelmista maadoitusresistanssin ja -impedanssin kannalta lähes merkityksettöminä, erityisesti jos samalta elektrodireitillä löytyy hyvin johtavia maaperiä pidemmältä matkalta. Esitetty esimerkki on toki hieman kärjistetty, mutta tuo kuitenkin selkeästi ilmi keskiarvolaskennan aiheuttamat ongelmat.

Työssä tarkasteltiin myös eräänlaisella painotetulla keskiarvolla laskemista. Maadoituselektrodireitille laskettiin maaperän resistiivisyydelle yksi arvo siten, että reitti jaettiin ensin maalajeittain pienempiin osiin. Jokaisen osan pituutta vastasi tietty prosentuaalinen osuus reitin koko pituudesta. Näin saaduilla pituuden kertoimilla kerrottiin jokaisen maalajin resistiivisyydet erikseen ja laskettiin lopuksi

yhteen. Tällä tavalla elektrodireitille muodostettiin yksi maalajien pituuksien suhteessa painotettu resistiivisyyden arvo. Esimerkiksi jos 50 % reitistä oli savimaata, 30 % moreenia ja 20 % kalliota, oli savimaalla suurin vaikutus lopulliseen laskennassa käytettävään resistiivisyyteen jne. Tällä menetelmällä saatettiin saada jonkin verran edustavampi kuva reitin olosuhteista. Tämäkään tapa ei kuitenkaan ollut tarpeeksi hyvä soveltuakseen kaikkialle. Edellisessä kappaleessa mainitussa tilanteessa, jossa elektrodireitti kostuu puolet hyvin johtavasta ja puolet huonosti johtavasta maaperästä, on ongelmana jälleen täsmälleen sama keskimääräinen resistiivisyyden arvo.

Luvun alussa esiteltyä nelinapamenetelmää tutkittaessa huomattiin, että tarkastelluista menetelmistä se sopii parhaiten TSV:n verkonsuunnittelun käyttöön, haastavasta laskennasta huolimatta. Simuloinneissa ja suunnittelutyössä menetelmän havaittiin toimivan johdonmukaisesti resistiivisyyden vaihteluista huolimatta. Se ottaa maadoituselektrodireitin epähomogeenisuudet huomioon, jokainen eri resistiivisyysosuus huomioidaan yksilöllisesti ja lopullinen maadoitusimpedanssin arvo muodostuu näiden osien perusteella. Nelinapamenetelmällä laskettujen elektrodireitin osasten maadoitusimpedanssit vastaavat esimerkiksi liitteessä 2 esitetyillä SFS 6001 standardin kaavoilla laskettujen osien maadoitusresistanssien suuruutta. Laskettu arvo on kuitenkin hieman standardin kaavojen arvoa suurempi, koska nelinapamenetelmä laskee pelkän maadoitusresistanssin sijaan maadoituselektrodin maadoitusimpedanssin, kuten pitkillä vaakamaadoituselektrodeilla kuuluukin.

Nelinapamenetelmästä valmistui työn ohessa taulukkolaskentaohjelmaan työkalu (kuva liitteessä 6), jonka avulla käytännön suunnittelutyö on helpompaa ja nopeampaa. Työkalulla voidaan laskea maadoituselektrodin maadoitusimpedanssi, kun syötettäviä lähtötietoja ovat vain elektrodireitiltä mitattujen maalajien resistiivisyydet ja maalajien esiintymisalueiden pituudet. Alustavasti laskentatyökaluun voidaan syöttää yhdestä elektrodireitistä 10 eri resistiivisyysosuuden tiedot, mutta lisää osia on helppo lisätä tarpeen mukaan. Laskentatyökaluun lisättiin vielä makro, joka suorittaa nelinapalaskennan molemmista elektrodin suunnista. Menetelmää tutkittaessa huomattiin, että maadoitusimpedanssin suuruuden kannalta on jonkin verran merkitystä, kummasta maadoituselektrodin päästä laskennan aloittaa.

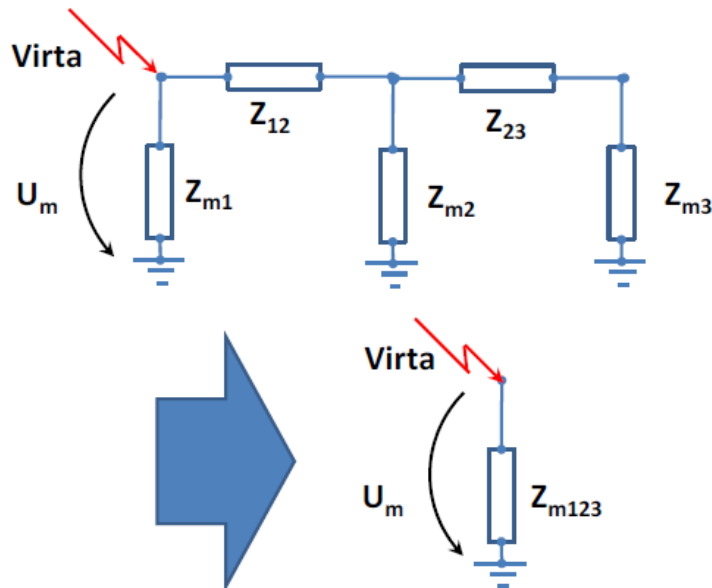
Vaakasuuntaisen maaperän epähomogeenisuuden huomioivan laskentamenetelmän valinta suunnittelukäyttöön ei lopulta ollut vaikeaa. Vaihtoehtoina olleet tavallinen keskiarvo tai edes painotettu keskiarvo eivät ottaneet resistiivisyydestään vaihtelevaa maaperää yhtä hyvin huomioon kuin nelinapamenetelmä. Keskiarvomenetelmät keskinkertaistavat tietyissä tapauksissa elektrodireitin olosuhteita liikaa, jolloin hyvin johtavien maaperien resistiivisyysarvoja ei pystytä hyödyntämään laskennassa täysimääräisesti. Nelinapamenetelmä huomioi jokaisen yksittäisen osuuden erikseen; hyvät olosuhteet pysyvät hyvinä ja johtavat maasulkuvirtaa paremmin maaperään kuin huonommat suuren resistiivisyyden omaavat maaperät. Huonosti johtavat maaperät eivät näin ollen muuta hyviä olosuhteita todellista huonommiksi, kuten keskiarvolla laskettaessa käy.

7 MAADOITUSVERKON MAADOITUSIMPEDANSSIN MÄÄRITTÄMINEN

Viimeinen vaihe yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän kosketusjännitevaatimusten täyttymisen todentamisessa TSV:n verkossa on maadoitusverkolle tehtävä resultoivan maadoitusimpedanssin laskenta. Sillä varmistetaan, että maadoitukset ovat riittävät, eikä vaaratilanteita pitäisi muodostua, jos ennalta määritetty maadoitusimpedanssin tavoitearvo alitetaan jokaisessa verkon pisteessä.

7.1 Resultoiva maadoitusimpedanssi

Resultoivalla maadoitusimpedanssilla tarkoitetaan kahden tai useamman yhteen kytketyn maadoituselektrodin muodostaman maadoitusverkon maadoitusimpedanssia (Mäkinen 2016, 6). Sen suuruuteen vaikuttavat koko yhteen kytketyn verkon maadoitukset sekä piste, jossa maasulku syntyy. Maasulkuvirta näkee maadoitusverkon impedanssiltaan erilaisena, riippuen maasulkukohdasta. Eri maadoitusverkon pisteissä impedanssi on erilainen, koska pisteet ovat sähköisesti eri kohdissa ketjuuntuvaa maadoitusverkkoa. Vikapaikasta riippuu, miten hyvin maasulkuvirta johtuu maahan itse vikapaikassa sekä miten se jakautuu muualle maadoitusverkon alueelle ja miten hyvin se sitä kautta johtuu maaperään. Kuvassa 14 on havainnollistettu resultoivan maadoitusimpedanssin muodostumista. Impedanssit Z_m kuvaavat maadoituselektrodien maadoitusvaikutusta ja niiden väliset impedanssit Z_{12} ja Z_{23} maadoituselektrodien välisiä yhdistymisiä. Maadoitusverkon keskellä maadoitusimpedanssi on jonkin verran pienempi kuin yhteen kytketyn ketjun päissä, koska keskellä vikavirta voi jakautua useampaan kuin yhteen suuntaan maadoitusverkon alueelle.



KUVA 14. Resultoivan maadoitusimpedanssin muodostaminen (Mäkinen 2016, 17)

Keskijänniteverkossa maadoitusjärjestelmän laskennallisia tarkasteluita varten maadoitusverkolle täytyy määrittää solmupisteitä. Solmupisteiksi valitaan useimmiten muuntamot tai vastaavat rakenteet, joissa verkko haarautuu useampaan eri suuntaan. Jokaiselle solmupisteelle lasketun resultadoivan maadoitusimpedanssin tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin turvallisesti määritelty maadoitusimpedanssin tavoitearvo. TSV ohjaa yleissuunnittelulla maadoitusten rakentamista antamalla resultadoivalle maadoitusimpedanssille eri solmupisteissä pienempiä arvoja, jos niiden tarvitsee jostain syystä olla tiukempia kuin tavallisesti. TSV:n oma verkon suunnittelija tekee standardin mukaiset maadoitussuunnitelmat ja -laskelmat, sekä dokumentaatiot myös KVR-urakoissakin.

Solmupisteiden (käytännössä muuntamoiden) väliset maadoitusten yhdistämiset toteutuvat TSV:n haja-asutusalueen keskijänniteverkossa usealla eri tavalla. Maasulussa vaikuttava vikavirta jakautuu ja kulkee rinnakkain vähintään Wiskikaapelin keskusköydessä ja vaihejohtinten kosketussuojissa. Edellä mainitut komponentit mallinnetaan vain maasulkuvirtaa jakavina maadoitusverkon osina, varsinaisia maadoitavia osia ovat muuntamoiden perustusmaadoitukset sekä mahdolliset muuntamoiden väliset vaakamaadoituselektrodit. TSV:n tapauksessa mahdollisten vaakamaadoituselektrodien kulkiessa koko matkan muuntamolta toiselle, ne myös jakavat virtaa muualle maadoitusverkkoon sen lisäksi, että ne johtavat sitä samalla matkalla maaperään. Lisäksi maasulkuvirta kulkee

syvällä maaperässä. Kahden muuntamon välillä on siis useampi maadoitukseen hyödynnettävä yhteys.

Muuntamolta toiselle asennettavat pitkät vaakasuuntaiset maadoituselektrodit täytyi mallintaa resaltoivan maadoitusimpedanssin laskentaa varten jollain tavalla. Mallintamiseen pohdittiinkin muutamia eri vaihtoehtoja. Maadoituselektrodin maadoitusimpedanssia nelinapamenetelmällä laskettaessa huomattiin, että laskentasuunnalla oli jonkin verran merkitystä maadoitusimpedanssin suuruuteen. Maadoitusimpedanssin arvo oli aina jonkin verran huonompi laskettaessa suunnasta, jossa elektrodin alkupäässä oli enemmän huonommin johtavaa maaperää kuin loppupäässä. Koska maadoituselektrodi on asennettu molemmista päistään eri muuntamoiden maadoitukseen kiinni, elektrodin on mahdollista kohdata maasulku kummasta päästä tahansa. Tästä syystä nelinapalaskennasta tullaan aina valitsemaan maadoitusimpedanssin suurempi, epäedullisempi arvo jatkolaskentaa varten.

Kokonaista elektrodia maadoitusvaikutuksineen ei voida mallintaa järkevästi maadoitusverkon laskennassa käytettävään työkaluun. Mahdollista olisi kuitenkin mallintaa solmupisteisiin eli muuntamoille maasulun suunnat, joiden mukaan valittaisiin, kumpaan päähän maadoituselektrodi maasulun sattuessa kytkeytyy sähköisesti. Tätäkin kokeiltiin luomalla eräänlainen lisäosa laskennassa käytettävään työkaluun ja hakemalla tiedot toisesta taulukosta. Tapa todettiin nopeasti suunnittelutyössä tarpeettoman haastavaksi. Kokeiltiin myös tapaa, jossa elektrodi jaetaan näennäisesti kahtia puolella välissä pituuttaan ja lasketaan kahtia jaetuille elektrodin osille maadoitusimpedanssit kullekin erikseen. Lopuksi maadoitusvaikutukset siirretään elektrodin päiden muuntamoiden solmupisteisiin. Lopulta valittiin kuitenkin tapa, jossa lasketaan ensin koko elektrodille maadoitusimpedanssi ja jaetaan vasta sen jälkeen maadoitusvaikutus puoliksi päiden muuntamoiden kesken. Näin tulos on hieman konservatiivisempi ja todenmukaisempi. Jos elektrodi jaettaisiin ensin kahtia, niin elektrodipituuden suhteessa heikkenevä maadoitusvaikutus ei tulisi huomioitua oikealla tavalla. Tietyissä pituudessa elektrodin maadoitusimpedanssi ei enää pienene, koska elektrodin syötetty virta on johdettu maahan jo ennen elektrodin loppupäätä (Sandholm 1968, 6; Valjus 1979, 20).

7.1.1 Laskentamalli

Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän resuloivan maadoitusimpedanssin suuruuden selvittäminen päädyttiin tekemään laskennan avulla. Myös mittaukset esimerkiksi V/A-menetelmällä olisivat olleet mahdollisia, mutta niitä ei lopulta päädytty isommassa mittakaavassa käyttämään. Perusteluja valintaan löytyy luvusta 4.4. Resuloivaan maadoitusimpedanssiin liittyvän laskennan voi suorittaa esimerkiksi Trimble NIS -verkkotietojärjestelmässä, jos sellainen on käytössä. TSV on kuitenkin päättänyt perustaa resuloivan maadoitusimpedanssilaskentansa Verkostosuosituksista löytyvään laskentatyökaluun (tekijä Antti Mäkinen), jonka pitäisi antaa pätevät ja Trimble NIS -verkkotietojärjestelmää vastaavat tulokset (Ahonen 2020, 24). Mittaustulosten ja laskelmien dokumentoinnin sekä tiedon ylläpidon osalta työmäärä saattaa olla valitulla tavalla hieman suurempi. Tämä johtuu osaksi siitä, että laskentatyökalussa on vain 10 solmupistettä. Maadoitusverkon resuloivan maadoitusimpedanssin laskenta voidaan siis suorittaa vain 10 muuntamolle kerrallaan. Työn aikana kokeiltiin laskea isomman maadoitusverkon maadoitusimpedanssia usean erillisen toisiinsa yhdistetyn laskentatyökalutiedoston avulla. Tässä onnistuttiin, mutta todettiin sen olevan niin haastavaa, ettei kyseistä tapaa kannata soveltaa kuin ihan välttämättömissä laskentatapauksissa, jos maadoitusimpedanssin tavoitearvoon ei muuten päästä.

Laskentatyökalussa on otettu huomioon useita parametreja, jotka vaikuttavat resuloivan maadoitusimpedanssin laskennalliseen arvoon. Jokaiselle laskennassa käytettävälle solmupisteelle voidaan antaa maadoitusresistanssin arvo, käytännössä siis muuntamolle mitattu tai laskettu arvo. Solmujen väliset maadoitusyhteydet voidaan mallintaa antamalla niiden väliset etäisyydet, sekä välillä käytettävän kaapelityypin sähköiset arvot, jotka riippuvat kaapelin materiaalista, poikkipinta-alasta ja rakenteesta. Lisäksi jokaisen solmupisteen sijainnit xy-koordinaatistossa voidaan antaa. Solmut voidaan yhdistää toisiinsa missä järjestyksessä halutaan, ei pelkästään peräkkäin. Maan ominaisresistanssi eli resistiivisyys voidaan myös ottaa huomioon. Resisttiivisyydelle on kuitenkin varattu vain yksi arvo, joten kyseistä ominaisuutta käyttäessä, kannattaa arvoksi valita esimerkiksi GTK:n maaperäkartan tai mahdollisten resistiivisyysmittausten perusteella koko maadoitusverkon aluetta edustava turvallisen konservatiivinen arvo. Maan ominaisresistanssi ja xy-koordinaatit vaikuttavat potentiaalin päällekkäisyysisään,

jolla kuvataan solmupisteiden läheisyyden vaikutusta toisiinsa. Mitä lähempänä kaksi maadoituselektrodiä ovat toisiaan, sitä enemmän ne vaikuttavat toistensa resultoiviin maadoitusimpedanssiarvoihin heikentävästi. Potentiaalipäällekkäisyyssuhteita voidaan valita laskettavaksi joko elektrodien reunoille tai keskelle. Viimeisenä laskennassa otetaan huomioon maasulkukohta, eli maasulkuvirran syöttökohta maadoitusverkossa. Laskentatyökalu antaa maadoitusimpedanssin arvon siinä solmussa johon virta syötetään.

Jo opinnäytetyön tekemisen alkuvaiheessa heräsi ajatus mahdollisuudesta määritellä yksi tai useampi eräänlainen maadoitusten vakiorakenne, joka soveltuisi kaikkialle TSV:n haja-asutusalueen yhteen liitetyle maadoitusverkolle. Tapauskohtaisesti näistä vakiorakenteista valittaisiin sopivin vaatimukset täyttävä rakenne kohdekohtaisesti. Vakiorakennetta varten tehtiin erilaisia simulointeja laskentatyökalulla. Nopeasti huomattiin, että laskentaan vaikuttavia parametreja on paljon, kun maadoituselektrodien maadoitusimpedanssilaskennan kautta tulee vielä reiteillä vaikuttavien resistiivisyyksien muutokset huomioitua. Lopulta laskentaan vaikuttavia asioita todettiin olevan niin paljon, että rajallisen ja järkevän skenaariomäärän luominen olisi ollut haastavaa. Vakiorakenteita saattaisi tulla liian monta tai suunnitteluvaiheessa olisi haastavaa valita oikea rakenne esimerkiksi joissain paikoissa todetun erittäin epähomogeenisen ja rikkonaisen maaperän takia. Huomattiin, että laskennassa monen asian yksittäinen muutos näkyy enemmän tai vähemmän useassa muussa kohdassa koko maadoitusverkon alueella.

Kattavien kaiken huomioon ottavien simulointien tekeminen ei siis osoittautunut tässä tapauksessa järkeväksi. Ensimmäisiä varsinaisia maadoitusten suunnitelmia todellisessa verkossa tehtäessä, saatiin kuitenkin hyvää kuvaa, miten maadoitusverkko kannattaa käytännössä rakentaa. Esimerkiksi hyvin johtavaan maaperään asennetuilla vaakamaadoituselektrodeilla on suuri merkitys resultoivan maadoitusimpedanssin riittävän pienen arvon muodostumisessa. Hyvin johtavan maaperän määritelmä riippuu paljon alueesta, jolla ollaan; joidenkin paikkojen hyvä johtavuus voi olla huonoa jossain muualla. Ensisijaisesti pyritään etsimään ja käyttämään vaakamaadoituselektrodien asentamiseen resistiivisyydeltään alle $1000 \Omega\text{m}$ maaperiä. Tällaisessa hyvin johtavassa maaperässä eräänlaiseksi va-

kiorakenteeksi vaikuttaisi muodostuvan, että vaakamaadoituselektrodiä asennetaan noin 30–50 prosenttia kaapeloidun verkon pituudesta. Jos joka toiselle muuntamoiden väliselle reitille asennetaan vaakamaadoituselektrodi, on jokainen maadoitusverkon muuntamo hyvässä yhteydessä maaperään suoraan pitkien vaakaelektrodien kautta, eikä pelkästään 20 kV kaapelin keskusköyden ja vaiheiden kosketussuojien kautta seuraavan muuntamon maadoitukseen ja siitä edelleen pitkään maadoituselektrodiin. Jokaisella muuntamolla ei siis tarvitse olla hyvät maadoitusolosuhteet, vaan maadoitusvaikutusta voidaan siirtää joltain toiselta muuntamolta jopa joitain kilometrejä riippuen esimerkiksi yhdistyksen poikkipinta-alasta, maaperän resistiivisyydestä ja muuntamon omien maadoitusten hyvyydestä.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Verkkoyhtiön haja-asutusalueen maadoitusverkolle oli tavoitteena löytää aiempaa edullisempi, mutta samalla kaikki standardin vaatimukset täyttävä rakenne. Nopeasti huomattiin, että suurjännitestandardissa esitelty uusi yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä muodostuu haja-asutusalueen maadoitusverkon järjestelmäksi ihan itsestään maakaapeloinnin seurauksena. Paikallisen tai laajan maadoitusjärjestelmän ehdot eivät ketjumaisessa kaapeliverkossa enää täyty, eikä niitä tässä tapauksessa voida käyttää. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän todentamiseen annettiin standardissa neljä eri vaihtoehtoa, joista maaperän paikallisen resistiivisyyden mittaukset ja mittaustulosten perusteella suoritettava laskenta valikoitui käytettäväksi todentamistavaksi. Ennen kuin voitiin luotettavasti määrittää tarkempi maadoitusverkon rakenne, täytyi ratkaista, miten maadoituselektrodin maadoitusresistanssin ja -impedanssin laskukaavoissa esiintyvä maaperän resistiivisyys tulkittaisiin mittaustuloksista.

SFS 6001 suurjännitestandardi kehottaa ottamaan resistiivisyyden vaihtelut huomioon maadoitusten laskennassa. Koska maaperän resistiivisyyden tiedettiin vaihtelevan joissain tapauksissa hyvin paljon, sen merkitystä ei voitu jättää huomioimatta. Opinnäytetyön alkuvaihe sisälsi paljon eri kirjallisuuslähteiden tutkimista varsinkin, kun huomattiin maaperän resistiivisyyden epähomogeenisuuden tulkitsemisen nousevan merkittävään rooliin työssä. Eri teoreettisten menetelmien soveltuvuuden arviointia tehtiin kiitettävässä määrin, erilaisia tulkinta- ja laskentamenetelmiä, varsinkin graafisia ratkaisutapoja löytyi useita. Monet niistä olivat haastavia ja aikaa vieviä menetelmiä, eikä niitä voitu ajatella sovellettavaksi verkkoyhtiön verkonsuunnittelun käyttöön. Lopulta päädyttiin käyttämään keskiarvolaskentaa. Tiedossa oli jo aiemmin, että jotkut verkkoyhtiöt käyttävät resistiivisyysmittaustulosten analysointiin keskiarvoa. TSV:lla haluttiin kuitenkin olla täysin varmoja valitun menetelmän käyttökelpoisuudesta ja luotettavuudesta, siksi myös muiden menetelmien soveltuvuutta testattiin paljon. Keskiarvolaskennan käyttämiselle löydettiin riittävät perustelut, kunhan käytännön suunnitteluprosessissa tiedostetaan ja pidetään muistissa menetelmän rajoitukset luotettavan laskennan kannalta. Keskiarvomenetelmää käytetäänkin, jollei tulevaisuudessa

kehitetä jotain parempaa tapaa ratkaista resistiivisyysmittauksissa havaitut maaperän epähomogeenisuuden haasteet.

TSV käyttää pitkiä vaakamaadoituselektrodeja joidenkin muuntamoidensa välillä. Maadoituselektrodireittien vaakasuuntaisen resistiivisyyden vaihtelujen huomioiminen oli siten erittäin tärkeää. Tästä haastavasta aiheesta ei erityisemmin löytynyt kirjallista tutkimusaineistoa tai tietoa, ainoastaan yksi siirtojohtojen yhtälöihin ja maadoituselektrodin nelinapaesitykseen perustuva menetelmä tuli esille. Nelinapamenetelmän käytöstä ei löytynyt mainintaa tai käyttökokemuksia muualta kuin kirjallisuuslähteestä, jossa menetelmä esiteltiin. Nelinapamenetelmää kehitettiin ja todettiin sen soveltuvan verkkoyhtiön käyttöön, kunhan laskennan pystyi tekemään taulukkolaskentaohjelmiston avulla. Opinnäytetyön ohessa valmistui muun muassa nelinapamenetelmään perustuva vaakamaadoituselektrodin maadoitusimpedanssin laskentatyökalu, joka helpottaa suunnittelijan työtä merkittävästi.

Maadoitusverkko päädyttiin jatkossa rakentamaan yhdellä rakenteella, jonka sisällä vaakamaadoituselektrodien määrää muutetaan tarpeen mukaan. Aiemmin jokaiselle muuntamovälille 20 kV kaapelin rinnalle asennettu lisämaadoituselektrodi jätetään nyt oletuksena asentamatta. Standardin edellyttämät maadoitusvaatimusten todentamislaskelmat jouduttaisiin kuitenkin tekemään, vaikka jokaiselle muuntamovälille asennettaisiinkin elektrodi. Jatkossa vaakamaadoituselektrodi asennetaan noin 30–50 % muuntamoväleistä alueen maaperän resistiivisyyden mukaan. Kokemuksen karttuessa uudesta maadoitustavasta, suunnittelusta ja Teiskon haja-asutusalueen maaperän resistiivisyyksistä, voidaan tehdä aiempaa tarkempia alustavia suunnitelmia, jo valmistuneita maadoitusverkkoja eräänlaisina pohjatietoina hyödyntäen.

Standardi edellyttää, että maaperän resistiivisyysmittaukset tehdään paikallisesti. Työn aikana huomattiinkin, että yhden paikan resistiivisyysmittaustuloksia ei voida suoraan yleistää muualle esimerkiksi maaperäkartan avulla, koska maaperän resistiivisyyden vaihtelut saattavat olla todella paikallisia esiintymiä niin syvyys- kuin vaakasuunnassakin. Maadoitusten esisuunnittelussa voidaan kuitenkin aiempia mittaustuloksia hyödyntää kokemuspohjaisena tietona.

Laskelmien ja simulointien johtopäätöksenä voidaan todeta, että maadoituksia ei kannata sijoittaa huonosti johtavaan maaperään, vaan tarkasteltavana olevan maadoitusverkon osan parhaisiin maaperiin, jossa maaperän resistiivisyys on mahdollisimman pieni. Jos esimerkiksi huonosti johtavalla maaperällä sijaitsevan muuntamon resuloiva maadoitusimpedanssi ei täytä vaatimuksia, voi olla parasta lisätä maadoituksia muualle paremmin johtaviin maaperiin kyseisen yhteen kytketyn maadoitusjärjestelmän alueella.

Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän määrittäminen suurjännitestandardiin paikallisen ja laajan maadoitusjärjestelmän rinnalle on ollut tärkeä asia. Yhteen liitetty järjestelmä kuvaa usein hyvin haja-asutusalueen maadoitusverkon rakennetta. Uudesta maadoitukseen liittyvästä verkostosuosituksesta, jota ei ollut vielä opinnäytetyön alkupuolella julkaistu huomattiin, että opinnäytetyöstä saadut tulokset olivat suosituksen kanssa linjassa. Verkostosuosituksessa ei kuitenkaan otettu kantaa siihen, miten maaperän epähomogeenisuus ja resistiivisyydsmittausten tulokset tulisi tulkita ja huomioida laskelmissa. Maaperän resistiivisyydestä ja epähomogeenisuudesta muodostuikin tärkeä osa opinnäytetyötä.

Yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään ja maaperän resistiivisyyteen liittyen jatkossakin riittää varmasti tutkittavaa ja kehitettävää. Tulevaisuudessa voisi tehdä lisäselvitystä esimerkiksi siitä, kannattaisiko vanhat maadoitusjärjestelmät määrittellä yhteen liitetyiksi järjestelmiksi ja mitä toimenpiteitä se vaatisi. Oletuksena olisi, että maadoitusverkon rakenne muuten vastaa yhteen liitetulle maadoitusjärjestelmälle asetettuja vaatimuksia. Lisäksi voisi olla hyvä tutkia yhteen liitetulle maadoitusjärjestelmälle tehtävien maadoitusten tarkastusten ja varmistusmittausten tarpeellisuutta sekä niiden mahdollista toteutustapaa.

LÄHTEET

ABB. 2000. ABB:n TTT-käsikirja 2000–07: Teknisiä tietoja ja taulukoita. Luku 8: Maasulkusuojaus.

Ahonen, P. 2020. Maadoitusten käsittelytavan soveltaminen jakeluverkkoyhtiössä. Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta. Tampereen yliopisto. Diplomityö.

Corrosion Doctors. n.d. Soil Resistivity Measurement. Luettu 18.2.2020. <https://corrosion-doctors.org/Corrosion-Kinetics/Ohmic-drop-soil.htm>

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.

Hallituksen esitys 28.1.2021. 2020/265.

IEEE 80-2013. 2013. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

Keränen, V. 2017. Maadoituksen suunnitteluohje Tampereen Sähköverkko Oy:lle. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opin- näytetyö.

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto.

Marshall, S. 2006. Resistivity Surveying: Chapter 12. PowerPoint-esitys. Julkaistu 16.8.2006. Luettu 18.2.2020. <https://slideplayer.com/slide/4196191/>

Mäkinen A. 2016. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmistä. Tampereen teknillinen yliopisto.

Nieminen, K. 1979. Julkaisu 39–79. Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaaminen: III Maapohjan mittaukset. Painos 249. Helsinki: Insinöörijärjestöjen Koulutuskeskus INSKO.

Prysmian Group. 2018. AHXAMK-W 20 kV 3-johtiminen. Datalehti. Julkaistu 17.4.2018. Luettu 4.2.2020. https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/AHXAMK-W%2020kV_170418.pdf

Sandholm, F. 1968. Julkaisu 25–68. Sähköasemien suunnittelu: X Maadoitukset. Painos 400. Helsinki: Insinöörijärjestöjen Koulutuskeskus INSKO.

SFS 6001. 2018. Suurjännitesähköasennukset. 5. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588.

Tyni, A. 2020. Teiskon alueen maasulkusuojauksen vaihtoehtojen selvittäminen. Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta. Tampereen yliopisto. Diplomityö.

Valjus, J. 1979. Julkaisu 39–79. Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu, rakentaminen ja mittaaminen: II Maadoituselektrodien teoriaa. Painos 249. Helsinki: Insinöörijärjestöjen Koulutuskeskus INSKO.

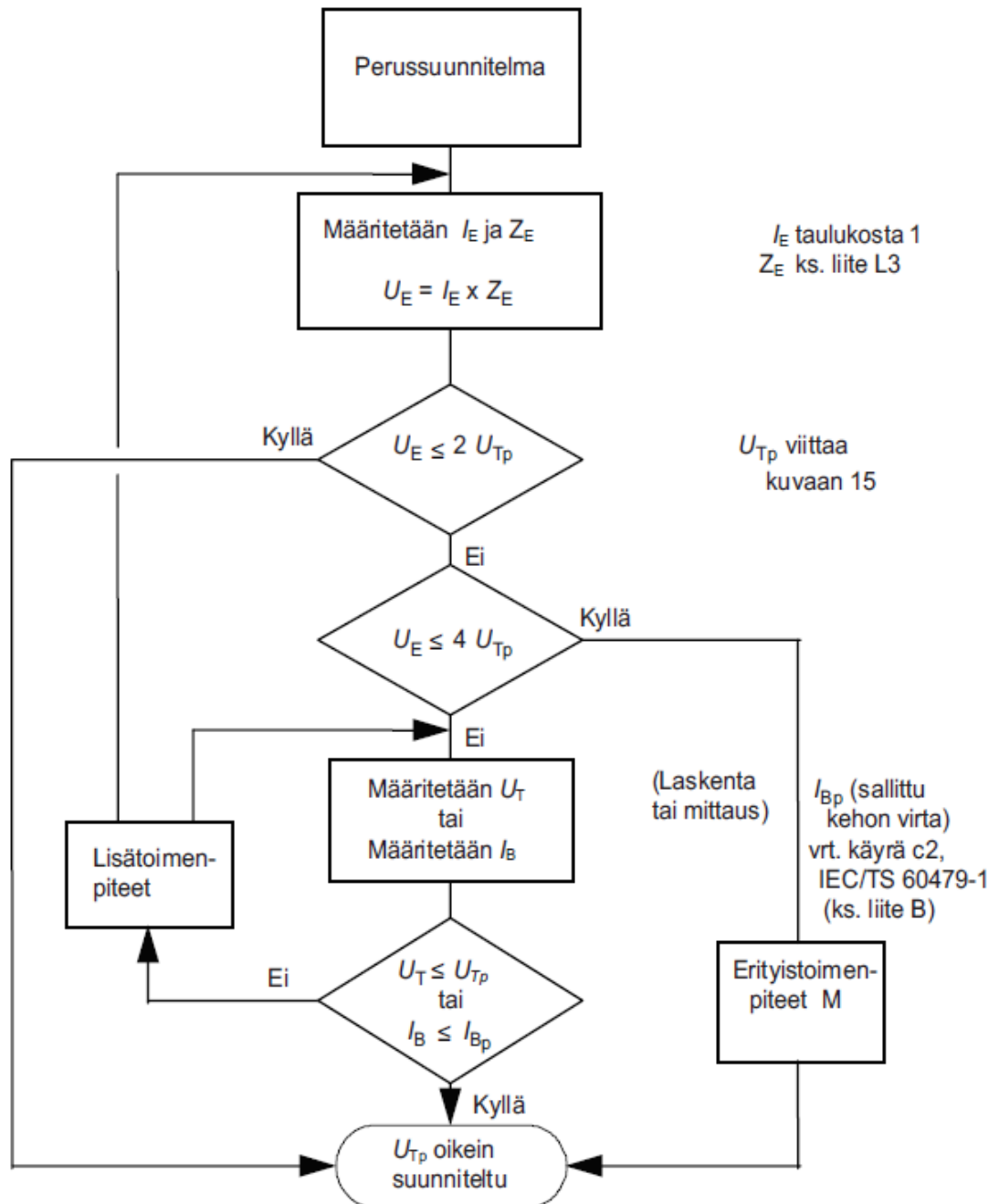
Verkostosuositus RJ 22:20. 2020. Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Verkostosuositus RK 1:16. 2016. Maakaapeliverkon rakentamisen vaatimukset 0,4–45 kV. Helsinki: Adato Energia Oy.

Verkostosuositus TJ 1:05. 2005. Sähkönjakeluverkkojen maadoitusmittaukset. Helsinki: Energiateollisuus ry.

LIITTEET

Liite 1. Maadoitusjärjestelmän suunnittelu (SFS 6001 2018, 94)



Liite 2. Maadoitusresistanssin laskentakaavoja (SFS 6001 2018, 148)

Elektrodin laatu	Kaava	Huomautukset
Pallo pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	
Levy pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	$s \ll D$
Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d} \times \frac{2h+L}{4h+L}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}$	$d \ll 4h$
Ruudukko	$R_E = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L}$	

L Elektrodin pituus (m)

D Pallon, levyn tai ruudukon halkaisija (m)









d Johtimen halkaisija tai puolet nauhan leveydestä (m)

s Levyn paksuus (m)

ρ_E Maaperän resistiivisyys (Ωm)

h Elektrodin upotussyvyys (m)

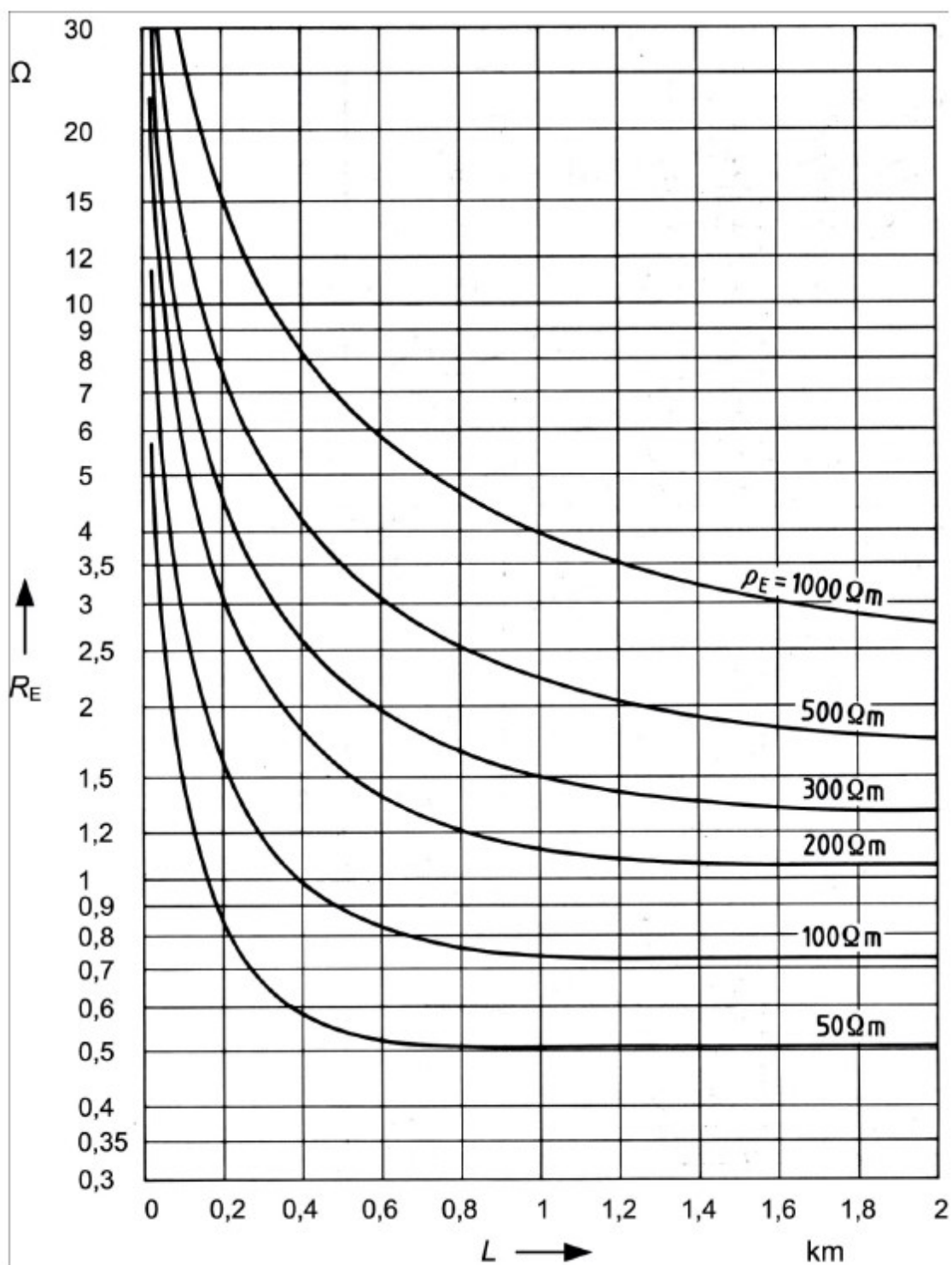
Liite 3. Elektrodimuodon vaikutus maadoitusresistanssiin (SFS 6001 2018, 149)

Elektrodin pituus L (m)		20	60	200	600
Elektrodin muoto		Maadoitusresistanssin suhde vaakasuoran johtimen maadoitusresistanssiin			
		100	100	100	100
0,2 m		133	144	155	159
2 m		109	123	135	143
20 m		92	98	109	119
		103	103	102	102
		107	106	106	105
		116	115	114	112
		136	135	132	129
		159	158	154	148
		109	108	107	106

Liite 4. Maaperän, betonin ja veden resistiivisyydet (SFS 6001 2018, 147)

Aine	Keskimäärin Ωm	Tavallisimmat vaihteluvälit Ωm
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...10000
Järvi- ja jokivesi	250	100...400
Pohja-, kaivo- ja lähdevesi	50	10...150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1...5

Liite 5. Maadoituselektrodin tyypillisiä resistanssiarvoja pituuden ja maaperän resistiivisyyden funktiona (SFS 6001 2018, 124)



Liite 6. Vaakamaadoituselektrodin maadoitusimpedanssin laskentatyökalu

Maasulku tarkastelupisteessä				Maasulku vasta-asemalla					
Elektrodin osa	L / m	$\rho / \Omega\text{m}$	Z_e / Ω	Elektrodin osa	L / m	$\rho / \Omega\text{m}$	Z_e / Ω		
1.	100	400	13,0557	6.	400	10000	94,3473		
2.	150	1500	9,5090	5.	200	3000	34,4306		
3.	50	200	5,4881	4.	150	2500	21,9746		
4.	150	2500	5,0443	3.	50	200	8,4387		
5.	200	3000	4,6366	2.	150	1500	6,9846		
6.	400	10000	4,4355	1.	100	400	4,9141		
7.			TYHJÄ				TYHJÄ		
8.			TYHJÄ				TYHJÄ		
9.			TYHJÄ				TYHJÄ		
10.			TYHJÄ				TYHJÄ		
	1050		4,4355		1050		4,9141		
								Huonompi tulos	2x
								4,9141	9,828

Laske

Tämä arvo lisätään tarkasteltavana olevan ja vasta-aseman muuntamo solmujen maadoituksiin. Laskenta saadaan suoritettua kerralla molemmista suunnista.