



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

VOIMAJOHDON PYLVÄSMAA- DOITUSTEN SUUNNITTELUN TYÖKALUJEN JA MENETELMIEN KEHITTÄMINEN

Rejlers Finland Oy

TEKIJÄ: Jarkko Pekkanen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Jarkko Pekkanen	
Työn nimi Voimajohdon pylväsmaadoitusten suunnittelun työkalujen ja -menetelmien kehittäminen	
Päiväys 11.6.2019	Sivumäärä/Liitteet 40/2
Ohjaaja(t) Yliopettaja Juhani Rouvali, Lehtori Timo Savallampi, Palvelupäällikkö Niklas Löf, Asiantuntija Timo Keskitalo	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Rejlers Finland Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tässä opinnäytetyössä kehitettiin maaperän resistiivisyysmittauksien ja pylväsmaadoitusten suunnittelun prosessia keskittyen parantamaan yrityksen jo olemassa olevaa mallia. Työn tilaajana toimi Rejlers Finland Oy.</p> <p>Prosessin kehittämisessä keskityttiin ottamaan oppia yrityksen 2018 kesällä tekemistä maaperän resistiivisyysmittauksista sekä sitä seuranneena syksynä suoritettua pylväsmaadoitusten suunnittelusta. Näiden prosessien havaitut ongelmatkohtat pyrittiin ratkaisemaan sekä parantamaan kokonaisuuden kustannustehokkuutta voimajohdon esi- ja yleissuunnittelun osana. Kustannustehokkuutta lähdettiin parantamaan yksinkertaistamalla prosessia sekä karsimalla turhia välivaiheita. Maaperän resistiivisyysmittauksissa otettiin käyttöön Excel-taulukkolaskentaohjelmalla toteutettu mittauspöytäkirja, joka saatiin liitettyä suoraan MicroStation piirto-ohjelmistolla toteutettuun maadoituspöytäkirjaan.</p> <p>Tämän opinnäytetyön tuloksena tuotettiin kaksi erillistä ohjeistusta maaperän resistiivisyysmittauksia ja pylväsmaadoitusten suunnittelua varten. Näiden ohjeistusten tarkoituksena on selkeyttää, nopeuttaa ja yksinkertaistaa molempien prosessien työvaiheita. Ohjeistukset on tarkoitettu ottaa käyttöön kesällä 2019 aloitettavilla voimajohtojen esi- ja yleissuunnitteluprojekteissa.</p>	
Avainsanat Voimajohto, pylväsmaadoitus, maaperän resistiivisyysmittaus, maadoitussuunnittelu	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Jarkko Pekkanen			
Title of Thesis Developing Powerline Tower Earthing Designing Tools and Methods			
Date	11.6.2019	Pages/Appendices	40/2
Supervisor(s) Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer, Mr. Timo Savallampi, Senior Lecturer. Mr. Niklas Löf, Service manager, Mr. Timo Keskitalo, Specialist			
Client Organisation /Partners Rejlers Finland Oy			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to develop the processes of soil resistivity measurements and tower earthing designing with the intent to improve upon the company's pre-existing model. The thesis was commissioned by Rejlers Finland Oy.</p> <p>The focus of developing was put on learning from the company's previous soil resistivity measurements from the summer of 2018 and tower earthing designing from the following autumn. An attempt was made in resolving the observed problematics and improving the cost effectiveness of these processes as a part of preplanning and general planning phases of powerline designing. The cost effectiveness was improved by simplifying the processes and eliminating unnecessary phases. The new soil resistivity measurements records were implemented with Excel-spreadsheet that could be attached straight to an earthing record drawn with MicroStation CAD software.</p> <p>As a result of this thesis, two individual instructions were developed for both soil resistivity measurements and tower earthing designing. The main objective of these instructions was to clarify, speed up and simplify the work phases of both processes. The instructions are meant to be taken into use during preplanning and general planning phases of powerline projects that will start in the summer of 2019.</p>			
Keywords Powerline, tower earthing, soil resistivity measurement, earthing planning			

ESIPUHE

Tässä opinnäytetyössä on perehdytty voimajohdon pylväspaikkojen maaperän resistiivisyysmittaukseen sekä pylväspaikkojen maadoitussuunnitteluun. Työn tilasi Rejlers Finland Oy ja tein töitä sen parissa 2019 keväällä. Toivon, että opinnäytetyöni parantaa nykyisiä menetelmiä ja mahdollistaa laadukkaamman ja kustannustehokkaamman maadoitussuunnittelun tulevilla voimajohtoprojekteilla.

Aivan aluksi haluaisin kiittää Rejlers Finland Oy:tä ensiluokkaisesta opinnäytetyön aiheesta sekä mahdollisuudesta työskennellä mielenkiintoisten projektien parissa sen tekemisen ohella. Minun pitää erityisesti myös kiittää opinnäytetyöni ohjaajia Juhani Rouvalia, Niklas Löfiä ja Timo Keskitaloa. Ilman heidän kattavaa opastustaan ja neuvoja tämä opinnäytetyö olisi tuskin koskaan tullut valmiiksi.

Kuopiossa 13.5.2019

Jarkko Pekkanen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	7
1.1	Rejlers Finland Oy	7
1.2	Työn tavoitteet	8
1.3	Työn toteutuksen vaiheet.....	8
1.4	Lyhenteet ja määritelmät	9
2	VOIMAJOHDON SUUNNITTELU.....	10
2.1	Alustava reittisuunnittelu.....	10
2.2	Ympäristöselvitys	10
2.3	Yleissuunnittelu.....	11
2.3.1	Maastotutkimukset.....	11
2.3.2	Pylväiden sijoitussuunnittelu.....	11
2.4	Lunastus- ja korvausmenettely	12
2.5	Rakentaminen.....	13
3	PYLVÄSMAADOITUSTEN SUUNNITTELUN VAIHEET	14
3.1	Maaperän resistiivisyysmittaukset.....	14
3.1.1	Wenner-menetelmä.....	15
3.1.2	Schlumberger-Palmer -menetelmä	15
3.2	Maadoitusten suunnittelu	16
3.3	Maadoitusten suunnitteluun vaikuttavat standardit, määräykset ja yleiset ohjeet	20
3.3.1	SFS-EN 50341–1:2014 sekä 50341–2-7:2015	20
3.3.2	SFS 6001:2018	23
3.3.3	Viestintävirasto 43 F/2015 M.....	23
3.3.4	VHV-ohjeet ja ITU-T suositukset.....	24
3.4	Vaara- ja häiriöjänniteselvitykset.....	25
3.4.1	Maadoituspotentiaalitarkastelu	25
3.4.2	Induktiovaarajänniteselvitys	26
3.5	Maadoitusresistanssimittaukset	26
3.6	Pylväsmaadoitusten dokumentointi.....	28
4	MAAPERÄN RESISTIIVISYYSMITTAUKSIEN KEHITTÄMINEN	29
4.1	Maaperän resistiivisyysmittauksien lähtötilanne.....	29
4.1.1	Yrityksen aikaisempiin mittauksiin perustuvat kehityskohteet	29

4.2	Tavoite	30
4.3	Suunnittelun ja mittauksien uudelleen organisointi	30
4.4	Käytössä oleva mittauslaitteisto	31
4.4.1	Chauvin-Arnoux CA6470N	31
4.5	Mittausten dokumentoinnin kehittäminen	31
4.5.1	Excel-pöytäkirjapohja	31
4.6	Maadoituspöytäkirjojen kehittäminen	32
4.6.1	Piirtäminen AutoCadilla	32
4.6.2	Piirtäminen MicroStationilla	33
4.7	Kustannustehokkuus	33
4.8	Ohjeistus maaperän resistiivisyysmittauksiin	33
5	MAADOITUSSUUNNITTELUN KEHITTÄMINEN	34
5.1	Maadoitussuunnittelun lähtötilanne	34
5.2	Tavoite	34
5.3	Kustannustehokkuus	34
5.4	Henkilöturvallisuus	36
5.5	Ohjeistus maadoitussuunnitteluun	37
6	POHDINTA	38
6.1	Opinnäytetyön hyödyt	38
6.2	Maadoitussuunnittelun tulevaisuus	38
7	YHTEENVETO	39
8	LÄHDELUETTELO	40
	LIITE 1: VANHA MAADOITUSSUUNNITELMA	41
	LIITE 2: UUDEN MAADOITUSSUUNNITELMAN PROTOTYYPPI	42

1 JOHDANTO

Pylväsmaadoitusten suunnittelun teoria on lähes muuttumattomana siitä lähtien kun Suomeen rakennettiin 30-luvulla ensimmäisiä voimajohtoja. Maadoitussuunnittelua on viety viimeaikoina yksinkertaisempaan suuntaan, vaikka teoriassa monimutkaisempien laskelmien toteuttaminen olisi nykyteknologialla helpompaa. Pylväsmaadoitusten suunnittelun määrittelevät standardit ovat muuttuneet ajan kanssa ja niidenkin suhteen on liikuttu osittain vapaampaan suuntaan. Nämä molemmat muutokset johtuvat todennäköisesti siitä, että on ymmärretty maaperän koostumuksesta ja asennettavista maadoituksista resurssien pylväsmaadoitusresistanssin olevan parhaimmillaan valistuneen arvauksen luokkaa hyvin tehtyjen mittaustenkin jälkeen.

Maadoitussuunnittelun tärkeys tulee korostumaan tulevaisuudessa kasvavan tehonsiirron tarpeen vuoksi, sillä se tulee johtamaan suurempiin oikosulkuvirtoihin. Suuremmat oikosulkuvirrat tarkoittavat vuorostaan maasulkuvirtojen kasvua, eli maadoitusten oikeaoppinen mitoittaminen tulee olemaan jatkuvasti kriittisempää henkilöturvallisuuden takaamiseksi.

1.1 Rejlers Finland Oy

Rejlers Finland Oy on osa ruotsalaista Rejlers AB-yhtiötä, ja se tarjoaa monipuolisia insinööripalveluja energian, teollisuuden, rakentamisen sekä infran asiakaskunnille. Rejlers Finland on aloittanut toimintansa Suomessa vuonna 1980 ja nykyään yrityksellä on aktiivista toimintaa 19 paikkakunnalla ja se työllistää vuonna 2019 jo yli 700 työntekijää. Rejlers-konsernin Suomen yhtiöiden liikevaihto vuonna 2017 oli noin 48,6 miljoonaa euroa. (Rejlers Finland Oy, 2018)

Rejlers Finlandin sähköverkkojen yksikkö on keskittynyt tarjoamaan kattavaa palvelua kanta-, alue- ja jakeluverkkoyhtiöille. Suomessa toimivista 92 sähköverkon haltijasta noin 60 on ollut tähän mennessä yksikön asiakkaana. (Energiavirasto, 2018) Yksikössä työskentelee yli 90 työntekijää erilaisten vastuutehtävien parissa kaikilla Rejlers Finlandin toimistoilla. Sähköverkkojen yksikkö on ollut mukana muun muassa Olkiluodon 400 kV voimajohtojen muutosten HSEQ-valvonnassa (Rejlers Finland Oy, 2018).

1.2 Työn tavoitteet

Rejlers Finlandin sähköverkkojen yksikkö on laajentanut vuonna 2018 toimintaansa voimajohtojen suunnittelun, rakennuttamisen valvonnan sekä asiantuntijapalveluiden suuntaan kyetäkseen tarjoamaan entistä kokonaisvaltaisempia palveluita sähköverkkoyhtiöille. Tämän vuoksi yrityksellä on kasvava tarve saada käyttöönsä toimivia ja kustannustehokkaita malleja voimajohtojen esi- ja yleissuunnittelun vaiheita varten. Yleissuunnittelun yhtenä henkilöturvallisuuden kannalta tärkeimpänä osa-alueena on voimajohdon pylväsmaadoitusten suunnittelu. Yrityksellä oli tarve kehittää mittauksien ja suunnittelun prosesseja tehokkaammiksi henkilöturvallisuutta vaarantamatta. Tämän vuoksi oli ensiluokkaisena tärkeää että opinnäytetyössä saatiin luotua yritykselle kustannustehokas paletti, jonka avulla voidaan toteuttaa suunnittelu toivotulla tavalla.

Työn tavoitteena oli luoda kokonaisvaltainen prosessi pylväsmaadoitusten suunnittelun pohjaksi, jota voidaan soveltaa jatkossa erilaisten voimajohtojen yleissuunnittelun tukena kustannustehokkaasti ja turvallisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa sisäisten ohjeiden luomista pylväsmaadoitusten resistiivisyyksien mittausten sekä pylväsmaadoitusten suunnittelun vaiheista. Lisäksi suunnittelua varten oli luotava laskentataulukot, jotka vähentävät manuaalisen työn määrää. Opinnäytetyössä oli myös tavoitteena tutkia, miten nykyaikaisia digitalisaatio-menetelmiä voitaisiin jatkossa käyttää pylväsmaadoitusten suunnittelun tukena.

Tavoitteena on saada opinnäytetyö valmiiksi viimeistään vuoden 2019 toukokuun loppuun mennessä, sillä tämän opinnäytetyön tuotokset on tarkoitus ottaa käyttöön saman vuoden kesällä lumien sulettua.

Opinnäytetyöstä rajattiin aihepiirin laajuuden vuoksi pois seuraavat asiat:

- Maaperän resistiivisyyksimittausmenetelmien soveltuvuuden vertailu
- Induktiovaarajänniteselvityksen prosessien kehittäminen
- Maadoitusjänniteraportin prosessien kehittäminen
- Maadoitussuunnitelmien karttojen piirtämisen prosessi.

1.3 Työn toteutuksen vaiheet

Työ toteutettiin kolmessa päävaiheessa. Ensimmäinen vaihe oli kesällä 2018 tehdyt maaperän resistiivisyyksimittaukset joiden aikana kerättiin käytännön kokemusta maastossa suoritettavista mittauksista sekä kehitysideoita niiden tarkkuuden ja nopeuden parantamisesta. Toisessa vaiheessa kehitettiin toimistolla suoritettavia työvaiheita ja pohdittiin, kuinka maastossa suoritettavia mittauksia sekä niiden dokumentointi saataisiin digitalisoitua. Asiantuntijahaastatteluista sekä aihepiiriä koskevasta kirjallisuudesta saatiin suurin osa lähtötiedoista joita opinnäytetyössä käytettiin. Lisäksi tässä vaiheessa kehitettiin laskentamallit pylväsmaadoitusten suunnittelun tueksi. Näiden lisäksi luotiin ohjeistukset maaperän resistiivisyyksimittauksiin sekä pylväsmaadoitusten suunnitteluun. Kolmannessa vaiheessa kaikki aikaisemmissa vaiheissa tehdyt työt viimeisteltiin ja niistä muodostettiin tämä opinnäytetyö.

1.4 Lyhenteet ja määritelmät

J-lenkki	Voimajohdon pylvään perustuksen alle vietävä maadoitusköysi
Perusmaadoitus	Pylväspaikalla tehtävä standardin vaatima minimi maadoitus sisältää J-lenkit sekä pylväsalkojen välissä kulkevan maadoitusköyden
Maaperän resistanssi	Maaperän yhden pisteen mitattu resistanssin arvo
Maaperän resistiivisyys	Maaperän mitatusta resistanssista laskemalla arvioitu teoreettinen maaperän resistanssi 1 m pitkälle ja poikkipinta-alaltaan 1 m ² maasyliinterille
Maadoitusresistanssi	Maadoituksen rakentamisen jälkeen mitattu pylväspaikan maadoitusten todellinen resistanssin arvo
Takaisku	Voimajohdon vaihe/vaiheet ovat sähköisessä yhteydessä pylväspaikan maadoitukseen, johtuu tyypillisesti salamaniskusta aiheutuneesta maadoituspotentiaalin muutoksesta
Maasulkuvirta	Voimajohdon vikapaikassa esiintyvä vikavirta
Maavirta	Pylväspaikalta maaperään johtuva virta
YVA-menettely	Ympäristövaikutusten arviointimenettely jolla määritellään projektin vaikutukset ympäristöön lain määrittelemällä tavalla
Reduktiokerroin	Ukkosjohtimien aiheuttaman virranjakautumisen kerroin maasulussa
ITU	International Telecommunication Union
U_{tp1-4}	Sallittu kosketusjännite eri lisä resistanssien arvoilla
U_{D1-4}	Pylväspaikalla esiintyvä kosketusjännite eri lisäresistanssien arvoilla
KJ-johto	Keskijännitejohto
PJ-johto	Pienjännitejohto
Voimajohto	110-400 kV jännitteellä toimiva sähkönsiirtoverkon johto

2 VOIMAJOHDON SUUNNITTELU

Voimajohdolla tarkoitetaan sähkönsiirrossa pääsääntöisesti pitkillä etäisyyksiä käytettävää ilmassa kulkevaa avojohtoa jonka jännitetaso on vähintään 110 kV. Yleisimpiä syitä voimajohdon rakentamiseen tai uusimiseen ovat esimerkiksi tarve kasvattaa sähköverkon tehonsiirtokykyä, vähentää alemmasta jännitetasosta aiheutuvia tehohäviöitä, kasvattaa siirtoverkon käyttövarmuutta tai liittää voimajohdolla verkkoon uusi liittyyjä.

Maaperän resistiivisyyssmittaukset ja pylväsmaadoitusten suunnittelu ovat osa voimajohdon esi- ja yleissuunnittelua. Tässä kappaleessa käydään lyhyesti läpi voimajohdon suunnittelun vaiheita, jotta saadaan parempi yleiskäsitys siitä, miten nämä vaiheet ovat osa laajempaa kokonaisuutta. Voimajohtohankkeet saattavat venyä joskus useampi vuotisiksi ja osa niiden suunnittelun vaiheista suoritetaan usein ennen koko projektin investointipäätöstä, tästä huolimatta voimajohtojen suunnittelu etenee pääsääntöisesti samassa järjestyksessä. Osa alla listatuista vaiheista jää puuttumaan jos kyseessä on saneerattava voimajohto.

2.1 Alustava reittisuunnittelu

Tämä vaihe koskee vain uusia voimajohtoja, sillä uusittavilla voimajohdoilla on tyypillisesti jo lunastettu johtokatu. Alustavassa reittisuunnittelussa määritetään johdon alku- ja loppupää, sekä aina vähintään kaksi eri reittivaihtoehtoa niiden välille. Tässä vaiheessa pyritään muodostamaan käsitys eri mahdollisuuksista voimajohdon reiteille sekä toteutustavoille, nämä reittivaihtoehdot käydään läpi eri viranomaisten kanssa, kuten ELY, museovirasto, maakuntaliitto sekä kunta/kaupunki jonka alueelle johto rakennetaan. Alustavien reittisuunnitelmien pohjalta päästään vertailemaan eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutuksia ympäristöön ja maankäyttöön sekä teknillistaloudellisia edellytyksiä. (Löf, 2018)

2.2 Ympäristöselvitys

Uusille 110 kV voimajohdoille tulee aina tehdä vähintään ympäristöselvitys, ja vain äärimmäisen harvoin tälle jännitetasolle vaaditaan ympäristövaikutuksen arviointia (YVA-menettely). YVA-menettely on lakiin ja asetuksiin pohjautuva ympäristölle vahinkoja ehkäisevä selvitys. Kevyemmän ympäristöselvityksen tarkoituksena on selvittää kuinka voimajohdon rakentaminen tulee vaikuttamaan seuraaviin asioihin:

- Ihmisten terveys, elinolot ja viihtyvyys
- Maaperä, vedet, ilma, ilmasto kasvillisuus, eliöt ja luonnon monimuotoisuus
- Yhdyskuntarakenne, rakennukset, maisema, kaupunkikuva ja kulttuuriperintö
- Luonnonvarojen hyödyntäminen sekä
- Näiden keskinäiset vuorovaikutussuhteet.

Ympäristön vaikutusten arviointimenettelyä tulee käyttää 220 kV ja yli olevissa voimajohtohankkeissa, joiden pituus ylittää 15 kilometriä. ELY-keskus tekee erikseen päätöksen alle 220 kV voimajohtojen YVA-menettelyn tarpeellisuudesta. (Fingrid Oy, 2016)

2.3 Yleissuunnittelu

Voimajohdon yleissuunnitteluvaiheessa siirrytään teoreettisista selvityksistä miettimään käytännön ratkaisuja. Suunnittelun yhtenä lähtökohtana on minimoida sen sijoituksesta sekä rakentamisesta aiheutuvat haitat maanomistajille, ympäristölle sekä yleiselle maankäytölle. Yleissuunnittelussa selvityksen alla ovat niin voimajohdon reitille sijoittuvat maanomistajat, pylväiden sijoittaminen, niiden tyyppi, rakenne sekä maaperä johon ne ollaan sijoittamassa. (Fingrid Oy, 2016)

2.3.1 Maastotutkimukset

Uusilla voimajohdoilla maastotutkimuksia varten on pääsääntöisesti hankittava tutkimuslupa maanmittauslaitokselta. Maastotutkimusten alkaessa maanomistajalle on ilmoitettava viimeistään 7 vuorokautta ennen kuin hänen maillaan aletaan tutkimaan voimajohdon reittiä. Maastotutkimukset voidaan aloittaa jo ympäristöselvityksen aikana. Maastotutkimusten perusteella suunnitellaan lopullinen voimajohdon reitti, sekä pylväspaikkojen sijainnit. Lisäksi maastotutkimuksissa kartoitetaan kaikki risteävät kohteet voimajohdon reitin varrelta, kuten tiet, ojat, pienjännite-, keskijännite- ja puhelinjohdot. Maanomistajalla on tässä vaiheessa vielä mahdollisuus esittää mielipiteensä voimajohdon sijoittamisesta (ainakin Fingridin projekteissa). Alan yleisenä käytäntönä on maksaa tutkimuksista aiheutuneet vahingot maanomistajalle. (Fingrid Oy, 2016)

2.3.2 Pylväiden sijoitussuunnittelu

Pylväiden sijoitussuunnittelussa pyritään optimoimaan pylväiden lukumäärä siten, ettei johdon riippuma ylitä standardin määrittämää turvarajaa johtimien etäisyydestä maanpintaan tai toisiin voimajohtoihin. Sijoitussuunnittelussa on kuitenkin otettava huomioon pylvään molemmilla puolilla olevien johtojen mitat, sillä merkittävä poikkeama niissä aiheuttaa suurempia vaatimuksia pylvään rakenteelliselle kestävyydelle. Lisäksi on otettava huomioon pylväiden perustusten rakentamisesta aiheutuvat kustannukset. Esimerkiksi joissain tilanteissa voi olla kustannustehokkaampaa sijoittaa kaksi pylvästä suon laidoille kuin yksi pylväs keskelle suota. Kun nämä kaikki suunnitteluun vaikuttavat asiat otetaan huomioon, saadaan suunniteltua teknillistaloudellisesti järkevä määrä pylväitä, eli todennäköisesti myös edullisin rakenne voimajohdolle. Pylväiden lopulliseen sijoitukseen vaikuttaa myös ensin maastoon profiilia mittaamaan menneen ryhmän havainnot ja toiseksi pylvään perustuksia rakentavan ryhmän havainnot. Jälkimmäinen ryhmä voi siirtää pylvään paikkaa noin 2 metrillä johdon suuntaisesti. (Löf, 2018)

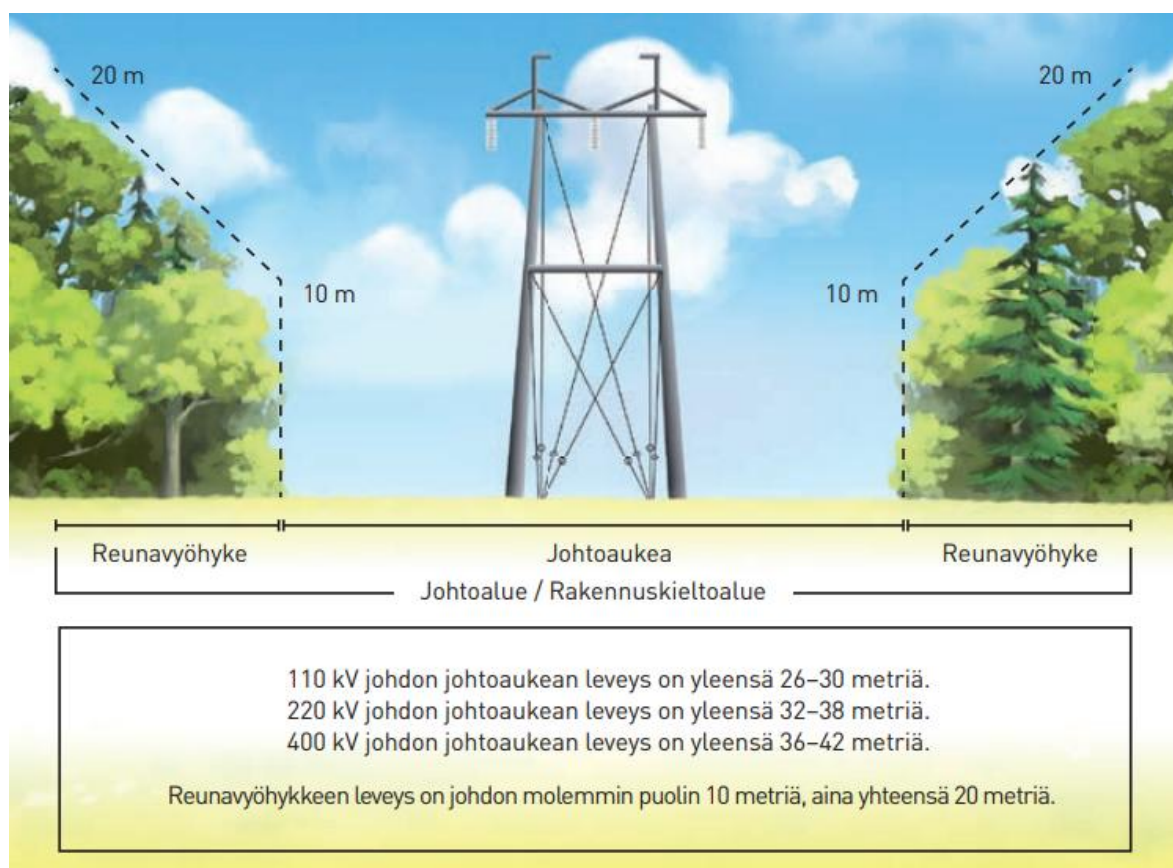
2.4 Lunastus- ja korvausmenettely

Yleisenä käytäntönä voimajohtaja rakennettaessa on yrittää saada maanomistajilta etukäteen suostumus voimajohdon rakentamiselle. Jos kaikkien maanomistajien kanssa saadaan tehtyä sopimukset, maanmittauslaitos käsittelee lunastuslupahakemuksen, kun taas ilman sopimuksia lunastuslupahakemuksen käsittely kuuluu valtioneuvostolle. Kun hakemus on valtioneuvostolla käsiteltävänä, viranomaisilta, kunnilta ja niiltä asianosaisilta, joilta voimajohdon rakennuttaja ei ole saanut suostumusta pyydetään lausunto tai heidät kutsutaan lunastuslain mukaisesti järjestettyyn kuulemiskokoukseen. Kun näiden asianomaisten lausunnot on kerätty, voimajohdon rakentajalta pyydetään vastine. Lopuksi valtioneuvosto myöntää tai on myöntämättä lunastuslupaa. Tästä päätöksestä voi vielä valittaa korkeimpaan hallinto-oikeuteen. Lunastuslupa antaa voimajohdon rakennuttajalle johtoalueen käyttöoikeuden, joka mahdollistaa voimajohdon rakentamisen, käytön ja kunnossapidon. Voimajohdon alle jäävät maa-alueet ja muu omaisuus pysyvät kuitenkin maanomistajan omistuksessa.

Voimajohdon rakennuttaja kompensoi maanomistajille voimajohdolle lunastamastaan maa-alueesta lunastustoimikunnan määräämän korvaussumman. Ennakkokorvauspäätöksestä ei ole valitusoikeutta. Lopullinen korvaus voidaan määrittää vasta voimajohdon valmistuttua. Ennen sitä maanomistajilla on mahdollisuus esittää korvausvaatimuksensa menetyksistään lunastustoimikunnalle. Loppukokouksessa lunastustoimikunta esittää korvauspäätöksensä perusteluineen. Voimajohdosta maksettava korvaus koostuu nykyään kuvassa 1 esitetyistä kolmesta kokonaisuudesta. Voimajohdon rakennuttajat maksavat nykyään pääsääntöisesti saman täyden hinnan kuvan 2 mukaisesta varsinaisesta johtoreitistä sekä puuston kasvua rajoittavasta reuna-alueesta. (Fingrid Oy, 2016)



KUVA 1. Lunastuslain mukaisen täyden korvauksen osa-alueet (Fingrid Oy, 2016)



KUVA 2. Voimajohdon johtoalue (Fingrid Oy, 2016)

2.5 Rakentaminen

Voimajohdon rakennustyöt voidaan aloittaa, kun rakennuttaja on tehnyt investointipäätöksen voimajohdon rakentamisesta, tämän lisäksi voimajohtoreitti on oltava jo vähintään ennakkohaltuunotettu. Itse voimajohdon rakentamisessa on monta eri vaihetta, ja joskus näiden vaiheiden välillä saattaa esiintyä pidempiäkin taukoja. Pääsääntöisesti voimajohdon rakentaminen alkaa pylväspaikkojen maadoitusten sekä perustusten rakentamisesta. Näiden rakentamisen jälkeen pylväät kasataan ja pystytetään, jonka jälkeen johtimet asennetaan paikoilleen. Voimajohdon rakentamisessa on huomattavasti aikaisemmin kuvailtua enemmän työvaihetta, mutta niihin ei paneuduta tässä opinnäytetyössä. (Löf, 2018)

3 PYLVÄSMAADOITUSTEN SUUNNITTELUN VAIHEET

Pylväsmaadoitusten suunnittelussa on kaksi päävaihetta. Näistä ensimmäinen vaihe on maaperän resistiivisyysmittaukset, joilla kerätään informaatiota jokaiselle pylväs paikalle tulevien maadoitusten vaikutusalueella olevasta maaperän resistiivisyydestä. Kun nämä kaikki resistiivisyysmittaukset saadaan suoritettua, voidaan niiden pohjalta suunnitella pylväs paikoille maadoitukset. Näiden kahden päävaiheen jälkeen tehtäväksi jää enää maadoitussuunnitelmien piirtäminen ja dokumentointi.

3.1 Maaperän resistiivisyysmittaukset

Maaperän resistiivisyysmittauksia suoritetaan, jotta saadaan selville teknillistaloudellisesti kannattava tapa toteuttaa maadoitus pylväs paikalle. Mittaustavoilla saadaan selville maaperän tietyn mitatun pisteen resistanssiarvo ja eri syvyyksistä mitatuilla resistanssin arvoilla voidaan laskea keskimääräinen pylväs paikan resistiivisyys. Maaperän resistiivisyyden arvo on teoreettinen maaperän resistanssi 1 m pitkälle ja poikkipinta-alaltaan 1 m² maasynterille. Maaperän resistiivisyyden (ρ) yksikkö on Ωm . Taulukossa 1 on esitettyä tyypillisiä resistiivisyyksiä eri maalajeille. Nämä arvot eivät ole kuitenkaan absoluuttisia, sillä saman mittausta paikan tulokset voivat vaihdella paljonkin kosteuden sekä lämpötilan vaikutuksesta.

Standardi vaatii maaperän resistiivisyysmittauksissa käytäväksi neljän piikin menetelmää. Wenner- ja Schlumberger-Palmer -menetelmät ovat yleisimmin käytössä olevat standardin vaatimuksen täyttävät mittausten menetelmiä. Käytännössä näiden kahden mittaustavan erona on mittauselektrodien keskinäinen asettelu sekä resistiivisyyden $\rho(\Omega\text{m})$ laskutapa. Wenner-menetelmä on näistä kahdesta laajemmin käytetty ja tunnetumpi. Wenner-menetelmän yksinkertaisempi laskukaava selittää osaltaan sen suosiota, sillä ennen taulukkolaskentaohjelmistojen yleistymistä resistanssit on pitänyt muuttaa resistiivisyyksiksi manuaalisesti. (Chauvin Arnoux Group, 2014) (SFS-EN 50341-1:2014, Liite H H.4.1)

TAULUKKO 1. Eri maalajien tyypillisiä resistiivisyyksiä (Chauvin Arnoux Group, 2014)

Maalaji	Resistiivisyys (Ωm)
Suo	2...30
Savimaa	20...100
Viljelymaa	10...150
Kalkkikivi	30...40
Saven sekainen hiekka	50...500
Kvartsihiekka	200...3000
Kivinen maasto	1500...3000
Ruohoisa kivimaasto	300...500
Pehmeä kalkkikivi	100...300
Murskattu kalkkikivi	500...1000
Liuskekivi	800
Murskattu graniitti ja hiekkakivi	1500...10000
Graniitti ja hiekkakivi	10000...30000

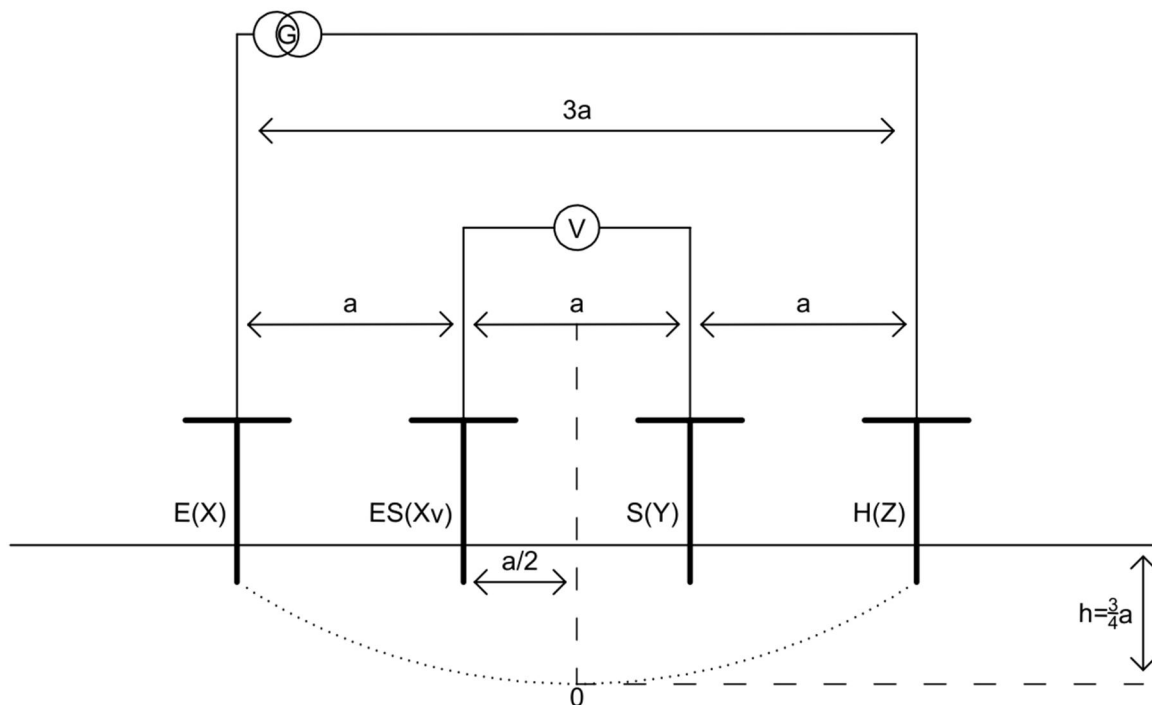
3.1.1 Wenner-menetelmä

Edellisessä kappaleessa mainituista maaperän resistiivisyysmittausmenetelmistä ensimmäinen on Wenner-menetelmä, jonka mittausperiaate esitellään kuvassa 3. Mittaamalla saadaan siis maaperän resistanssi pisteessä 0, joka on jännite- ja virtaelektrodien puolivälissä ja $\frac{3}{4}$ -osan syvyydessä etäisyydestä a . Wenner-menetelmällä mitattu maaperän resistanssi $R(\Omega)$ muutetaan resistiivisyydeksi $\rho(\Omega\text{m})$ kaavalla 1. (Chauvin Arnoux Group, 2014)

$$\rho = 2\pi a R \quad (1)$$

jossa

ρ	on	maaperän resistiivisyys
a	on	elektrodien väli
R	on	mitattu 0-pisteen maaperän resistanssi



KUVA 3. Wenner-menetelmän mittausperiaate

3.1.2 Schlumberger-Palmer -menetelmä

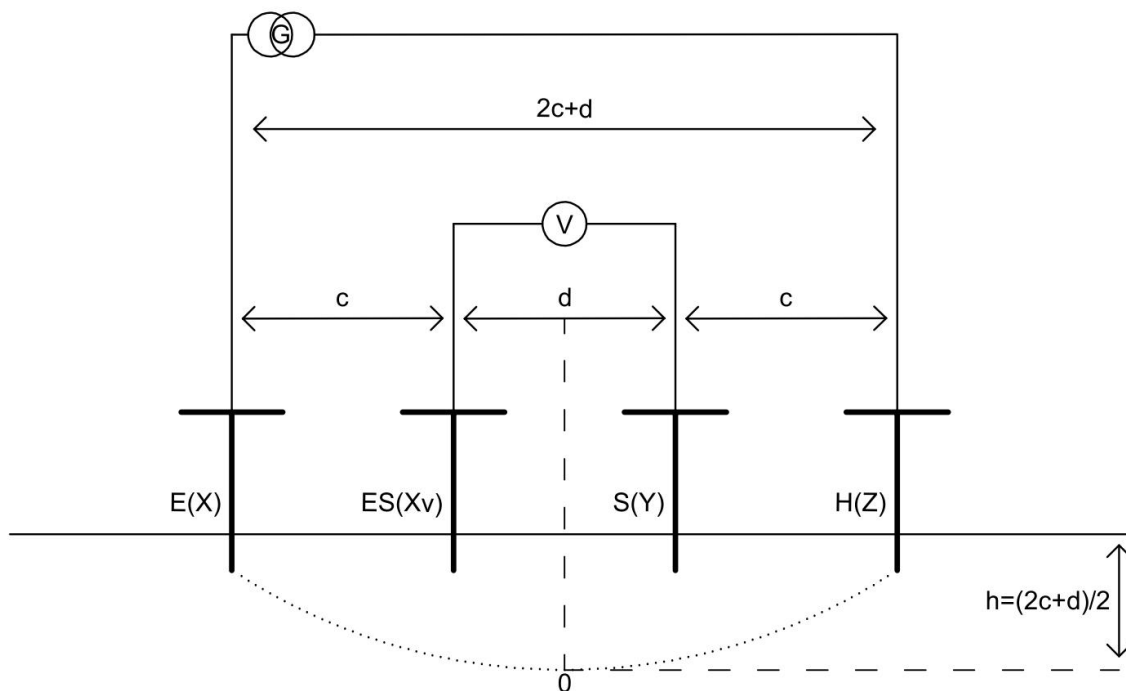
Schlumberger-Palmer -menetelmässä puolestaan jännite- ja virtaelektrodeja siirretään pareittain, pitäen niiden etäisyys c toisistaan vakiona ja kasvattaen välimatkaa d mittausten välillä. Kuvassa 4 esitetyllä mittaustavalla saadaan 0-kohdan resistanssi, joka on myös jännite- ja virtaelektrodien puolivälissä, syvyydessä, joka on puolet jännitepiikkien välisestä etäisyydestä. Schlumberger-Palmer -menetelmällä mitattu maaperän resistanssi (Ω) muutetaan resistiivisyydeksi (Ωm) kaavalla 2. (Chauvin Arnoux Group, 2014) (An American National Standard ANSI, 1983)

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d}$$

(2)

jossa

ρ	on	maaperän resistiivisyys
c	on	jännite- ja virtaelektrodiparien väli (vakio mittauksien ajan)
d	on	jännite-elektrodien etäisyys
R	on	mitattu 0-pisteen maaperän resistanssi



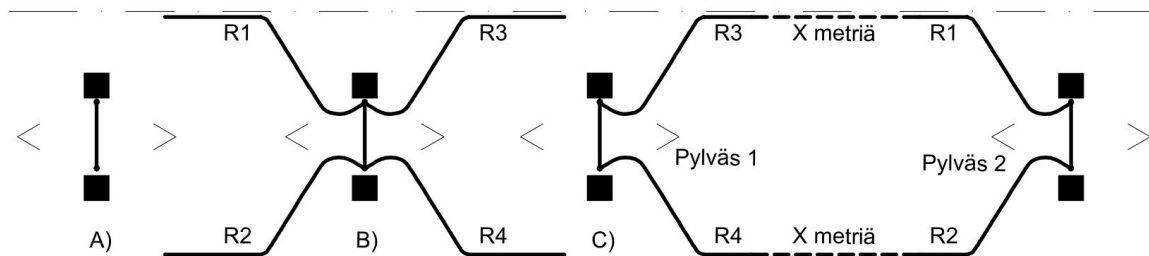
KUVA 4. Schlumberger-Palmer -menetelmä mittausperiaate

3.2 Maadoitusten suunnittelu

110 kV voimajohto on Suomessa pääsääntöisesti maadoitettu vain tiettyjen muuntajien tähtipisteiden kautta käyttäen noin 120 Ω resistanssia. Muuten 110 kV voimajohdot on maadoitettu lähes poikkeuksetta jokaiselta pylväspaikaltaan. Pylväsmaadoitusten tehtävänä on parantaa henkilöturvallisuutta pienentämällä pylvään maadoitus- ja kosketusjännitteitä. Pylväsmaadoitukset pienentävät myös pylvään potentiaalia salaman iskiessä ukkosjohtimiin. Tämä auttaa etenkin siinä, ettei salamanku aiheuta takaiskua. Lisäksi pylväsmaadoitukset parantavat maasulkusuojauksen toiminta-herkkyyttä ukkosjohtimilla varustetuilla voimajohdoilla ja mahdollistavat sen toiminnan ukkosjohtimettomilla voimajohdoilla.

110 kV voimajohdon pylväällä on aina oltava vähintään perusmaadoitus. Perusmaadoitus muodostuu pylvään perustuksista, niiden alle rakennettavasta "J-lenkistä", pylvään jalkoja yhdistävästä kupari-koödestä sekä haruksista ankkureineen. Jos perusmaadoituksen maadoitusresistanssi osoittautuu liian korkeaksi, pylvään kosketusjännitteet ovat myös korkeat. Tällöin käytetään lisämaadoituksia,

joita yleisesti rakennetaan enintään neljänä eri säteenä kulkemaan pylväspaikalta voimajohdon johdotkadun reunoja. Äärimäisissä tapauksissa saatetaan käyttää läpi meneviä maadoituksia, eli pylväiden maadoitukset yhdistetään toisiinsa paremman maadoitusresistanssin saamiseksi. Esimerkit näistä erilaisista vakiokäytännöistä löytyy kuvasta 5. (Elovaara & Haarla, 2011)



KUVA 5. Yleisten käytäntöjen mukaiset maadoitustavat: A) Perusmaadoitus, B) Perusmaadoitus ja 4 sädettä, C) Perusmaadoitukset ja läpimenevät maadoitukset

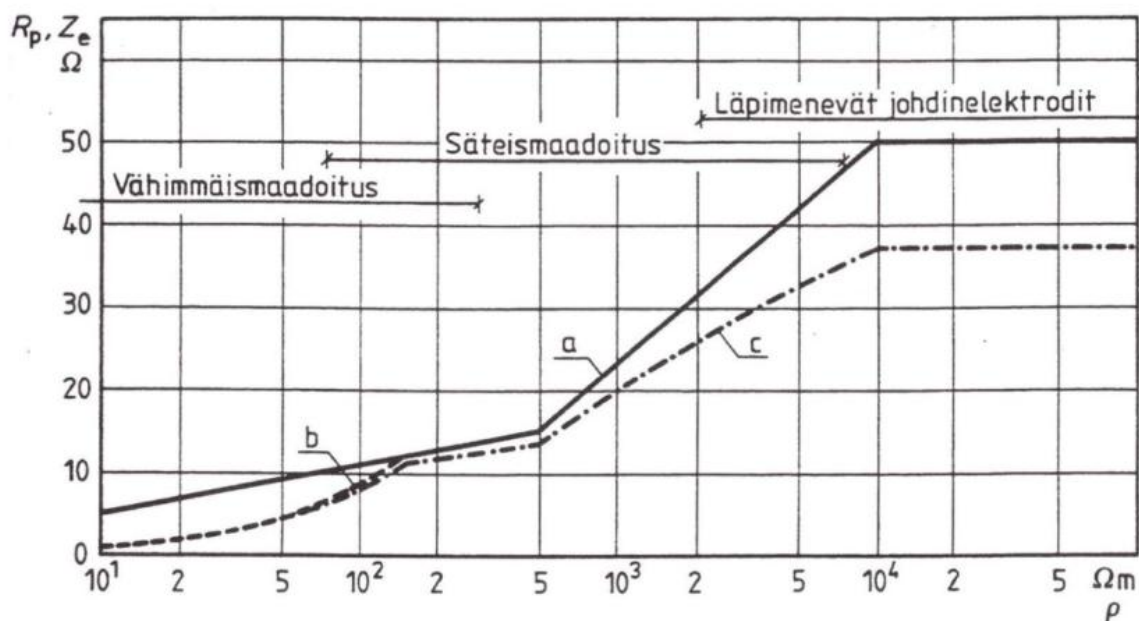
Aikaisemmin maadoitusten suunnittelussa on käytetty niin sanottua tarkkaa suunnittelun menetelmää, jossa asennettavan maadoituksen mittaa kasvatetaan 5 metrin välein pylväspaikan laskennallisen maadoitusresistanssin ylittäessä tavoitemaadoitusresistanssi. Tämä suunnittelumenetelmä on ollut perinteisillä työkaluilla todella aikaa vievä, joten Fingrid on kehittänyt yhdessä alan toimijoiden kanssa yksinkertaistetun menetelmän voimajohdon pylväspaikkojen maadoitusten suunnitteluun. Tämä yksinkertaistettu menetelmä otettiin myös Rejlersillä käyttöön. Menetelmässä pylväspaikan maaperän resistiivisuuden määrittämisen jälkeen valitaan taulukosta 2 resistiivisyyttä vastaava määrä sädettä. Jokainen yksittäinen säde on 40 m pitkä, ja aina kun asennetaan kaksi rinnakkaista sädettä, niiden päiden välille asennetaan myös yhdistyskupari, tämä auttaa takamaan maadoituksen eheyden ja toimivuuden vaikka maadoitusköysi katkeaisikin jostain kohtaa.

Yksinkertaistetussa maadoitussuunnittelumenetelmässä maadoitusresistanssia laskiessa maadoittavan kuparin määränä otetaan huomioon vain sädet ja 10 metriä perusmaadoituksesta. Tällöin laskennallinen maadoitusresistanssi on lähes aina mitattua suurempi, jolloin pylväspaikka on pääsääntöisesti turvallisempi.

Potentiaalintasauselektrodi on pylväspaikan välittömään läheisyyteen asennettava maadoituselektrodi, jonka tarkoitus on tasoittaa pylvään ja maaperän välinen potentiaaliero. Vaikka standardi suoraan ei sitä vaadikaan, suunnittelussa on tapana sijoittaa potentiaalintasauselektrodi yleensä pylväspaikoille, joilla oletetaan ihmisten mahdollisesti liikkuvan paljasjaloin tai viettävän pidempiä yhtenäisiä jaksoja pylvään läheisyydessä. Potentiaalintasauselektrodista otetaan huomioon 40 metriä maadoitusresistanssia laskiessa, mutta maadoituskuparia asennetaan arviolta 80 metriä. Maadoitussuunnittelussa on kuitenkin otettava huomioon yksittäiset pylväspaikat sekä niiden asettamat vaatimukset. (Kuusinen, 2018)

TAULUKKO 2. Maadoitusten mitoituksen määrittämiseen käytettävä taulukko

Maadoitussäteiden määrä	Resistiivisyys (Ωm)
Perusmaadoitus	-100
R1	100-300
R2	300-800
R3	800-2000
R4	2000-



Kuva 6. Tavoite maadoitusresistanssi maaperän resistiivisyyden funktiona (Elovaara & Haarla, 2011)

Pylväsrajojen tavoitemaadoitusresistanssin laskemiseen tehdystä kuvasta 6 määritettiin kaksi kaavaa Excel-tilukkolaskentaohjelman logaritmisista trendiviivoista käyttäen. Näillä kaavoilla saatiin lasketua tavoitemaadoitusresistanssi pylväsrajoille suoraan maaperän resistiivisyydestä käyttäen Excel-tilukkolaskentaohjelmistoa. Maaperän resistiivisyyden ollessa välillä $10 \Omega\text{m} - 500 \Omega\text{m}$ tavoitemaadoitusresistanssin laskemiseen käytetään kaavaa 3:

$$R_t = 2,5562 * \ln(\rho) - 0,8859 \quad (3)$$

Maaperän resistiivisyyden ollessa välillä $500 \Omega\text{m} - 10\,000 \Omega\text{m}$ tavoitemaadoitusresistanssin laskemiseen käytetään kaavaa 4:

$$R_t = 11,683 * \ln(\rho) - 57,607 \quad (4)$$

jossa

R_t on tavoite maadoitusresistanssi
 ρ on maaperän mitattu resistiivisyys

Maaperän resistiivisyyden ollessa yli 10 000 Ωm tavoitemaadoitusresistanssina käytetään 50 Ω vakioarvoa.

Kun maadoitussäteiden määrä on saatu päätettyä käyttäen taulukkoa 2, sitä vastaava maadoitusresistanssi voidaan laskea kaavalla 5, olettaen että maadoittaessa käytetään suoraa johdinta upotettuna vaakaan. Tätä kaavaa käyttäessä maadoitusjohtimen halkaisija tulee olla merkittävästi pienempi kuin maadoituksen upotussyvyys. Suomessa yleisesti käytössä oleva 25 mm² maadoituskuparin halkaisija on merkittävästi pienempi kuin yleinen 0,7 metrin upotussyvyys.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{L^2}{1,85 \cdot hd}\right) \quad (5)$$

jossa

ρ	on	maaperän mitattu resistiivisyys
L	on	maadoituskuparin mitta
h	on	maadoituksen upotussyvyys
d	on	maadoitusjohtimen halkaisija

Koska maadoitussäteitä asennetaan maahan rinnakkain, tulee maadoitusten suunnittelussa tiedostaa myös sen vaikutus maadoitusresistanssiin. Tämä vaikutus on esitettyä taulukossa 3 ja kuvassa 7. Taulukosta 3 saadaan Excelin suuntaviivatyökalun potenssikaavalla 6 approksimoitua maadoitussäteiden rinnakkaisuuden vaikutus maadoitusresistanssiin, tämä kaava on:

$$Y = 72,41 * X^{0,0771} \quad (6)$$

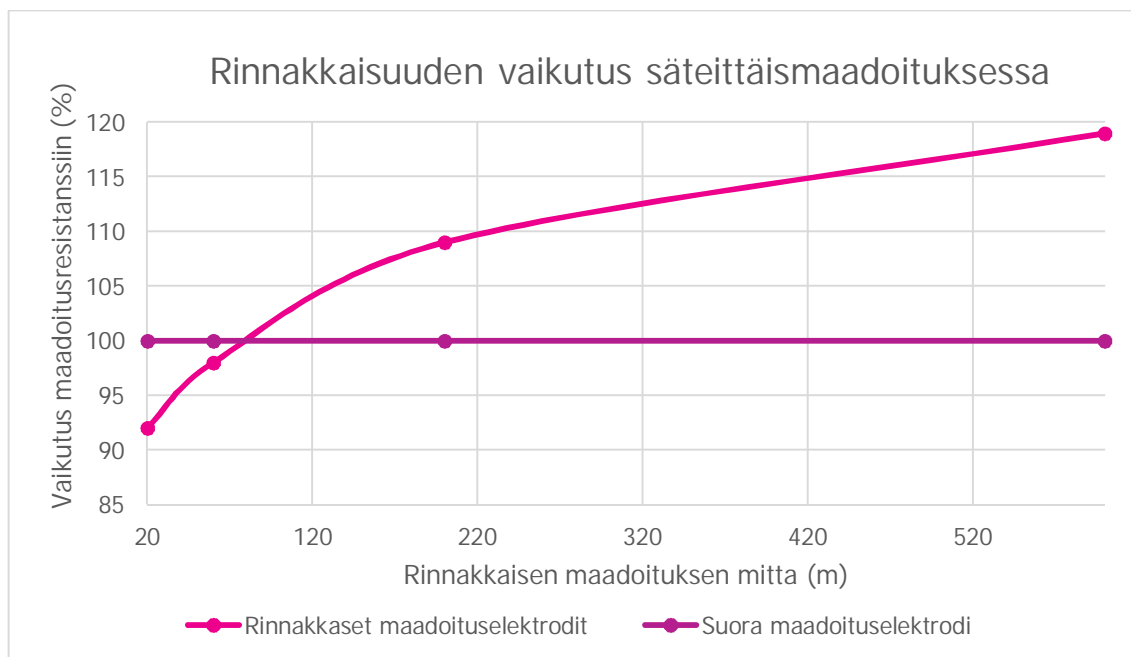
jossa

Y	on	rinnakkaisen maadoituksen prosentuaalinen vaikutus maadoitusresistanssiin
X	on	rinnakkaisen maadoituksen pituus

Kaavasta voidaan huomata, että esimerkiksi yleisen käytännön mukaisilla 40 m säteillä rinnakkaisten maadoitusten vaikutus on noin 1,5 prosenttia pienempi maadoitusresistanssi. Kyseessä on suhteessa merkityksetön muutos, eikä sitä oteta huomioon tällä hetkellä käytössä olevalla maadoitussuunnittelu menetelmällä. (Elovaara & Haarla, 2011)

TAULUKKO 3. Rinnakkaisten maadoitusten prosentuaalinen vaikutus maadoitusresistanssiin

Maadoituksen pituus	Maadoitusresistanssi rinnakkaiset säteet (%)	Maadoitusresistanssi yksi säde (%)
20	92	100
60	98	100
200	109	100
600	119	100



KUVA 7. Rinnakkaisuuden vaikutus säteittäismaadoituksessa

3.3 Maadoitusten suunnitteluun vaikuttavat standardit, määräykset ja yleiset ohjeet

Suurin määrittelevä tekijä pylväsmaadoitusten suunnittelussa on standardit. Ne määrittelevät rajat, joiden mukaan maadoitukset tulee suunnitella. Tämän vuoksi niihin tutustuminen on oleellista suunnittelun laadun ja henkilöturvallisuuden ylläpitämisessä ja kehittämisessä. Seuraavissa kappaleissa on käyty läpi eri huomioitavia standardeja ja niiden suunnitteluun vaikuttavia kohtia.

3.3.1 SFS-EN 50341-1:2014 sekä 50341-2-7:2015

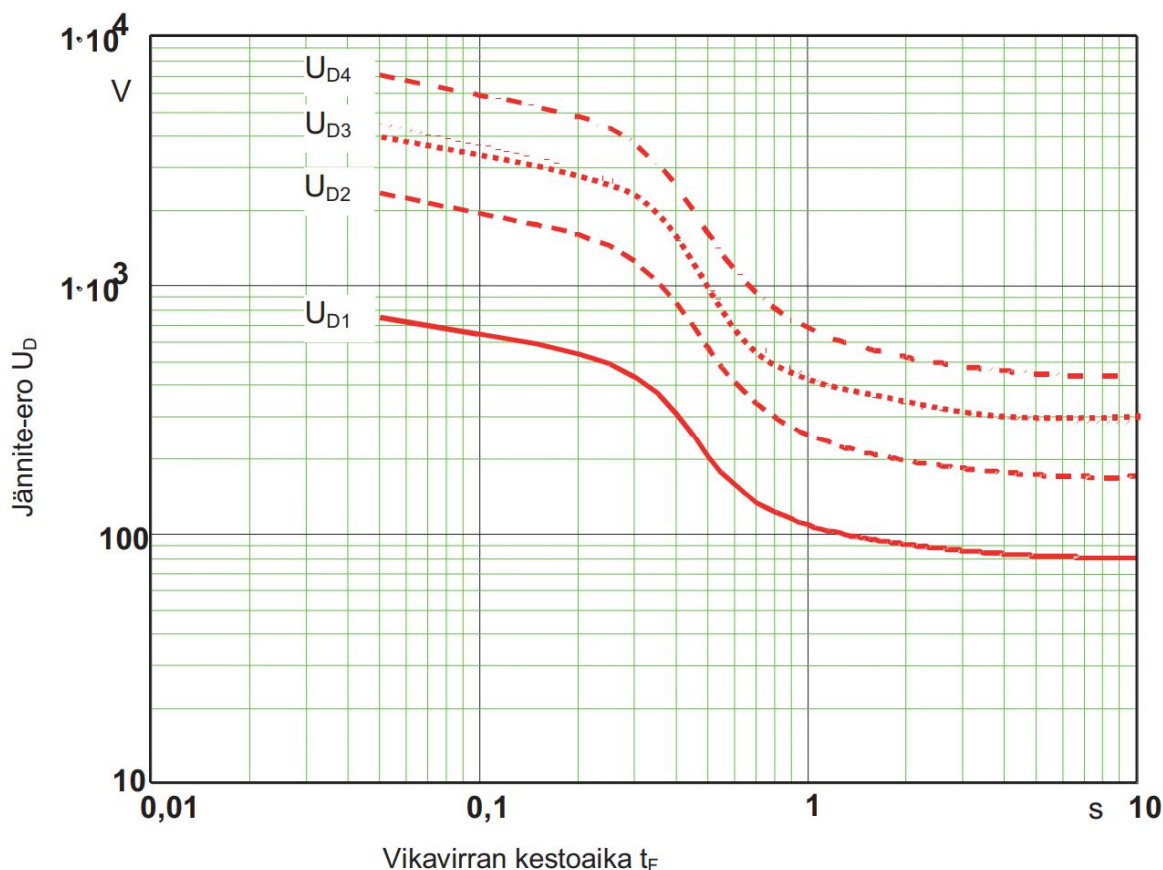
SFS-EN 50341-1:2014 Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt

Standardin kohdan 6 sekä liitteiden G ja H on tarkoituksena toimia ohjeina maadoitusjärjestelmien suunnittelun, asennuksen ja testauksen kriteereihin yli 1 kV vaihtosähköilmajohdoilla. Kolme lähtökohtaista vaatimusta käyttötaajuudella toimivien maadoitusten suunnittelulle ovat:

- Mekaanisen lujuuden sekä korroosionkestävyyden varmistaminen vähimmäismitat huomioon ottaen.
- Terminen kestävyys ylittää laskemalla määritellyn suurimman vikavirran.
- Henkilöturvallisuuden varmistaminen ottaen huomion myös maasulun aikana maadoituksissa esiintyvät jännitteet.

Näiden vaatimuksien lisäksi on vältettävä vahinkoja omaisuudelle sekä laitteille. Huomattavaa tässä sanamuodossa on se, ettei vahinkoja ole estettävä, mikä olisi teknillistaloudellisesta näkökulmasta mahdotonta. Standardissa ei määritellä, miten maadoitusten suunnittelussa pitäisi ottaa salamoiden vaikutus huomioon, sillä se on jokaisessa projektissa optimoitava asia.

Standardin kohdassa 6.4 määritellään käyrä U_{D1} , joka edustaa korkeinta sallittua kosketusjännitettä eri kosketuksen kestoajoilla siten, että jännitteen kulkureittinä on ihmiskeho paljaasta kädestä paljaaseen jalkaan. U_{D1} ei siis ota huomioon mahdollisia tai jopa todennäköisiä lisäresistansseja joita kengät tai muut varusteet ja vaatteet aiheuttavat. Nämä on otettu huomioon U_{D2} - U_{D4} käyrissä. Askeljännitteelle ei ole määritelty sallittuja arvoja, sillä sallitut arvot ovat lähtökohtaisesti suurempia kuin sallitut kosketusjännitteet. Tästä johtuen kosketusjännitevaatimukset täyttävää maadoitusta voidaan pitää lähtökohtaisesti turvallisena myös askeljännitteiden kannalta. Koska kaikki viat kytetään irti automaattisesti tai käsin sähköaseman suojalaitteilla, voimajohdoilla ei esiinny kestoajaltaan epämääräisiä maasulkuja.



KUVA 8. Sallitut kosketusjännitteet eri lisäresistansseilla sekä kestoajoilla (SFS-EN 50341-1)

Alla on kuvattu eri tilanteita, joissa kuvan 8 käyriä voidaan soveltaa.

" U_{D1} – sijaintipaikat, joilla ihmiset voivat oleskella paljain jaloin, kuten leikkikentät, uima-altaat, leirintäalueet, virkistysalueet ja niiden kaltaiset alueet. Huomioon ei oteta lisäresistansseja ihmiskehon lisäksi.

U_{D2} – sijaintipaikat, joilla voidaan kohtuudella otaksua, että ihmiset käyttävät kenkiä. Näitä ovat yleisten teiden jalkakäytävät, pysäköintialueet jne. Lisäresistanssina käytetään $1\,750\ \Omega$.

U_{D3} – sijaintipaikat joilla voidaan kohtuudella otaksua, että ihmiset käyttävät kenkiä ja että maan resistiivisyys on korkea, esim. $2\,000\ \Omega\ m$. Lisäresistanssina otetaan huomioon $4\,000\ \Omega$.

U_{D4} – sijaintipaikat joilla voidaan kohtuudella otaksua, että ihmiset käyttävät kenkiä ja että maan resistiivisyys on hyvin korkea, esim. $4\,000\ \Omega\ m$. Lisäresistanssina otetaan huomioon $7\,000\ \Omega$."

(SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2014)

Laskettavan maadoitusjännitteen U_E (V) tulee olla pienempi kuin sovellettava U_D arvo käytössä olevalla vikavirran laukaisujalla.

Maadoitusjännite saadaan kaavasta 7:

$$U_E = z_E I_E \quad (7)$$

jossa

I_E on maavirta
 Z_E on laskettu tai mitattu maadoitusimpedanssi

Maadoitusimpedanssi Z_E saadaan kaavasta 8:

$$Z_E = 0,25(z_s + \sqrt{z_s(4R_t + Z_s)}) \quad (8)$$

jossa

Z_s on ukkosjohtimien impedanssi yhden jänteen pituudelta
 R_t on pylvään maadoitusresistanssi

Maavirta I_E saadaan kaavasta 9:

$$I_E = r3I_0 \quad (9)$$

jossa

r on ukkosjohtimien reduktiokerroin
 I_0 on nollavirta vian aikana

Standardin kohdassa 6.5 määritellään maadoituksen dokumentoinnista ilmi tultavat asiat. Nimelliseltä käyttöjännitteeltään yli 45 kV vaihtojännitteisille ilmajohtoille pitää laatia maadoitus suunnitelma, jossa on esitetty seuraavat asiat:

- Elektroodin materiaali
- Elektroodin sijainti
- Haaroituskohdat
- Kaivuusyvytydet
- Mahdolliset käytetyt erikoistoimenpiteet sallittujen kosketusjännitteiden saavuttamiseksi

(SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2014)

SFS-EN 50341–2-7:2015 Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä. Osa 2-7 Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt

Samana standardin osissa 2-7 käydään läpi Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt osan 1 kansainvälisille standardeille. Maadoitusten suunnittelun osalta tämä lisäys on lyhyt. Lisäyksessä selvennetään potentiaalintasauselektrodin huomiointia kosketusjännitelaskelmissa ja sen asentamista. Tässä määrittelyssä on kerrottu kaksi menetelmää henkilöturvallisuuden varmistamiseksi pylväspaikeilla, mikäli sallittuja kosketusjännitetasoja ei saavuteta. Ensimmäinen on eristeaineisen aidan käyttäminen suojaamaan pylväs tahattomalta kosketukselta. Toinen tapa on maan pintakerroksen korvaaminen eristävällä aineella. Lisäksi tässä kansallisessa määrittelyssä käydään läpi tarkemmin hausten maadoitus ja eristys Suomen olosuhteissa. (SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2015)

3.3.2 SFS 6001:2018

Tätä standardia ei sovelleta erillisten laitteistojen välisillä ilmajohtoilla. Tosin SFS-EN 50341–2-7:2015 standardissa todetaan, että siirtyvien jännitteiden osalta noudatetaan standardia SFS 6001:2018. (SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2015) Televerkkoihin ja muihin järjestelmiin siirtyvien jännitteiden osalta standardissa SFS 6001 todetaan että suurjänniteverkon läheisyydessä olevat tietoliikenneverkot eivät kuulu tämän standardin soveltamisalaan. Televerkkoihin siirtyvien jännitteiden varalta sovelletaan kansainvälisiä julkaisuja sekä direktiivejä, kuten ITU-suosituksia. (SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2018)

Standardin SFS 6001:2018 mukaan muihin maadoituksiin siirtyvä jännite saa olla enintään $2 \times U_{Tp}$. Tiettyjen erityisehtojen täytyessä siirtyvien jännitteiden raja-arvona voidaan käyttää myös kerrointa 4 ja joskus jopa 5. Tämä U_{Tp} raja-arvo on esimerkiksi 0,2 s laukaisuajalla 1074 V, mutta se korreloi negatiivisesti laukaisuajan kanssa, eli jännitteen sallittu raja-arvo laskee suhteessa laukaisuajan nousuun.

3.3.3 Viestintävirasto 43 F/2015 M

Viestintäviraston määräyksessä viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta on tehty pakolliseksi yleisen viestintäverkon ja siihen liitetyn verkon suojaustoimenpiteet, jotka auttavat verkkoa sietämään ja kestäämään sekä ilmastollista että toisten viestintäverkkojen aiheuttamia ylijännitteitä. Näillä tarkoitetaan pääasiassa ukkosta ja 110 kV ja suurempia voimajohtoja. Määräyksessä käsitellään voimajohtoja pykälissä § 13, § 14, § 15 ja § 16.

Pykälässä § 13 määritellään, ettei suurjännitelaitteiston normaalikäytöstä kapasitiivisesti kytkeytyvä jännite saa aiheuttaa yli 10 mA virtaa kosketeltaessa, ja johtimiin indusoituva pitkäaikainen sähkömotorinen voima (smv) ei saa ylittää 60 V jännitettä. Pykälässä § 14 on esitetty lyhyt- ja pitkäaikaisen maasulkujen suurin sallittu vaikutus viestintäverkkoon eri tilanteissa. Ilman suojausta olevaan viestintäverkkoon indusoituva smv ei saa ylittää 430 V suurjännitelaitteiston ollessa yksivaiheisessa maasulussa. Kuitenkin yli 110 kV suurjännitelaitteiston yksivaiheisen maasulun viestintäverkkoon indusoituva jännite saa nousta hetkellisesti taulukon 4 mukaisiin arvoihin. Taulukosta nähdään, että

yleisesti käytössä olevat suoja-alueiden laukaisuajat voimajohdoilla sallivat 650 V ja 1500 V indusoituvat sähkömotoriset voimat (0,2 s ja 0,5 s), kun taas yli 3 sekuntia kestävässä maasulussa induoituva smv ei saa ylittää normaalikäytön induoiman sähkömotorisen voiman raja-arvoa eli 60 V.

TAULUKKO 4. International Telecommunication union (ITU) ITU-T K.68 suosituksen kohdan 6.2.2 taulukko 18

Vika-ajan kesto t(s)	Indusoituva jännite rms (v)
$t \leq 0.10$	2000
$0.10 < t \leq 0.20$	1500
$0.20 < t \leq 0.35$	1000
$0.35 < t \leq 0.50$	650
$0.50 < t \leq 1.00$	430
$1.00 < t \leq 3.00$	150
$3.00 < t$	60

Pykälässä § 15 käsitellään tilanteita, joissa viestintäverkon maadoitukset ovat suurjännitelaitteistojen maadoitusalueella tai niiden potentiaalinen vaikutusalueella ja sitä, kuinka suojaus on huomioitava näissä tilanteissa. Viestintäverkon asennuksissa nousseen maapotentiaalisen alueella tulee noudattaa standardia SFS-EN 50174-3. Pykälässä § 16 kerrotaan vain se, että viestintäverkon erotusvälimatkat pien- ja suurjänniterakenteista tulee olla standardin SFS-EN 50174-3 mukaiset, ellei toisin sovita. (Viestintävirasto, 2014)

3.3.4 VHV-ohjeet ja ITU-T suositukset

Tässä kappaleessa esitellään voimajohdon suunnitteluun soveltuvia vaara- ja häiriöjännitevaliokunnan ohjeita (VHV-ohjeet) 02 ja 05. Kokonaisuudessaan VHV-ohjeita on 01-05, mutta ne ovat nykyään osin vanhentuneita, eikä ohjeita luonutta valiokuntaa ole enää olemassa. Soveltuvia ohjeita käytetään kuitenkin vielä paikoin ja niihin viitataan useissa dokumenteissa, joten ne on hyvä tiedostaa ja tuntea.

VHV-ohjetta 02 sovelletaan voimajohdon induktion aiheuttamien vaarajännitteiden tarkasteluun. Ohjeessa keskitytään normaalikäytössä tai maasulussa telejohtoon induoituvan virran ja jännitteen arvojen tarkasteluun, ja siinä esitellään suunnittelumenetelmiä sekä suojaustoimenpiteitä, joilla raja-arvojen ylittäminen voidaan estää. (Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, 1995)

VHV-ohjetta 05 sovelletaan voimajohdon maasulun aikaisen konduktiivisen kytkeytymisen aiheuttamien vaarajännitteiden tarkasteluun. Ohjeessa esitellään suunnittelumenetelmiä sekä suojaustoimenpiteitä, joilla raja-arvojen ylittäminen voidaan estää. (Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, 1995)

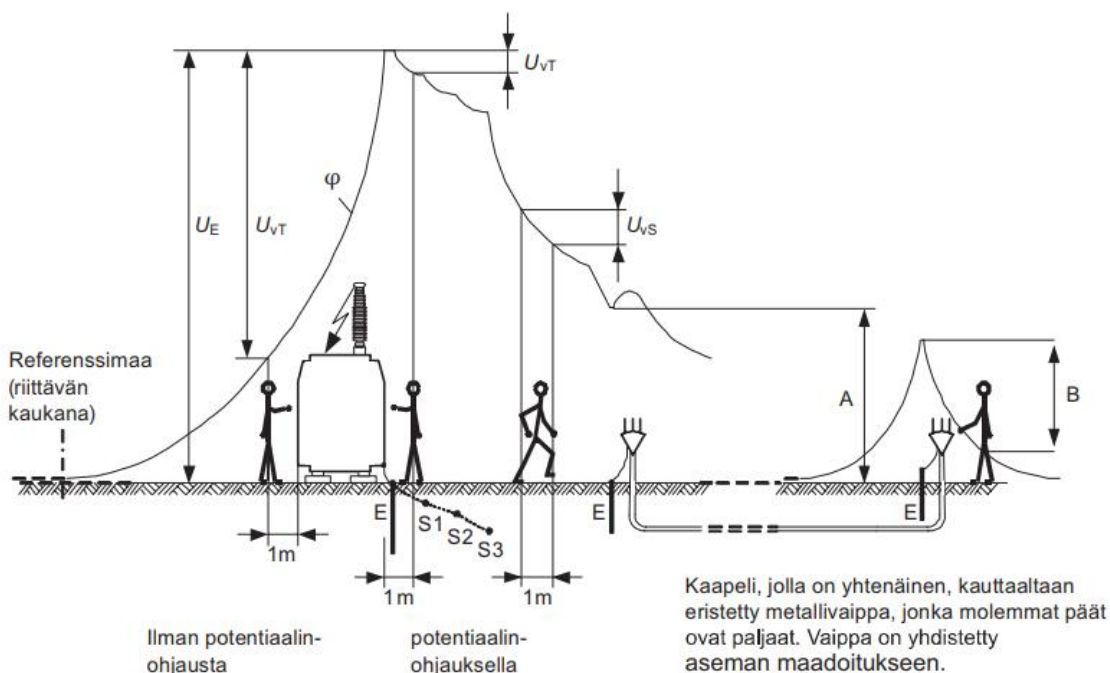
International Telecommunication Union (ITU) on yhdistyneiden kansakuntien alainen televiestintäverkkoja ja -palveluja kansainvälisesti koordinoiva järjestö. ITU vastaa kansainvälisen telekommunikaatioverkoston standardoimiseksi luotujen suositusten julkaisemisesta. Suomessa on käyty keskustelua ITU:n suosituksen käyttämisestä vaarajänniteselvityksissä VHV-ohjeiden sijaan, ja esimerkiksi Jukka Väljä esittää diplomityössään, että jatkossa ITU-T K.68 suositusta voitaisiin käyttää telejohtojen induktiojännitteiden tarkastelussa. ITU-T K.68 suositus on nykyaikainen sekä kansainvälinen julkaisu, ja kuten jo edellisessä kappaleessa mainittiin, jo viestintäviraston määräyksessäkin viitataan tähän järjestön suositukseen. Suosituksessa on käsitelty samat asiat kuin molemmissa soveltuissa VHV-ohjeissa, sekä muitakin aiheita, joita ei voida voimajohdoille soveltaa. (Väljä, 2010) (International Telecommunication Union ITU, 2008)

3.4 Vaara- ja häiriöjänniteselvitykset

Voimajohdolle on tehtävä vaara- ja häiriöjänniteselvitykset, joissa selvitetään voimajohdon vaikutukset sitä ympäröivään maa-alueeseen sekä sähkö- ja televerkkoon. Näissä selvityksissä esitetyillä toimenpiteillä voidaan huomata henkilöturvallisuuden sekä sähkö- ja televerkon laitteiden kannalta vaaralliset kohteet ja toteuttaa suojaavia toimenpiteitä niille.

3.4.1 Maadoituspotentiaalitarkastelu

Maadoitusjänniteselvityksessä tarkastellaan pylväspaikan ympärille vikatilanteessa leviävän potentiaalilin suuruutta. Kuvassa 9 on esitelty tärkeimpiä tarkasteltavia suureita. Nämä suureet ovat maadoitusjännite U_E , suurin askeljännite U_{vs} , suurin kosketusjännite U_{tp} , siirtyvästä potentiaalista johtuva suurin kosketusjännite, jos kaapelin vaippa on maadoitettu vain toisesta päästä A, sekä kaapelin vaiipan ollessa maadoitettuna molemmista päistä B. Selvityksen tarkoituksena on siis tarkastella, että kaikkien pylväspaikkojen henkilöturvallisuutta vikatilanteessa ja määrittää tarvittavat toimenpiteet, jotka auttavat parantamaan sitä tai takaavat sen asetettujen rajarajojen ylittyessä. Pylväspaikkojen maadoituksia suunnitellessa tulee siis ottaa maapotentiaaliselvityksen tulokset huomioon ja muokata maadoituksia standardien mukaiseksi. (Elovaara & Haarla, 2011) (SUOMEN STANDARDOIMISLIITTO SFS, 2018)



KUVA 9. Erilaiset pylväspaikan lähellä mahdollisesti esiintyvät vaaralliset potentiaalit virran kulkiessa maadoituselektrodeissa (SUOMEN STANDARDOIMISLIITTO SFS, 2018)

3.4.2 Induktiovaarajänniteselvitys

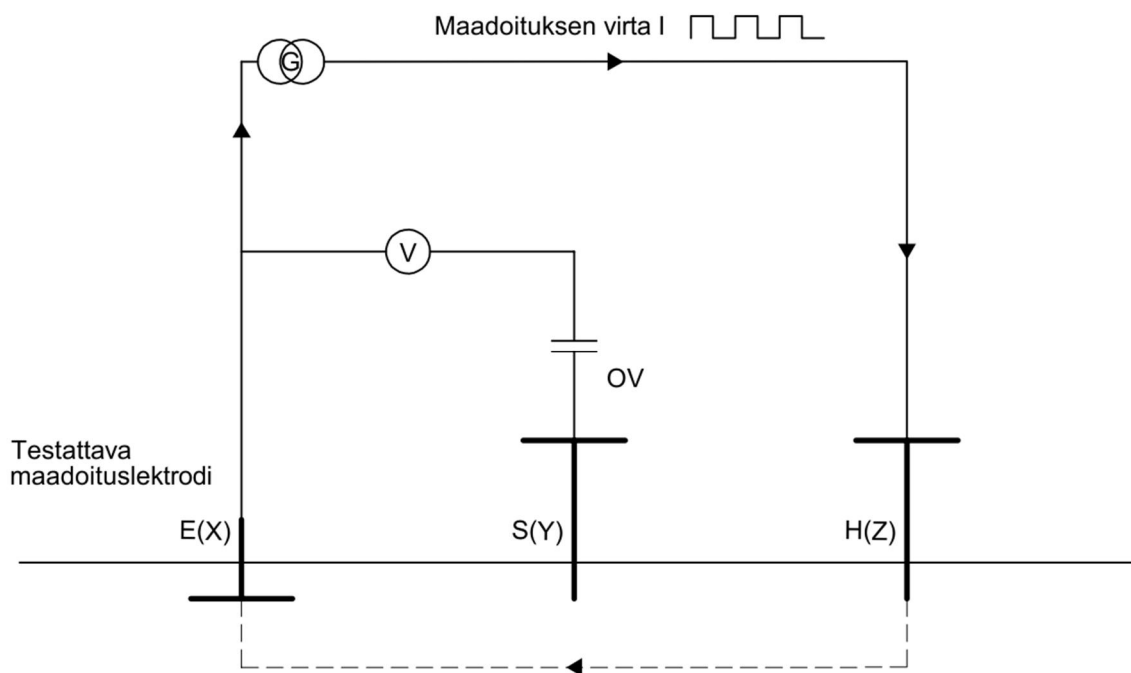
Induktiovaarajänniteselvityksellä otetaan selvää, kuinka paljon rakennettava voimajohto indusoi sähkömotorista voimaa (smv) ympäristöönsä. Standardin asettamat vaatimukset on käyty jo aikaisemmin läpi kohdan 3.3.3 taulukossa 4. Induktiovaarajänniteselvitys ei varsinaisesti vaikuta voimajohdon pylväasmaadoitusten suunnitteluun, vaan se toteutetaan ympäröivien televerkkojen sekä muiden sähköisesti johtavien rakenteiden turvallisuuden varmistamiseksi. Suurimmat vaikuttavat tekijät smv:n suuruuteen ovat sähköisesti johtavan rakenteen etäisyys ja yhdensuuntainen mitta voimajohdosta. Selvityksessä todetaan, havaittiinko mahdollisia vaarallisia kohteita ja suositellaan tilaajalle toimenpiteitä, joilla nämä saadaan palautettua turvallisiksi. (Elovaara & Haarla, 2011)

3.5 Maadoitusresistanssimittaukset

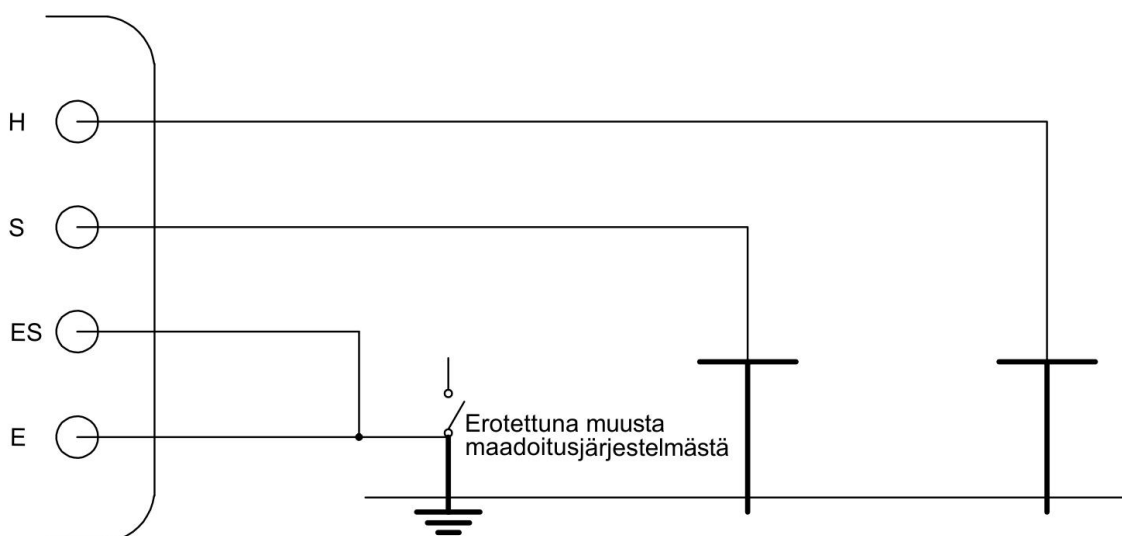
Voimajohdon pylväspaikkojen maadoitusresistanssit tulee tarkistaa niiden asentamisen jälkeen, tällä varmistetaan pylväspaikan turvallisuus suunnittelu- tai asennusvirheen varalta. Lisäksi on mahdollista, että maaperän resistiivisyyksimittaukset ovat epäonnistuneet, jolloin niiden pohjalta oikein suunnitellut maadoitukset voivat olla riittämättömiä tai ylimitoitettuja. Näiden mittausten avulla osataan tehdä tarvittavat toimenpiteet, mikäli maadoitusresistanssin huomataan ylittävän asetetun raja-arvon.

Voimajohtojen maadoitusresistanssimittauksiin käytetään yleensä käänteispistemenetelmää. Maadoitusmittausten aikana pylväspaikan maadoitukset tulee olla erotettuna ja eristettynä muista maadoituksista, kuten ukkosjohtimista sekä sähköaseman maadoituksista. Tällä menetelmällä mitattaessa KUVA 10 esitetyn mittauselektrodin S(Y) on oltava 2,5 kertaa kauempana mitattavasta maadoitus-

elektrodista kuin mikä sen ulottuvuus on, kuitenkin vähintään 20 m päässä. Tämä tarkoittaa käytännössä 40 m säteitä käytettäessä, että maapiikin etäisyyden on oltava 100 m mitattavasta maadoituselektrodista. Apumittauselektrodin H(Z) etäisyys puolestaan pitää olla 4 kertaa mitattavan maadoituselektrodin ulottuvuus, eli 160 m, kuitenkin vähintään 40 m. Käänteispistemennetelmällä on suositeltavaa käyttää mittauksissa enintään 150 Hz vaihtojännitettä. (SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS, 2014)



KUVA 10. Yhden maadoituselektrodin maadoitusresistanssin mittausmenetelmä



KUVA 11. 4-napamenetelmän kytkentä

Kuvissa 10 ja 11 esitellyt 3- ja 4-napamenetelmät eroavat kytkennöiltään vain siinä, että 3-napamenetelmässä ei ole kytketty mittarin ES-liitintä E-liittimen johtoon. 4-napamenetelmä tosin antaa noin 10 kertaa paremman erottelutarkkuuden, mikä aiheuttaa sen, ettei mittausjohtojen vastusta tarvitse ottaa huomioon. (Chauvin Arnoux Group, 2014)

3.6 Pylväsmaadoitusten dokumentointi

Perinteisesti pylväsmaadoitusten dokumentointi on toteutettu todella yksinkertaisesti kynä ja paperi menetelmällä valmiille ruudukko pohjalle. Tässä menetelmässä on pidetty positiivisena sen helppoa muokattavuutta ja muokkauksien kestävyttä. Hahmotelman tarkkuudessa on kuitenkin luotettava täysin pylväspaikan piirtäjän ammattitaitoon eikä tästä menetelmästä jää varmuuskopiota, ellei selaista erikseen skannata tai toista kopiota tulosteta viemään arkistointitilaa. Mutta koska kyseessä on hahmotelma, tämän tyylinen ratkaisu on aikanaan ollut aivan täysin riittävä. Esimerkki aikaisemmin yleisesti käytössä olleesta maadoituspöytäkirjasta löytyy liitteestä 1.

4 MAAPERÄN RESISTIIVISYYSMITTAUKSIEN KEHITTÄMINEN

Maaperän resistiivisyysmittaukset ovat yksi maadoitussuunnittelun eniten aikaa vievistä vaiheista, tämän vuoksi etenkin tämän vaiheen nopeutta on syytä pyrkiä parantamaan. Lisäksi maaperän resistiivisyysmittauksissa on syytä kiinnittää huomiota laatuun, sillä pylväspaikoilla suoritettavat mitaukset ovat ainoa informaatio, johon maadoitussuunnitelma pohjautuu. Jos pylväspaikka on mitattu väärin, voidaan sinne joutua asentamaan lisämaadoituksia, joka puolestaan lisää kustannuksia suunnittelusta. Henkilöturvallisuutta ei voida myöskään taata mitaustulosten ollessa epätarkkoja.

4.1 Maaperän resistiivisyysmittauksien lähtötilanne

Opinnäytetyön osalta maaperän resistiivisyysmittauksien lähtötilanteena voidaan pitää kesää 2018, kun yrityksellä oli käynnissä kaksi voimajohdon pylväsmaadoitusten suunnitteluprojektia. Tähän suunnitteluun kuului maastossa suoritettavat pylväspaikojen maaperän resistiivisyysmittaukset. Kesän aikana ja muutamana päivänä syksyllä mittauksia tehtiin noin 300 pylväspaikalla, ja yksittäisiä mittauksia kertyi yhteensä noin 650 kappaletta. Alkukesästä mitattiin noin 60 pylväspaikkaa yhdellä mitaajalla, minkä jälkeen aikataulullisista syistä mittauksiin palkattiin avustaja. Mittauksiin päästiin siis tutustumaan sekä vasta-alkajan aspektista että kokeneempana mitaajana avustajan antamien kehitysideoiden kautta.

Maastossa tulokset tallennettiin analogiseen muotoon pöytäkirjapohjaan, joka piti toimistolla konvertoida manuaalisesti Excel-laskentataulukoon. Samaan pöytäkirjaan merkittiin kaikki maastossa tehdyt havainnot pylväspaikkojen läheisyydessä, kuten kivikot ja keskijännite-, pienjännite- tai televerkon johdot.

4.1.1 Yrityksen aikaisempiin mittauksiin perustuvat kehityskohteet

Kesän 2018 mittauksista tehtiin useita havaintoja parannuskohteista sekä mahdollisuuksista erottua positiivisesti kilpailijoista. Mittauksia parantavia tekijöitä jatkossa voisi olla parempi perehdytys mitaajille ennen mittauksien aloittamista sekä selkeä ja kattava ohje mittauksista. Jatkossa on parempi useasta eri syystä, jos maastoon lähetetään kaksi mitaajaa yhden sijaan. Tämä auttaa parantamaan mitaajien turvallisuutta maastossa ja mitaustuloksien laatu pysyy korkeammalla kun mukana on kaksi silmäparia karsimassa virheitä. Pöytäkirja ei voi jatkossa olla paperinen sillä se lisää tarpeetonta informaation menettämisen riskiä sekä lisäkustannuksia turhasta työvaiheesta, koska nämä tulokset uudelleen kirjataan sähköisiin pöytäkirjoihin.

Näiden lisäksi mahdollisesti parannettavia kohteita mittauksissa olisi mitausten määrän päiväkohtainen suunnittelu, eli mittauksiin käytettävä aika saataisiin tietoon jollain tarkkuudella jo ennen maastoon lähtemistä. Tämä tarkoittaisi tarkempaa budjetointia sekä työtuntien resursointia rajallisena aikana suoritettaviin mittauksiin. Tällöin tiedetään kuinka moneen projektiin voidaan yhdessä vuodessa tarjoutua yhdellä mittaryhmällä. Projektin aikataulutuksen paremman aikataulutuksen mahdol-

listamiseksi pylväspaikkojen hahmotelmat olisi tehtävä ennen maastoon lähtemistä. Näistä hahmotelmista saa karkean kuvan pylväspaikoilla vallitsevista maasto-olosuhteista, joiden perusteella pystyttäisiin arvioimaan pylväspaikalla tarvittavien mittauksien määrä.

Taulukossa 5 on esitettyä kesän 2018 mittauksien perusteella laskettu päiväkohtainen pylväspaikkojen mittausmäärä. Tämän perusteella kahdesta mittaajasta aiheutuu prosentuaalisesti lähemmäs 30 % lisäkustannuksia per pylväspaikka, mutta pylväspaikkoja saadaan samassa ajassa mitattua lähes 70 % enemmän. Kahdella mittaajalla suoritettavien mittauksien voidaan silti sanoa olevan hyödyllisiä, sillä mittauksissa käytettävissä oleva aika on rajallinen. Lisäksi muissa kustannuksissa, kuten majoituksessa ja kilometrikorvauksissa säästetään jonkin verran, eli lopullinen kustannusero yhden ja kahden mittaajan välillä on pienempi kuin taulukon ehdottama n. 30 %.

TAULUKKO 5. Kesällä 2018 kerätty data mittauksien kestosta yhdellä ja kahdella mittaajalla

	2 mittaajaa	1 mittaaja	1 mittaaja/ 2 mittaaja(%)
Aikaa/pylväspaikka (h/kpl)	1,06	1,66	64
Aikaa/mittaus (h/kpl)	0,49	0,78	63
Pylväspaikka/päivä (kpl/pv)	7,90	4,67	169
Mittaus/päivä (kpl/pv)	17,17	9,93	173

4.2 Tavoite

Tavoitteena on luoda viime kesän resistiivisyysmittauksien ja syksyn maadoitussuunnittelun pohjalta ohjeistus jatkossa suoritettaviin maaperän resistiivisyysmittauksiin. Samalla pyritään kohentamaan entisestään mittauksista saatavan datan tasoa, niin paremmin valittujen mittauspisteiden kuin voimajohtoa ympäröivien sähköturvallisuuden kannalta mielenkiintoisten kohteiden dokumentoinnilla. Parantuneen mittausdatan ansiosta maadoitusten suunnittelusta saadaan laadukkaampaa. Lisäksi työstä on tavoitteena poistaa tarpeettomia välivaiheita.

4.3 Suunnittelun ja mittauksien prosessien uudelleen organisointi

Suunnittelun ja mittauksien järjestystä uudelleen organisoitiin, jotta kokonaisuutena prosessista saatiin koherentimpi. Lähtötilanteena oli luonnostaan muodostunut työvaiheiden järjestys, mikä ei ollut tehokkain mahdollinen prosessi. Yrityksen sisäiseen käyttöön luotiin kuvaus vanhasta prosessista ja siitä tehtiin siitä uudistettu versio, jossa esiteltiin uusi tavoiteltava prosessi.

4.4 Käytössä oleva mittauslaitteisto

Yritykselle tuotetussa maaperän resistiivisyysmittausohjeessa on käyty laajemmin läpi käytössä oleva mittauslaite sekä kaikki välineet joita mittauksissa käytetään. Mittauslaitteiston määrä on pyritty pitämään minimissään, jotta maastossa kannettavan tavaran määrä pysyisi kohtuullisena, sillä n. 30 kg varusteiden lisäksi mittaajat joutuvat toisinaan maastollisista syistä kuljettamaan mukanaan päivän ruoat sekä juomat.

Mittauslaitteistossa ei huomattu viime kesän mittauksien perusteella merkittäviä puutteita, mutta joitain kuluvia osia uusittiin tulevia mittauksia varten.

4.4.1 Chauvin-Arnoux CA6470N

Yrityksellä on käytössään yksi kappale Chauvin Arnouxin maadoitusresistanssi- ja maaperän resistiivisyys -testereitä. Laite on suunniteltu kenttäolosuhteisiin, sillä se on iskun- ja vedenkestävä. Mittalaitteella voidaan toteuttaa maadoitusresistanssin mittaukset 3- tai 4-napamenetelmällä ja maaperän resistiivisyysmittauksissa mittalaite laskee automaattisesti sekä Wenner- että Schlumberger-menetelmällä maaperän resistiivisyyden mitatusta resistanssista. Testeriä on mahdollista käyttää 41–512 Hz taajuuksilla ja se kestää häiriöjännitteitä jopa 60 V saakka.

4.5 Mittausten dokumentoinnin kehittäminen

Mittauspöytäkirjoja kehitettiin viime kesän kynä ja paperi -versiosta digitaalisiksi, jotta prosessista saatiin eliminoitua tarpeettomia välivaiheita. Mittauspöytäkirjojen kehittämisessä oli aluksi muutamia eri vaihtoehtoa, joita opinnäytetyössä lähdettiin tutkimaan. Nämä vaihtoehdot olivat Flyspectin palveluun erikseen Rejlersiä varten kehitettävä raportointipohja mobiililaitteeseen. Toisena vaihtoehtona lähetettiin kehittämään jo aikaisemmin luodusta Excel-työkirjasta mobiililaitte ystävällisempää versiota, josta voitaisiin päivittää saadut mittaustulokset suoraan maadoitussuunnittelijan käyttöön aina mittauspäivän jälkeen.

4.5.1 Excel-pöytäkirjapohja

Pöytäkirjojen kehittämisessä parhaaksi tutkittavaksi vaihtoehdoksi valittiin yrityksen sisällä kehitetty pöytäkirjapohja Excel-taulukkolaskentaohjelmalla, joka toimisi samalla suoraan karttapohjiin liitettävänä pöytäkirjana. Käytännössä tämä tarkoitti kesällä 2018 käytettyjen pöytäkirjapohjien yksinkertaistamista sekä sovittamista lopulliseen karttapohjaan. Pöytäkirjapohjaan otettiin vaikutteita paljon Jarmo Kuusisen kommentteista, ja tämän hetkinen lopullinen versio on kuvan 12 mukainen.

ASIAKKAAN LOGO		Kartassa käytettävät viivatyyppit ja mittakaava		MAADOITUSPÖYTÄKIRJA										
				Mittaus		A		B		C		D		
				a (m)	R(Ω)	ρ(Ωm)	R(Ω)	ρ(Ωm)	R(Ω)	ρ(Ωm)	R(Ω)	ρ(Ωm)		
Johto:		Mittaaja(t):		Pylvänumero ja laji:		1	0	0	0	0	0	0	0	0
Sutu:		Mittaus pvm:		Jännitetaso: 110 kV		2	0	0	0	0	0	0	0	0
Maadoitussuunnitelma		Huomioitavaa		Maadoitustyö				Huomioitavaa						
Odotettavissa R _{50Hz} /R _{50kV} (Ω)		0,0		Valmistunut: / /										
25 mm ² CU-köyttä		m		25 mm ² CU-köyttä				m						
70 mm ² CU-köyttä		m		70 mm ² CU-köyttä				m						
Eristysmuoviputkea(PVC)		m		Eristysmuoviputkea(PVC)				m						

KUVA 12. Yrityksen sisällä kehitetty maadoituspöytäkirjapohja

Maadoituspöytäkirjan kehittämisen tärkeimpänä osuutena oli määrittää ja rajata sille oleellinen data. Alkuperäisestä maadoituspöytäkirjan pohjasta karsittiin esimerkiksi pylväspaikan koordinaatit sekä mittauspaikan maalaji. Tämän lisäksi kaikki pöytäkirjat sijoitettiin yhteen Excel-tiedostoon, johon luotiin myös yhteenveto-välilehti. Tälle välilehdelle kasattiin jokaiselta pylväspaikalta tarpeelliset tiedot helpottamaan tiedon prosessointia.

4.6 Maadoituspöytäkirjojen kehittäminen

Maadoituspöytäkirjojen karttapohjien tarkempi kehittäminen rajattiin pois tästä opinnäytetyöstä ajankäytöllisistä syistä. Opinnäytetyöhön päätettiin kuitenkin sisällyttää määrittely siitä, mitä karttoihin tuodaan yleisistä maastokartta-tietokannoista. Tämä määrittely asettaa raamit, jonka pohjalta opinnäytetyön jälkeen yrityksen sisällä lähdetään kehittämään karttojen tekemisestä mahdollisimman vähävaiheista ja automaattista. Tämä määrittely hoidetaan yrityksen käyttöön tulevassa ohjeistuksessa.

4.6.1 Piirtäminen AutoCadilla

AutoCadin käyttämistä hahmotelmien piirtämiseen harkittiin pitkään ja ohjelmistossa oli monta positiivista puolta. Suurimpana ongelmana tämän ohjelman kanssa oli Excel-pöytäkirjapohjan liittäminen. Se osoittautui mahdottomaksi tehdä linkitetyllä Excel-pohjalla visuaalisesti tyydyttävällä tavalla, koska AutoCad tahtoo tehdä Excel-pohjasta oman taulukon muutettavilla sarakevevyksillä. Tässä tapauksessa todettiin, ettei ole kannattavaa lähteä tappelemaan ohjelman kanssa, joka ei tahdo suostua yhteistyöhön.

4.6.2 Piirtäminen MicroStationilla

MicroStation päätettiin ottaa käyttöön ensisijaiseksi ohjelmistoksi pylväsmaadoituspöytäkirjojen piirtämisessä, vaikka ohjelma ei välttämättä olekaan yhtä nykyaikainen kuin AutoCad. Yrityksen sisällä on jo laaja osaaminen MicroStationin käytöstä, joten tutun ohjelmiston käyttö jatkossakin on järkevää. Lisäksi toisin kuin AutoCadilla, MicroStationiin oli suorastaan nautinto liittää linkitettyjä Excel-pöytäkirjapohjia. Liitteessä 2 on esiteltyä prototyyppi yrityksen jatkossa tuottamasta maadoituspöytäkirjasta.

4.7 Kustannustehokkuus

Suunnittelujärjestyksen kehittäminen ja manuaalisten välivaiheiden karsiminen paransi maanperän resistiivisyysmittauksien kustannustehokkuutta huomattavasti. Vaikka maaperän resistiivisyyden mittaajilla tulee todennäköisesti menemään hieman enemmän aikaa per pylväspaikka maadoitusten säteiden asennettavuuden pohtimisen kanssa. Tämä kuitenkin säästää toimistolla huomattavasti enemmän aikaa ja mahdollisesti parantaa jopa maadoitussuunnittelun laatua. Maadoitussuunnittelu-prosessi on lisäksi yksinkertaistettu sille tasolle, että se ei ole liian vaikeaa edes opiskelijalle, joten mittaajina/suunnittelijoina voidaan käyttää jopa kesätyöntekijöitä.

4.8 Ohjeistus maaperän resistiivisyysmittauksiin

Opinnäytetyön tuloksena yritykselle tuotettiin seikkaperäinen ohjeistus maaperän resistiivisyysmittauksien tueksi. Ohjeen on tarkoitus toimia sekä työnantajan että mittaajan muistilistana. Tällä ohjeistuksella saadaan jatkossa tehtyä tasalaatuisempia mittauksia ja yhtenäistettyä mittauksien prosessia. Jos mittaajakohtaiset mittaustapojen muutokset saadaan eliminoitua, ei maadoitussuunnittelijan tarvitse ottaa huomioon tulosten eroavaisuuden mahdollisuutta.

Ohjeessa on esitettyä mittaajan henkilökohtaiset suojavälineet sekä perustelut niiden valintaan. Tämän lisäksi mittaus- ja huoltovälineet on luetteloitu, ja niiden käyttö ja huolto on opastettu. Ohjeessa on paljon havaintoja maastosta tavoista, joilla mittaamisen nopeutta voidaan parantaa. Kesällä 2018 näillä menetelmillä saatiin hiottua maaperän resistiivisyysmittauksissa kahdella mittaajalla kestävä aika keskimäärin 12 minuutista noin 7 minuuttiin.

Ohjeistukseen tehtiin vuokaavio mittauskertojen määrän päättämisestä. Tämän vuokaavion tarkoitus oli karsia mittaajan päätöksenteko mittauskertojen määristä, jolloin mittauksien tekeminen helpottuu ja yhtenäistyy.

Ohjeistuksessa on myös liitteenä riskianalyysi, jonka avulla voidaan tiedostaa mittauksien mahdolliset riskit ja toimia turvallisesti ne huomioiden. Ohjeistuksessa on myös neuvottu mittaajalle, miten dokumentaatio mittauksista tulee tehdä. Dokumentaatioissa huomioitavaa on mittaustulosten oikein kirjaaminen.

5 MAADOITUSSUUNNITTELUN KEHITTÄMINEN

5.1 Maadoitussuunnittelun lähtötilanne

Maadoitussuunnittelun lähtötilanne oli kappaleen 3.2 mukainen. Tällä menetelmällä suunniteltiin kahden voimajohdon maadoitukset. Näiden voimajohtojen suunnittelusta saatua dataa käytetään maadoitussuunnittelumenetelmän kehittämisen pohdintaan.

5.2 Tavoite

Tavoitteena on etsiä perusteluita nykyisen maadoitussuunnittelumenetelmän puolesta ja vastaan, sillä nykyisestä suunnittelumenetelmästä ei tulla tämän opinnäytetyön aikana luopumaan. Opinnäytetyön tuotoksena yrityksellä tulee olemaan käytössään ohjeistus, jonka perusteella maadoitussuunnittelu helpottuu, yksinkertaistuu ja yhtenäistyy. Ohjeistuksen tulisi olla mahdollisimman yksinkertainen ja kattava, jotta sitä voidaan käyttää vaihtelevissa maadoitusolosuhteissa sijaitsevilla voimajohtojilla.

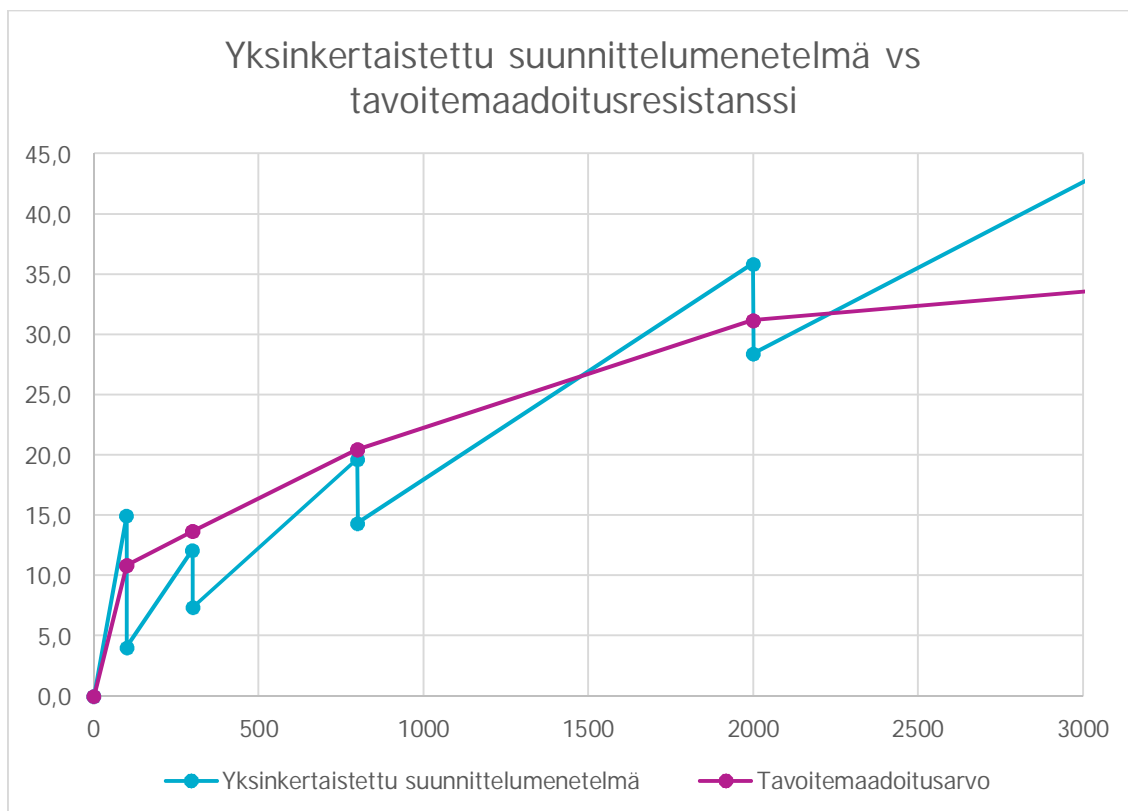
5.3 Kustannustehokkuus

Maadoitussuunnittelussa kustannustehokkuutta ei päästy kehittämään merkittäväällä tavalla opinnäytetyön aikana. Tämä johtui siitä että yritys päätyi jatkamaan samalla Fingridin yksinkertaistetulla maadoitussuunnittelumenetelmällä. Tähän valintaan vaikutti kaikista eniten se, että Fingrid vaatii tätä menetelmää omissa projekteissaan.

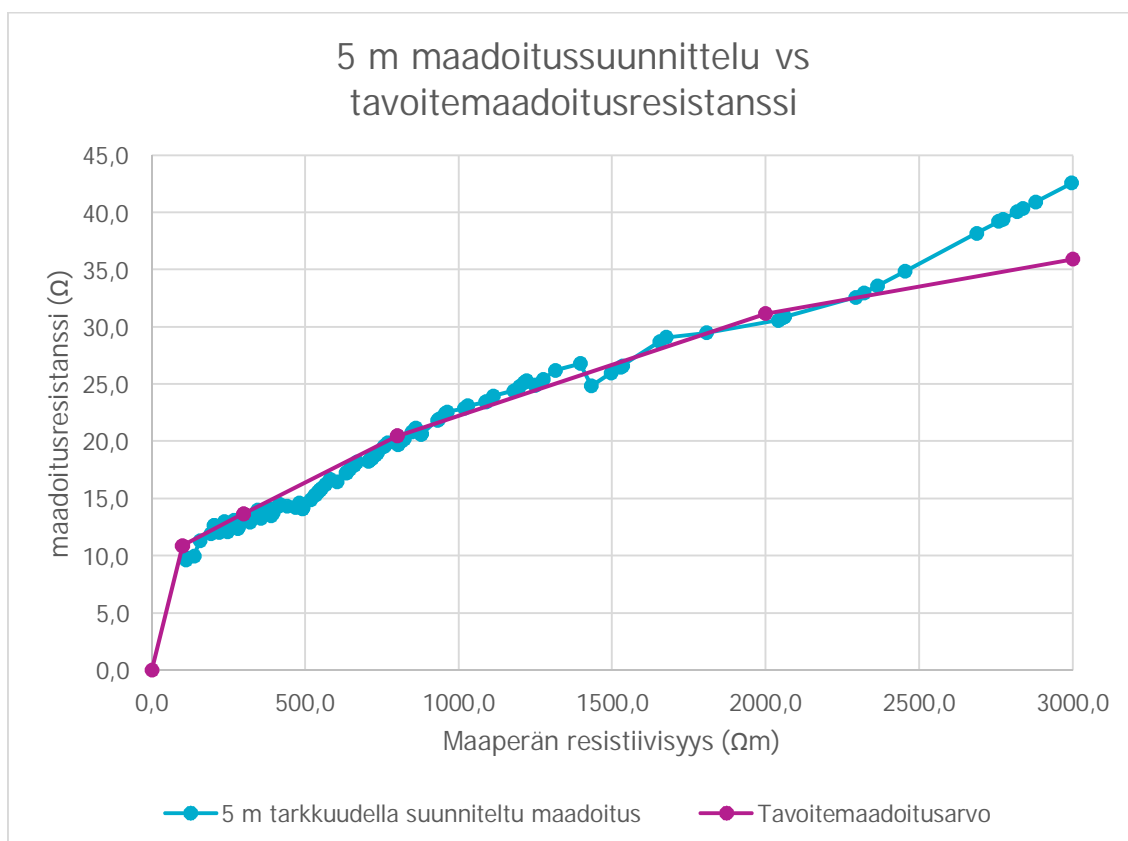
Opinnäytetyössä voidaan kuitenkin tarkastella nykyisen menetelmän kustannustehokkuutta ja pohtia potentiaalisia parannuskohteita.

Kuvassa 13 on esitetty tavoitemaadoituksen arvo ja sen rinnalla yksinkertaistetulla suunnittelumenetelmällä saavutettu laskennallinen maadoitusresistanssin arvo. Suunnitellulla maadoituskuparin määrällä toteutuva laskennallinen maadoitusresistanssi on laskettu kaavalla 5 ja tavoitemaadoitusresistanssi on laskettu kaavoilla 3 tai 4, maaperän resistiivisyydestä riippuen. Kuvan 14 arvot on laskettu samoilla menetelmillä.

Tästä kuvasta voidaan päätellä yksinkertaistetun maadoitussuunnittelumenetelmän olevan toimiva tapa pitää pylväspaikan maadoitusresistanssi alle tavoitemaadoitusresistanssin maaperän resistiivisyyden ollessa vähemmän kuin $2300 \Omega\text{m}$. Korkeammilla maaperän resistiivisyyden arvoilla pylväspaikan maadoitusresistanssi jatkaa lineaarisesti kasvuaan, kun taas tavoitemaadoitusresistanssi kasvaa logaritmisesti arvoon 50Ω saakka, jonka jälkeen se pysyy vakiona.



KUVA 13. Maadoitusresistanssi suhteessa maaperän resistiivisyyteen



KUVA 14. 5 m tarkkuudella suunnitellut maadoitukset vs tavoitemaadoitusresistanssi

Kuvista 13 ja 14 voidaan vertailla 5 m väleillä suunniteltua ja yksinkertaistettua suunnittelumenetelmää. Kuvassa 14 on käytetty yhden voimajohdon pylväspaikkojen mitattuja resistiivisyysarvoja, joten maaperän resistiivisyyden vaihteluvälit ovat voimajohdolla esiintyvään maaperään sidonnaisia.

Kuten kuvista voidaan havaita, tarkalla maadoitustensuunnittelun menetelmällä pysytään huomattavasti lähempänä tavoite arvoa. Kustannuksien puolesta tämä olisi ideaalia, mutta koska maaperä ei ole homogeeninen, näillä laskentamalleilla pystytään vain tekemään valistuneita arvioita lopputuloksesta. Yksinkertaistetulla suunnittelumenetelmällä aiheutuva laskennallinen ylivoittoaminen on siis jopa suotavaa suurimman osan aikaa.

Jos yksinkertaistettua suunnittelumenetelmää haluaisi lähteä kehittämään johonkin suuntaan, niin yksi vaihtoehto olisi vaihtaa neljännen säteen lisääminen nykyisestä 2000 Ωm arvosta jo 1500 Ωm arvoon. Tämän muutoksen myötä lähes kaikilla pylväspaikan maaperän resistiivisyyden arvoilla pyryttäisiin tavoitemaadoitusresistanssin käyrän paremmalla puolella 2300 Ωm saakka. Henkilöturvallisuuden kannalta tämä muutos olisi totta kai turvallisempaan suuntaan, mutta kuitenkin sen vaikutus tyypillisellä voimajohdolla on väiteltävissä. Etenkin kun otetaan huomioon, ettei TUKESin "Sähkötaturmissa kuolleet" -listauksen mukaan voimajohdon pylväspaikoilla ole tapahtunut yhtään kuolemaan johtanutta sähkötapaturmaa alimaadoittamisen vuoksi. (Turvallisuus ja kemikaalivirasto TUKES, 2017)

Tyypillisesti yhden metrin maadoituksen asentaminen materiaaleineen maksaa noin 7-8 €. Asennettavien maadoitusten määrä on tyypillisesti 50 % - 80 % koko voimajohdon mitasta, mikä tarkoittaa sitä että esimerkiksi 40 km pitkän voimajohdon maadoituskustannukset ovat tyypillisesti luokkaa 170 000 € - 300 000 €. Asennettavan maadoituksen määrä riippuu voimakkaasti pylväspaikkojen maaperän resistiivisyyksistä sekä yleisesti alueesta, johon voimajohtoa ollaan suunnittelemassa. Suunnittelun ja rakennuttamisen kokonaiskustannukset kyseisen mittaiselle voimajohdolle ovat tyypillisesti 5-6 miljoonan euron luokkaa, eli pylväasmaadoitusten kustannusten vaikutus koko voimajohdoprojektin kustannuksiin on prosentuaalisesti merkittävä. Maadoituksia suunnitellessa kannattaa kuitenkin unohtaa kustannukset ja keskittyä henkilöturvallisuuden takaamiseen.

5.4 Henkilöturvallisuus

Maadoitussuunnittelun lähtökohtaisesti tärkein aspekti on henkilöturvallisuus. Sen varmistaminen ajaa lähtökohtaisesti teknillistaloudellisten ratkaisujen ylitse. Kohdassa 3.3 on esitettyinä laajemmin standardit, määräykset ja ohjeet, jotka määrittelevät vaateet henkilöturvallisuudelle pylväspaikoilla. Pylväällä esiintyvä potentiaali ei saa lähtökohtaisesti ylittää $2 \cdot U_{tp}$ eli 1074V arvoa voimajohdon suoja-alueen laukaisuajan ollessa 0,2 sekuntia. Tähän kuitenkin on olemassa poikkeuksia pylväiden osalta, jotka sijaitsevat alueilla, joilla ihmisten liikkumisen mahdollisuus on hyvin pieni, toisin sanottuna korvessa. Tällaisilla syrjäisillä paikoilla, joissa voidaan olettaa siellä liikkuvien ihmisten käyttävän kenkiä, voidaan kosketusjännitteen laskemiseen käyttää lisäresistansseja. Jos tämän lisäksi maaperän pinta on huonosti johtavaa, voidaan pylväspaikan sallittuna kosketusjännitteenä käyttää jopa $4 \cdot U_{tp}$ arvoa. Vuorostaan alueilla, joilla on oletettavaa, että ihmiset liikkuvat paljasjaloin tai viettävät pidempiä yhtenäisiä jaksoja kosketusjännitteen rajaksi on määrätty huomattavasti alhaisempi $1 \cdot U_{tp}$. Lisäksi näillä paikoilla potentiaalintasausedelektrodin käyttö on pakollista.

5.5 Ohjeistus maadoitussuunnitteluun

Opinnäytetyön tuloksena yritykselle tuotettiin myös toinen seikkaperäinen ohjeistus. Tämä ohjeistus tehtiin suunnittelijalle maadoitussuunnittelun tueksi. Ohjeistuksessa käytiin laajasti läpi yrityksen käytössä oleva maadoitussuunnittelumenetelmä ja esiteltiin normaalista poikkeavissa tilanteissa toiminta. Ohjeistuksella pyrittiin saamaan maadoitussuunnittelusta yrityksen laajuudella yhtenäistä ja perusteltua. Tällä taataan asiakkaille se, etteivät suunnitellut maadoitukset perustu yksittäisten henkilöiden mielipiteisiin, vaan tilastoihin, faktoihin ja analyyseihin.

Ohjeistuksessa pyrittiin ottaa mahdollisimman laajasti kantaa vaihteleviin olosuhteisiin, mutta tämän opinnäytetyön jäljiltä se ei silti kata jokaista maadoitussuunnittelussa vastaan tulevaa tilannetta. Sen takia on tärkeää, että ohjetta muokataan projektien mukaan ja siihen liitetään aina uusia vastaantulevia poikkeavia tilanteita.

Ohjeistuksessa esitettiin myös teoria johon maadoitussuunnittelu pohjautuu. Eri suunnittelumenetelmien vertailu on tällöin helpompaa, jos jatkossa löydetään potentiaalisesti optimaalisempi tapa toteuttaa voimajohdon pylväsmaadoituksia sekä niiden suunnittelua.

Ohjeistukseen tullaan liittämään opinnäytetyön jälkeen lopullinen tapa, miten pylväsrajojen hahmotelmat piirretään jatkossa, kunhan se menetelmä saadaan kehitettyä loppuun saakka ja testattua käytännössä toimivaksi. Tällä haetaan jälleen yhtenäistä yrityksen sisäistä visuaalista ilmettä dokumentoinnissa vaikka työskenneltäisiin eri projektien parissa.

6 POHDINTA

6.1 Opinnäytetyön hyödyt

Opinnäytetyön ansiosta Rejlers Finlandilla on mahdollisuus tarjota asiakkailleen entistä kokonaisvaltaisempi palvelu voimajohtojen esi- ja yleissuunnittelusta. Prosessin virtaviivaistaminen on parantanut huomattavasti maaperän resistiivisyysmittauksien sekä maadoitussuunnittelun kustannustehokkuutta. Voimajohtojen esi- ja yleissuunnittelu vaikuttaa jatkossa enemmän ja enemmän kilpaillulta yritystoiminnalta, joten tämän prosessin kehittäminen kilpailukykyisemmälle tasolle on yritykselle tärkeää.

6.2 Maadoitussuunnittelun tulevaisuus

Maadoitussuunnittelussa itsessään kovin moni asia tulee tuskin muuttumaan tulevaisuudessakaan. Teoriaa johon maadoitusten suunnittelu pohjautuu, on laajasti tutkittu ja siitä on jo lähes sadan vuoden kokemus Suomen olosuhteissa, joten maadoittamisesta nykyisin käytössä olevat menetelmät ovat lähtökohtaisesti järkkymättömät. On kuitenkin joitain asioita, joita tulevaisuudessa voidaan suunnittelun teorian ympärillä pyrkiä kehittämään. Näitä asioita on listattuna alle.

Maaperän resistiivisyysmittauksissa on käytetty jo todella pitkään pääsääntöisesti Wenner-menetelmää mittaamiseen, ja yhtenä suurimpana perusteluna sen puolesta on ollut resistiivisyyden laskennan yksinkertaisuus. Tämä on johtunut siitä, ettei ennen, toisin kuin nykyään, ole ollut käytössä laskentataulukko-ohjelmistoja, joten tulokset on laskettu käsin. Tulevaisuudessa siis kannattaisi pohtia mahdollisuutta tutkia laajemmin Wenner- ja Schlumberger-Palmer-menetelmien tulosten eroja, sekä olemassa olevien maadoitusten vaikutusta niihin. Käytettävän maaperän resistiivisyydenmittausmenetelmän oikein valitsemisen merkitys tulevaisuudessa voi korostua, sillä maahan asennetun sähköä johtavan materian määrä tulee jatkossa todennäköisesti vain kasvamaan.

Yhtenä tulevaisuuden näkymänä maadoitussuunnittelulle on paremmat laskentaohjelmistot. Nämä laskentaohjelmistot laskisivat pylväspaikoille määrittelystä sallitusta maapotentialista suoraan pylväspaikalla tarvittavan maadoituksen määrän. Tämä optimoisi asennettavan kuparin määrän, mutta vähentäisi samalla ylimitoittamista, jota pylväsmaadoitusten suuripiirteisempi suunnitteleminen jättää. Ylimitoittaminen on kuitenkin jossain määrin positiivinen asia, sillä maaperä saattaa poiketa mitatusta ja ylimitoittamalla ollaan aina turvallisemmalla puolella standardia.

Eräänä potentiaalisena vaihtoehtona tulevaisuuden maaperän resistiivisyydenmittauksille on geologian tutkimuskeskuksen tekemän maaperän sähkömagneettisen kartoituksen käyttäminen maadoitusten suunnitteluun. Tämän menetelmän luotettavuutta pitäisi kuitenkin arvioida todella kattavasti ennen sen käyttöönottoa. Jos lähdeaineisto todettaisiin luotettavaksi, eliminoisi se maaperän resistiivisyysmittauksien tarpeen tiettyjä poikkeustapauksia lukuun ottamatta. Tämä tarkoittaisi todella suuria säästöjä koko maadoitussuunnitteluun.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aiheeksi valittiin kesällä 2018 maaperän resistiivisyysmittauksien sekä maadoitus-suunnittelun prosessien tehostaminen jo ennen niiden aloittamista. Tehtävänä oli ottaa oppia näistä 2018 tehdyistä mittauksien sekä suunnittelun vaiheista ja havaita niissä mahdollisesti esiintyviä puutteita. Tämän lähtökohdan pohjalta alettiin kehittämään yritykselle modernia ja kustannustehokasta tapaa toteuttaa mittaukset ja suunnittelu. Opinnäytetyön tekemiselle annettiin aikaa 2019 toukokuun loppuun saakka, sillä uusien projektien pylväspaikkojen maaperän resistiivisyysmittaukset oli määrä aloittaa saman vuoden kesäkuussa. Tässä opinnäytetyössä ei otettu kantaa maaperän resistiivisyysmittausmenetelmien soveltuvuuden vertailuun puutteellisen mittausdatan vuoksi. Opinnäytetyön talvelle ajoittumisen vuoksi ei myöskään ollut mahdollista suorittaa näitä mittauksia itse.

Opinnäytetyön perustana toimineet maaperän resistiivisyysmittaukset ja maadoitussuunnittelu aloitettiin kesällä 2018, vaikka varsinaisesti opinnäytetyön kirjoittamisen aloittaminen viivästyikin tammi-kuulle 2019 saakka. Näiden mittauksien pohjalta lähdettiin kehittämään prosesseista kustannustehokkaampia ja laadukkaampia. Lähtökohtaisesti jo ennen ensimmäisiä mittauksia tiedettiin, että maastossa tehtävillä maaperän resistiivisyysmittauksissa tahdotaan jatkossa käyttää digitaalisia kartta-aineistoja sekä mittauspöytäkirjoja alun perin käytettyjen paperisten sijaan. Tämän havaitun tarpeen perusteella kehitettiin Excel-laskentataulukko-ohjelmalla mittauspöytäkirja, joka laskee maaperän resistiivisyyden perusteella pylväspaikalle asennettavien maadoitussäteiden määrän. Tämä auttoi kehittämään maadoitussuunnittelua enemmän maastossa toteutettavaan suuntaan, siten että toimistolla varmistettaisiin vain standardien asettamien rajojen alittaminen.

Opinnäytetyön aikana tuotettiin kaksi ohjeistusta yrityksen käyttöön tulevaisuuden maaperän resistiivisyysmittauksia ja maadoitussuunnittelua varten. Näiden ohjeistusten avulla käytännöt maastossa ja toimistolla saadaan yhtenäistettyä, vaikka niitä suorittavat työntekijät vaihtuisivatkin. Tämän lisäksi prosessien kustannustehokkuus saatiin kilpailukykyiselle tasolle.

Lopuksi kerättiin kaikki työn aikana tehdyt havainnot sekä tutkimustyö ja niiden pohjalta muodostettiin tämä opinnäytetyön raportti. Opinnäytetyö ja sen tuotokset saatiin yrityksen käyttöön sovittuun määräaikaan mennessä, kuin myös varsinainen opinnäytetyökin.

8 LÄHDELUETTELO

- An American National Standard ANSI. (1983). *ANSI/IEEE Std 81-1983: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Chauvin Arnoux Group. (2014). *Maadoitusvastuksen mittaussopas*. Chauvin Arnoux Group.
- Elovaara, J.;& Haarla, L. (2011). *Sähköverkot II - Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet*. Gaudeamus Helsinki University Press.
- Energiavirasto. (31. 1. 2018). *Sähköverkon haltijat: Energiavirasto*. Noudettu osoitteesta <https://www.energiavirasto.fi/sahkoverkon-haltijat>
- Fingrid Oy. (2016). *Näin etenee voimajohtohanke*.
- International Telecommunication Union ITU. (2008). *Rec. ITU-T K.68 Operator responsibilities in the management of electromagnetic interference by power systems on telecommunication systems*. International Telecommunication Union ITU.
- Kuusinen, J. (Marraskuu 2018). (T. Keskitalo;& H. Sipilä, Haastattelijat)
- Löf, N. (Syyskuu 2018). (J. Pekkanen, Haastattelija)
- Rejlers Finland Oy. (31. 1. 2018). *Toimialat ja palvelut/Sähköverkot: Rejlers Finland Oy*. Noudettu osoitteesta https://www.rejlers.fi/Toimialat_ja_palvelut/Energia/Sahkoverkot/
- Rejlers Finland Oy. (31. 1. 2018). *Yritys: Rejlers Finland Oy*. Noudettu osoitteesta <https://www.rejlers.fi/Yritys/>
- SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS. (2014). *SFS-EN 50341-1 VAIHTOSÄHKÖILMAJOHDOT YLI 1 KV JÄNNITTEILLÄ. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt*. SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS.
- SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS. (2015). *SFS-EN 50341-2-7 VAIHTOSÄHKÖILMAJOHDOT YLI 1 KV JÄNNITTEELLÄ. Osa 2-7 Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt*. SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS.
- SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS. (2018). *SFS 6001:2018 Suurjännitesähköasennukset*. SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO SFS.
- Turvallisuus ja kemikaalivirasto TUKES. (2017). *Onnettomuudet*. Haettu 29. 4. 2019 osoitteesta Sähkötapaturmissa kuolleet 1980-: <https://tukes.fi/onnettomuudet/sahkokuolemat>
- Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. (1995). *VHV-ohje 02*. Sähköenergialiitto ry SENER.
- Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. (1995). *VHV-ohje 05*. Sähköenergialiitto ry SENER.
- Viestintävirasto. (2014). *43 F/2015M*. Viestintävirasto.
- Vionice. (2018). <https://map.vionice.io>. Haettu 17. Huhtikuu 2019 osoitteesta <https://map.vionice.io>
- Väljä, J. (2010). *Voimajohtojen induktiovaarajännitteet*. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

LIITE 1: VANHA MAADOITUSSUUNNITELMA

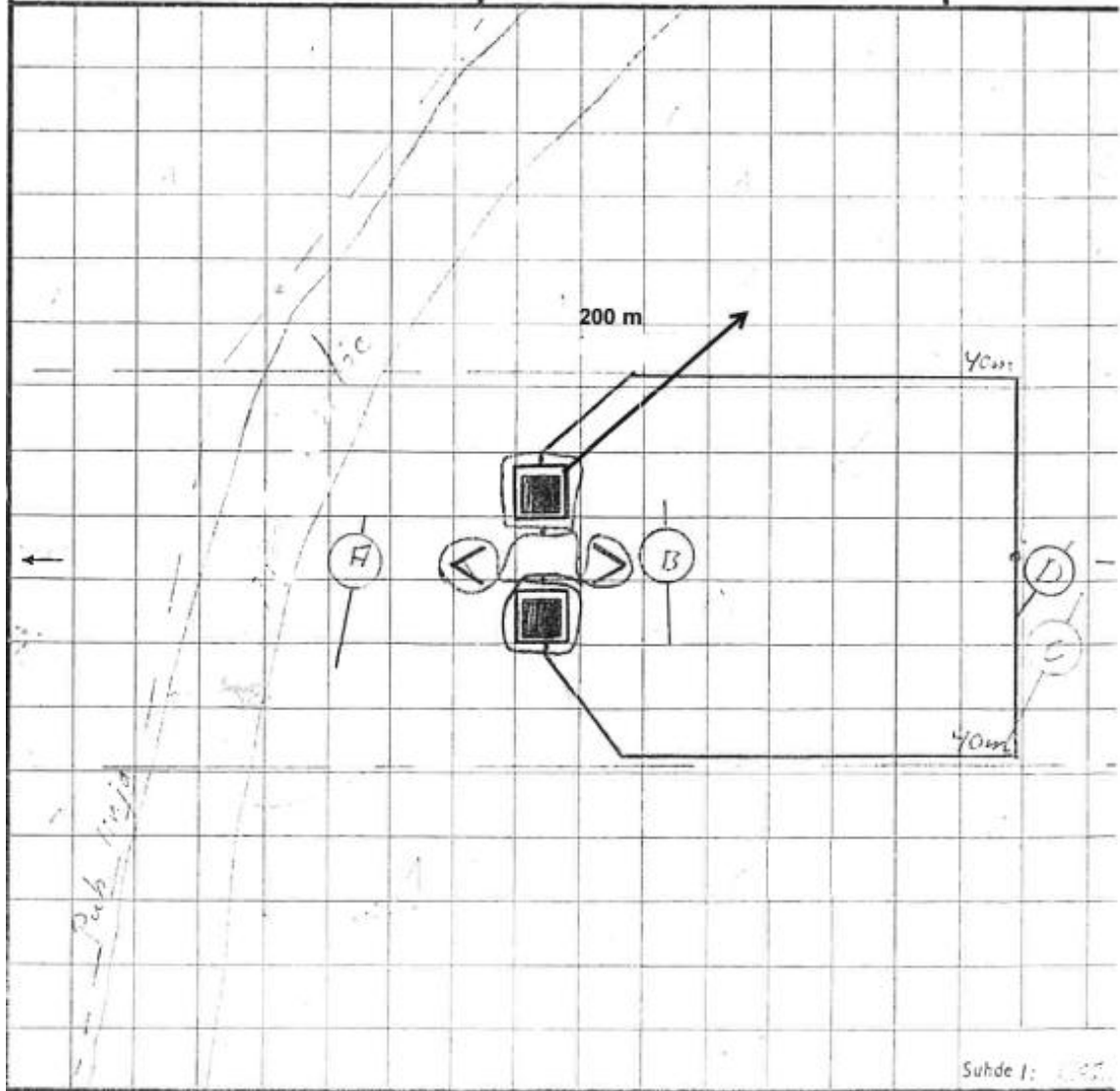
110 kV johto — Pylväsmaadoitukset Pylvään laatu: (työ-n:o)

Pylväs n:o

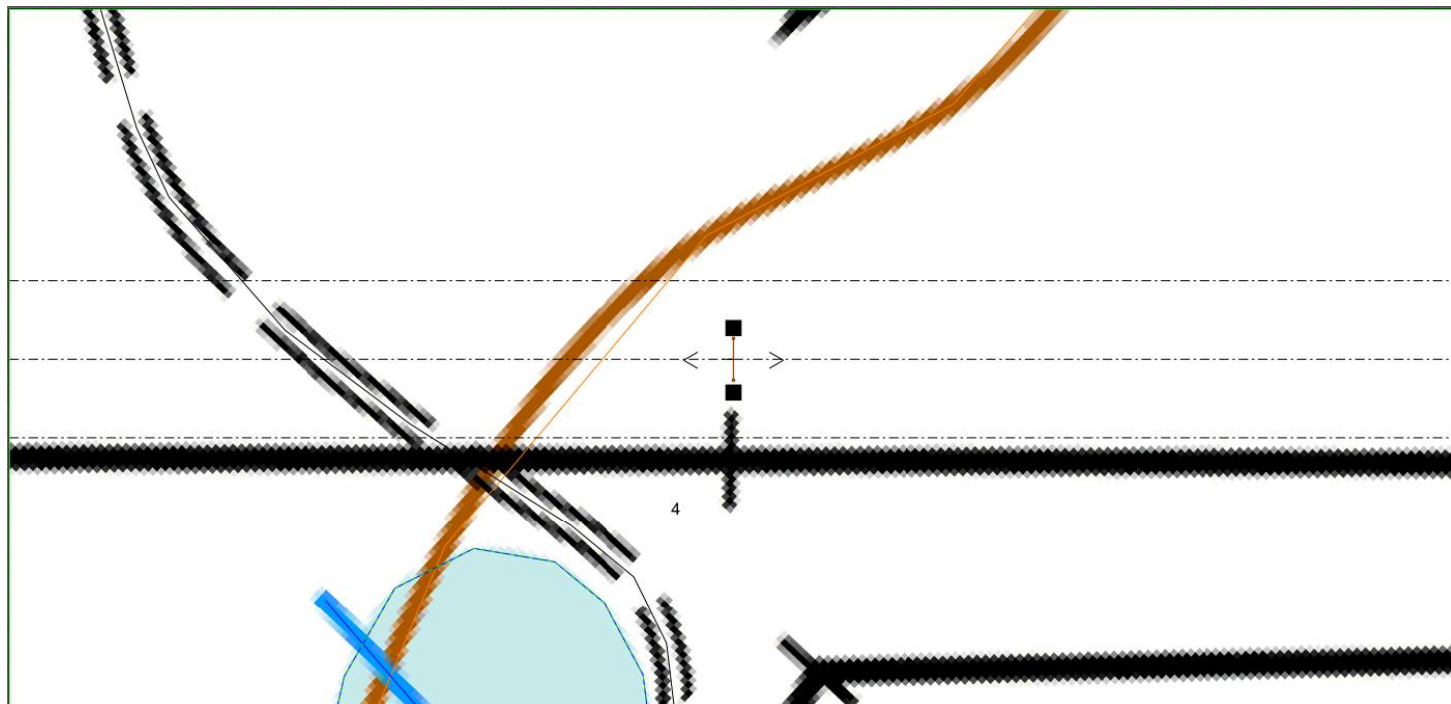
Maadoitusten suunnittelumittaukset			Pylvään luonn.maadoitusvastus			R _{mi} :stä laskettu									
			R _{mi} = 680 Ω			e = 8000 Ω m									
Pka:	A		B		C		D		E						
Maa:	Kallio/Hiekka		Hiekka		Turve		740Vg								
a	R	e _r	e _a	R	e _r	e _a	R	e _r	e _a	R	e _r	e _a	R	e _r	e _a
m	Ω	Ω m	Ω m	Ω	Ω m	Ω m	Ω	Ω m	Ω m	Ω	Ω m	Ω m	Ω	Ω m	Ω m
1	440	2800	4000	270	1400	1800	70	190	200	63,7	400				
2	300	3800	5000	140	1800	2400	16	200	410	43,5	550				
4	170	4700	4500	92	2300	3100	16	450	790	37,0	930				
8	81	4100	4700	55	2800	3300	11	550	810	35,3	1800				
16	51	5100	8900	29	3700	8900	7,1	710	1800	33,1	3300				

Maadoitussuunnitelma:			Maadoitustyö:		
Odotettavissa R _m ≈	24 Ω		Valmistunut		
12 mm ² - käyttö	180 m		12 mm ² - käyttö	180 m	
mm ² - käyttö	m		mm ² - käyttö	m	
mm ² - käyttö	m		mm ² - käyttö	m	
1" putkia	kpl =		1" putkia	kpl =	

Huom.		Huom.	
-ohje			



LIITE 2: UUDEN MAADOITUSSUUNNITELMAN PROTOTYYPPI



ASIAKKAAN LOGO		Kartassa käytettävät viivatyytit ja mittakaava		MAADOITUSPÖYTÄKIRJA							
				Mittaus		A		B		C	
a (m)		R(Ω)	ρ(Ωm)	R(Ω)	ρ(Ωm)	R(Ω)	ρ(Ωm)	R(Ω)	ρ(Ωm)		
1		0	0	0	0	0	0	0	0		
2		0	0	0	0	0	0	0	0		
4		0	0	0	0	0	0	0	0		
8		0	0	0	0	0	0	0	0		
16		0	0	0	0	0	0	0	0		
Johto:	Mittaaja(t):	Pylväsnumero ja laji:		Maadoitustyö				Huomioitavaa			
Sutu:	Mittaus pvm:	Jännitetaso: 110 kV		Valmistunut: / /							
Maadoitussuunnitelma		Huomioitavaa		25 mm2 CU-köyttä		70 mm2 CU-köyttä		Eristysmuoviputkea(PVC)			
Odotettavissa R _{SOHz} /R _{ekv} (Ω)		0,0		m		m		m			