

Eino Niittymäki

VOIMAJOHTOMAADOITUSTEN MITOITTAMINEN

Diplomityö
Informaatioteknologian
ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Kari Lahti
Tarkastaja: Seppo Valkealahti
Kesäkuu 2023

TIIVISTELMÄ

Eino Niittymäki: Voimajohtomaadoitusten mitoittaminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan DI-ohjelma
Kesäkuu 2023

Voimajohtomaadoituksilla on oleellinen tehtävä maadoitusjännitteen ja häiriötiheyden alentamisessa sekä suojauksen luotettavan toiminnan mahdollistamisessa. Fingridin pylväsmaadoitusten suunnittelussa hyödynnetään suurelta osin Imatran Voiman luomaa ohjeistusta sekä tavoitearvokäyrää. Käyrällä maadoitusresistanssin tavoiteltava arvo määritetään maan ominaisresistanssin avulla. Imatran Voiman luoman tavoitearvokäyrän luomisperiaatteet ovat kuitenkin suurelta osin kadonneet ajansaatossa. Koska käyrä on luotu vuosikymmeniä sitten, ei voida olla varmoja luomisperusteiden sopivuudesta nykypäivän maadoitussuunnitteluun. Tästä syystä tämän työn tavoitteena oli muodostaa nykypäivän parametrejä vastaavat suuntaviivat maadoitussuunnitteluun. Suuntaviivat pyrittiin muodostamaan niin, että työn havaintojen pohjalta maadoitussuunnittelun virallinen ohjeistus voitaisiin päivittää. Lisäksi työn tavoitteena oli yhtenäistää tiettyjä maadoitussuunnittelun käytäntöjä.

Työssä hyödynnettiin suurelta osin kirjallisuutta ja siihen pohjautuvaa laskentaa. Kirjallisuuden lisäksi nykyisen maadoitussuunnittelun kokonaiskuvaa muodostettaessa keskusteltiin myös maadoitussuunnittelua suorittavan tahon kanssa. Lisäksi maadoitussuunnitteluun liittyen lähetettiin lyhyt kysely Fingridille maadoitussuunnittelua suorittaville yrityksille. Työssä hyödynnettiin myös Fingridin tilastoimaa tietoa. Tilastotiedon avulla pyrittiin tutkimaan maadoituselektrodin poikkipinnan kasvattamisen tarvetta maadoitusten ikääntymisen sekä maadoitusvaurioiden näkökulmista. Lisäksi tilastotietoa hyödynnettiin tarkasteltaessa ukkoshäiriöherkkyyden yhteyttä maadoituksiin nykyisessä siirtoverkossa. Uuden tavoitearvokäyrän muodostus puolestaan pohjautui kirjallisuuden sekä sen pohjalta luotuun laskentaan.

Työn tarkastelujen lopputuloksena maadoitussuunnitteluun muodostettiin tavoitearvokäyrä, joka pohjautuu takaiskutiheyteen. Muodostettu käyrä on käyttöperiaatteiltaan samanlainen kuin Imatran Voiman luoma tavoitearvokäyrä. Näin ollen muodostettu käyrä ei itsessään aiheuta suuria muutoksia maadoitussuunnitteluun. Työn muut tarkastelut eivät myöskään johda suuriin muutoksiin maadoitussuunnittelussa. Maadoituselektrodin poikkipinnan kasvatukselle ei työssä löydetty perusteluja. Maadoitussuunnitteluun on kuitenkin perusteltua lisätä vaihe, jossa maadoituselektrodin terminen kesto varmistetaan. Erityisesti tarkastelu tulee suorittaa pylväille, joilla on perusmaadoituksen lisäksi yksi lisäsäde. Työssä luodulla tavoitearvokäyrällä sekä ehdotetuilla muutoksilla tulisi vielä suunnitella todellisen voimajohdon maadoitukset. Näin ollen käytännön vaikutukset maadoitussuunnitteluun voitaisiin havaita.

Avainsanat: Voimajohtomaadoitukset, maadoitusten mitoittaminen, maadoitussuunnittelu, siirtoverkko

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Eino Niittymäki: Dimensioning of powerline groundings
Master's Thesis
Tampere University
Master's Programme in Electrical Engineering
June 2023

Powerline groundings have an essential role in lowering grounding voltages and outage rates. In addition, powerline groundings enable reliable protection of powerlines. The dimensioning and design of Fingrid's tower groundings are largely based on Imatran Voima's specification and target value curve. The target value for grounding resistance can be read from the curve and it is based on the soil's resistivity. The curve was created decades ago and the basis for it is largely forgotten. Thus, it is not certain if the curve's basis is still functional for today's grounding design. The objective of this master's thesis is to create guidelines for powerline grounding design. These guidelines could be then used to update the official specification for grounding design. In addition, one goal was to unify some of the practices in grounding design.

The thesis is largely based on scientific literature and calculations based on aforementioned literature. Additionally, grounding design was discussed with a representative from a grounding designing company to form an understanding of grounding design. Further, a short survey was sent to different grounding designing companies who work with Fingrid. In addition to aforementioned methods, Fingrid's statistics were also utilized in the thesis. The statistics were used to study the need for increasing the grounding electrode's cross section caused by aging or damaging of electrodes. The statistics were also utilized to study the correlation between lightning performance and groundings in the current transmission network. Forming of the new target value curve in turn was based on scientific literature and calculations.

As a conclusion of the thesis' research a new back flashover-based target value curve was created. The curve is similar to Imatran Voima's curve in its operating principles. Thus, the curve itself does not change grounding design drastically. The thesis' other findings likewise will not cause major changes to grounding design. Increasing the cross section of a grounding electrode was not found to be necessary. However, an additional phase to the grounding design process is recommendable based on the findings. In this phase the adequacy of the electrode's thermal endurance should be ensured. Focus on this phase should be on towers with one radial grounding electrode. The created target value curve should be tested in practice by using it in grounding designing of a real transmission line. Other suggested changes to the designing process could be tested simultaneously. With a practical test the actual benefits or disadvantages could be noticed.

Keywords: Powerline grounding, grounding dimensioning, grounding design, transmission network

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö toteutettiin Fingrid Oyj:lle Verkon kunnonhallinta yksikössä. Haluan kiittää kaikkia matkassa mukana olleita henkilöitä, jotka ovat auttaneet diplomityön edistämistä. Erityisesti haluan kiittää Fingridin ohjausryhmää: Mikko Jalosta, Keijo Välimaata ja Olli Karaa. Erityisesti Mikko Jalosen kanssa käydyt keskustelut olivat diplomityötä fantastisesti edistäviä. Lisäksi haluan kiittää Heikki Sorria, jonka kanssa käyty keskustelu auttoi ymmärtämään maadoitussuunnittelun sielunelämää. Haluan myös kiittää Antti Mäkelää Ilmatieteen laitokselta saadusta salama-aineistosta, joka auttoi työssä suuresti. Viimeisenä muttei vähäisimpänä haluan kiittää Tampereen yliopiston ohjaajaa Kari Lahtea hyvästä ja selkeästä palautteesta ja avunannosta työn aikana.

Tampereella, 18.6.2023

Eino Niittymäki

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VOIMAJOHTOMAADOITUKSET	4
2.1 Yleiset vaatimukset	4
2.2 Maadoitus- ja vaarajännitteet	7
2.3 Maadoitusimpedanssi	11
2.4 Maan ominaisresistanssi	17
2.5 Pylväsmaadoitukset	19
2.5.1 Perusmaadoitus	19
2.5.2 Lisämaadoitukset	22
3. MAADOITUSSUUNNITTELU	26
3.1 Maadoitusresistanssin laskenta	28
3.2 Maadoitussuunnitteluun vaikuttavat tekijät	31
4. MAADOITUSELEKTRODIN POIKKIPINNAN KASVATUSTARVE	35
4.1 Kustannushyöty	35
4.2 Terminen kesto	38
4.3 Maadoitusten ikääntyminen	40
4.4 Maadoitusvauriot	44
5. UKKOSHÄIRIÖHERKKYYS	47
5.1 Nykyverkon ukkoshäiriöherkkyydestä tarkastelu	47
5.2 Takaiskuhäiriöherkkyys	54
6. UUDEN TAVOITEARVOKÄYRÄN MUODOSTAMINEN	71
6.1 Uusi tavoitearvokäyrä	83
6.2 Maadoitussuunnittelun kokonaisuus sekä muutokset	92
7. YHTEENVETO	96
LÄHTEET	99
LIITE 1: MAADOITUSSUUNNITTELUN PERIAATTEELLINEN KULKU	102
LIITE 2: TYÖSSÄ MUODOSTETTU TAVOITEARVOKÄYRÄ	103

LYHENTEET JA MERKINNÄT

$3I_0$	nollavirta
A	maadoitusjohtimen tai -elektrodin poikkipinta-ala
BFR	takaiskutiheys
b	vaakatasoinen etäisyys ukkosjohtimien välillä
C	kytkentäkerroin
c	valonnopeus
C_n	rahavirta aikaperiodilla
D	maadoituspallon, -levyn tai -ruudukon halkaisija
d	maadoitusjohtimen halkaisija
D_d	vaakasuuntainen etäisyys johdinten välillä
d_p	pylväsjalcojen välinen etäisyys
E_0	koronailmiön alkamiseen vaadittu sähkökentän voimakkuus
GFD	keskimääräinen vuosittainen maasalamatiheys neliökilometriä kohden
h	maadoituselektrodin upotussyvyys
H_1	salamavirralisen johtimen korkeus
h_1	korkeus pylvään keskiosaan
H_2	normaalitilassa olevan johtimen korkeus
h_2	korkeus pylvään keskiosasta yläosaan
h_s	salamavirralisen johtimen korkeus maasta
H_t	koko pylvään korkeus
h_t	ukkosjohtimen korkeus maanpinnasta pylvään kohdalla
I	salamavirta
\bar{I}_a	suunnasta a pylväälle tuleva maasulkuvirta
\bar{I}_b	suunnasta b pylväälle tuleva maasulkuvirta
I_C	kriittinen salamavirta
\bar{I}_E	maadoitusten läpi virtaava maasulkuvirran osa
I_{e_j}	pylväältä j maahan kulkeva virta
I_j	johtimen virran tehollisarvo
I_k	impulssikerroin
IVO	Imatran Voima Oy
K	virralisen osan materiaalista johtuva vakio
KAH	keskeytyksestä aiheutunut haitta
K_{sp}	jännekerroin
L	maadoituselektrodin pituus
M	maadoitusresistanssin muutosprosentti
m_n	maadoitusmittaus
m_{n-x}	aikaisempi maadoitusmittaus $x:n$ ollessa 1 tai 2
MS_{100}	vuosittainen maasulkumäärä sataa kilometriä kohden
N	aikaperiodien määrä
n	aikaperiodi
N_L	vuosittaiset salamaniskut voimajohtoon 100 kilometriä kohden
NPV	nettonykyarvo
$P(I)$	salamavirran suuruuden todennäköisyys
$P(I_C)$	todennäköisyys kriittisen virran ylitymiselle
\bar{r}	reduktiokerroin
r_1	pylvään yläosan säde
r_2	pylvään keskiosan säde
r_3	pylvään alaosan säde
r_c	koronan säde johtimen ympärillä

R_E	maadoituselektrodin maadoitusresistanssi
r_{eq}	ekvivalenttinen pylvään säde
$r_{eq'}$	johtimen kaarevuutta kuvaava ekvivalenttinen säde
R_i	impulssireduoitu maadoitusresistanssi
r_{k1}	salamavirralisen johtimen säde korona huomioiden
r_{lk}	laskentakorkokanta
r_p	pylvään säde
R_V	maadoitusresistanssien keskiarvo Vaarajännite-sovelluksesta
S	maasulkuun keskimäärin vaadittava salamamäärä
s	maadoituslevyn paksuus
s_j	pisteen P ja pylvään j maadoitusten keskipisteen välinen etäisyys
T_A	syöksyaallon kulku aika vaihejohtimen korkeudelle
t_F	syöksyaallon rinnan nousuaika
t_i	vikavirran kesto aika
T_T	syöksyaallon kulku aika maasta pylvään huippukohtaan eli ukkosor- teen
U_{50}	eristinketjun syöksyjännitelujuus standardiaallolla 1,2/50 μ s
U_{50NS}	eristinketjun syöksyjännitelujuus standardiaaltomuodosta 1,2/50 μ s poikkeavalle aaltomuodolle
U_c	arvio eristinketjun ylilyöntijännitteestä takaiskun hetkellä
U_F	pylväsmaadoitusten aiheuttama jännite eristinketjun yli
U_I	eristinketjun yli vaikuttava huippujännite
\bar{U}_P	pylväspotentiaali eli maadoitusjännite
U_{PF}	vaihejännite salamaniskun aikana
V_P	pisteen P potentiaali
\bar{Z}_a	voimajohdon alkupään maadoitusimpedanssi
\bar{Z}_{a-1}	pylvästä a-1 edeltävä johdon alkupään maadoitusimpedanssi
\bar{Z}_b	voimajohdon loppupään maadoitusimpedanssi
\bar{Z}_{b+1}	pylvään b+1 jälkeinen johdon loppupään maadoitusimpedanssi
\bar{Z}_E	ekvivalenttinen maadoitusimpedanssi
\bar{Z}_k	ketjuimpedanssi
\bar{Z}_M	ukkos- ja vaihejohtimen välinen keskinäisimpedanssi
Z_P	impulssi-impedanssi
\bar{Z}_{p+1}	seuraavan pylvään maadoitusimpedanssi
Z_T	pylvään aaltoimpedanssi
\bar{Z}_u	ukkosjohtimen impedanssi (maa paluutienä)
$\bar{Z}_{u(i-1)}$	pylvääseen kytketyn johdon loppupään puolen ukkosjohtimen impe- danssi
$\bar{Z}_{u(i+1)}$	pylvääseen kytketyn johdon alkupään puolen ukkosjohtimen impe- danssi
β	lämpötilassa 0 °C olevan virralisen osan resistanssin lämpötilaker- toimen käänteisarvo
ΔU	pylvään jännitehäviö
θ_i	alkulämpötila
θ_f	loppulämpötila
ρ	maan ominaisresistanssi
τ	syöksyaallon selän puoliaika

1. JOHDANTO

Kantaverkossa voimajohtopylväät maadoitetaan turvallisuuden ja häiriöherkkyyden parantamiseksi. Lisäksi maadoitukset mahdollistavat suojauksen luotettavan toiminnan. Koska maadoituksilla on oleellinen tehtävä voimajohtojen toiminnassa sekä turvallisuuden varmistamisessa, on myös maadoitussuunnittelun toiminnallisuus oleellista. Maadoitussuunnittelussa voimajohtomaadoitukset suunnitellaan ennen kaikkea täyttämään turvallisuusvaatimukset. Suunnittelussa tärkeää on kuitenkin huomioida myös kokonaisuutta esimerkiksi häiriöiden kannalta.

Fingridin voimajohtojen maadoitussuunnittelu pohjautuu Imatran Voima Oy:n (IVO) luomaan tavoitearvokäyrään sekä ohjeistukseen. Tavoitearvokäyrä esiintyy 70-luvun loppupuolen teksteissä, joten käyrän voidaan olettaa olevan yli 40 vuotta vanha. Tavoitearvokäyrällä voimajohtopylväälle määritetään tavoiteltava maadoitusresistanssin arvo, joka perustuu maan ominaisresistanssiin. Käyrän käyttötavat ovat yleisesti tiedossa mutta tavoitearvokäyrän taustalla olevat valinnat sekä teoria eivät ole täysin tiedossa. Voidaan olettaa, että tavoitearvokäyrä pohjautuu sen luomisajankohdan aikaisiin parametreihin, esimerkiksi ukkoshäiriöherkkyyteen ja materiaalikustannuksiin. Oletettavasti tavoitearvokäyrä on muodostettu jonkinlaisella teknistaloudellisella optimoinnilla, sillä se ei vaikuta tavoittelevan mitään vaatimusta suoraan. Koska teoria ja valinnat ovat hukkuneet ajansaatossa, jää tavoitearvokäyrän tausta epäselväksi.

Tavoitearvokäyrän avulla maadoitussuunnittelussa tavoitellaan tiettyjä resistanssin arvoja. Voidaan kuitenkin kyseenalaistaa arvojen tavoittelu, jos ei tiedetä, mistä kyseiset tavoitearvot muodostuvat. Koska tavoitearvokäyrä on vanha, on mahdollista, että käyrän luonnissa käytetyt parametrit eivät ole enää samoja. Vaikka käyrän luomisperusteita ei tiedetä, voi tämä mahdollinen muutos johtaa tavoitearvoihin, jotka eivät enää tavoittele optimaalista lopputulosta. Myös muissa maadoitussuunnittelun osa-alueissa on epävarmuuksia ja eri maadoitussuunnittelijat ratkaisevat asiat eri tavoin. Esimerkiksi maadoitusresistanssin laskennassa käytettävistä kertoimista esiintyy eri käytäntöjä.

Näistä syistä työn tavoitteena on luoda maadoitussuunnitteluun nykypäivää vastaavat suuntaviivat, joiden pohjalta maadoitussuunnitteluun tekninen määrittely voidaan päivittää. Tämän lisäksi tavoitteena on yhtenäistää maadoitussuunnittelun käytäntöjä niiltä osin kuin se on järkevää. Toisin sanoen tavoitteena on tarkastella maadoitussuunnittelun kokonaisuutta nykypäivän tilanteessa. Maadoitussuunnittelun suuntaviivoilla ei

automaattisesti tarkoiteta uutta tavoitearvokäyrää, vaan työn aikana tarkasteltiin eri vaihtoehtoja maadoitussuunnitteluun. Koska työssä käsitellään nykypäivää ei 220 kV:n verkkoon oteta kantaa, sillä uusissa asennuksissa kyseistä jännitetasoa ei esiinny. Tavoitteisiin pääsy edellyttää, että esimerkiksi uuden tavoitearvokäyrän tausta sekä valinnat esitellään riittävän tarkasti. Näin ollen joitain maadoitussuunnittelun epävarmuuksia ratkotaan automaattisesti.

Maadoitussuunnittelusta ja maadoitusmittauksesta on tehty aiempia opinnäytetöitä, esimerkiksi Luukkaisen (2020) diplomityö, joka käsittelee maadoitusmittauksia ja maadoitusprosessin kehittämistä. Lisäksi maadoitussuunnittelun prosessia kuvailee esimerkiksi Fagerin (2016) opinnäytetyö. Aiemmat työt eivät kuitenkaan ota kantaa maadoitussuunnitteluun ylätasolta, johon tällä työllä pyritään. Työssä ei käsitellä jokaista maadoitussuunnittelun yksityiskohtaa. Sen sijaan kantaa otetaan asioihin, joissa koetaan olevan epävarmuustekijöitä. Lisäksi työ käsittelee vain pylväasmaadoituksia ja niiden suunnittelua. Sähköaseman tai muihin maadoituksiin ei oteta työssä kantaa.

Työssä maadoitussuunnittelun kokonaisuutta sekä suuntaviivoja muodostetaan kirjallisuuteen ja laskentaan perustuen. Lisäksi mahdollisuuksien mukaan keskustellaan maadoitussuunnittelussa mukana olevien tahojen kanssa. Työn tavoitteisiin pääsy nähdään mahdollisena ilman omia testejä, sillä maadoituksista löytyy runsaasti tieteellisiä tekstejä. Esimerkiksi pylväasmaadoituksen käyttäytymisestä salamasyöksyjännitteen alaisena löytyy useita artikkeleita. Laskennan ja kirjallisuuden lisäksi työssä pyritään käyttämään olemassa olevaa tilastotietoa hyödyksi mahdollisimman hyvin. Työn tuloksena on tarkoitus olla kokonaisuus, joka esittää maadoitussuunnittelun kokonaisuuden ylätasolta yhtenäisenä kokonaisuutena.

Ensimmäisenä työssä käsitellään voimajohtomaadoituksia yleisesti. Samalla esitellään voimajohtomaadoituksia koskevia yleisiä vaatimuksia, jotka maadoitusten tulee täyttää. Tämän lisäksi maadoitusten ja maadoitussuunnittelun kannalta oleellinen teoria esitellään. Myös pylväiden sekä pylväasmaadoitusten fyysisiä kokoonpanoja käsitellään lyhyesti. Tämän jälkeen tarkastellaan nykyistä maadoitussuunnittelua ja käsitellään yleisesti suunnittelun eteneminen. Lisäksi otetaan kantaa maadoitusresistanssin laskentaan. Maadoitusresistanssin laskennan jälkeen tarkastellaan maadoitussuunnittelun näkökulmia. Tämän avulla pyritään löytämään mahdolliset lähestymistavat maadoitussuunnitteluun ja mahdolliseen uuteen tavoitearvojärjestelmään.

Maadoituksen poikkipinnan kasvattamisen tarpeellisuudesta 110 kV pylväillä on eriäviä mielipiteitä. Tästä syystä asiaa tarkastellaan maadoitussuunnittelun eri näkökulmia käsittelevän osan jälkeen. Poikkipinnan kasvattamisen tarvetta tarkastellaan kustannusten,

termisen keston, maadoitusten ikääntymisen sekä maadoitusvaurioiden näkökulmista. Poikkipintatarkastelun jälkeen siirrytään käsittelemään ukkoshäiriöherkkyyttä tilastoihin sekä laskentaan perustuen. Tilastollisen tarkastelun sekä laskennan avulla pyritään muodostamaan pohja uudelle tavoitearvojärjestelmälle.

Viimeisenä työssä käsitellään maadoitussuunnittelun kokonaisuutta. Lisäksi esitellään ehdotettavat muutokset maadoitussuunnitteluun. Maadoitussuunnittelua ei kuitenkaan kuvata yksityiskohtaisesti, vaan pelkästään oleelliset seikat kuvataan tarkasti. Luvun tarkoituksena ei ole toimia maadoitussuunnittelijalle vaiheellisena ohjeena, vaan kertoa oleelliset asiat kokonaisuutta ajatellen.

2. VOIMAJOHTOMAADOITUKSET

Maadoitukset voidaan jakaa kahteen luokkaan: käyttömaadoitus ja suojamaadoitus. Käyttömaadoituksessa maahan yhdistetään virtapiirin osa, kun taas suojamaadoituksessa maahan yhdistetään virtapiiriin kuulumaton jännitteelle altis osa. Käyttömaadoituksen yksi tehtävistä on pitää jännite-epäsymmetria sekä maavirta riittävän pienenä. Näin pienennetään heikkovirtalaitoksille aiheutuvien häiriöiden määrää. Lisäksi käyttömaadoitus varmistaa, ettei vaihejohtimien ja maan välisestä jännitteestä aiheudu vaaratilanteita tai vaurioita. Suojamaadoitus puolestaan oikein toimiessaan estää vaarallisten kosketusjännitteiden muodostumisen esimerkiksi eristysvian seurauksena. Lisäksi on olemassa väliaikainen työmaadoitus, jolla varmistetaan työn aikainen turvallisuus. (Elovaara & Haarla 2011) Työmaadoitusta ei kuitenkaan tässä työssä tarkastella, sillä se ei liity työssä käsiteltäviin maadoituksiin. Sen sijaan työssä tarkastellaan voimajohtomaadoituksia, joihin pylväsmaadoitukset kuuluvat.

Voimajohtomaadoituksissa sovelletaan vaatimuksia, joita esitetään standardeissa SFS-EN 50341-1, SFS-EN 50341-2-7 sekä SFS 6001. Lisäksi vaatimuksia voimajohtomaadoituksille esitetään Viestintäviraston määräyksessä M43, jonka soveltamisessa ohjeistaa Vaara- ja häiriöjännitevaliokunnan ohjeet. Maadoituksiin liittyen ohjeistusta tarjoaa pääosin VHV-Ohje 05.

2.1 Yleiset vaatimukset

Yleiset vaatimukset sekä määrittelyt vaihtosähköilmajohdoille, mukaan lukien voimajohtomaadoitukset, esitetään standardissa SFS-EN 50341-1, johon SFS-EN 50341-2-7 tarkentaa Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt. (SFS-EN 50341-1 2014; SFS-EN 50341-2-7 2015). Lisäksi voimajohtomaadoituksissa sovelletaan standardia SFS 6001 (2018), joka käsittelee suurjänniteasennuksia. Yksi standardin sovelluskohteista on siirtyvät potentiaalit. Viestiverkkoa koskeviin siirtyviin potentiaaleihin sovelletaan Viestintäviraston määräystä 43. (SFS 6001 2018) Seuraavaksi tarkastellaan standardien esittämiä vaatimuksia voimajohtomaadoitusten näkökulmasta.

Standardi SFS-EN 50341-1 (2014) esittää käyttötaajuudella toimivien maadoitusten suunnittelulle kolme vähimmäisvaatimusta:

- a) maadoitusten mekaaninen lujuus sekä korroosionkestävyys tulee olla riittävä vähimmäismitat huomioiden
- b) termisen kestävyuden tulee olla riittävä lasketulle suurimmalle vikavirralla

- c) henkilöturvallisuus tulee taata ottamalla huomioon maasulun aikaiset jännitteet.

Omaisuus- ja laitevahinkoja tulee myös välttää. (SFS-EN 50341-1 2014) Toisin sanoen maadoituksia suunniteltaessa täytyy varmistua siitä, että maadoitus kestää fyysisesti ja sähköisesti samalla taaten henkilöturvallisuuden. Kuitenkin tulee huomioida, että mainitut vaatimukset koskevat vain käyttöaajuudella toimivia maadoituksia.

Mekaanisen ja sähköisen kestävyysnäkökulmista maadoitus- ja yhdistysjohtimien vähimmäispoikkipinta-aloille on määritetty alarajat. Taulukko 1 esittää poikkipinnoille asetetut alarajat.

Taulukko 1. Maadoitus- ja yhdistysjohtimien vähimmäispoikkipinta-alat (SFS-EN 50341-1, 2014).

Materiaali	Poikkipinta-ala
Kupari	16 mm ²
Alumiini	35 mm ²
Teräs	50 mm ²

Myös muiden kuin taulukossa esitettyjen materiaalien käyttö on sallittua. Materiaalien tulee kuitenkin täyttää edellä mainitut kolme vähimmäisvaatimusta a–c. (SFS-EN 50341-1 2014) Standardin vaatimuksesta poiketen Fingrid edellyttää 400 kV:n pylväillä vähintään 25 mm²:n poikkipintaa kuparijohtimilla (Fingrid 2022a). Myös muita poikkeuksia standardin vaatimukseen on ja niitä esitellään alaluvussa 2.5.

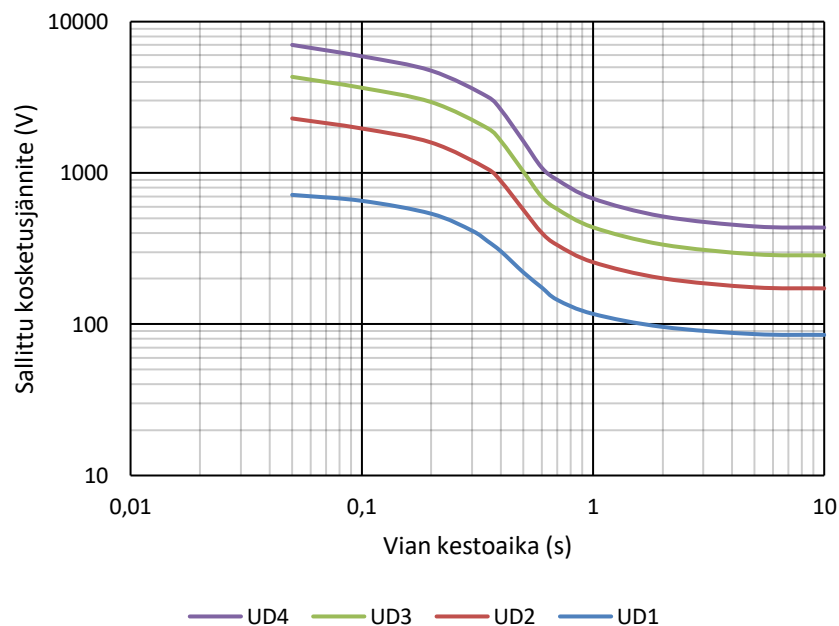
Termisen kestävyysnäkökulmasta tulee maadoituselektrodeille ja -johtimille määrittää vaadittava poikkipinta virtakestoisuuden avulla. Vaadittavaan poikkipintaan vaikuttaa vikavirran suuruus ja kesto sekä elektrodin materiaaliin sekä alku- ja loppulämpötiloihin pohjautuvat arvot. Termisen keston kannalta vaadittu elektrodin poikkipinta alle viisi sekuntia kestäville vioille voidaan määrittää kaavalla

$$A = \frac{I_j}{K} \sqrt{\frac{t_F}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}}, \quad (1)$$

jossa A on maadoitusjohtimen tai -elektrodin poikkipinta, I_j johtimen virran tehollisarvo, t_F vikavirran kesto-aika, K virrallisen osan materiaalista riippuva vakio, β lämpötilassa 0 °C olevan virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo, θ_i on alkulämpötila ja θ_f on loppulämpötila. Termistä kestävyyttä määritettäessä tulee kuitenkin huomioida aiemmin esitetyt minimipoikkipinnat. (SFS-EN 50341-1 2014) Termisen kestävyysnäkökulmasta voidaan selvittää myös yli 5 sekuntia kestäville vikavirrille. Normaalitytilanteessa

Fingridin verkossa nopean automaattisen poiskytkennän toiminta-aika ei ylitä viittä sekuntia. Toisin sanoen tämän työn kannalta kaava 1 on riittävä. Maadoituksessa käytettävien poikkipintojen kasvatustarvetta tarkastellaan luvussa 4.

Henkilöturvallisuuden näkökulmasta maadoitettaville pylväille on annettu kosketusjänniterajoja, jotka esitetään standardissa SFS-EN 50341-1. Raja-arvot perustuvat ihmisen kehon läpi kulkevan virran suuruuden ja keston vaikutukseen ihmisessä. Lisäksi raja-arvot perustuvat virran kulkeman reitin impedanssiin, joka on riippuvainen kosketusjännitteestä. Kyseisistä arvoista saadaan laskettua kosketusjänniterajat tietyille kestoajoille pylvään erilaisissa sijaintipaikoissa. (SFS-EN 50341-1 2014) Kosketusjänniterajat esitetään kuvassa 1.



Kuva 1. Kosketusjänniterajat eri lisäresistansseilla (SFS-EN 50341-1 2014).

Kuvassa nähdään neljä eri käyrää sallituista kosketusjännitteistä, U_{D1} – U_{D4} , jotka määräytyvät käytetyn lisäresistanssin mukaan vian kestoajoille. Lisäresistanssien avulla esitetään ihmiskehoon kohdistuva kosketusjännite tyypillisissä sijaintipaikoissa. (SFS-EN 50341-1 2014) Eri sijaintipaikoissa vaatimukset pylvään kosketusjännitteille ovat siis eri suuret.

Käyrää U_{D1} vastaavassa sijainnissa ihmiset voivat oleskella paljain jaloin, esimerkiksi virkistysalueet sekä leikkikentät. Näin ollen ihmiskehon lisäksi muita resistansseja ei huomioida. Käyrän U_{D2} muodostuksessa käytetään 1 750 Ω :n lisäresistanssia. Tämä vastaa sijaintipaikkoja, joissa ihmisten voidaan kohtuudella olettaa käyttävän kenkiä. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi jalkakäytävät. Käyrä U_{D3} koskee sijaintipaikkoja, joissa maan ominaisresistanssi on korkea ja ihmisten voidaan olettaa käyttävän kenkiä. Maan

ominaisresistanssin arvona käytetään 2000 Ω m:ä. Ottamalla huomioon maan ominaisresistanssi sekä kenkien vaikutus, saadaan käytettäväksi lisäresistanssiksi 4000 Ω . Käyrä U_{D4} koskee sijainteja, joissa voidaan kohtuudella olettaa ihmisten käyttävän kenkiä sekä maaperän ominaisresistanssin olevan hyvin korkea. Maan ominaisresistanssin arvona käytetään 4000 Ω m:ä, jonka lisäksi huomioidaan kenkien vaikutus kuten U_{D3} tilanteessa. Näin ollen käytettäväksi lisäresistanssiksi saadaan 7000 Ω . (SFS-EN 50341-1 2014)

Kosketusjänniterajat määrittävät pylväälle kosketusjännitevaatimukset neljässä tyypillisessä sijaintiin sidonnaisessa tilanteessa. Kaikissa yllä käsitellyissä tapauksissa oletuksena kuitenkin on, että ihmisen läsnäolo pylvään läheisyydessä on kohtuullisen todennäköistä. Jos voidaan olettaa, että ihmisiä ei oleskele säännöllisesti pylvään läheisyydessä, ei kosketusjännitteelle ole vaatimuksia. Tämä koskee tilanteita, joissa käytössä on vian nopea automaattinen poiskytkentä. (SFS-EN 50341-1 2014) Toisin sanoen Fingridin pylväillä, joiden läheisyydessä ihmiset eivät oleskele, ei ole kosketusjännitevaatimuksia nopean automaattisen poiskytkennän seurauksena.

Liitteessä 1 esitetään standardin SFS-EN 50341-1 maadoitussuunnitteluun liittyvä kaavio, josta nähdään, milloin kosketusjännitettä tulee tarkastella. Tarkemmin maadoitusten suunnittelua tarkastellaan luvussa 3. Kaaviosta huomataan, että eristeaineista pylvästä ei tarvitse maadoittaa kosketusjännitevaatimusten kannalta. Vanhemmissa asennuksissa Fingrid on käyttänyt puupylväitä, jotka on kuitenkin maadoitettu suojauksen toiminnan varmistamiseksi. Uusissa asennuksissa eristeaineisia pylväitä ei kuitenkaan enää käytetä, joten tämä ohjeistuksen kohta ei vaikuta nykyiseen maadoitussuunnitteluun.

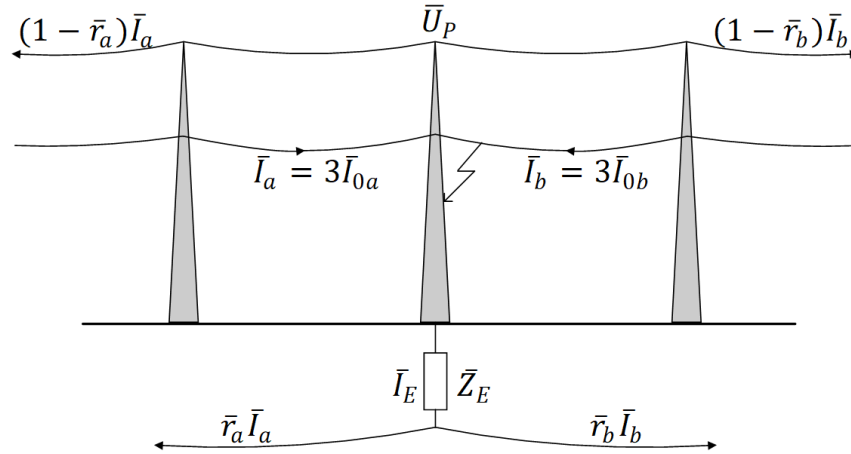
2.2 Maadoitus- ja vaarajännitteet

Ukkosjohtimilla varustetulla pylväällä maasulun aikana pylvään ja edelleen maadoitusten kautta maahan kulkee vain osa maasulkuvirrasta (Elovaara & Haarla 2011; Huhtanen 2022). Koska Fingridin verkossa pylväät ovat ukkosjohtimin varustettuja, voidaan yleisesti olettaa, että vain osa maasulkuvirrasta jakautuu maadoituksille. Fingridin verkossa on myös poikkeustapauksia, jolloin ukkosjohtimien jatkuvuus kuitenkin taataan yhdistämällä maadoitukset (Fingrid 2022b). Näitä tapauksia esitellään alaluvussa 2.5 pylväsmaadoitusten yhteydessä.

Maadoitusimpedanssin läpi maahan kulkiessaan virta nostaa pylvään ja ympäristön potentiaalia. Maasulkuvirran jakautumisen ukkosjohtimien ja maadoitusten välille määrittää reduktiokerroin, joka voidaan määrittää kaavalla

$$\bar{r} = 1 - \frac{\bar{Z}_M}{\bar{Z}_u}. \quad (2)$$

Kaavassa \bar{r} on reduktiokerroin, \bar{Z}_M on ukkosjohtimien ja vaihejohtimien välinen keskinäisimpedanssi ja \bar{Z}_u on ukkosjohtimen oma impedanssi, kun paluutienä on maa. Kuvassa 2 on esitettyä pylväällä tapahtuvan maasulun aikaiset virrat.



Kuva 2. Maasulussa pylväspotentiaalın suuruuteen vaikuttavat virrat (Elovaara & Haarla 2011; Huhtanen 2022).

Kuvassa \bar{I}_a on suunnasta a pylväälle kulkeva maasulkuvirta ja \bar{I}_b suunnasta b virtaava maasulkuvirta. \bar{U}_p on maasulkuvirran ja ekvivalenttisen maadoitusimpedanssin \bar{Z}_E aiheuttama pylväspotentiaali eli maadoitusjännite. \bar{I}_E puolestaan on maadoitusten läpi virtaava maasulkuvirran osa. Kuvassa nähtävät reduktiokertoimet \bar{r}_a ja \bar{r}_b edustavat johdon alku- ja loppupään reduktiokertoimia. Kuvasta huomataan, että ukkosjohtimille jakautuu $(1 - \bar{r})$ -osa maasulkuvirrasta. Näin ollen pelkästään jäljelle jäävä virran komponentti ($\bar{r}3\bar{I}_0$) vaikuttaa maadoitusjännitteen suuruuteen. Toisin sanoen maadoitusjännitteeseen vaikuttaa maadoitusten tehokkuuden lisäksi oleellisesti myös ukkosjohtimet.

Lisäksi kuvasta tulee huomata, että virta \bar{I}_E ja impedanssi \bar{Z}_E ovat ekvivalenttisia arvoja. Toisin sanoen yksittäisen pylvään maadoitusten läpi kulkeva virta on vain osa virrasta \bar{I}_E , sillä se kuvastaa koko virtaa, joka jakautuu useille maadoituksille. Yksittäisen pylvään maadoitusten läpi kulkeva virta voidaan laskea esimerkiksi maadoitusjännitteen ja pylvään maadoitusresistanssin osamääränä. Esimerkiksi maadoituselektrodin minimipoikkipintaa määritettäessä tulee käyttää varsinaista elektrodin läpi kulkevaa virtaa ekvivalenttisen sijasta. Ekvivalenttisen maadoitusimpedanssin muodostumista tarkastellaan alaluvussa 2.3.

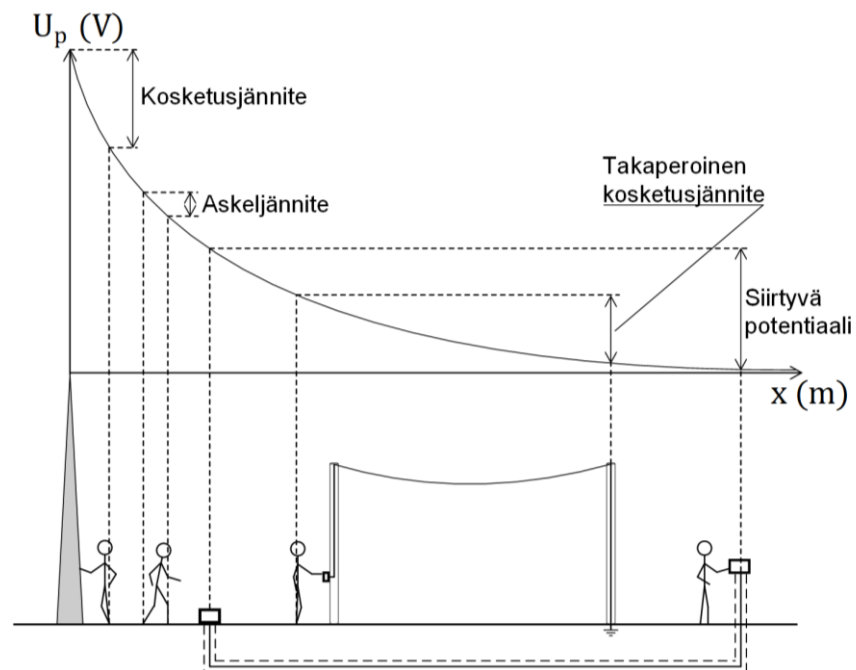
Maasulussa olevalta pylväältä pois päin liikuttaessa potentiaali laskee. Jyrkimmin potentiaali laskee pylvään lähellä ja potentiaalın leviämiseen vaikuttaa maaperän

ominaisuudet. Homogeenisessa maassa potentiaali leviää melko tasaisesti. Jos maaperän pohjakerros johtaa paremmin kuin pintakerros, potentiaali ei leviä yhtä kauas kuin homogeenisessa maassa. Pintakerroksen ollessa paremmin johtava kuin pohjakerroksen, leviää potentiaali pidemmälle kuin homogeenisessa maassa. (Elovaara & Haarla 2011) Koska potentiaali laskee jyrkimmin pylvään lähellä, syntyvät suurimmat askeljännitteet lähellä pylvästä. Potentiaalın leviämiseen kuitenkin vaikuttaa maaperän vaihtelevat ominaisuudet sekä maassa sijaitsevat johtavat materiaalit. Potentiaalın leviäminen ei siis noudata homogeenisen maan mukaista käyrää todellisuudessa.

Homogeenisessä maassa pisteen P potentiaali maasulun aikana voidaan laskea kaavalla

$$V_P = \frac{\rho}{2\pi} \left| \sum_{j=1}^n (\overline{I_{e_j}} / s_j) \right|. \quad (3)$$

Kaavassa ρ on maan ominaisresistanssi, $\overline{I_{e_j}}$ pylväältä j maahan kulkeva virta, s_j pisteen P ja pylvään j maadoitusten keskipisteen välinen etäisyys ja n on tarkasteluun otettujen pylväiden lukumäärä. (Elovaara & Haarla 2011) Vaikka todellisuudessa maaperä ei ole homogeeninen, osoittaa kaava potentiaalın jakautumisen periaatteen. Potentiaalın leviäminen aiheuttaa erilaisia vaarajännitteitä, joita tarkastellaan seuraavaksi. Periaatteellisia esimerkkejä vaarajännitteistä on nähtävissä kuvassa 3.



Kuva 3. Ihmiseen kohdistuvat vaarajännitteet (Elovaara & Haarla 2011; Huhtanen 2022).

Kosketusjännitteellä tarkoitetaan maadoitusjännitteen osaa, joka vaikuttaa ihmiseen virran kulkiessa kädestä jalkoihin. Askeljännite puolestaan on se osa maadoitusjännitteestä, joka vaikuttaa ihmiseen virran kulkiessa jalasta toiseen. Molemmissa tapauksissa vaakasuora etäisyys on 1 metri. (SFS 50341-1 2014) Käytännössä kosketusjännite luonnollisesti määräytyy todellisten etäisyyksien ja virtateiden mukaan. Kuten kuvasta huomataan, myös takaperoinen kosketusjännite on mahdollinen. Esimerkiksi kun kaukana maadoitettu eristetty viestijohto tuodaan pylvään läheisyyteen, vaikuttaa ihmiseen takaperoinen kosketusjännite. Siirtyvä potentiaali syntyy samoin kuin takaperoinen kosketusjännite mutta päinvastaisena ilmiönä. Pylvään läheisyydessä maadoitettu eristetty johde vie potentiaalın kauemmaksi pylväästä, jolloin johdetta toisessa päässä koskettaessa ihmiseen vaikuttaa potentiaaliero. (Elovaara & Haarla 2011; Huhtanen 2022)

Kosketusjännitevaatimusten arvoihin verrataan yleensä maadoitusjännitettä, sillä maadoitusjännite on helpommin laskettavissa kuin kosketusjännite. Maadoitusjännite on kuitenkin aina suurempi kuin kosketusjännite johtuen potentiaalın laskemisesta etäisyyden funktiona sekä kosketusvälin rajallisuudesta. Kosketusjännitevaatimusten täyttymistä tarkasteltaessa kosketusjänniterajat kerrotaan kahdella ja saatua arvoa käytetään maadoitusjännitteelle raja-arvona (SFS-EN 50341-1).

Siirtyvät potentiaalit sekä takaperoiset kosketusjännitteet tulee ottaa huomioon maadoitussuunnittelussa niin, ettei vaarallisia jännitteitä pääse syntymään (SFS 6001 2018). Viestintäverkkoon indusoituville jännitteille on omat vaatimuksensa, jotka esitetään Viestintäviraston määräyksessä 43. Taulukossa 2 on esitettyä viestintäverkkoon indusoituvien jännitteiden ylärajat, kun aiheuttaja on vähintään 110 kV suurjännitelaitteiston yksivaiheinen maasulku. Raja-arvot perustuvat suosituksen ITU-T K.68 kohdan 6.2.2 taulukon 18 mukaisiin arvoihin.

Taulukko 2. Viestintäverkkoon indusoituneen sähkömotorisen voiman raja-arvot (MPS 43 2015).

Maasulun kesto (s)	Indusoitunut sähkömotorinen voima (V)
$t < 0,10$	2000
$0,10 < t < 0,20$	1500
$0,20 < t < 0,35$	1000
$0,35 < t < 0,50$	650
$0,50 < t < 1,00$	430
$1,00 < t < 3,00$	150
$3,00 < t$	60

Taulukon arvot toimivat myös raja-arvoina viestintäverkon kautta siirtyville potentiaaleille.

2.3 Maadoitusimpedanssi

Maadoitusimpedanssin voidaan ajatella olevan tarkastelukohdan ja neutraalimaan välinen impedanssi (SFS 6001 2018; IEEE Std 81-2012). Toisaalta maadoitusimpedanssi voidaan kuvata myös maadoituselektrodin potentiaalın sekä sen läpi kulkevan virran osamääränä (Elovaara & Haarla 2011). Tarkasteltaessa pylvään maadoituksia pientaajuisen vian kannalta, voidaan maadoitusimpedanssia käsitellä pelkkänä maadoitusresistanssina. Maadoitusimpedanssin kapasitiiviset ja induktiiviset ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi suurtaajuisten vikojen tarkastelussa. (IEEE Std 81-2012 2012) Maadoitusimpedanssista käytetään yleisesti termiä maadoitusresistanssi, kun tarkastellaan pylväsmaadoituksia. Tämä johtuu siitä, että pylväsmaadoitukset ovat suppeat sekä usein tarkastelu liittyy käyttötaajuuden ilmiöihin, jolloin resistiiviset ominaisuudet ovat määrääviä (IEEE Std 81-2012). Tässä työssä maadoitusresistanssi-termillä tarkoitetaan matalan taajuuden maadoitusresistanssia.

Maadoitusresistanssi on suoraan verrannollinen maan ominaisresistanssin. Maan ominaisuuksilla on siis suuri vaikutus maadoituksen tehokkuuteen ja maadoituksen toteutukseen. (Elovaara & Haarla 2011) Maan ominaisresistanssin lisäksi maadoitusresistanssiin vaikuttaa maadoituselektrodin mitat sekä asennustapa. Taulukossa 3 esitetään laskukaavoja eri elektrodityypeille.

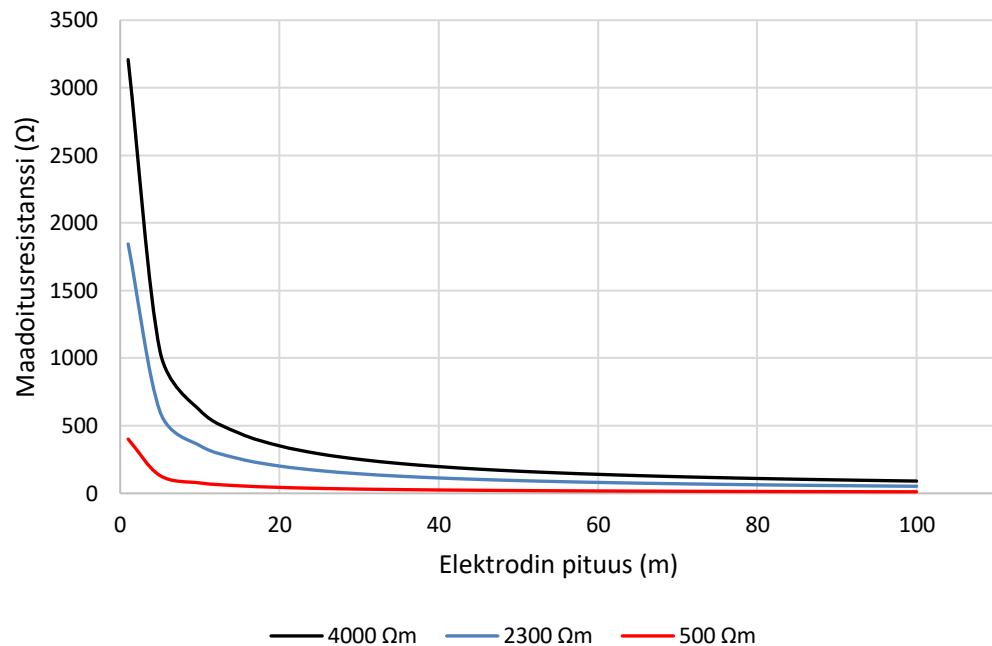
Taulukko 3. Maadoitusresistanssien laskukaavoja erilaisille elektrodityypeille (Elovaara & Haarla 2011; SFS 6001 2018).

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

Taulukossa R_E on elektrodin maadoitusresistanssi, ρ maaperän ominaisresistanssi, L elektrodin pituus, h elektrodin upotussyvyys, d johtimen halkaisija, D pallon, levyn tai ruudukon halkaisija ja s levyn paksuus. Taulukossa esitetään pallomaiselle elektrodille

laskukaava mutta todellisuudessa maadoituselektrodia ei rakenneta palloelektrodeilla. Laskennassa pylväsperustukset voidaan kuitenkin esittää puolipallona, jolloin kyseinen kaava toimii riittävällä tarkkuudella. (Elovaara & Haarla 2011)

Kuten taulukossa 3 esitetyistä kaavoista huomataan, suurin vaikutus maadoitusresistanssiin on sauvamaisen elektrodin pituudella sekä pallomaisen elektrodin halkaisijalla. Kuvassa 4 esitetään elektrodin pituuden vaikutus maadoitusresistanssiin.



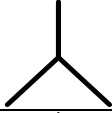

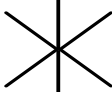
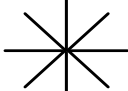



Kuva 4. Maadoituselektrodin pituuden vaikutus maadoitusresistanssiin erilaisilla maaperän johtavuuden arvoilla.

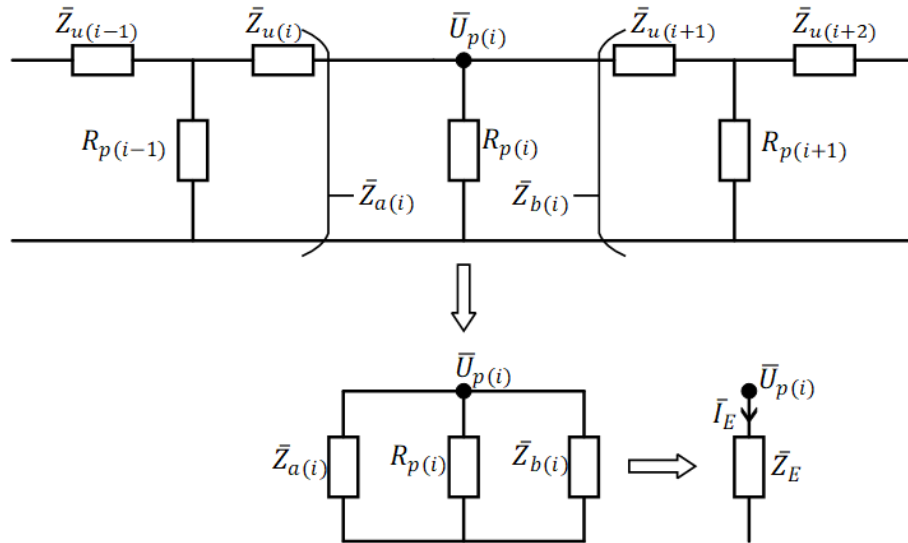
Kuvan maadoitusresistanssit on laskettu käyttäen upotetun vaakasuoran johtimen kaavaa taulukosta 3. Kuvasta voidaan todeta yllä mainittu elektrodin pituuden suuri vaikutus maadoitusresistanssiin. Lisäksi huomataan, että vaikutus on suurin pienillä elektrodipituuksilla. Poikkipinnan vaikutusta maadoitusresistanssiin tarkastellaan myös luvussa 4.

Kuten aiemmin mainitaan, myös asennustapa vaikuttaa maadoitusresistanssiin. Taulukossa 4 esitetään eri asennustavoilla saavutettuja maadoitusresistanssien arvoja suhteessa vaakasuoran johtimen maadoitusresistanssiin. Taulukosta huomataan, että vain kahdella rinnakkaisella elektrodilla saavutetaan pienempi maadoitusresistanssi kuin suoralla johtimella. Tällöinkin pienempi maadoitusresistanssi saavutetaan elektrodien välisen etäisyyden ollessa 20 metriä. Suoralla elektrodilla saavutetaan siis yleensä pienin maadoitusresistanssi, jos materiaalia käytetään tietty määrä. Jakamalla maadoitus useampaan säteeseen saavutetaan kuitenkin tehokkaampi maadoitus salamavirran näkökulmasta. Lisäksi useammalla säteellä voidaan kasvattaa elektrodien yhteispituutta, jolloin maadoitusresistanssi pienenee. (Elovaara & Haarla 2011)

Taulukko 4. Elektrodien asennustavoilla saavutettava maadoitusresistanssi suhteessa vaakaelektrodiin (Elovaara & Haarla 2011; SFS 6001 2018).

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

Fingridin verkossa pylväät on varustettu ukkosjohtimilla, jolloin pylväiden maadoitusresistanssien sekä ukkosjohtimien impedanssien voidaan ajatella muodostavan impedanssiketjun. Näin ollen myös muiden kuin vikapylvään maadoitukset vaikuttavat ukkosjohtimien kanssa vikapylvään ekvivalenttiseen maadoitusimpedanssiin sekä maadoitusjännitteeseen. Ukkosjohtinten ja maadoitusten muodostama piiri on nähtävissä kuvassa 5.



Kuva 5. Pylväsmaadoitusten ja ukkosjohtimien muodostama maadoitusimpedanssi (Huhtanen 2022).

Kuvassa on esitetty vain vikapylväs ja kaksi viereistä pylvästä, mutta todellisuudessa impedanssiin vaikuttavat myös muut pylväät sekä ukkosjohtimet. Kuvasta kuitenkin nähdään periaatteellisesti, miten ekvivalenttinen maadoitusimpedanssi muodostuu. Huomiolarvoista on, että pylvään maadoituksista käytetään pelkkää resistanssia. Tämä johtuu siitä, että kuvan tilanteessa tarkastellaan vikaa käyttötajaudella. Kuvasta huomataan myös, että pylvään maadoitusjännite muodostuu ekvivalenttisesta virrasta sekä ekvivalenttisesta maadoitusimpedanssista, kuten aiemmassa alaluvussa mainitaan.

Jos johtoa esittävää ketjua kuvataan samansuuruisilla impedansseilla, voidaan maadoitusimpedanssin suuruutta arvioida. Ketjuimpedanssi voidaan laskea kaavalla

$$\bar{Z}_k = \frac{1}{2}(\bar{Z}_u + \sqrt{\bar{Z}_u \times (4R_T + \bar{Z}_u)}) . \quad (4)$$

Kaavassa \bar{Z}_k on ketjuimpedanssi, \bar{Z}_u ukkosjohtimen impedanssi yhden jänteen pituudella ja R_T on pylvään maadoitusresistanssi. Ehtona kaavan käytölle on, että yhden identtisen impedanssielementin lisäys ei muuta ketjun päässä havaittavaa impedanssia. (Elovaara & Haarla 2011) Kaavan avulla voidaan laskea kuvassa 4 nähtävät impedanssit \bar{Z}_a ja \bar{Z}_b , joiden perusteella voidaan edelleen laskea pylvään kohdalla ekvivalenttinen maadoitusimpedanssi. Tulee kuitenkin huomioida, että saatava impedanssi kuvaa vain impedanssin suuruutta, sillä kaavassa käytetään identtisiä arvoja kuvaamaan koko johtoa.

Tarkasti maadoitusimpedanssin voi laskea noudattamalla rinnankytkennän yleisiä laskutapoja. Esimerkiksi johdon alkupään impedanssin \bar{Z}_a laskemisessa voi hyödyntää kaavaa

$$\bar{Z}_a = \frac{\bar{Z}_{a-1} \times \bar{Z}_{p-1}}{\bar{Z}_{a-1} + \bar{Z}_{p-1}} + \bar{Z}_{u(i-1)}, \quad (5)$$

jossa \bar{Z}_a on alkupään maadoitusimpedanssi, \bar{Z}_{a-1} on edeltävä johdon alkupään impedanssi, \bar{Z}_{p-1} on edeltävän pylvään maadoitusimpedanssi ja $\bar{Z}_{u(i-1)}$ on pylvääseen kytketyn johdon alkupään puolen ukkosjohtimen impedanssi. Kaavassa oleva $\bar{Z}_{u(i-1)}$ esitetään myös kuvassa 4. Kaavalla voidaan järjestelmällisesti laskea johdon alkupään maadoitusimpedanssi. Kaavan muotoilun takia laskenta täytyy käytännössä aloittaa johdon alusta, sillä kaava vaatii edeltävän maadoitusimpedanssin laskeakseen seuraavan impedanssin. Ensimmäisenä arvona kaavassa voidaan käyttää alkupään aseman maadoitusimpedanssia. (Kara 2022)

Johdon loppupään maadoitusimpedanssin laskeminen onnistuu samalla periaatteella kaavalla

$$\bar{Z}_b = \frac{\bar{Z}_{b+1} \times \bar{Z}_{p+1}}{\bar{Z}_{b+1} + \bar{Z}_{p+1}} + \bar{Z}_{u(i+1)}. \quad (6)$$

Kaavassa \bar{Z}_b on loppupään maadoitusimpedanssi, \bar{Z}_{b+1} seuraava johdon loppupään maadoitusimpedanssi, \bar{Z}_{p+1} seuraavan pylvään maadoitusimpedanssi, $\bar{Z}_{u(i+1)}$ on pylvääseen kytketyn loppupään puolen ukkosjohtimen impedanssi. Kuten kaavasta huomataan, täytyy laskenta nyt aloittaa johdon loppupäästä ja edetä haluttua pylvästä kohti. Ensimmäisenä arvona voidaan käyttää loppupään aseman maadoitusimpedanssia. (Kara 2022) Molemmissa kaavoissa esiintyy pylvään maadoitusimpedanssi, mutta käytännössä arvona käytetään maadoitusresistanssia.

Tähän mennessä on tarkasteltu maadoituksia vain käyttötaajuisten vikojen kannalta. Maasulkuja kuitenkin aiheuttaa myös salamaniskut johto- ja pylväsrakenteisiin. 110 kV:n verkossa noin 29 % maasuluista on salamaniskujen aiheuttamia Fingridin häiriöraportin perusteella. Fingridin häiriötilastoissa maasulkujen määrään tilastoidaan myös maasuluista oikosuluiksi levinneet häiriöt. Maadoitusten käyttäytyminen salamavirran vaikutuksen alaisena on siis myös oleellinen asia maadoitusten sekä maadoitussuunnittelun kannalta.

Salamavirtaa kuvataan yleisesti syöksyaaltona, jonka nousuaika on 1,2 μ s ja selän puoliaika 50 μ s. Salamän iskiessä rakenteeseen se kohtaa ensimmäisenä rakenteen aaltoimpedanssin, jonka suuruuteen vaikuttaa virtateiden määrä. Esimerkiksi kahden

ukkosjohtimen aaltoimpedanssi on noin 280 Ω ja yhden maajohtimen noin 170 Ω . Maadoitusten kannalta aaltoimpedanssia pienentää säteiden määrä, sillä virtateiden määrä kasvaa. Useamman säteen maadoituksen aaltoimpedanssi saadaan laskettua jakamalla 170 Ω säteiden määrällä. Useamman säteen tapauksessa takaisinheijastuva aalto on pienempi ja näin ollen pylvään potentiaali on myös pienempi. Tämä edelleen pienentää takaiskun todennäköisyyttä. Takaiskulla tarkoitetaan pylvästä vaihejohtimeen muodostuvaa maasulkua. (Huhtanen 2023; Sorri 2023) Maajohtimessa syöksyaallon etenemisnopeus on noin $100 \frac{m}{\mu s}$. Maadoitusimpedanssi puolestaan alkaa vaikuttaa, kun negatiivinen aalto on heijastunut takaisin elektrodin päähän. Ottaen huomioon syöksyaallon muodon ja etenemisnopeuden muodostuu elektrodin maksimimitaksi noin 50 metriä. Pidemmän elektrodin tapauksessa aalto ei ehdi heijastua takaisin riittävän nopeasti. Syöksyaaltojen muodot kuitenkin eroavat standardiaallosta, joten maksimipituus ei ole universaali. (Pesonen 1960)

Maadoitusimpedanssi syöksyaallon vaikutuksen alaisena ei kuitenkaan ole vakio, vaan maadoitusimpedanssi on transienttinen. Maadoitusimpedanssi pienenee aaltoimpedanssin suuruudesta maadoitusresistanssia vastaavaan arvoon muutamissa mikrosekunneissa. Toisin sanoen aaltoimpedanssin vaikutusaika jää hyvin lyhyeksi. Syöksyaallon vaikutuksen alaisena olevaa maadoitusimpedanssia voidaan kuvata myös impulssiimpedanssilla (engl. Impulse impedance), joka saadaan ajan suhteen muuttuvan jännitteen sekä virran huippujen osamääränä. Jännitteen ja virran huiput eivät tapahdu aina yhtäaikaisesti, sillä maaperään ominaisuudet ovat taajuusriippuvaisia. Näin ollen riippuen syöksyaallon taajuudesta, voi jännite olla virtaa edellä tai jäljessä. Vaikka ylilyönti ei tapahdu aina jännitteen huipun kohdalla, käytetään impulssi-impedanssia maadoitusten suunnittelussa salamanäkökuilmasta. Impulssi-impedanssi kuitenkin kuvastaa suhteellisen hyvin impedanssin suuruutta ylilyönnin aikana ja näin ollen sitä voidaan hyödyntää suunnittelussa. (Cooray 2010)

Poiketen aaltoimpedanssin aiheuttamasta elektrodin maksimipituudesta, impulssiimpedanssin elektrodin efektiivinen pituus riippuu maan ominaisresistanssista. Efektiivinen pituus tarkoittaa elektrodipituutta, jota suuremmilla pituuksilla impulssi-impedanssi ei enää pienene. Toisin sanoen maadoitusresistanssi on pienempi kuin impulssiimpedanssi, kun taas efektiivistä pituutta lyhyemmillä pituuksilla impulssi-impedanssi on pienempi kuin maadoitusresistanssi. Esimerkiksi 500 Ωm :n maaperässä efektiivinen pituus elektrodille on 23 metriä. (Cooray 2010) Toisin sanoen aaltoimpedanssin määrittämä maksimipituus on suurempi kuin tiettyä maan ominaisresistanssia vastaava efektiivinen pituus.

Impulssi-impedanssin suhdetta maadoitusresistanssiin kuvaa impulssikerroin (engl. impulse coefficient), joka saadaan jakamalla impulssi-impedanssi maadoitusresistanssilla. Impulssikerroin voidaan arvioida kaavalla

$$I_k = 0,89 - 5,1^{-5} \cdot \rho, \quad (7)$$

jossa ρ on maan ominaisresistanssi. Impulssikerroin on käytännön ukkoshäiriötarkastelussa hyödyllinen, sillä sen avulla voidaan arvioida maadoitusresistanssista impulssi-impedanssin suuruus. Jos maadoituselektrodin pituus on suurempi kuin efektiivinen pituus, on impulssikerroin yli yhden. Pienimmillään impulssikerroin voi olla 0,4. Toisin sanoen impulssi-impedanssi voi olla huomattavasti maadoitusresistanssia suurempi tai pienempi, riippuen maan ominaisresistanssista sekä elektrodin pituudesta.

2.4 Maan ominaisresistanssi

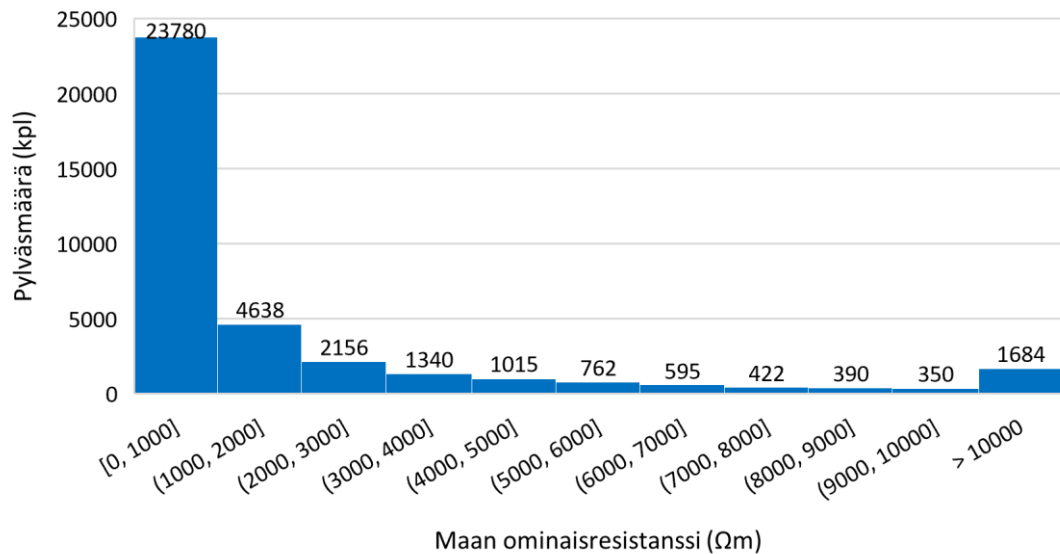
Tässä alaluvussa tarkastellaan maan ominaisresistanssia sekä Suomen maaperän ominaisuuksia. Maan ominaisresistanssi vaihtelee huomattavasti eri sijainneissa. Siihen vaikuttaa maaperän tyyppi, tiheys, kosteus sekä raekoko. Ominaisresistanssi voi vaihdella myös tilapäisesti kosteuden muutosten seurauksena. Nämä muutokset ominaisresistanssissa yltyvät yleensä muutaman metrin syvyyteen. Maaperä koostuu yleensä erityyppisistä maakerroksista, jolloin myös ominaisresistanssi vaihtelee syvyyden mukaan (SFS 6001 2018). Taulukossa 5 on esitettyä maaperän tyypillisiä ominaisresistansseja, joita standardi SFS 6001 (2018) suosittelee käytettäväksi Suomessa.

Taulukko 5. Suomen maaperän ominaisresistansseja (SFS 6001 2018).

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

Taulukosta nähdään, että maaperän ominaisresistanssi voi vaihdella suurestikin saman aineen sisäisesti. Taulukosta tulee huomata, ettei keskimääräinen ominaisresistanssi tarkoita vaihteluvälin keskiarvoa.

Suomen maaperän ominaisresistanssina käytetään yleisesti arvoa 2300 Ω m. Kuvassa 6 esitetään histogrammi maan ominaisresistanssien jakautumisesta Fingridin pylvässijainneille.



Kuva 6. Maan ominaisresistanssin jakautuminen Fingridin pylvässijainneille.

Pylvässijaintien maaperän ominaisresistanssit on laskettu 1, 2 ja 4 metrin mittaustulosten keskiarvoista. Kuvasta huomataan, että suurin osa pylväistä sijaitsee alle 1000 Ω m:n maaperässä. Kaikkien käytettyjen mittaustulosten pohjalta keskiarvoksi maan ominaisresistanssille saadaan 2052 Ω m. Saatu keskiarvo maaperän ominaisresistanssille on siis suhteellisen lähellä yleisesti käytettyä arvoa 2300 Ω m. Pylvässijainteihin perustuvan keskiarvon laskennassa on käytetty vain 4 metriin asti olevia mittaustuloksia. 2300 Ω m:n keskiarvossa puolestaan on todennäköisesti huomioitu myös syvemmältä mitattuja arvoja. Tämä on todennäköisesti yksi syy keskiarvojen eroon. Toinen mahdollinen syy on mitaussijaintien eroavaisuudet, sillä pylvässijainnit eivät välttämättä edusta samanlaista otosta, johon 2300 Ω perustuu.

Taulukossa 6 esitetään maadoitusresistanssien eroja savelle, hiekalle, moreeni- sekä harjusoralle niiden ominaisresistanssien vaihteluväleillä.

Taulukko 6. Maadoitusresistanssit ominaisresistanssien vaihteluväleillä savelle, hiekalle, moreeni- ja harjusoralle.

	Savi	Hiekka	Moreenisora	Harjusora
Pienin (Ω)	1,2	49,8	49,8	149,4
Keskimäärin (Ω)	2,0	99,6	149,4	747,2
Suurin (Ω)	3,5	149,4	498,2	1494,5
Maadoitusresistanssien suhde	2,8	3,0	10,0	10,0
Ominaisresistanssin suhde	2,8	3,0	10,0	10,0

Maadoitusresistanssit on laskettu yhdelle 40 metrin 16 mm² poikkipintaiselle vaakaelektrodille, joka on upotettu 0,7 metrin syvyyteen. Käytetyt maan ominaisresistanssit ovat taulukosta 5, esimerkiksi savelle käytetty pienin arvo on 25 Ωm, keskimääräinen 40 Ωm ja suurin 70 Ωm. Maadoitusresistanssien ja ominaisresistanssien suhteet on laskettu suurimman ja pienimmän arvon osamääränä. Taulukon tulokset osoittavat, että maadoitusresistanssi on suoraan verrannollinen maan ominaisresistanssiin, kuten aiemmassa alaluvussa todetaankin. Maan ominaisresistanssin mittaaminen maadoitussuunnittelussa onkin oleellinen osa maan ominaisresistanssin ja maadoitusresistanssin suoraan verrannollisuuden sekä ominaisresistanssien suurien vaihteluvälien takia.

2.5 Pylväsmaadoitukset

Pylväsmaadoitusten tehtävä on vähentää ukkoshäiriöitä, mahdollistaa tai parantaa maasulkusuojauksen toiminta sekä pienentää pylvään maadoitus- ja kosketusjännitettä. Ukkoshäiriöitä maadoitukset vähentävät laskemalla pylvään potentiaalia, jolloin takaiskun todennäköisyys pienenee. Pylväsmaadoitukset mahdollistavat maasulkusuojauksen ukkosjohtimettomalle johdolle ja ukkosjohtimilla varustetulla johdolla maasulkusuojauksen toimintaherkkyys paranee. Lisäksi maadoitus- sekä kosketusjännite pienentyvät, kun maadoituksen läpi kulkeva virta kohtaa pienemmän impedanssin, jolloin maadoitusjännite on pienempi. (Elovaara & Haarla 2011; Nousmaa 1979) Maadoitukset vaikuttavat myös potentiaalin leviämiseen, jolloin kosketus- ja askeljännite yleensä pienenevät, kuten alaluvussa 2.3 mainitaan.

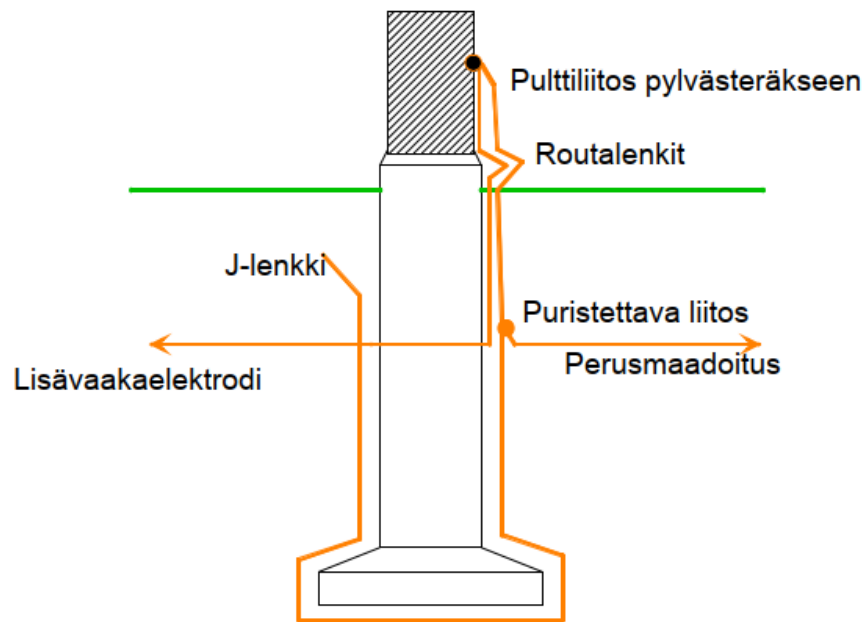
Toisin sanottuna pylväsmaadoituksia tarvitaan, jotta saavutetaan vaadittu taso henkilöturvallisuudessa sekä materiaalivahinkoja kohtaan. Lisäksi maadoituksia tarvitaan, jotta saavutetaan vaadittu voimajohdon käytön luotettavuustaso. (Fingrid 2022a) Ukkoshäiriöiden ja maadoitusten suhdetta tarkastellaan luvussa 5. Maadoitusten elektrodit ovat yleensä kerrattua kupariköyttä. Perusmateriaalina 110 kV:n ja 220 kV:n pylväillä käytetään standardin (SFS-EN 50341-1) minimipoikkipintavaatimuksen mukaista 16 mm² köyttä. 400 kV:n pylväillä puolestaan käytetään 25 mm²:n kupariköyttä. (Fingrid 2022a) 400 kV:lla vaaditaan suurempi poikkipinta, sillä maasulkuvirrat ovat suuremmat kuin 110 kV:n verkossa.

2.5.1 Perusmaadoitus

Jokaiselle pylväälle asennetaan vähintään perusmaadoitus. Poikkeustapauksissa perusmaadoituksia ei kuitenkaan asenneta, esimerkiksi avokalliolla olevalle pylväälle maadoitusten asennus ei ole välttämättä mahdollista. (Jalonen & Luojus 2020) Poikkeustapauksissa pylväs voidaan myös eristää vaarajännitesyistä (Fingrid 2022a).

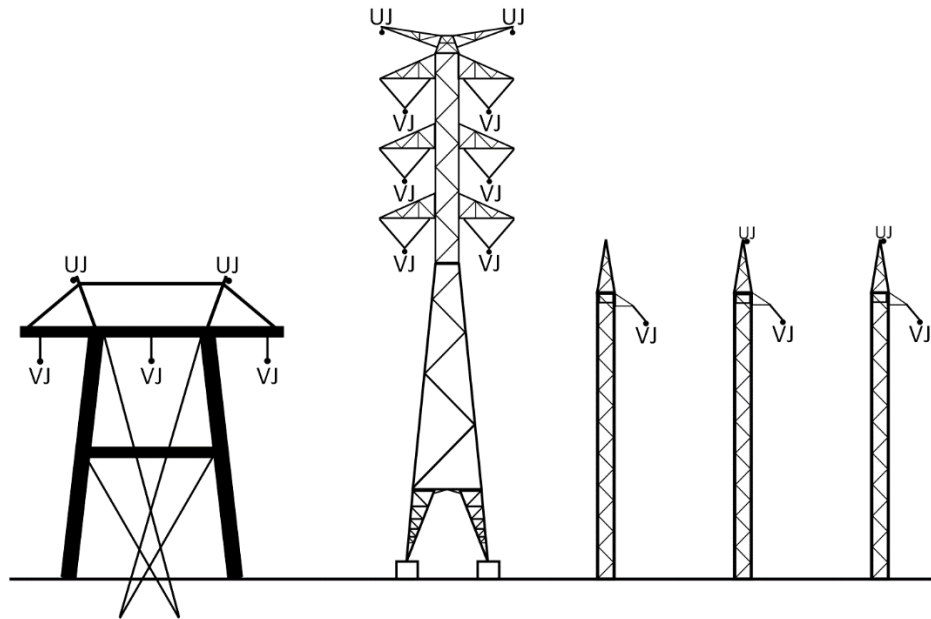
Perusmaadoitus koostuu eri rakenteista pylvästyypin mukaan. Pelkällä perusmaadoituksella aikaansaataavasta maadoitusresistanssista käytetään nimitystä luonnollinen resistanssi. (Elovaara & Haarla 2011; Hänninen 1989)

Harustetuilla portaalipylväillä perusmaadoitus koostuu perustusten alle sijoitetuista J-lenkeistä ja maahan upotetusta elektrodista, joka yhdistää J-lenkit ja samalla pylväsjalat toisiinsa. Myös vapaasti seisovilla pylväillä asennetaan J-lenkit perustusten alle yhdistäen vähintään vastakkaisten kulmien lenkit toisiinsa elektrodilla. (Fingrid 2022a) J-lenkki on nähtävissä kuvassa 7.



Kuva 7. Pylväasperustusten alle asennettu J-lenkki (Fingrid 2022b).

J-lenkkien lisäksi vapaasti seisoville pylväille asennetaan yksi 40 metriä pitkä vaakaelektrodi. Paalutusten yhteydessä vähintään kahden paalun mukana maahan viedään maadoituselektrodit, jotka yhdistyvät pylvään teräsrakenteisiin. Peltopylväille kuten harustetuille portaaleille asennetaan J-lenkit sekä lenkit yhdistävät elektrodit. (Fingrid 2022a) Piikkipylväillä orsi korvataan sähköisesti perusmaadoituksella yhdistämällä jalat toisiinsa 95 mm²:n kuparijohtimella (Hänninen 1989). Kuvassa 8 esitetään periaatteelliset piirrokset harustetusta portaalista, vapaasti seisovasta sekä piikkipylvästä.

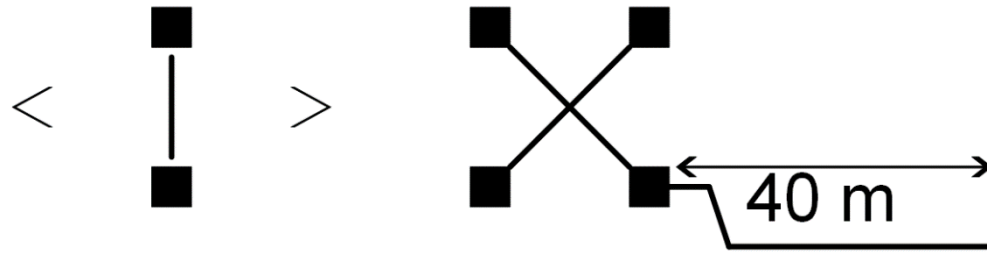


Kuva 8. Periaatteelliset piirrokset harustetusta portaalista, vapaasti seisovasta pylväästä sekä piikki pylvästä.

Kuvassa vasemmanpuoleinen pylväs edustaa harustettua portaalista, keskimmäinen vapaasti seisovaa ja oikeanpuoleinen piikki pylvästä. Harustetusta portaalista käytetään nimitystä H-pylväs. Lisäksi on olemassa Hx-pylväs, jolla on kaksi eri virtapiiriä. Esimerkiksi kuvan H-pylväällä voisi olla toinen virtapiiri alemman vaakaorren kohdalla. Vapaasti seisovat pylväät voivat olla esimerkiksi T-, L-, Z- ja Y-pylväitä. Mainitut pylvästyypit voivat kuitenkin olla myös harustettuja. Kuvan keskimäinen pylväs on T-pylväs. Kuvassa esitetään myös vaihejohtimien (VJ) ja ukkosjohtimien (UJ) suuntaa antavat sijainnit. Johtimien sijainnit eivät kuitenkaan itsessään vaikuta maadoitukseen.

Perusmaadoituksella saadaan kaikki pylvään rakenteet yhdistettyä luotettavasti koko maadoitusrakenteeseen. Samalla myös kasvatetaan virtateiden määrää, mikä auttaa esimerkiksi elektrodin termisen keston kannalta. Termistä kestoa tarkastellaan aluvussa 4.2. Erityisesti piikki pylvään tapauksessa huomataan perusmaadoituksen ja orren sähköisen korvauksen tärkeys. Ilman maassa kulkevaa jalkoja yhdistävää vaakaelektrodia, eivät kaikki pylväsrakenteet välttämättä olisi suorassa yhteydessä mihinkään maadoitukseen. Esimerkiksi keskimäinen jalka voisi olla kokonaan irrallaan maadoituselektrodista. Näin ollen keskimmaisellä vaiheella tapahtuvassa maasulussa pylväsmaadoitukset eivät toimisi halutulla tavalla.

Kuvassa 9 on nähtävissä perusmaadoitusten periaatteelliset esimerkkiasennukset harustetulle portaalipylväälle sekä vapaasti seisovalle pylväälle.



Kuva 9. Perusmaadoitukset harustetulle portaalille sekä vapaasti seisovalle pylväälle (Fingrid 2022b).

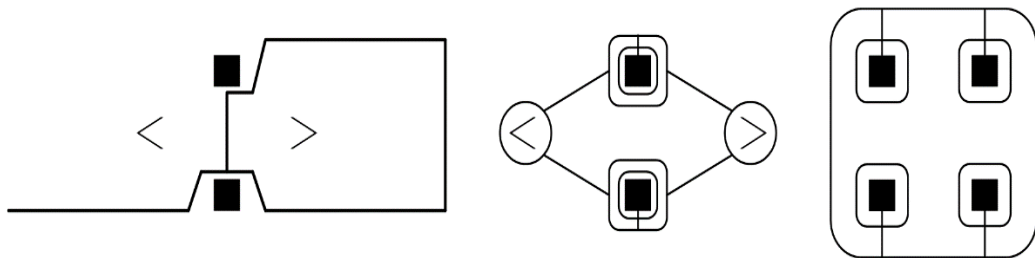
Kuvassa vasemmanpuoleinen pylväs esittää harustettua portaalipylvästä ja asennettuja perusmaadoituksia. Oikeanpuoleinen pylväs puolestaan esittää vapaasti seisovaa pylvästä ja perusmaadoituksia. Kuvassa neliöt esittävät pylväsalkojen perustuksia ja viivat edustavat maadoitusjohtimia. Harusankkurit esitetään kuvassa "<"- ja ">"-merkein. J-lenkkejä kuviin ei erikseen piirretä. Jos oikeanpuoleisen pylvään maadoituksista poistetaan säteittäinen elektrodi, jäisi jäljelle peltopylväälle asennettava perusmaadoitus. Harustetut portaalipylväät eli H-pylväät kattavat enemmistön Fingridin toiminnassa olevista pylväistä. Loppuosan pylväskannasta muodostavat vapaasti seisovat pylväät, joista osa on kuvan oikeanpuoleisen pylvään kaltaisia.

2.5.2 Lisämaadoitukset

Lisämaadoituksia käytetään, kun perusmaadoitus ei saavuta maadoitusresistanssin tavoitearvoa. Lisämaadoitus voidaan toteuttaa säteis-, pystymaadoituksena, läpimenevänä tai ylipitkänä maadoituksena. Useimmiten kuitenkin käytetään säteismaadoitusta parempaa maadoitusresistanssia tavoiteltaessa. (Hänninen 1989)

Potentiaalinhjauselektrodi puolestaan käytetään sijainneissa, joissa ihmisiä oleskelee usein eli kosketus- ja askeljännitettä tulee rajoittaa (Elovaara & Haarla 2011; Hänninen 1979). Potentiaalinhjauselektrodiä käytetään myös, jos sähköasemalta katsottuna ensimmäinen aseman ulkopuolella oleva pylväs on korkeintaan 30 metrin päässä aseman aidasta. Aseman sisäpuolella harvan maadoitusruudukon alueella sijaitsevalle pylväälle tulee myös asentaa potentiaalinhjauselektrodi. Lisäksi potentiaalinhjauselektrodit tulee asentaa Fingridin asiakkaiden johdonvarsiasemiin liitettäville pylväille. Johdonvarsi-asetat myös yhdistetään pylväsmaadoituksiin. Johtimena käytetään kahta vähintään yhtä johtavaa elektrodia kuin liityntäpisteen ukkosjohtimet ovat. Kuparielektrodilla vähimmäispoikkipinta on kuitenkin 50 mm² ukkosjohtimien johtavuudesta riippumatta. (Fingrid 2022a)

Säteismaadoituksessa pylväälle asennetaan 1–4 vaakaelektrodia, joiden peruspituus on 40 metriä (Fingrid 2022a). Peruspituudesta voidaan myös käyttää termiä vakio pituus, sillä se on lähtökohtaisesti elektrodin pituus. Yli 35 metrin mittaiset saman suuntaiset elektrodit yhdistetään päistään toisiinsa, jolloin maadoitusresistanssi ei kasva elektrodin katketessa yhdestä kohtaa (Hänninen 1979). Toisin sanoen saman suuntaiset maadoituselektrodit yhdistetään aina peruspituuden ollessa 40 metriä. Pituus on elektrodille kaitvetun ojan pituus, joten se ei tarkasti kuvaa elektrodin pituutta (Fingrid 2022a). Tässä työssä ojan pituus ja elektrodin pituus kuitenkin yleistetään jatkossa yhtä suuriksi, sillä materiaalitarve on vähintään ojan pituuden verran. Käyttämällä vakio pituuksia elektrodeille ylimitoitetaan paikoittain maadoituksia. Suhteessa suurimmat kustannukset kuitenkin johtuvat työkoneen hankkimisesta pylvässijaintiin. Näin ollen kustannusten lasku, joka saavutettaisiin käyttämällä hieman lyhyempää elektrodia, on suhteessa työkoneen kustannuksiin hyvin pieni. Maadoituselektrodin pituus voi erota peruspituudesta mutta yli 40 metrin mittaisia säteitä tulee kuitenkin välttää ja tarvittaessa tulisi lisätä säteiden määrää pituuden sijasta (Jalonen & Luojus 2020). Useat säteet ovat tehokkaampia myös salamavirran kannalta. Säteittäismaadoituksen sekä potentiaalinojauselektrodien periaatteelliset asennukset ovat nähtävissä kuvassa 10.



Kuva 10. Säteittäinen lisämaadoitus sekä potentiaalinojauselektrodit (Fingrid 2022b).

Kuvassa vasemmanpuoleiselle pylväälle on asennettu kolme vaakaelektrodia, joista kaksi on yhdistetty päistään yhteen. Keskimäinen pylväs edustaa harustettua portaali-pylvästä, jolle on asennettu potentiaalinojauselektrodi. Kuvan piirtoperiaatteet ovat samat kuin kuvassa 9. Kuten kuvasta huomataan, tulee myös harusankkurien ympärille asentaa elektrodit. Oikeanpuoleinen pylväs esittää vapaasti seisovaa pylvästä, joka on varustettu potentiaalinojauselektrodilla. Edellä mainittiin, että vaakaelektrodin peruspituus on 40 metriä. Näin ollen saman suuntaiset säteet yhdistetään aina päistään, jolloin säteet sekä perusmaadoituksen vaakaelektrodi muodostavat silmukan. Vaikka saman suuntaiset säteet muodostavatkin silmukan, käytetään tässä työssä kyseisistä maadoituksista selkeyden takia nimitystä säde.

Yleensä lisämaadoituksena käytetään vaakaelektrodeja mutta myös pystymaadoitus on mahdollinen. Esimerkiksi paalutettaessa tai maassa, jossa huonosti johtavan pintakerroksen alla on paremmin johtavaa maata, voi pystymaadoitus olla perusteltua. Tällöin urakoitsijan tulee kuitenkin osoittaa laskelmilla, että maadoitusresistanssi vastaa vähintään vaakamaadoituksilla saatavaa maadoitusresistanssia. (Jalonen & Luojus 2020) Pystymaadoituselektrodeja ei yleensä asenneta kahta enempää. Jos elektrodeja kuitenkin asennetaan enemmän, tulee elektrodien välisen etäisyyden olla vähintään kaksinkertainen elektrodin pituuteen verrattuna. (Hänninen 1979)

Läpimeneviä maadoituksia voidaan käyttää, jos säteismaadoitus ei riitä tavoitearvon saavuttamiseen. Läpimenevässä maadoituksessa pylvään maadoitus yhdistetään seuraavan pylvään maadoitukseen vähintään yhdellä maadoitusjohtimella. Läpimenevät maadoitukset asennetaan vain silloin, jos useammalla peräkkäisellä pylvällä on tarve. (Hänninen 1989) Nykyään läpimeneviä maadoituksia ei kuitenkaan lähtökohtaisesti käytetä Fingridin maadoituksissa. Kuten alaluvussa 2.3 käsitellään, vaikuttavat muiden pylväiden maadoitukset ja ukkosjohtimet maadoitusimpedanssiin. Toisin sanoen yhdellä pylvällä tavoitearvoa korkeampi maadoitusresistanssi ei ole suuri ongelma, jos viereisillä pylvillä maadoitusresistanssi on riittävän alhainen. Olettaen, etteivät vaarajännitteet aiheuta ongelmia.

Ylipitkää maadoitusta voidaan käyttää, kun pylvästä kauempana on oleellisesti johtavampaa maaperää. Tällöin läpimenevän maadoituksen sijasta voidaan asentaa 70–100 metriä pitkä säde. Kuten säteismaadoituksessa, myös ylipitkät maadoituselektrodit yhdistetään päistään kahta johdinta käytettäessä. (Hänninen 1989)

Rinnakkaisilla johdoilla pylväiden maadoitukset tulee yhdistää jokaiselta pylvältä yhdellä elektrodilla, jos pylväävät ovat korkeintaan 50 metrin päässä toisistaan. Etäisyyden ollessa yli 50 metriä yhdistetään vähintään joka viidennen pylvään maadoitukset yhdellä elektrodilla. Yleensä kuitenkin yhdistetään joka kolmannen maadoitukset. Samalta johdtoauealta erkaantuessa yhdistetään erkaantumispisteen pylväs kahdella elektrodilla erkannevan johdon lähimpään pylvääseen. Luonnollisesti sama periaate pätee myös johdtoauealle yhtyvien johtojen tapauksessa, katselusuunnan ollessa vain vastakkainen. Yhdistykseen käytetään 25 mm² kuparijohdinta kaikilla siirtoverkon jännitteillä. (Fingrid 2022a) Vaikka maadoitukset yhdistetään toisiinsa, mitoitetaan ne toimimaan itsenäisesti (Jalonen & Luojus 2020).

Ensimmäinen sähköaseman ulkopuolella olevista pylväistä yhdistetään kahdella kuparijohtimella aseman maadoituskaivoihin. 110 kV:n pylvällä käytetyt johtimet ovat vähintään 25 mm², 220 kV:lla vähintään 70 mm² ja 400 kV:lla vähintään 95 mm². Jos johdolla

on pylviäitã aseman sisãllã, kulkevat johtimet myõs nãiden pylvãiden maadoitusten kautta aseman portaalille asti. Viimeisin kohta ei kuitenkaan koske jo olemassa olevalle asemalle yhdistettãviã johtoja ja pylviäitã. (Fingrid 2022a)

Ukkosjohtimien jatkuvuus varmistetaan kãyttãmãllã maahan kaivettuja johtimia tai vaihejohtimien alapuolelle asennettavia reduktiojohtimia. Esimerkiksi haarajohdon maadoitukset yhdistetãn runkojohdon maadoituksiin, jolloin ukkosjohtimet yhdistyvãt toisiinsa. Oletuksena tietysti on, ettã ukkosjohtimet ja maadoitukset on yhdistetty toisiinsa luotettavasti, mikã pitãã paikkansa Fingridin verkossa. (Fingrid 2022a) Varmistamalla ukkosjohtimien jatkuvuus pyritãn varmistamaan luotettava tie vikavirroille.

3. MAADOITUSSUUNNITTELU

Maadoitussuunnittelun lähtökohtana on suunnitella maadoitusjärjestelmä, joka takaa erityisesti henkilöturvallisuuden, kuten luvussa 2 esitellyt vaatimukset edellyttävät. Toisin sanoen kosketus- ja askeljäännitteet eivät saa nousta sallittujen rajojen yläpuolelle suoja-releiden ja katkaisijoiden normaalien toiminta-aikojen puitteissa. Lisäksi tulee huomioida, etteivät siirtyvät potentiaalit nouse liian korkeiksi, mikä voikin muodostua rajoittavaksi tekijäksi maadoituksen suunnittelussa. Virallisten vaatimusten lisäksi maadoitussuunnittelu sisältää teknistaloudellista optimointia, esimerkiksi takaiskujen osalta. (Jalonen & Luojus 2020)

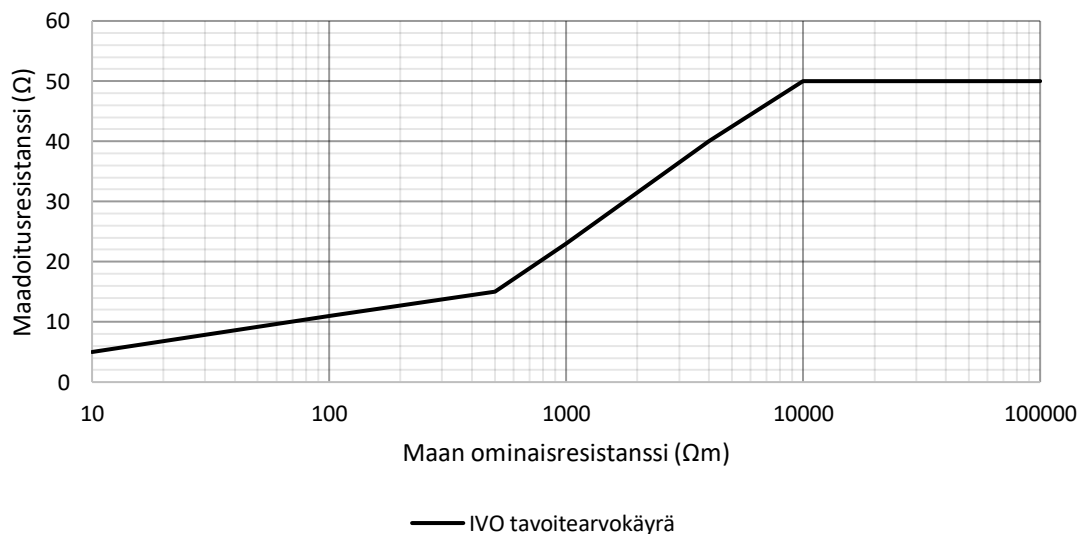
Maadoitussuunnittelu koostuu neljästä periaatteellisesta kokonaisuudesta: maadoitusten suunnittelu, maapotentialiraportin ja induktiovaarajänniteselvityksen laadinta, kontrollimittaukset ja maapotentialiraportin sekä induktiovaarajänniteselvityksen päivitys. Varsinainen suunnittelu toteutetaan kahdessa ensimmäisessä vaiheessa. Näiden vaiheiden jälkeen suoritetaan kontrollimittaukset, joiden jälkeen suunnitelmia ja raportteja päivitetään tarpeen mukaan. Näin ollen myös maadoituksia lisätään tarvittaessa. (Fingrid 2022a) Kontrollimittaukset sekä niihin pohjautuvat päivitykset ovat kuitenkin oleellinen osa maadoitussuunnittelun laadunvarmistusta. Vaikka suunnittelun vaiheet esitetään yleensä omina kokonaisuuksinaan, suoritetaan niitä usein samanaikaisesti.

Maadoitussuunnittelun tuloksena jokaiselle pylväälle luodaan maadoituspöytäkirja, josta selviää maan ominaisresistanssin mittaustulokset, maadoitusten sijainti, materiaali, maadoitusresistanssin tavoitearvo sekä saavutettu arvo, eri mittaustulokset sekä muita maadoituksiin liittyviä tietoja. Maadoituspöytäkirjan laatimista ja maadoitussuunnittelua varten on oleellista tietää maan ominaisresistanssi, joka selvitetään yleensä mittaamalla Wennerin menetelmää käyttäen. Mittaukset suoritetaan yleensä 2, 4, 8 ja 16 metrin piikkiväleillä, jolloin mittaustulokset edustavat maan ominaisresistanssia mainituissa syvyyksissä. Mittausten perusteella saadaan laskettua mittaussijainnille maan ominaisresistanssi (Hiltunen & Sorri 2022) Tarkemman kuvauksen mittausprosesseista tarjoaa esimerkiksi Luukkaisen (2020) diplomityö, joka käsittelee maadoitusmittauksia ja mittausprosessin kehittämistä.

Maan ominaisresistanssin mittauksen yhteydessä mittaaja mahdollisuuksien mukaan pyrkii jo suunnittelemaan maadoitusten sijaintia pöytäkirjaan. Samalla pylvässijainnista huomioidaan maadoitusten kannalta oleelliset maastonmuodot sekä rakenteet, jotka kuvataan maadoituspöytäkirjan karttaosiossa. Onkin välttämätöntä, että pylvässijainnit

ovat jo suunnitteluvaiheessa tiedossa. Karttaosiossa esitetään myös maanalaiset rakenteet, jotka maadoituksia suunnitellessa tulee huomioida, esimerkiksi kaapelit tai putkistot. (Sorri 2022)

Maan ominaisresistanssin perusteella pylväälle on mahdollista selvittää alustavasti tavoiteltava maadoitusresistanssin arvo, joka saadaan Imatran Voiman kehittämästä tavoitearvokäyrästä. Tulee kuitenkin huomioida, ettei tavoitearvolla pyritä täyttämään vaarajännitteiden vaatimuksia. Käyrästä luomisperusteet ovat ajansaatossa kadonneet eikä yleistä konsensusta ole siitä mitä tavoitearvokäyrä varsinaisesti tavoittelee. Kuitenkin voidaan olettaa käyrästä sisältävän teknistaloudellista optimointia, jonka yhtenä osana on ukkoshäiriöherkkyys. Voidaan kuitenkin olettaa, ettei tavoitearvokäyrä tavoittele turvallisuusvaatimusten täyttämistä, sillä ne eivät läheskään aina pelkästään käyrää hyödyntämällä täyty. Tämä koskee kuitenkin vain nykytilannetta ja on mahdollista, että käyrästä on aiemmin tavoitellut myös vaatimusten täyttämistä. Tilanne on kuitenkin voinut muuttua esimerkiksi vaatimusten muuttuessa. Jotta käyrästä voitaisiin suunnitella maadoitukset vaarajännitteiden kannalta, tulisi käyrästä huomioida myös vikavirtojen suuruudet ja ympäristö rakenteineen. Imatran Voiman luoma tavoitearvokäyrä on esitettyä kuvassa 11.



Kuva 11. Imatran Voiman luoma tavoitearvokäyrästä (Nousmaa 1979).

Kuvan käyrältä voidaan lukea tavoiteltavan maadoitusresistanssin arvo maan ominaisresistanssin välille 10–100000 Ωm . Esimerkiksi 500 Ωm :n maaperässä tavoitellaan noin 15 ohmin maadoitusresistanssia. Tavoitekäyrästä saatavaan maadoitusresistanssiin pohjautuen voidaan selvittää pylväälle vaadittava kuparimäärä eli säteiden lukumäärät sekä pituudet. Toisin sanoen maadoitus suunnitellaan taaksepäin aloittaen tavoitearvosta, johon pyritään. Kuitenkin tulee huomioida, ettei kyseinen mitoitus maadoituksille

huomioi vaarajännitteitä, jotka voivat aiheuttaa muutoksia suunnitelmaan. Tavoitearvoikäyrästään pohjautuva suunnitelma voi kuitenkin olla myös lopullinen suunnitelma maadoituksille, kun muita vaatimuksia maadoituksille ei ole. Tavoitearvoikäyrän mukainen maadoitusresistanssia ei myöskään aina ole mahdollista saavuttaa, esimerkiksi kallioisessa maaperässä. Näissä tapauksissa viereisten pylväiden maadoituksia pyritään parantamaan, mikä pienentää maadoitusjännitteitä.

Maapotentiaaliraportti laaditaan jokaiselle johdolle ja siinä tarkistetaan määräysten täyttyminen. Raportissa esitetään voimajohtokohtainen potentiaalikuvaaja, josta nähdään tehokkaasti, alitetaanko määräysten asettamat raja-arvot jokaisella pylväällä. Lisäksi raportissa esitetään toimenpide-ehdotukset, joilla määräykset täytetään. Toimenpide-ehdotukset koskevat ennen kaikkea siirtyviä potentiaaleja, sillä muut vaatimukset huomioidaan lähtökohtaisesti jo aiemmin. Näin ollen vaikutukset asennettaviin maadoituksiin voivat olla merkittävät. Esimerkiksi potentiaalinojauselektrodeihin päädytään maapotentiaaliraportin pohjalta, sillä tavoitearvoikäyrä ei ota kyseiseen elektrodityyppiin kantaa. Todellisuudessa potentiaalinojauselektrodin asennuspäätös voidaan tehdä jo ennen maapotentiaaliraporttia, esimerkiksi pylvään sijaitessa hyvin lähellä asutusta. Lisäksi maadoitussuunnittelun vaiheet sulautuvat käytännössä yhteen, jolloin käytännön suunnittelu eroaa toteutukseltaan hieman tässä työssä esitetystä.

Maapotentiaaliraportin lisäksi muodostetaan induktiovaarajänniteselvitys. Selvitys laaditaan SFS EN 50341-2-7 perusteella ja sillä tarkastellaan telejohtoihin indusoituvia jännitteitä ja määräysten täyttymistä. Selvityksen pohjalta voidaan pyrkiä parantamaan telekaapelin maadoituksia. (Jalonen & Luojus 2020) Voimajohtomaadoitusten suunnitteluun selvityksellä ei kuitenkaan ole vaikutusta. Näin ollen selvitystä ei tässä työssä tarkastella tarkemmin.

Esitellyt vaiheet kuuluvat ylätasolta katsottuna nykyiseen maadoitussuunnitteluun mutta yksityiskohtaisemmat toteutukset vaihtelevat toimijoiden välillä. Esimerkiksi Imatran Voiman tavoitearvoikäyrän käyttö ei ole millään tavoin pakollista, joskin se on yleisesti käytetty. Vaarajänniteselvitykset ovat vaadittuja, joten niiden toteutuksessa ei ole yhtä paljon vapauksia. Kaikkiin yksityiskohtaisiin suunnittelun vaiheisiin ei ole työssä järkevää ottaa kantaa. Työn ei ole tarkoitus optimoida kaikkia suunnittelun vaiheita, vaan luoda kokonaiskuva.

3.1 Maadoitusresistanssin laskenta

Fingrid ei suunnittele voimajohtomaadoituksia itse, vaan suunnittelua toteuttavat useat eri suunnittelutoimistot. Maadoitussuunnittelua varten on tekninen määrittely, josta

selviävät vaatimukset sekä ohjeistus suunnittelun suorittamiseen. Yksityiskohtaiset toteutukset kuitenkin vaihtelevat, sillä ohjeistus ei käsittele yksityiskohtaisesti kaikkia seikoja. Yksi näistä eri tavoin toteutettavista asioista on maadoitusresistanssin laskenta. Maadoitusresistanssin laskentaan voidaan käyttää hieman eri laskukaavoja ja periaatteita, joilla kaikilla päästään käytännön näkökulmasta riittävän tarkkoihin tuloksiin. Laskentatavat halutaan kuitenkin yhtenäistää, jolloin ei jää eri osapuolien välisiä epäselvyyksiä tuloksista. Yhtenäisillä laskentamenetelmillä myös laadunvalvonta on tehokkaampaa, kun voidaan tehdä helposti tarkastuslaskentoja. Lisäksi yhtenäistetyt laskentamenetelmät helpottavat ohjeistusta ja erimielisyyksien selvittämistä, kun laskutavat ovat kaikkien tiedossa.

Työtä varten kuudelle maadoitussuunnittelua Fingridille toteuttavalle suunnittelutoimistolle lähetettiin lyhyt kysely, jolla pyrittiin selvittämään suunnitteluun liittyviä asioita. Tämän lisäksi Despron edustajan Heikki Sorrin kanssa käytiin keskustelu, jossa kyselyn asiat käytiin myös läpi. Kyselyyn vastasi neljä suunnittelutoimistoa, minkä lisäksi Sorrin kanssa käyty keskustelu kasvattaa määrän käytännössä viiteen. Kyselyn avulla huomattiin, että osasta suunnittelun seikoista on eriäviä toimintatapoja. Yksi näistä liittyy maadoitusresistanssiin määrittelyyn. Lisäksi kysely vahvisti oletuksen Imatran Voiman tavoitearvokäyrän käytöstä, sillä käyrä on käytössä kaikissa vastanneissa yrityksissä. Muut vastauksissa esiintyneet eroavaisuudet liittyvät pääosin nykyiseen ohjeistukseen, joten tässä alaluvussa otetaan kantaa vain maadoitusresistanssin laskentaan.

Standardissa SFS 6001 (2018) esitetään laskukaavoja eri elektrodityyppien maadoitusresistansseille. Kaavat on esitetty aiemmin taulukossa 3. Kaavojen lisäksi standardi esittää asennuskonfiguraatiosta riippuvia kertoimia, jotka on myös esitetty aiemmin taulukossa 4. Standardia soveltamalla tulisi päätyä ratkaisuihin, jotka täyttävät lait ja määräykset. Muiden tapojen soveltaminen vaatisi erillisiä perusteluja. Luukkainen (2020) havaitsee diplomityössään, että kahdella muulla tavalla laskettuna maadoitusresistanssit ovat pienemmät kuin standardin tavalla. Kummallakin toisella tavalla lasketut arvot puolestaan ovat lähellä toisiaan. Ero maadoitusresistansseissa laskutapojen välillä riippuu maan ominaisresistanssista. Suuremmat maadoitusresistanssin arvot johtavat suurempiin maadoitusmateriaalimääriin. Tämä johtuu siitä, että samaan tavoitearvoon pääsy edellyttää suurempaa maadoituselektrodipituutta standardin laskutavalla kuin toisella laskutavalla. Toisin sanoen standardin arvoilla päädytään suurempiin maadoituksiin. Voitaisiin siis optimoinnin näkökulmasta perustella toinen laskutapa paremmaksi. Maadoituksia tarkastellessa kustannukset eivät kuitenkaan ole päätekijä, vaan mahdollinen osatekijä. Lisäksi voidaan todeta, että laskutavat on todennäköisesti valittu standardiin,

koska niiden ajatellaan olevan riittävän tarkat maadoitussuunnittelun tarpeisiin. On siis perusteltua käyttää tässä työssä taulukoiden 3 ja 4 kaavoja sekä kertoimia.

Perusmaadoituksen ja lisämaadoitusten voidaan ajatella kytkeytyvän rinnan (IVO 1977; Sorri 2023). Näin ollen tulee koko maadoitusresistanssin laskentaa varten laskea ensin perusmaadoituksen maadoitusresistanssi. Tässä työssä tavoitearvokäyrän laskennassa perusmaadoitus lasketaan pelkästään vaakaelektrodin pituudella huomioimatta J-lenkkejä. Näin pyritään huomioimaan vain perusmaadoituksen tehollinen resistanssi. Vaakaelektrodille maadoitusresistanssin laskenta onnistuu taulukon 3 upotetun vaakaelektrodin kaavalla. Esimerkiksi H-pylväillä vaakaelektrodi yhdistää jalat toisiinsa ja näin ollen elektrodeja on vain yksi, joten tulos saadaan suoraan kyseisellä kaavalla. Esimerkiksi peltopylvään tapauksessa vaakaelektrodit muodostavat ristin, jolloin maadoitusresistanssi tulee kertoa kertoimella 1,16, joka saadaan taulukosta 4.

Yhden lisäsäteen tapauksessa säteen maadoitusresistanssi saadaan upotetun vaakaelektrodin kaavalla. Rinnankytkentä puolestaan saadaan normaaleilla rinnankytkennän laskentaperiaatteilla. Koko maadoitusresistanssi tulee kuitenkin kertoa kertoimella 1,03, joka saadaan taulukosta 4. Kahden säteen tapauksessa molemmat säteet kytkeytyvät rinnan, joten tulee molemmat kertoa samalla kertoimella kuin yhden säteen tapaus. Pois lukien kaksi sädettä, jotka yhdistetään päistään, jolloin ne muodostavat silmukan. Näin ollen silmukka kytkeytyy rinnan perusmaadoituksen kanssa ja tulee silmukka kertoa kertoimella 1,08. Kolmen säteen tapauksessa kaksi sädettä on aina samaan suuntaan ja muodostavat näin ollen silmukan. Toisin sanoen täytyy silmukan resistanssiin hyödyntää kerrointa 1,08 ja toisen suunnan säteeseen kerrointa 1,03. Neljän säteen tapauksessa säteet muodostavat kaksi erisuuntaista silmukkaa, joten molempiin silmukkoihin täytyy hyödyntää kerrointa 1,08.

Perusmaadoituksen laskennassa voidaan myös huomioida J-lenkit, jolloin voidaan päätyä pienempiin maadoitusresistansseihin. Tämä johtuu siitä, että perusmaadoituksesta käytettiin edellä olleessa laskennassa arvioita, joka kuvasi tehollista resistanssia. Taulukon 4 kertoimia ei kuitenkaan voida hyödyntää laskennassa, sillä ne on suhteutettu vaakaelektrodiin. Maadoitussuunnittelussa pelkällä vaakaelektrodillakin päästään riittävän tarkkoihin tuloksiin. Luvussa 4 huomataan suunniteltujen ja mitattujen maadoitusresistanssien eroavan suhteellisen paljon toisistaan sekä suurempaan että pienempään suuntaan. Näin ollen J-lenkkien sisällyttäminen laskentaan ei todennäköisesti vaikuta maadoitussuunnitteluun merkittävästi huomioiden muut muuttujat.

3.2 Maadoitussuunnitteluun vaikuttavat tekijät

Maadoitusten tulee täyttää tietyt vaatimukset ja niiden avulla, esimerkiksi vaarajännitteitä koskevia määräyksiä tulee noudattaa. Maadoituksiin ja niiden suunnitteluun vaikuttaa eniten turvallisuus, käyttövarmuus sekä kustannukset. Yhtenä työn tavoitteena on selvittää, onko tavoitearvojärjestelmälle, esimerkiksi käyrälle, tarvetta nykyisessä maadoitussuunnittelussa. Maadoitussuunnittelu on monesta pienemmästä osakokonaisuudesta koostuva prosessi, joista suuri osa pohjautuu lopulta maadoitusresistanssiin sekä maan ominaisresistanssiin. Jos maadoitussuunnittelua toteutettaisiin ilman tavoitearvoa, tehtäisiin jokaiselle pylväälle silti samat tarkastelut vaarajännitteisiin liittyen. Näin ollen jokaiselle pylväälle muodostuisi myös tavoiteltava maadoitusresistanssin arvo turvallisuusnäkökulmasta. On kuitenkin olemassa suuri määrä pylväitä, joille turvallisuusnäkökulma ei aseta vaatimuksia. Toisin sanoen ilman tavoitearvojärjestelmää, täytyisi näille pylväille määrittää tavoiteltava maadoitusresistanssin arvo käyttövarmuus- ja kustannusnäkökulmaa hyödyntäen. Vaihtoehtoisesti näille pylväille voitaisiin asentaa vain minimimaadoitukset, jolloin käyttövarmuusnäkökulma jätettäisiin huomioimatta kokonaan.

Ilman yhtenäistä tavoitearvoa maadoitussuunnittelussa on täysin mahdollista huomioiden kaikki kolme näkökulmaa. Esimerkiksi käyttövarmuuden näkökulmasta voidaan määrittellä maadoitussuunnittelijoille vaatimukset ja raja-arvot, jotka maadoitusten täytyy saavuttaa. Toisin sanoen täytyisi jokaiselle pylväälle erikseen laskea maadoitusresistanssi, joka täyttää vaatimukset. Erikseen laskeminen on kuitenkin työlästä, joten todennäköisesti tämä menettely johtaisi vaatimuksiin sekä raja-arvoihin pohjautuvaan yleistettyyn tavoitearvojärjestelmään. Vaihtoehtoisesti maadoitussuunnitteluprosessi muuttuisi työläämmäksi ja kustannuksiltaan suuremmaksi. Koska maadoitussuunnittelussa on mukana useita toimijoita, johtaisi tämä todennäköisesti myös useisiin erilaisiin ratkaisuihin. Tavoite maadoitussuunnittelun yhtenäistämisestä ei toteutuisi. Maadoitusresistanssin täytyy silti pohjautua kolmeen edellä mainittuun näkökulmaan, vaikka ennalta määritellyä tavoitearvoa ei olisikaan. Selvityksestä voidaan päätellä, että lopulta päädyttäisiin todennäköisesti kuitenkin tavoitearvojärjestelmään, sillä se helpottaa suunnittelua.

Tavoitearvojärjestelmä voi pohjautua kaikkiin kolmeen mainittuun näkökulmaan. Tällaisen järjestelmän kehitys on nykyisillä laskentaohjelmilla täysin mahdollista. Tulee kuitenkin huomioida, että vaatimukset maadoituksille vaihtelevat suuresti pelkästään turvallisuusnäkökulmasta. Kuten alaluvussa 2.1 on mainittu, joissain paikoissa vaatimuksia ei ole. Toisessa sijainnissa puolestaan turvallisuusvaatimukset ovat määräävät. Toisin sanoen järjestelmään täytyisi sisällyttää useita eri lähtötilanteita tai vaihtoehtoisesti tilannekohtaisesti lähtötiedot täytyisi muuttaa täysin. Ei ole järkevää pyrkiä huomioimaan kaikkia näkökulmia tavoitearvossa, sillä tuloksena on raskas ja monimutkainen järjestelmä.

Tavoitearvokäyrän näkökulmasta ei olisi edes mahdollista luoda vain yhtä käyrää, joka huomioisi kaikki näkökulmat riittävän hyvin. Eri tilanteissa eri näkökulmat ovat määrääviä, joten yksinkertainen tavoitearvojärjestelmä ei pysty kattamaan kaikkia tilanteita.

Tätä työtä varten tavoitearvojärjestelmää tarkastellaan suojauksen, turvallisuuden, ukkoshäiriöiden sekä kustannusten näkökulmasta. Eri näkökulmat ovat eri asemassa toisiinsa nähden tavoitearvoa tarkasteltaessa. Maadoitusten tulee täyttää turvallisuusvaatimukset mutta käyttövarmuuden sekä kustannusten näkökulmasta tavoitearvon optimointi on mahdollista. Koska turvallisuusvaatimukset ovat määrääviä, tarkastellaan ensin tavoitearvojärjestelmää, joka huomioi turvallisuusnäkökulman.

Turvallisuusnäkökulma tarkoittaa voimajohtomaadoitusten näkökulmasta vaarajännitteitä sekä niiden vaatimuksia. Vaarajännitevaatimuksia on kuitenkin useita eikä ole järkevää muodostaa tavoitearvoja jokaiselle tapaukselle. Henkilöturvallisuuden näkökulmasta tavoitearvot voidaan muodostaa esimerkiksi huomioiden alaluvussa 2.1 esitellyt $2 \cdot UD_{1-4}$ -arvot. Näin ollen maadoitusjännitteen yläraja määräisi pylväiden maadoituksille maadoitusresistanssin ylärajan eli tavoiteltavan arvon. Maadoitusjännitteeseen kuitenkin vaikuttaa maadoitusresistanssin lisäksi myös koko johdon impedanssiketju sekä maasulkuvirrat. Toisin sanoen yksittäisen pylvään maadoitusten tavoitearvoon vaikuttaisivat myös muut pylväät sekä maasulkuvirtojen suuruus pylvään kohdalla. Vaihtoehtoisesti voidaan muodostaa pelkästään vikavirtaan pohjautuva tavoitearvo, jolloin kaikkien pylväiden maadoitusresistanssi oletetaan yhtä suureksi. Maasulkuvirrat kasvavat kuljettaessa johdon keskiosasta syöttäviä asemia kohden. Tämä huomioiden voidaan maadoitusresistansseille valita tietyillä pylväsväleillä tavoiteltava vakiomaadoitusresistanssi.

Ongelmaksi maadoitusjännitteisiin pohjautuvassa tavoitearvojärjestelmässä muodostuu tavoitearvojen määrä. Eri ukkosjohtimet sekä jännepituudet vaikuttavat ketjuimpedanssiin ja näin ollen tavoiteltavaan vakiomaadoitusresistanssiin. Maadoitusjännitevaatimukset vaihtelevat pylvässijaintien kesken. Toisin sanoen päädyttäisiin useaan eri tavoitearvoon ja monimutkaisempaan systeemiin kuin nykyinen tavoitearvokäyrä. Tavoitearvojen ei tarvitsisi olla johtokohtaisia, vaan ne voitaisiin muodostaa esimerkiksi jollain maasulkuvirtojen suuruuden välillä. Tuloksena olisi silti useat eri tavoitearvot, joten useiden tavoitearvojen ongelma ei ratkea.

Koska tavoitearvojärjestelmä pohjautuu maadoitusjännitteisiin, tavoiteltaisiin sillä kyseisten vaatimusten täyttämistä. Maan ominaisresistanssi kuitenkin vaihtelee ja paikoittain suurten arvojen takia ei kaikilla pylväillä todennäköisesti päästäisiin tavoiteltuihin arvoihin. Toisin sanoen täytyisi maadoitusjännitteitä tarkastella viereisten pylväiden avulla kuten nykyisessä suunnittelussa. Lisäksi tavoitearvo ei ota kantaa käyttöhäiriöiden määrään,

joten ne täytyisi tarkastella erikseen. Koska tavoitearvo ei todennäköisesti aina täyttäisi vaarajännitevaatimuksia, täytyisi vaarajänniteselvitykset eli maapotentialiraportti sekä induktiovaarajänniteselvitys silti laatia. Olettaen, että tavoitearvo olisi muodostettu järkevästi, lyhentyisi todennäköisesti vaarajänniteselvityksiin käytetty aika. Todennäköisesti säästetty aika siirtyisi kuitenkin käyttöhäiriötarkasteluun eli ukkoshäiriötarkasteluun. Lisäksi ukkoshäiriötason tarkastelu on kompleksisempaa ja epätarkempaa kuin vaarajännitetarkastelu. Huomioiden kaikki käsitellyt seikat, voidaan todeta, ettei turvallisuusnäkökulma ole perusteltu lähestymistapa tavoitearvojärjestelmään. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, ettei turvallisuusvaatimuksia tule täyttää. Sen sijaan voidaan todeta, ettei turvallisuusnäkökulma tule todennäköisesti muuttumaan tämän työn tarkastelun tuloksena.

Kustannukset ovat yksi tavoitearvoon vaikuttavista tekijöistä. Kustannuksia voidaan kuitenkin optimoida vain joissain tilanteissa ja ensisijaista on maadoitusten riittävä mitoitus. Tästä syystä pelkästään kustannuksiin pohjautuvaa tavoitearvojärjestelmää ei tarkastella, vaan kustannusten optimointi pyritään sisällyttämään tavoitearvoihin. Luvussa 2 mainitaan, että Fingridin verkossa pylväät maadoitetaan suojauksen toiminnan varmistamiseksi. Toisin sanoen tavoitearvojärjestelmä voisi perustua suojauksen tuomiin rajoituksiin ja raja-arvoihin. Fingridin verkossa suojauksia suunniteltaessa kuitenkin oletetaan, että vika tapahtuu pylväällä, jolla vikavastus on pieni. Toisin sanoen vika tapahtuu pylväällä, joka on yhteydessä viereisiin pylväisiin ukkosjohtimien avulla. Näin ollen pylvään maadoituksen vaikutus ei ole yhtä merkittävässä asemassa. Lisäksi voimajohtojen erilaiset maadoitukset otetaan johdon suojauksen suunnittelulaskennassa huomioon. (Honkanen & Huhtanen 2022) Voidaan siis todeta, ettei suojausnäkökulmasta löydetä lähtökohtia tavoitearvojen muodostamiseen. Maadoituksilla on kuitenkin vaikutus suojauksen toimintaan, joten maadoitusresistanssien ei voida antaa nousta liiallisesti, vaikka tavoitearvojärjestelmä ei suojaukseen perustukaan.

Viimeisenä tarkasteltavana näkökulmana tavoitearvojärjestelmän luonnille on käyttövarmuus. Maadoitusten mitoittamisella on käyttövarmuuden kannalta suurin vaikutus ukkosen aiheuttamien takaiskujen syntymisen ehkäisyyn. Muilla tavoilla syntyvien maasulkujen ehkäisyyn maadoitukset eivät pysty vaikuttamaan. Koska maadoitusresistanssilla on suora yhteys pylvään potentiaaliin salamaniskun aikana, on mahdollista löytää yhteys ukkoshäiriöiden sekä maadoitusten välille. Myös ukkoshäiriötiheyden näkökulmasta on mahdollista muodostaa useita eri tilanteita maadoituksille. Esimerkiksi salamatiheydet vaihtelevat maantieteellisen sijainnin perusteella, jolloin myös ukkoshäiriömäärät oletettavasti vaihtelevat samalla maadoitusresistanssilla. Yleistilanteen muodostaminen on kuitenkin perustellumpaa ukkoshäiriöiden näkökulmasta verrattuna turvallisuusnäkökulmaan. Jos joillain pylväillä on esimerkiksi suurempi salamatiheys, seuraa tästä suurempi

ukkohäiriötiheys. Oikein valitulla yleistilanteella eivät nämä tilanteet kuitenkaan ole merkittäviä kokonaiskuvassa. Turvallisuusnäkökulmasta jokaisella pylväällä täytyy päästä vaatimuksiin, joten samanlaisen yleistilanteen luonti ei onnistu. Tulee myös huomioida, että nykyisessä maadoitussuunnittelussa turvallisuusnäkökulma huomioidaan vaarajänniteselvityksissä. Toisin sanoen maadoitussuunnittelu ei muuttuisi suuresti uusilla tavoitearvoilla, mikä helpottaa siirtymää järjestelmästä toiseen. Tarkastelluista näkökulmista ukkohäiriötiheys vaikuttaa toimivalta lähestymiseltä uuden tavoitearvojärjestelmän luontiin ja se valitaan jatkotarkasteluun.

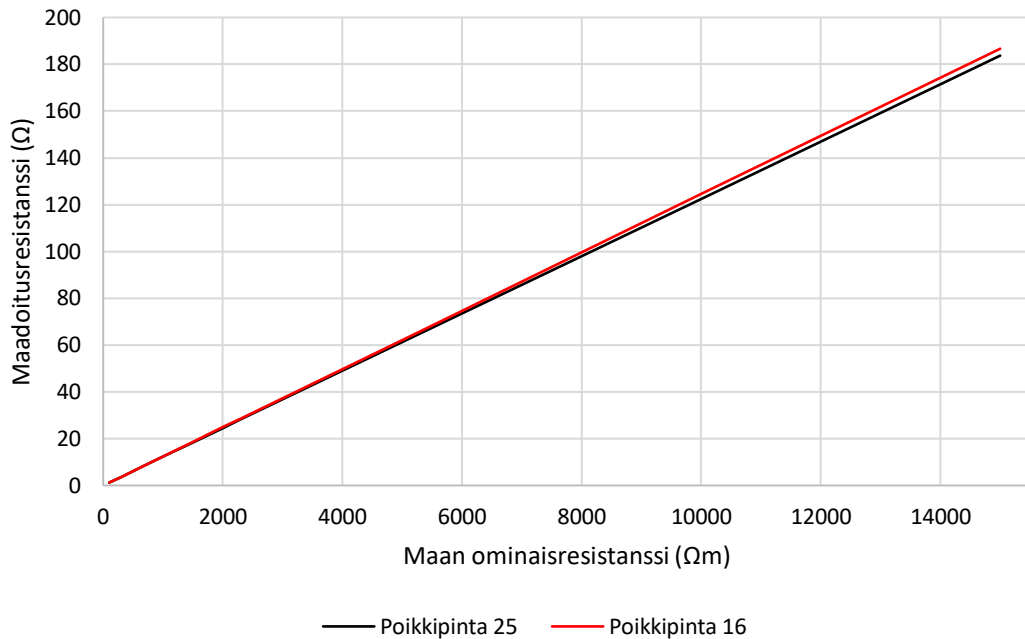
4. MAADOITUSELEKTRODIN POIKKIPINNAN KASVATUSTARVE

Suuret vikavirrat edellyttävät suurempia maadoituselektrodin poikkipintoja, jotta elektrodin terminen kesto on riittävä. Lisäksi suuremman poikkipinnan elektrodi kestää suurempia mekaanisia voimia. Tässä luvussa tarkastellaan tarvetta maadoituselektrodin poikkipinnan kasvattamiselle 16 mm²:stä 25 mm²:iin 110 kV:n pylväillä. Joillain Fingridin 110 kV:n pylväillä maadoitukset koostuvat jo 25 mm²:n poikkipintaisista johtimista. Lähtökohdiana 110 kV:n pylväiden maadoituksille on kuitenkin 16 mm² ja 400 kV:n pylvälle 25 mm² poikkipinta. Tässä työssä keskitytään suurimmaksi osaksi tarkastelemaan poikkipinnan kasvatusstarvetta 110 kV:n pylväillä. Suoritetuissa tarkasteluissa 400 kV:n pylväiden maadoitukset ovat kuitenkin useasti mukana. Näin ollen myös 400 kV:n maadoituksia tarkastellaan painopisteen kuitenkin ollessa 110 kV:n puolella.

Poikkipinnan kasvattaminen voi olla kannattavaa laskevien kustannusten näkökulmasta. Kustannuksia voi laskea pienenevä materiaaltarve, pienentyneet vauriomäärät tai elektrodin ikääntymisen hidastuminen. Vaihtoehtoisesti poikkipinnan kasvattaminen voi olla pakollista, jos terminen kesto todetaan riittämättömäksi pienemmällä 16 mm²:n elektrodilla. Työssä pyritään selvittämään poikkipinnan kasvatuksen tarve edellä mainittujen näkökulmien kautta.

4.1 Kustannushyöty

Maadoituselektrodin poikkipintaa kasvattamalla saavutetaan samalla elektrodipituudella pienempi maadoitusresistanssi eli tehokkaampi maadoitus. Toisin sanoen samaan maadoitusresistanssiin päästään lyhyemmällä elektrodilla. Jos elektrodia voidaan lyhentää riittävästi, on suuremmalla poikkipinnalla vaadittavan kuparin massa pienempi. Näin ollen myös materiaalikustannukset olisivat pienemmät oletuksella, että materiaalikustannukset muuttuvat massojen suhteessa. Alaluvussa 2.3 kuitenkin todetaan, että elektrodin poikkipinnan vaikutus maadoitusresistanssiin on pieni verrattuna elektrodin pituuden vaikutukseen. Kuvassa 12 on esitettyä 16 mm²:n ja 25 mm²:n poikkipinnoilla saavutettavat maadoitusresistanssit maan ominaisresistanssin suhteen.



Kuva 12. Maadoituselektrodin poikkipinnoilla 16 mm² ja 25 mm² saavutettavat maadoitusresistanssit 200 metrin elektrodipituudella.

Kuvan maadoitusresistanssit on laskettu kaavalla

$$R_E = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}, \quad (8)$$

joka on esitetty myös taulukossa 3. Kaavalla lasketaan upotetun vaakaelektrodin maadoitusresistanssi. Koska 0,7 metriä on Fingridin teknisessä määrittelyssä ohjeistettu asennussyvyys (Fingrid 2022b), käytetään sitä tässä työssä laskennassa elektrodin upotussyvyytenä. Yhden säteen peruspituus on Fingridin pylväsmaadoituksissa 40 metriä (Fingrid 2022b). Tästä syystä 40 metriä käytetään laskennassa minimipituutena elektrodille, pois lukien perusmaadoitus tai muut erikseen mainitut tapaukset.

Kuvasta 12 huomataan, että elektrodin poikkipinnan kasvatus pienentää maadoitusresistanssia hyvin vähän. Tarkastelussa 25 mm²:n poikkipinnalla saavutetaan 1,99 % pienempi maadoitusresistanssi elektrodipituuden ollessa 40 metriä. Koska suurin Fingridin pylväsmaadoituksissa käytetty elektrodimäärä on 4 sädettä, voidaan lisäelektrodien maksimipituutena pitää yhteensä 200 metriä huomioiden elektrodien päiden yhdistykset. Kyseisellä elektrodipituudella ero maadoitusresistanssien välillä on 1,58 %. Prosentuaaliset parannukset maadoitusresistanssissa mahdollistavat noin 1–3,5 metriä lyhyemmän maadoituselektrodin. Prosentuaalinen ero pysyy vakiona kaikilla maan ominaisresistansseilla eli jokaisella pylväällä voitaisiin käyttää noin 1–3,5 metriä vähemmän kuparijohdinta.

Finnparttian sähkötukun (2023) hinnoilla 16 mm²:n kuparijohdin on noin 63 % 25 mm²:n elektrodin hinnasta. Toisin sanoen 16 mm²:n johdin on noin 37 % edullisempi kuin 25 mm²:n johdin. Finnparttian hinnat eivät todennäköisesti vastaa todellisia materiaalikustannuksia. Johtimien prosentuaalisen hinnaneron voidaan kuitenkin olettaa olevan lähellä urakoitsijalle kohdistuvien materiaalikustannusten eroa, sillä suurin kustannus johtimessa on todennäköisesti kupari itsessään. Edellä havaittiin suuremman poikkipinnan mahdollistavan vain noin kaksi prosenttia lyhyemmän maadoituselektrodin. Johdinten prosentuaalinen hinnanero puolestaan on reilusti suurempi. Toisin sanoen suurempi poikkipinta ei voi koskaan olla kustannuksiltaan pienempi. Jos prosentuaalinen hinnanero ja elektrodien pituusero olisivat yhtä suuret, olisivat myös kustannukset yhtä suuret. Näin ollen kustannukset olisivat pienemmät, jos 25 mm²:n poikkipinta mahdollistaisi yli 37 % lyhyemmän elektrodin.

Yllä olevasta laskennasta nähdään, ettei poikkipinnan kasvatus ole kustannusten kannalta järkevää. Samaan havaintoon päädytään myös tarkasteltaessa tarvittavan kuparin määrää. Taulukossa 7 on nähtävissä 16 mm²:n ja 25 mm²:n elektrodien kuparimäärät kilogrammoissa.

Taulukko 7. Poikkipintoja 16 mm² ja 25 mm² vastaavat kuparimäärät eri elektrodipituuksilla.

Poikkipinta (mm ²)	Elektrodin pituus (m)	Kuparin massa (kg)
16	40	7,0
25	40	11,5
	25	7,2

Vaikka maadoituselektrodin hinta ei todennäköisesti määräydy puhtaasti kuparin määrästä, on sillä suuri vaikutus elektrodin hintaan. Taulukosta huomataan, että suuremmalla poikkipinnalla elektrodin tulisi olla 15 metriä lyhyempi, jotta käytetyn kuparin määrä olisi lähes yhtä suuri kuin pienemmällä poikkipinnalla. Toisin sanoen 25 mm²:n elektrodin tulisi olla noin 63 % 16 mm²:n elektrodin pituudesta eli 37 % lyhyempi. Myös muilla elektrodipituuksilla prosentuaalinen ero pysyy yhtä suurena. Aiemmin havaittiin poikkipinnan kasvatuksen mahdollistavan noin 1–3,5 metriä lyhyemmän maadoituselektrodin. Toisin sanoen kuparin määrä on todellisuudessa aina suurempi 25 mm²:n elektrodeilla samaa maadoitusresistanssia tavoiteltaessa. Lisäksi huomataan, että edellä saatu 63 % ja 37 % vastaa Finnparttia-tarkastelun hintojen prosentuaalista eroa. Tämän tarkastelun perusteella kuparimäärä vaikuttaisi siis olevan ainoa tekijä hinnanerossa. Maadoituselektrodin poikkipinnan kasvattaminen ei siis ole kustannusten näkökulmasta kannattavaa.

4.2 Terminen kesto

Kustannusten näkökulmasta poikkipinnan kasvattaminen havaittiin kannattamattomaksi. Termisen keston kannalta se voi kuitenkin olla pakollista. Standardi SFS-EN 50341-1 (2014) esittää laskukaavan, jolla voidaan laskea elektrodin vaadittava poikkipinta termisen kestävyden kannalta. Kaava on esitetty alaluvussa 2.1 kaavassa 1. Ratkaisemalla kaavasta virta I_j saadaan

$$I_j = \frac{AK}{\sqrt{\frac{t_f}{\theta_f + \beta} \ln \frac{\theta_i + \beta}{\theta_f + \beta}}}, \quad (9)$$

jossa A on maadoitusjohtimen tai -elektrodin poikkipinta, I_j johtimen virran tehollisarvo, t_f vikavirran kesto-aika, K virrallisen osan materiaalista riippuva vakio, β lämpötilassa 0 °C olevan virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo, θ_i on alkulämpötila ja θ_f on loppulämpötila. Näin ollen kaavalla voidaan tarkastella haluttujen poikkipintojen terminen kesto eri vika-ajoilla. Taulukossa 8 on esitettynä 16 mm²:n ja 25 mm²:n poikkipintojen maksimivirrat termisen keston näkökulmasta eri vika-ajoilla.

Taulukko 8. Elektrodien termiset virtakestoisuudet vika-ajoilla 0,1 s, 0,2 s, 0,5 s ja 1,0 s.

Vika-aika (s)	16 mm ² virtakestoisuus (kA)	25 mm ² virtakestoisuus (kA)
0,1	9,85	15,39
0,2	6,97	10,88
0,5	4,41	6,88
1,0	3,11	4,87

110 kV:n verkossa vika-ajat ovat johdon keskiosalla yleensä 0,2 sekuntia ja johdon päissä 0,5 sekuntia. Eri ajat johtuvat suojausvyöhykkeiden asettelusta. Kyseisiä vika-aikoja voidaan siis käyttää pylväismaadoitusten mitoittamisessa sillä ne edustavat normaalia toimintaa vikatilanteissa. Taulukossa 8 on esitettynä termiset virtakestoisuudet myös 0,1 sekunnille, joka vastaa 400 kV:n verkon vika-aikoja. Yhden sekunnin vika-aika edustaa taulukossa pikajälleenkytkentää pahimmassa tapauksessa eli kahtena 0,5 sekunnin vian poiskytkentänä. Pikajälleenkytkennässä johdin on virrattomana noin 0,7 sekuntia (Fingrid 2017). Näin ollen voidaan olettaa, ettei johdin ehdi jäähtyä virrattomana ollessaan.

Taulukosta 8 huomataan, että 16 mm²:n elektrodi kestää 0,5 sekunnin vika-ajalla 4,4 kiloampeeria. Suuremmalla poikkipinnalla elektrodi kestää noin 1,5 kertaisen virran

kaikilla taulukon vika-ajoilla. Suurimmat maasulkuvirrat tämänhetkisessä 110 kV:n verkossa ovat noin 6 kA:n luokkaa. Toisin sanoen nykyisessä verkossa maasulkuvirta voi olla suurempi kuin elektrodin terminen kesto normaaleilla vika-ajoilla. Kuitenkin tulee huomata, ettei koko maasulkuvirta virtaa maadoitusten läpi. Kuten alaluvussa 2.3 käsitellään, kulkee maadoitusten läpi reduktiokertoimella kerrottu osa maasulkuvirrasta. Tämmäkään osa virrasta ei kuitenkaan kulkeudu maahan yhden pylvään maadoitusten kautta, vaan jakautuu useammalle pylvälle ukkosjohtimien avulla. Lisäksi virta jakaantuu yksittäisellä pylvällä vähintään kahden jalan maadoituksille eli vähintään kahdelle johtimelle. Poikkeustapauksena ovat pylvää, joilla on yksi lisäsäde. Aluksi virralla on useampi virtatie, jotka kuitenkin yhtyvät säteeseen. Näin ollen suuri osa virrasta kulkee säteen läpi. Maadoitukset eivät ole eristettyjä, joten säteen läpi ei kulje täysi summavirta jalkojen läpi kulkevasta virrasta. Voidaan kuitenkin olettaa, että säteen läpi kulkee suuri osa virrasta.

Yksittäisen pylvään maadoituksen kautta kulkevan virran suuruus riippuu useasta tekijästä, kuten vierekkäisten maadoitusten resistansseista, vikavirran suuruudesta ja reduktiokertoimesta. Tarkastellaan esimerkkinä todellista 110 kV:n voimajohtoa, jolla maasulkuvirta on suurimmillaan noin 5,5 kA. Yksittäisen pylvään maadoituksen läpi kulkeva suurin virta kyseisellä johdolla on noin 2,5 kA, joka on pienempi kuin yhden sekunnin vika-aikaa vastaava terminen virtakestoisuus. Vaikka arvo jääkin termisen kestoisuuden alle, on virran suuruus suhteellisen lähellä kestävyuden raja-arvoa. Korkeaan virtaan johtaa kyseisellä johdolla vikapaikalla olevat teräsukkosjohtimet, jonka seurauksena reduktiokerroin on noin 0,9. Toisin sanoen lähes koko maasulkuvirta kulkee maadoitusten läpi. Nykyään voimajohdoille asennetaan teräsjohtimia paremmin johtavat ukkosjohtimet, minkä seurauksena myös reduktiokerroin on pienempi. Näin ollen myös maadoitusten läpi kulkeva virta on pienempi kuin teräsukkosjohtimilla varustetun johdon tapauksessa. Vaikka esimerkkitapauksessa pylvään maadoitusten läpi kulkeva virta onkin lähellä termistä kestoaa, ei se ylitä virtakestoisuuden rajaa edes teräsukkosjohtimien kanssa. Koska uusien asennusten ukkosjohtimien voidaan olettaa olevan teräsukkosjohtimia paremmin johtavia, voidaan reduktiokertoimien olettaa olevan myös pienempiä. Lisäksi huomioiden maasulkuvirran jakautumisen, ei poikkipinnan kasvatusta nähdä tarpeellisena nykyisillä maasulkuvirtojen suuruuksilla.

Historiallisesti tarkasteltuna sekä ennusteiden mukaan vikavirtatasot tulevat kuitenkin kasvamaan. Tulee siis myös tarkastella maasulkuvirtoja tulevaisuuden näkökulmasta, sillä on kannattavampaa asentaa maadoitukset suoraan suuremmalla poikkipinnalla kuin vaihtaa maadoitukset myöhemmin. VHV-ohjeessa 5 (1995) 110 kV:n verkon maasulkuvirran maksimiarvoksi annetaan 4,5 kA ja nykyverkossa vastaava arvo on noin 6 kA.

Toisin sanoen vuosittainen kasvu olisi noin 1,1 %. Vuoden 2030 ennustemallin ja nykyhetken perustilanteen massalaskennan perusteella 110 kV:n verkon maasulkuvirrat kasvaisivat noin 9 %. Näin ollen vuosittainen kasvuprosentti on noin 1,3 %. Kasvuprosenttiin tulee kuitenkin suhtautua varauksella mutta se on suuntaa antava. (Kara 2023) Historiallinen kasvuprosentti ja ennusteen mukainen kasvuprosentti ovat siis suhteellisen lähellä toisiaan. Ennusteen arvoa voidaan käyttää suuntaa antavassa tarkastelussa, sillä kasvuprosentti ei vaikuta järjettömällä verraten historialliseen kasvuun.

Vuoden 2030 ennusteeseen pohjautuen maasulkuvirrat olisivat siis suurimmillaan noin 6,5 kA. Jos maasulkuvirtojen kasvu jatkuisi lineaarisena, olisi maasulkuvirta vuonna 2050 noin 8,5 kA. Maasulkuvirtoja kuitenkin rajoitetaan 110 kV:n verkossa maadoittamalla vain tiettyjen muuntajien tähtipisteet, joten virtojen kasvua ei voida käsitellä lineaarisena. Huomioiden aiemmin mainitut seikat maasulkuvirran jakautumisesta, reduktiokeinoista sekä maasulkuvirran rajoittamisesta, ei maasulkuvirran kasvu ennusteen perusteella edellytä suurempaa elektrodin poikkipintaa yleisesti. Poikkeustapauksena voidaan kuitenkin pitää pylviäitä, joilla on yksi säteittäinen maadoituselektrodi. Jos pylvällä on pieni maadoitusresistanssi verrattuna voimajohdon viereisiin pylväisiin, kulkee vian aikana pienen maadoitusresistanssin kautta suuri virta. Tämä voi johtaa tilanteeseen, jossa yhden maadoitussäteen kautta kulkee termistä kestoja suurempi virta. Toimenpiteet tämän tilanteen estämiseen esitellään alaluvussa 6.2.

4.3 Maadoitusten ikääntyminen

Tämän tarkastelun tavoitteena on selvittää maadoitusresistanssin muutokset käyttöiän aikana ja tarkastella onko muutoksilla yhteyttä elektrodin poikkipintaan. Fingrid suorittaa jokaiselle voimajohdolle maadoitusmittaukset 12 vuoden välein. Ensimmäisestä mittauksesta käytetään termiä kontrollimittaus. Mittaukseen valitaan pylvääit, joilla on potentiaalintasausrenkaat, erotinasemalta viisi lähintä pylvästä molempiin suuntiin sekä 10 % kaikista muista voimajohdon pylväistä. Kymmenen prosentin osuuteen valitaan pylvääit, joiden lähellä ihmiset voivat oleskella pitkiä aikoja tai lyhyitä aikoja useasti. Myöhempiä mittauksia kutsutaan jälkimittauksiksi. Mittaukseen valitaan pylvääit, joiden lähistöllä on rakenteita tai ihmiset oleskelevat pylvään ympäristössä. Lisäksi mitataan viisi erotinasemaa lähimpänä olevaa pylvästä molempiin suuntiin. (Jalonen 2023b)

Tämän alaluvun tarkastelussa verrataan kolmea eri mittaustulosta eli ensimmäisen ja viimeisen mittauksen välissä on 24 vuotta. Mukana tarkastelussa ovat kaikki pylvääit, joilta löytyy kolme mittaustulosta. Tarkastelusta jätettiin pois pylvääit, joiden mittaustulokset arvioitiin epäluotettaviksi. Kyseiset arvot johtuvat todennäköisesti kirjaus-, lasku- tai mittausrvirheestä, esimerkiksi mittaussiiriin on jäänyt mukaan ukkosjohtimet. Lisäksi

huomioimatta jätettiin yli 1000 %:n muutokset maadoitusresistanssissa, sillä ne johtuvat todennäköisesti tuhoutuneista tai katkenneista maadoituksista. Maadoitusresistanssin muutokset saadaan kaavalla

$$M = \frac{m_n - m_{n-x}}{m_{n-x}} * 100 \% , \quad (10)$$

jossa M on maadoitusresistanssin muutosprosentti, m_n maadoitusmittauksen tulos ja m_{n-x} on aikaisemman maadoitusmittauksen tulos x :n ollessa 1 tai 2. Esimerkiksi kolmannen ja toisen mittauksen välistä muutosta laskiessa n on 3 ja x on 1. Jos x olisi 2 ja n olisi 3, saataisiin kolmannen ja ensimmäisen mittauksen välinen muutos. Kaavalla resistanssin muutos suhteutetaan aina aikaisempaan mittaustulokseen. Kaavalla laskettaessa negatiiviset muutokset tarkoittavat maadoitusresistanssin pienentymistä ja positiiviset kasvua.

Tarkastelun mukaan 110 kV:n pylväillä maadoitusresistanssi kasvaa keskimäärin noin 37 % ensimmäisen ja viimeisen mittauksen välillä. 400 kV:n maadoituksilla vastaava kasvu on noin 21 %. Tarkastelussa oli mukana maadoituksia, joilta löytyy vähintään kolme mittaustulosta ja otanta pidettiin samana tarkastelun ajan. Maadoitusresistanssien muutoksien keskiarvot mittausten välillä esitetään taulukossa 9.

Taulukko 9. Maadoitusresistanssien keskimääräiset muutokset eri mittausten välillä.

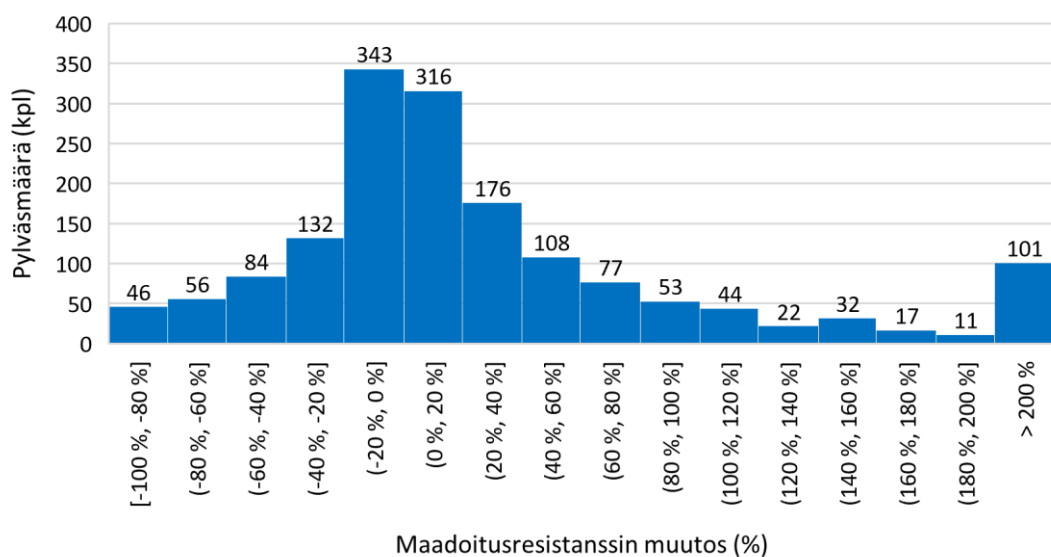
	3. mittaus - 2. mittaus	2. mittaus - 1. mittaus	3. mittaus - 1. mittaus
110 kV	26 %	16 %	37 %
400 kV	10 %	19 %	21 %

Taulukosta huomataan, että 110 kV:n pylväillä maadoitusresistanssi kasvaa ensimmäisen ja toisen mittauksen välissä noin 16 % sekä toisen ja kolmannen mittauksen välissä noin 26 %. Kasvujen tuloksi saadaan 46 %, joka ei vastaa ensimmäisen ja kolmannen mittauksen välistä muutosta 37 %. Kasvujen tulo ja kolmannen sekä ensimmäisen mittauksen muutoksen ei välttämättä tulekaan vastata toisiaan, sillä tarkastelussa käytetään prosentuaalisten muutosten keskiarvoja. Tämä voidaan havainnollistaa yksinkertaisesti, esimerkiksi kertomalla luku viisi kahdella eri muutosprosentilla. Kerrotaan viisi ensin 0,5, mistä saadaan 2,5. Kerrotaan 2,5 edelleen 1,5, mistä saadaan tulokseksi 3,75. Käytettyjen muutosprosenttien -50 % ja 50 % keskiarvo on 0 %. Näin ollen myös kokonaismuutosprosentti olisi 0 % keskiarvojen perusteella. Kuitenkin kertomalla 0,5 ja 1,5 toisillaan saadaan 0,75 eli kokonaismuutokseksi -25 %. Toisin sanoen keskiarvoihin perustuva kokonaismuutosprosentti ei välttämättä vastaa todellista kokonaismuutosprosenttia. Näin ollen myöskään taulukon 9 kolmannen ja toisen sekä toisen ja ensimmäisen

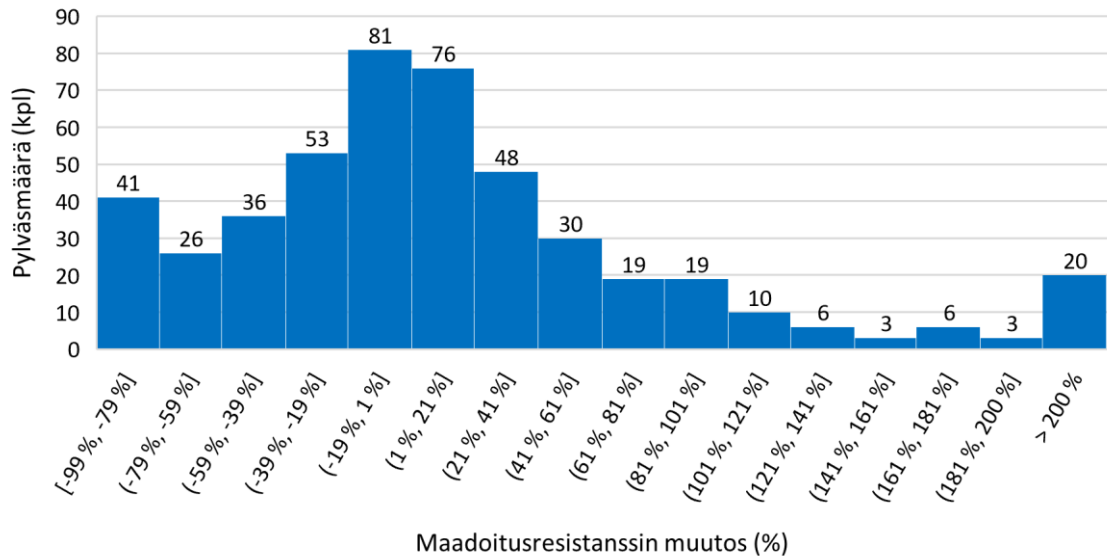
mittauksen muutosprosenttien keskiarvoista ei voida laskea kokonaismuutosprosenttia. Lisäksi tarkastelun aineistosta tarkastettiin, että kolmannen ja ensimmäisen mittauksen muutosprosentti vastaa toisen ja ensimmäisen sekä kolmannen ja toisen mittauksen muutosprosenttien tuloa. Toisin sanoen tarkastettiin, että jokaisella pylväällä kokonaismuutosprosentti syntyy kaikkien muutosprosenttien tulona.

Taulukon 9 arvojen perusteella 110 kV:n pylväillä maadoitusresistanssien kasvu kiihtyisi. 400 kV:n pylväiden maadoituksissa maadoitusresistanssien kasvu puolestaan näyttäisi hidastuvan. Koska otanta pysyi samana tarkastelun ajan, ei otannan muutos selitä maadoitusresistanssin muutoksen kiihtymistä tai hidastumista. Kiihtyvän muutoksen lisäksi kolmannen ja ensimmäisen mittauksen välinen muutosprosentti on 110 kV:lla 16 % suurempi kuin 400 kV:lla. Näin ollen tarkastelun perusteella siirtyminen 16 mm²:stä 25 mm²:iin olisi kannattavaa. Tarkastelu on kuitenkin hyvin pintapuolinen. Tuloksiin voi myös vaikuttaa muutokset mittaussuunnissa tai maaperän kosteuden muutokset. Lisäksi keskiarvoissa ääritapaukset voivat vaikuttaa tuloksiin, vaikka yli 1000 % muutokset onkin poistettu tarkastelusta. Näin ollen tarkastelun perusteella ei voida luoda realistisia johtopäätöksiä maadoitusresistanssien muutoksista eri maadoituselektrodin poikkipinnoilla. Luotettavat johtopäätökset vaatisivat fyysisten maadoituselektrodien tutkimista ja muutujien vähentämistä. Esimerkiksi maaperän kosteuden vaikutus tulisi huomioida, sillä kosteuden muutos saattaa aiheuttaa tuloksen, jossa maadoitusresistanssin kasvu vaikuttaisi kiihtyvän.

Kuvissa 13 ja 14 esitetään histogrammit 110 kV:n sekä 400 kV:n pylväiden maadoitusresistanssien muutoksista ensimmäisen ja kolmannen mittauksen välillä.



Kuva 13. Ensimmäisen ja kolmannen mittauksen välinen muutos 110 kV:n maadoitusresistanssissa.



Kuva 14. Ensimmäisen ja kolmannen mittauksen välinen muutos 400 kV:n maadoitusresistanssissa.

Histogrammeista huomataan, että suurimmat keskittymät ovat $\pm 20\%$ nollan eli muuttumattoman maadoitusresistanssin ympärillä. Lisäksi kuvista huomataan, että myös negatiivisen muutoksen puolella on useita maadoituksia. Toisin sanoen mittausten perusteella maadoitusten maadoitusresistanssi olisi pienentynyt useilla maadoituksilla. Maadoitusten parantuminen itsestään vuosien saatossa ei kuitenkaan ole realistista. Maadoitusten asentamisen jälkeen maaperällä kestää korkeintaan muutama vuosi asettua, jonka aikana maadoitusresistanssissa voi tapahtua muutoksia. Osa tarkastelun mittauksista on kontrollimittauksia, jotka suoritetaan maadoitusten asentamisen jälkeen. Näin ollen maaperän asettuminen on voinut vielä vaikuttaa joihinkin mittaustuloksiin. Itsestään parantuneita maadoituksia on kuitenkin sekä 12 että 24 vuoden resistanssimuutoksissa, joten maaperän asettuminen ei selitä kaikkia tapauksia.

Mittaushetken maaperän kosteutta ei huomioida tuloksissa, joten kosteuden vaihtelun voivat vaikuttaa suunnitellun ja mitatun maadoitusresistanssin eroon. Näin ollen myös itsestään parantuneet maadoitukset vaikuttaisivat loogisemmilta, sillä mittaushetkellä maaperä on voinut olla kosteampi kuin alkuperäisenä mittaushetkenä. Toisin sanoen maadoitusresistanssi olisi pienempi. Myös päinvastainen tilanne on mahdollinen, joka selittäisi kasvaneita maadoitusresistansseja. Kosteuden vaihtelut ovat yksi mahdollinen selitys nollan molemmiin puolin oleville muutosprosentteille. Toinen mahdollinen syy suunnitellun ja mitatun resistanssin erolle voi olla mittaussuunta. Maaperä ei yleensä ole homogeenistä, jolloin muutokset mittaussuunnassa voivat vaikuttaa maan ominaisresistanssin arvoon suurestikin. Uusissa asennuksissa maan ominaisresistanssi mitataan yleensä vain pylvään toiselta puolelta. Näin ollen maadoitukset voivat sijaita pylvään

puolella, josta ominaisresistanssia ei ole mitattu. Yleensä mittaukset pyritään suorittamaan niin, että maadoitukset sijoitettaisiin samalle puolelle. On kuitenkin mahdollista, että näin ei ole. Näin ollen mitattu maan ominaisresistanssi ei välttämättä kuvaa maaperää, jossa maadoitukset sijaitsevat kovin tarkasti. Myös myöhempien mittaustulosten eroa voi myös selittää pienetkin erot mittaussuunnissa.

Maan ominaisresistanssia ei mitata maadoitusmittausten yhteydessä, joten maadoitusresistansseja ei voida suhteuttaa maan ominaisresistanssiin. Maaperän ominaisresistanssin muutokset selittävät todennäköisesti osan maadoitusresistanssien muutoksista mittausten välillä. Histogrammista kuitenkin huomataan, että yli 100 % kasvaneiden resistanssien maadoituksia on molemmilla jännitetasoilla vähemmän kuin ± 20 %:n alueella. Kyseiset suuret resistanssin muutokset kuitenkin kasvattavat keskiarvoa sillä ne ovat lukuarvoiltaan suhteellisesti suuria. Histogrammin perusteella voidaan todeta, ettei tilanne todellisuudessa ole yhtä huono kuin keskiarvot antavat ymmärtää. Edellä on mainittu mahdollisia syitä suunniteltujen ja mitattujen maadoitusresistanssien eroille ja muutoksille. Työn puitteissa varmoja syitä on kuitenkin vaikea varmistaa. Esimerkiksi maaperän kosteuden muutoksia ei ole kirjattu mittaushetkeltä, joten sen vaikutuksen varmistaminen on erittäin vaikeaa. Mittaustulosten sitomista maaperän kosteuteen ja sen vaikutuksia voi olla perusteltua tutkia laajemmin muissa tutkimuksissa. Epävarmuuden suuruuden puitteissa ei tarkastelun tuloksia ole myöskään järkevää hyödyntää muussa maadoitussuunnittelussa. Jos tulokset ja syy-seuraussuhteet olisivat luotettavimpia, voitaisiin esimerkiksi tavoitearvoa säätää suuremmaksi tai pienemmäksi.

4.4 Maadoitusvauriot

Edellä tarkastellaan maadoitusten resistanssin muutosta vuosien aikana ja mahdollista yhteyttä kuparin poikkipintaan. Edellä otannasta jätettiin pois suuret maadoitusresistanssin muutokset, jolla pyrittiin olemaan huomioimatta katkenneita ja tuhoutuneita elektrodeja. Kun maadoituselektrodi katkeaa tai tuhoutuu, kasvaa maadoitusresistanssi luonnollisesti. Katkeamisen voi aiheuttaa esimerkiksi roudan aikaansaama maaperän liike. Maadoituselektrodi voi myös katketa tai tuhoutua, jos elektrodin läpi virtaa liian suuri virta. Myös esimerkiksi työkoneilla tehtävät kaivuutyöt voivat katkoa tai tuhota maadoituksia. Fingridin pylväille tehdään maastotarkastuksia, joissa mahdolliset viat kirjataan ylös kuntotietoihin. Lisäksi pylväille tehdään jo aiemmassa alaluvussa mainittuja maadoitusmittauksia. Maastotarkastuksissa havainnot pohjautuvat tarkastajan visuaalisesti ja muin aistein tekemiin havaintoihin. Maadoitusmittauksissa puolestaan tarkastellaan maadoituksia tarpeen ja mahdollisuuksien mukaan tutkaamalla. Toisin sanoen vain

maadoitusmittausten sekä tutkimuksen avulla pystytään havainnoimaan maadoitusvauriot, jotka sijaitsevat maan alla.

Tässä työssä maadoitusvaurioita tarkastellaan kuntotietojen pohjalta. Maadoitusvaurioita on kuntotiedoissa monia erilaisia, mutta niistä huomioidaan vain katkenneet ja tuhoutuneet maadoitukset. Tarkastelussa pyritään huomioimaan vain normaalitilanteen mukaiset maadoitusvauriot, joihin elektrodin poikkipinta voisi vaikuttaa. Toisin sanoen varkauksiin, kaivuutyöhön tai kaapelikenkiin liittyvät tapaukset on jätetty huomioimatta. Kuntotietojen kuvaukset ovat kuitenkin välillä monitulkintaisia, joten myös otantaan kuulumattomia tapauksia on varmasti mukana tarkastelussa. Taulukossa 10 on esitettyä tunnuslukuja maadoitusvaurioista.

Taulukko 10. Maadoitusvaurioiden tunnusluvut.

	110 kV	400 kV
Pylväsmäärä	22178	14749
Maadoitusmitatut pylväät	12480	4693
Tarkastuksella havaitut vauriot	2400	920
Mittauksella havaitut vauriot	567	187
Vauriot suhteessa pylväisiin	11 %	6 %
Vauriot suhteessa mitattuihin	5 %	4 %

Taulukossa tarkastuksella havaitut vauriot tarkoittavat maastotarkastuksella havaittuja maadoitusvaurioita ja mittauksella havaitut tarkoittavat maadoitusmittauksella havaittuja vaurioita. Maastotarkastuksilla havaittujen maadoitusvaurioiden määrä on suhteutettuna pylväsmäärään, jolle maastotarkastukset on suoritettu. Maadoitusmittauksilla tehdyt havainnot maadoitusvaurioista puolestaan on suhteutettu pylväsmäärään, jolle maadoitusmittaukset on suoritettu. Mainittavaa on, että maadoitusmittauksilla havaitut maadoitusvauriot sisältyvät myös maastotarkastus havaintomäärään. Maadoitusmittauksilla havaittujen kuntotietojen kuvaukset on käyty yksitellen läpi, jotta varmistutaan otannan oikeellisuudesta. Maastotarkastuksiin perustuvat kuntotiedot puolestaan on karsittu sanapohjaisten suodatusten avulla, jolloin otantaan on todennäköisesti jäänyt enemmän sinne kuulumattomia havaintoja. Sanapohjaisella suodatuksella tarkoitetaan Excelissä tehtyä suodatusta, joka poistaa rivit, joilla mainitaan esimerkiksi varkaus. Myös maadoitusmittauksella havaittujen vaurioiden otannassa on todennäköisesti ylimääräisiä havaintoja joidenkin kuntotietojen kuvausten epämääräisyyksien takia. Kuntotietojen kuvausten osittainen monitulkintaisuus ja epämääräisyys sekä otantojen karsintamuodot seilittävät osin taulukon 10 prosentuaalisten tulosten eroavaisuuksia.

Taulukosta 10 huomataan, että maadoitusmittauksiin perustuvan tarkastelun mukaan 110 kV:n maadoituksilla maadoitusvaurioita on noin 5 %:lla mitatuista maadoituksista. 400 kV:lla eli 25 mm²:n maadoituselektrodin poikkipinnalla maadoitusvaurioita puolestaan on noin 4 % mitatuista maadoituksista. Ero maadoitusvaurioiden prosentuaalisessa määrässä on siis vain 1 %. Maastotarkastuksiin perustuvan tarkastelun mukaan 110 kV:lla maadoitusvaurioita olisi kuitenkin 5 % enemmän. Viisi prosenttia kaikista 110 kV:n pylväistä tarkoittaa noin 1100 pylvästä. Näin ollen maastotarkastuksiin pohjautuvan arvon mukaan suuremmalla elektrodin poikkipinnalla voitaisiin ehkäistä noin 1100 pylvään maadoitusten katkeaminen tai tuhoutuminen. Maastotarkastuksiin pohjautuvassa tarkastelussa virhemarginaali on kuitenkin suurempi otannan muodostamistavan takia verrattuna maadoitusmittaustarkasteluun. Lisäksi maastotarkastuksissa ei pystytä havaitsemaan maanalaisia maadoitusvaurioita yhtä hyvin kuin maadoitusmittauksissa. Näin ollen voidaan todeta, että maadoitusmittauksiin pohjautuva tarkastelu kuvaa maadoitusvaurioiden määrää tarkemmin. Koska maadoitusmittausten otannat ovat suhteellisen suuret, voidaan maadoitusvaurioiden prosentuaalisten suuruuksien olettaa kuvaavan osuutta kaikista maadoituksista.

Ottaen huomioon myös aiemmat elektrodin poikkipintaa käsittelevät alaluvut, ei poikkipinnan kasvattamiselle ole perusteita. Tarkasteluissa on kuitenkin suhteellisen paljon epävarmuustekijöitä. Tarkempien tulosten ja syysseuraussuhteiden löytämiseksi olisi perusteltua suorittaa laajempi tarkastelu aiheesta. Laajemmassa tarkastelussa voisi olla perusteltua tutkia konkreettisesti esimerkiksi maadoitusten ikääntymistä. Toisin sanoen tulisi vanhoja maadoituksia kaivaa ylös maaperästä.

5. UKKOSHÄIRIÖHERKKYYS

Käyttövarmuus on yksi maadoitus suunnittelun näkökulmista. Käyttövarmuuteen vaikuttavat monet asiat, joista yksi on ukkoshäiriöherkkyys. Maadoitukset pienentävät ukkoshäiriöherkkyttä laskemalla takaiskun todennäköisyyttä. Alaluvussa 3.2 ukkoshäiriönäkökulma valittiin uuden tavoitearvojärjestelmän lähestymistavaksi. Tässä luvussa ukkoshäiriötiheyttä tarkastellaan nykyverkon avulla sekä takaiskutiheyden kannalta teoreettisesti.

Nykyverkon ukkoshäiriötiheyden tarkastelulla pyritään löytämään yhteys salamoiden aiheuttamien maasulkujen sekä maadoitusresistanssin välille. Maadoitusresistanssi ei suoraan ole syöksyaallon kannalta yhtä relevantti kuin esimerkiksi impulssi-impedanssi. Maadoitusresistanssilla ja impulssi-impedanssilla on kuitenkin suora yhteys, joten maadoitusresistanssia voidaan käyttää myös ukkoshäiriötarkasteluissa. Lisäksi maadoitusresistanssi on helpommin ymmärrettävissä ja mitattavissa käytännön näkökulmasta.

Nykyverkon tarkastelun lisäksi alaluvussa 5.2 tarkastellaan takaiskutiheyttä teoreettisesti. Tavoite molemmilla alaluvuilla 5.1 ja 5.2 on kuitenkin sama, löytää yhteys ukkoshäiriöherkkyden sekä maadoitusresistanssin välillä. Tätä yhteyttä pyritään edelleen hyödyntämään uuden tavoitearvojärjestelmän luonnissa.

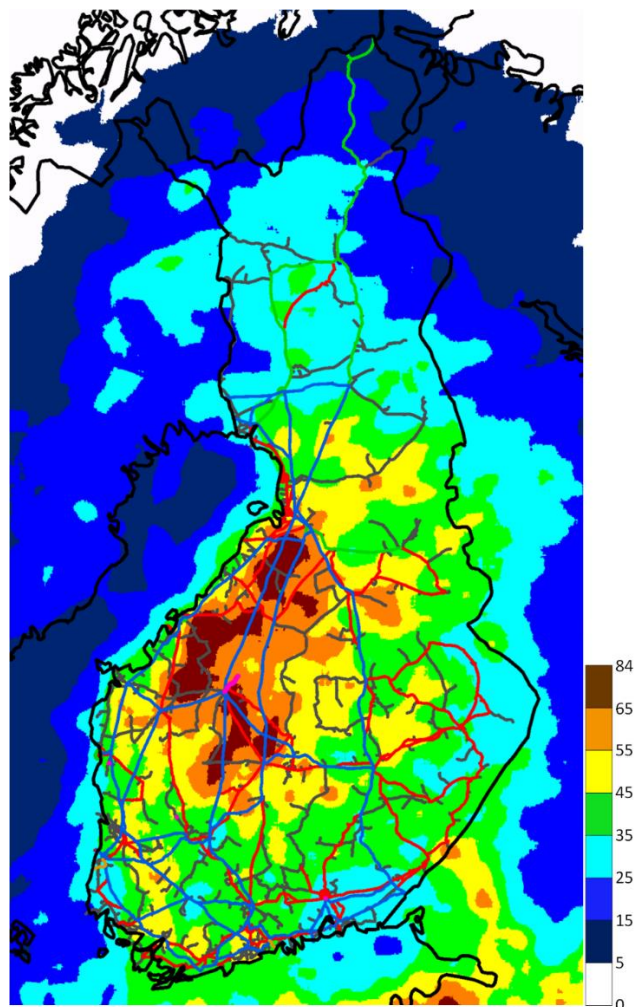
5.1 Nykyverkon ukkoshäiriöherkkyystarkastelu

Tässä alaluvussa tarkastellaan salamaniskujen aiheuttamien maasulkujen määriä Fingridin nykyisillä voimajohdoilla. Maasulku voi teoriassa levitä oikosuluksi mutta näiden tapauksen osuus on merkitsemättömän pieni siirtoverkossa. Tästä syystä pelkästään maasulkuja tarkastellaan. Tämän alaluvun tarkastelussa maasulkuihin kuuluvat takaiskun aiheuttamat maasulut sekä maasulut, jotka aiheutuvat salamaniskusta vaihejohtimeen. Alaluvun 5.2 tarkastelussa puolestaan käsitellään ukkoshäiriöherkkyttä pelkästään takaiskujen kannalta.

Tarkastelu ukkoshäiriöherkkydestä koostuu 36 voimajohdosta, joista 19 ovat käyttöjännitteeltään 400 kV:n johtoja ja loput 17 ovat 110 kV:n voimajohtoja. Kaksi 110 kV:n voimajohdoista on kuitenkin entisiä 220 kV:n johtoja eli rakenteellisesti ne on suunniteltu 220 kV:lle. Tarkastelun voimajohtoja valittaessa pyrittiin valitsemaan johtoja erilaisista salamaolosuhteista. Samalla valitut voimajohdot sijoittuvat myös osittain eri sijainteihin Suomessa. Tarkasteluun on valittu myös voimajohtoja, joiden rinnalla kulkee vähintään yksi toinen voimajohto. Näin pystytään tarkastelemaan rinnakkaisen voimajohdon

mahdollista vaikutusta ukkoshäiriötiheyteen. Lisäksi tarkastelussa on voimajohtoja, jotka koostuvat yhteispylväistä, joissa 400 kV:n virtapiiri kulkee 110 kV:n virtapiirin yläpuolella. Kyseiset johdot on pyritty valitsemaan niin, että suurin osa pylväistä olisi edellä mainitun kaltaisia. Näiden voimajohtojen avulla pyritään tarkastelemaan yhteispylväiden vaikutusta ukkoshäiriötiheyteen.

Jotta maadoitusresistanssien sekä ukkoshäiriötiheyksien määrää voidaan verrata, täytyy ukkoshäiriöt ensin suhteuttaa johdon salamatiheyteen. Suhteuttamista varten tarvitaan riittävän kattava tilasto maasalamiheyksistä Suomessa. Tässä työssä hyödynnetään Ilmatieteen laitokselta saatua rasterimuotoista aineistoa, joka kattaa Suomen sekä ympäröivien alueiden maasalamiheydet vuosina 2002–2021. Salamahavainnoista ja salamapaikannuksesta, johon aineisto perustuu, on kerrottu tarkemmin Mäkelä et al. (2014) tutkimuksessa. Rasteriaineiston käytössä hyödynnetään ArcMap-sovellusta ja sen työkaluja. Kuvassa 15 esitetään vuosittainen keskimääräinen maasalamiheys sataa neliökilometriä kohden vuosina 2002–2021.



Kuva 15. Keskimääräinen vuosittainen maasalamiheys sataa neliökilometriä kohden.

Kuvassa esitetään myös Fingridin sähköverkko eli kantaverkko. Kuvan oikeassa alareunassa olevasta selitteestä nähdään salamatiheysvälejä edustavat värit. Esimerkiksi vihreä edustaa 35–45 maasalamaa vuodessa sataa neliökilometriä kohden. Kuten kuvasta huomataan, suurimmat salamatiheydet sijaitsevat Pohjanmaan alueella. Suurin yksittäinen salamatiheysalue sijaitsee Haapaveden ja Oulaisten välissä. Aluetta ei kuitenkaan erota kuvan kartasta salamatiheysvälien laajuuden takia. Kuvasta kuitenkin huomataan, että Fingridin voimajohtoja sijaitsee myös Suomen salamatiheillä alueilla. Osa näistä voimajohtoista on mukana tarkastelussa.

Kuvassa esitetyt keskimääräiset salamatiheydet eivät kuvaa voimajohtoihin iskevien salamoiden määrää suoraan. Voimajohtoon osuvien salamoiden määrä saadaan laskettua kaavalla

$$N_L = \frac{GFD}{10} (28h_t^{0,6} + b), \quad (11)$$

jossa N_L on vuosittaiset salamaniskut voimajohtoon 100 kilometriä kohden, GFD on keskimääräinen vuosittainen maasalamatiheys neliökilometriä kohden, h_t on ukkosjohtimen korkeus maanpinnasta pylvään kohdalla ja b on vaakatasoinen etäisyys ukkosjohtimien välillä. (Eriksson 1987) Voimajohtojen sijainneissa vallitseva salamatiheys saadaan Arc-Map-sovelluksen Zonal Statistics -työkalulla. Ukkoshäiriötarkastelua varten maasalamatihyksistä käytetään koko voimajohdon keskiarvoa sen sijaan, että voimajohto jaettaisiin alueisiin salamatiheyden perusteella. Näistä maasalamatihyden eli GFD :n arvoista lasketaan kaavalla 11 johtokohtaiset keskiarvot vuosittaisista johtoon osuvista salamoista sataa kilometriä kohden. Kaavan 11 muuttujien h_t ja b arvoina käytetään kunkin voimajohdon kaikkien pylväiden parametrien keskiarvoja. Johtoon osuvat keskimääräiset salamamäärät esitellään myöhemmin taulukoissa 11 ja 12.

Tarkastelua varten voimajohdolle selvitetään maadoitusresistanssin keskiarvo kolmella eri tavalla. Eri keskiarvot ovat suunnitellun maadoitusresistanssin, viimeisimmän mitatun maadoitusresistanssin sekä Vaarajännite-sovelluksesta saadun maadoitusresistanssin keskiarvo. Suunniteltu maadoitusresistanssi tarkoittaa nimensä mukaisesti maadoitusresistanssin arvoa, joka maadoituksilla pyritään saavuttamaan. Viimeisin mitattu maadoitusresistanssi puolestaan tarkoittaa viimeisimmän maadoitusmittauksen arvoa. Vaarajännite-sovellus on osa Maximo-ohjelmistossa ja se käyttää maadoitusresistanssista ensisijaisesti mitattua arvoa. Jos mitattua resistanssia ei ole, käyttää sovellus suunnitelluarvoa. Viimeisenä mainittua tapaa voidaan pitää realistisimpana kuvauksena maadoitusresistanssille. Tarkastelu ukkoshäiriötiheyden ja maadoitusresistanssin yhteydestä suoritettiin kaikilla kolmella tavalla, mutta vain viimeisenä mainittu esitetään myöhemmin taulukoissa 11 ja 12. Muita ei esitetä taulukossa, sillä niistä ei tarkastelussa ollut

nähtävissä eriäviä havaintoja. Tarkastelussa ne kuitenkin olivat mukana mahdollisten eriävien havaintojen takia. Lisäksi viimeisenä mainittu kuvaa parhaiten todellista maadoitusresistanssia. Maadoitusresistanssien keskiarvon lisäksi ukkoshäiriötiheyden yhteyttä tarkastellaan ekvivalenttiseen impedanssiin Z_E , joka on esitelty tarkemmin aluvuossa 2.3. Maadoitusresistanssien sekä ekvivalenttisten impedanssien voimajohtokohdaiset keskiarvot esitetään muiden muuttujien kanssa taulukoissa 11 ja 12.

Tarkasteluun valitut voimajohtot ovat eripituisia, joten johdoilla tapahtuneet maasulut suhteutetaan sataa kilometriä kohden, jotta arvot ovat vertailukelpoisia. Maasulkujen määrä saadaan suhteutettua maasalamioiden määrään kaavalla

$$S = \frac{N_L}{MS_{100}}, \quad (12)$$

jossa S on maasulkuun vaadittavien salamoiden määrä, MS_{100} on vuosittainen maasulkumäärä sataa kilometriä kohden ja N_L on vuosittaiset salamaniskut voimajohtoon sataa kilometriä kohden. Toisin sanoen kaavalla voidaan laskea, kuinka monta salamaniskua voimajohtoon keskimäärin tarvitaan yhtä maasulkua varten. Vuosittaiset ukkosen aiheuttamat maasulut on laskettu vuosien 1998–2021 ajalta. Jos voimajohtoon käyttöönotto on tapahtunut vuoden 1998 jälkeen, on MS_{100} laskettu huomioiden käyttövuodet. Taulukoissa 11 ja 12 on koottuna tarkastelun kannalta oleellisia muuttujia.

Taulukko 11. Tarkastelussa käytetyt 400 kV:n verkon muuttujat.

Voimajohto	MS_{100}	GFD	N_L	S	$R_v (\Omega)$	$Z_E (\Omega)$
Johto 1 ^a	0,19	0,38	9,2	48,0	60,5	1,16
Johto 2	0,28	0,62	14,0	50,1	41,0	1,08
Johto 3	0,21	0,47	11,2	53,0	36,2	1,00
Johto 4	0,24	0,59	13,0	54,2	77,2	1,18
Johto 5 ^b	0,20	0,50	12,6	62,0	47,3	0,78
Johto 6	0,15	0,46	11,0	71,8	68,1	1,19
Johto 7 ^a	0,06	0,37	9,0	142,4	66,9	0,86
Johto 8 ^a	0,07	0,64	14,3	192,8	69,6	0,93
Johto 9 ^a	0,03	0,64	14,2	420,8	61,6	0,97
Johto 10 ^{ac}	0,00	0,39	9,3	-	75,4	1,17
Johto 11 ^a	0,00	0,47	11,6	-	22,7	0,61
Johto 12 ^a	0,00	0,35	8,7	-	108,8	0,96
Johto 13 ^b	0,00	0,42	10,4	-	77,8	0,71
Johto 14 ^c	0,00	0,43	10,9	-	107,1	0,93
Johto 15 ^b	0,00	0,38	10,0	-	39,1	0,71
Johto 16 ^b	0,00	0,45	11,7	-	52,5	0,51
Johto 17 ^b	0,00	0,50	12,4	-	57,8	0,61
Johto 18 ^c	0,00	0,42	10,4	-	73,0	1,02
Johto 19 ^c	0,00	0,56	13,8	-	27,4	0,79

Taulukko 12. Tarkastelussa käytetyt 110 kV:n verkon muuttujat.

Voimajohto	MS_{100}	GFD	N_L	S	$R_v (\Omega)$	$Z_E (\Omega)$
Johto 20	1,37	0,34	5,6	4,1	78,6	1,85
Johto 21	1,13	0,41	6,6	5,9	50,3	1,81
Johto 22 ^b	1,08	0,40	9,8	9,1	90,6	0,75
Johto 23 ^c	1,08	0,47	10,2	9,4	183,8	1,47
Johto 24	1,01	0,61	9,9	9,8	76,1	1,51
Johto 25 ^b	1,13	0,49	12,6	11,2	24,3	0,90
Johto 26	0,57	0,41	6,7	11,8	88,1	1,42
Johto 27 ^c	0,95	0,47	11,5	12,0	158,4	1,02
Johto 28	0,65	0,64	10,1	15,4	113,2	1,36
Johto 29 ^a	0,31	0,34	5,4	17,1	277,7	1,00
Johto 30 ^b	0,25	0,43	11,2	44,4	47,4	0,52
Johto 31 ^a	0,16	0,47	7,8	47,5	104,1	0,63
Johto 32 ^d	0,21	0,64	12,9	61,2	70,4	1,65
Johto 33 ^d	0,14	0,55	9,3	65,3	36,2	1,54
Johto 34 ^b	0,15	0,50	12,1	79,0	90,1	0,63
Johto 35 ^b	0,00	0,38	10,1	-	43,3	0,73
Johto 36 ^b	0,00	0,46	9,9	-	107,3	0,92

Taulukoissa MS_{100} tarkoittaa vuosittaista maasulkumäärää sataa kilometriä kohden, GFD vuosittaista maasalamihiheyttä neliökilometriä kohden, N_L vuosittaisia salamaniskuja voimajohtoon sataa kilometriä kohden, S maasulkuun vaadittavien salamoiden määrä, R_v Vaarajännite-sovelluksesta saatujen maadoitusresistanssien keskiarvoa ja Z_E ekvivalenttien maadoitusimpedanssien keskiarvoa. Taulukoissa voimajohdot on järjestetty S -sarakkeen mukaan pienimmästä suurimpaan. Toisin sanoen ylimpänä on voimajohto, jolla maasulkuun vaaditaan pienin määrä salamaniskuja. Voimajohdoilla 10–19 sekä 35–36 ei ole tapahtunut yhtään maasulkua vuosien 1998–2021 tai johdon käyttöönoton ja vuoden 2021 välillä.

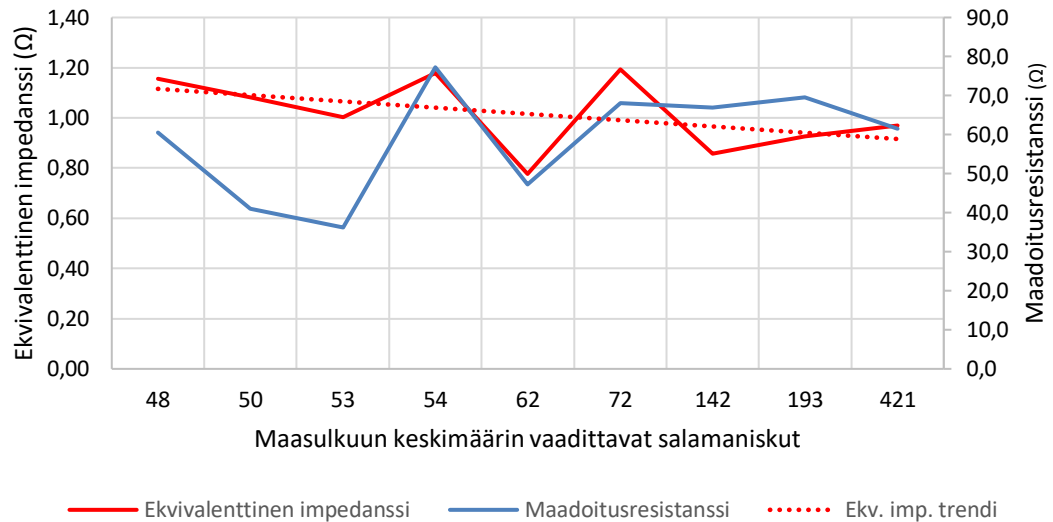
Yläindeksi a tarkoittaa taulukoissa, että kyseisen voimajohdon rinnalla kulkee suuren osan johtopituudesta toinen voimajohto. Yläindeksi b tarkoittaa, että voimajohto kulkee lähes kokonaan tai suuren osan matkasta yhteispylväissä. Yläindeksi c tarkoittaa, että voimajohto kulkee osan matkasta yhteispylväissä ja yläindeksillä d merkityt voimajohdot ovat entisiä 220 kV:n voimajohtoja. Taulukosta 12 huomataan, että b yläindeksilliset voimajohdot ovat hajautuneet eri kohtiin taulukkoa. Kolme voimajohtoa on alimpana mutta samalla kaksi johtoa on korkealla taulukossa. Toisin sanoen yhteispylväillä ei näyttäisi olevan suoraa vaikutusta ukkoshäiriöherkkyyden kasvuun 110 kV:n voimajohdoilla. Taulukosta 11 sen sijaan huomataan, että yhteispylväissä kulkevilla 400 kV:n johdoilla ukkoson aiheuttamia maasulkuja on suhteessa vähän tai ei ollenkaan. Näin ollen voitaisiin olettaa, että 110 kV:n virtapiiri suojaa 400 kV:n virtapiiriä ukkoson aiheuttamilta

maasuluilta. 110 kV:n eristinketjujen jännitelujuus on huomattavasti pienempi kuin 400 kV:n eristinketjujen, jolloin havainto on täysin mahdollinen. Tarkastelun otanta on kuitenkin suhteellisen suppea, joten oletuksen varmistaminen edellyttäisi laajempaa tarkastelua.

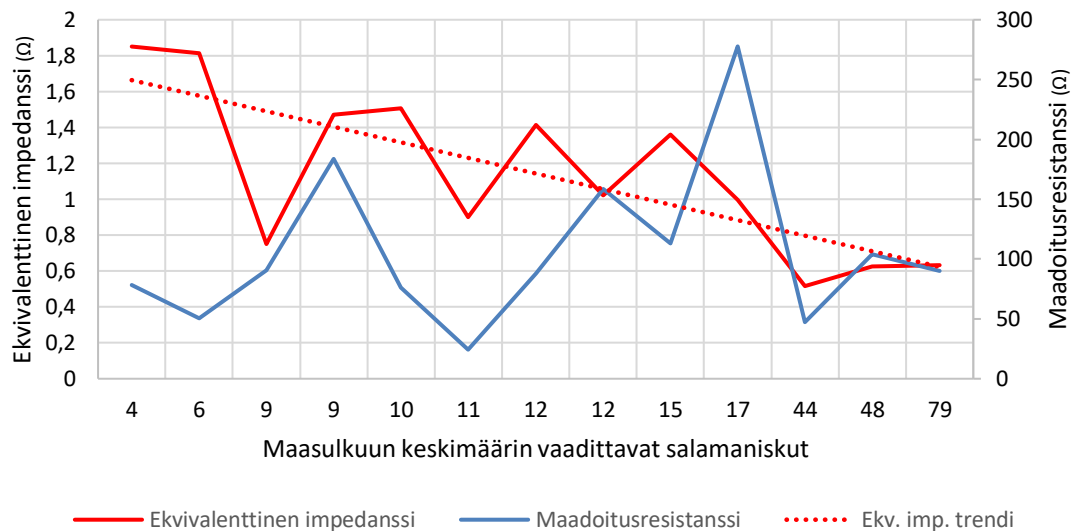
Yläindeksillä a merkittyjen voimajohtojen osuus on tarkastelussa suhteellisen pieni. Kyseisistä voimajohdoista suurin osa sijoittuu taulukoiden keskivaiheelle ja alemmaksi kuin johdot, joiden rinnalla ei kulje toista johtoa. Lähes jokaisen voimajohdon rinnalla kulkee jossain vaiheessa toinen johto, joten tarkastelussa ei ole johtoja, joiden rinnalla ei jossain vaiheessa olisi toista johtoa. Taulukoiden perusteella rinnakkaisten johtojen läsnäolo vaikuttaisi laskevan ukkoshäiriöherkkyyttä. Otanta on kuitenkin edelleen suppea, joten johdot päätökset jäävät suhteellisen epävarmoiksi. Kuitenkin teoreettisesti ajateltuna rinnakkaisen voimajohdon voi ajatella parantavan ukkoshäiriöherkkyyttä. Rinnakkainen johto pienentää jossain määrin todennäköisyyttä, että salama iskee viereiseen johtoon, sillä salamalle on enemmän korkeita kohteita. Lisäksi osa maadoituksista yhdistetään toisiinsa ja näin ollen maadoitusten tehokkuus paranee pienentäen takaiskun todennäköisyyttä.

Yläindeksin d voimajohdoilla eli entisillä 220 kV:n johdoilla, on selkeästi vähemmän ukkoshäiriöiden aiheuttamia maasulkuja, vaikka ekvivalenttinen impedanssi on suhteellisen suuri. Muilla saman ukkoshäiriöherkkyydystason 110 kV:n voimajohdoilla ekvivalenttinen impedanssi on alle yhden ohmin suuruusluokkaa, kun taas entisillä 220 kV:n johdoilla arvo on yli 1,5 ohmia. 220 kV:n eristinketjun jännitelujuusvaatimus on noin 1,9-kertainen 110 kV:n ketjun jännitelujuusvaatimukseen verrattuna. Taulukon havainto osoittaa, kuinka suuri vaikutus eristinketjun jännitelujuudella on ukkoshäiriöiden määrään.

Taulukoiden 11 ja 12 arvoista ei suoraan erota selkeää yhteyttä pienemmän maadoitusresistanssin ja pienemmän ukkoshäiriöitiheyden välillä. Taulukoiden arvojen mukaan, pylvään maadoitusresistanssilla ei vaikuta olevan lähes mitään vaikutusta ukkoshäiriöherkkyyteen. Taulukoiden arvoista muodostetut kuvaajat ovat nähtävissä kuvissa 16 ja 17.



Kuva 16. Maasulkuun vaadittavat keskimääräiset salamamäärät ekvivalenttisen impedanssin sekä maadoitusresistanssin suhteessa 400 kV:n verkossa.



Kuva 17. Maasulkuun vaadittavat keskimääräiset salamamäärät ekvivalenttisen impedanssin sekä maadoitusresistanssin suhteessa 110 kV:n verkossa.

Kuvissa maasulkuun keskimäärin vaadittavien salamoiden määrä eli S on piirretty voimajohdon ekvivalenttisen impedanssin sekä maadoitusresistanssin suhteen. Vaadittavalla salamamäärällä tarkoitetaan keskimääräistä salamamäärää, joka aiheuttaa yhden maasulun. Lisäksi ekvivalenttisiin impedansseihin suhteutetuille käyrille on luotu lineaariset trendiviivat. Kuten trendiviivoista huomataan, vaaditaan pienemmällä ekvivalenttisella impedanssilla suurempi salamamäärä aiheuttamaan maasulku. Vaihteluväli trendiviivan ympärillä on kuitenkin hyvin suuri. Teoriaan pohjautuen trendiviivan suunta on looginen, vaikka vaihtelu trendin ympärillä onkin suurta. Maadoitusresistanssille kuviin ei ole piirretty trendiviivoja, mutta ne olisivat molemmissa tapauksissa nousevia. Lisäksi

kuvista, kuten taulukoistakin, huomataan, ettei maadoitusresistanssilla näytä olevan mitään vaikutusta ukkoshäiriöherkkyyteen. Maadoitussuunnittelu kuitenkin pohjautuu maadoitusresistanssiin, joten tavoitearvon muodostamisen kannalta tarkastelun tulos ei ole luotettavasti hyödynnettävissä.

Tarkastelun perusteella ei maadoitusresistanssilla olisi käytännössä mitään vaikutusta ukkoshäiriöiden määrään. Tulee kuitenkin huomioida, että tarkastelussa käytetään keskiarvoja kaikissa muuttujissa. Esimerkiksi voimajohdon maadoitusresistanssit voivat vaihdella suurestikin pylväiden välillä, mutta keskiarvoissa nämä erot eivät näy yhtä selkeästi. Toisin sanoen suuri osa maasuluista voi esiintyä suuren maadoitusresistanssin pylväillä, vaikka maadoitusresistanssin keskiarvo koko johdolle olisikin pieni. Lisäksi salamatiheydet esitetään koko voimajohdon keskiarvoina, jolloin ei huomioida mahdollisia korkean salamatiheyden alueita. On mahdollista, että korkean salamatiheyden alueella on pylväitä, joilla on suuria maadoitusresistansseja, mikä johtaisi suureen ukkoshäiriöherkkyyteen. Tästä tarkastelusta näitä alueita ei kuitenkaan pysty havaitsemaan. Tarkempien tulosten saamiseksi täytyisi maasulkuja tutkia sijaintiin pohjautuvien arvojen perusteella. Toisin sanoen täytyisi salamatiheydet, maadoitusresistanssin sekä muut muuttajat vähintään keskiarvoista pienemmille johdon osille. Vaihtoehtoisesti voisi pylväitä käsitellä yksittäisinä, mikä kuitenkin vaatisi suuren työmäärän. Tässä työssä laajuuden puitteissa ei laajempaa tutkimusta suoriteta yllä mainituilla tavoilla.

Ekvivalenttisen impedanssin avulla voitaisiin muodostaa maadoitussuunnitteluun tavoitearvot. Tarkastelussa havainnot maadoitusresistanssin sekä ekvivalenttisen impedanssin näkökulmista ovat kuitenkin ristiriidassa, mikä ei ole teorian kannalta loogista. Voidaan siis kyseenalaistaa tarkastelun käytettävyyttä luotettavien tavoitearvojen muodostamisessa. Maadoitussuunnittelussa on useita epävarmuustekijöitä, joten on mahdollista, että tarkastelun tuloksien perusteella luodut tavoitearvot toimisivat käytännössä. Voidaan kuitenkin myös todeta, että teoreettisella lähestymisellä voidaan luoda huomattavasti luotettavimmat tavoitearvot.

5.2 Takaiskuhäiriöherkkyys

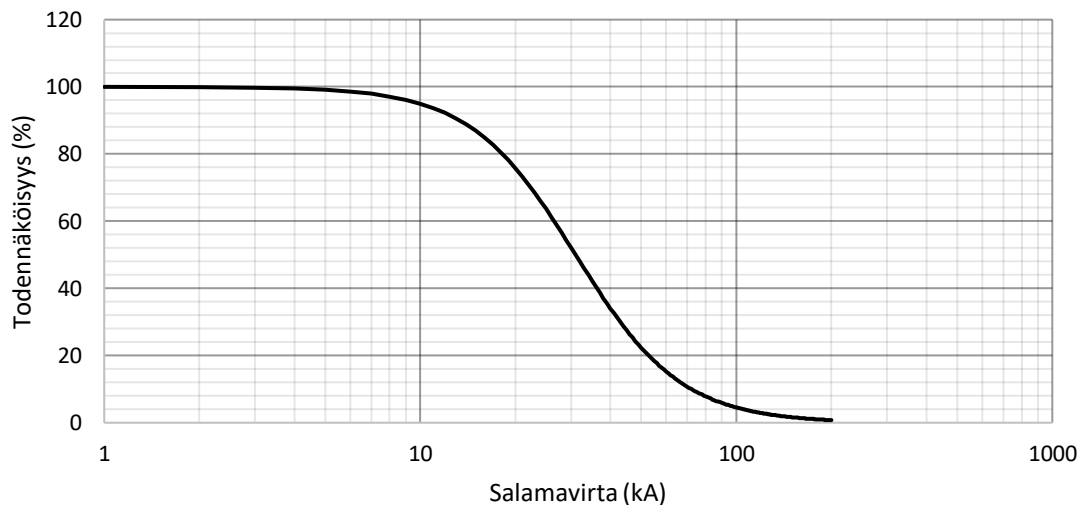
Nykyiseen verkkoon pohjautuvalla tarkastelulla luotettavaa korrelaatiota maadoitusresistanssin sekä ukkoshäiriöherkkyyden välillä ei löydetty. Ukkoshäiriöiden määrä on kuitenkin oleellinen näkökulma maadoitussuunnittelussa ja tavoitearvon luonnissa. Maadoitusresistanssin ja ukkoshäiriöherkkyyden yhteyden löytämiseksi tässä alaluvussa asiaa tarkastellaan teoreettisesti. Tarkastelu sekä laskenta pohjautuvat suureksi osaksi CIGRE:n tekniseen dokumenttiin 63 (1991) sekä CIGRE:n tekniseen dokumenttiin 839 (2021), joka täydentää ja päivittää dokumentin 63 tietoja. Aiemmassa alaluvussa

ukkokshäiriötiheyteen lasketaan takaiskujen lisäksi myös muut ukkosen aiheuttamat maasulut. Tässä alaluvussa tarkastellaan kuitenkin pelkästään takaiskuja ja niiden yhteyttä maadoitusresistanssiin. Seuraavaksi käsitellään laskentaa, sen lähtöarvoja sekä tehtyjä valintoja. Tässä tarkastelussa takaiskutiheyden laskenta pohjautuu pääosin pelkästään pylvääseen osuviin salamoihin. Laskennassa kuitenkin huomioidaan jänteelle osuvat salamaiskut myöhemmin esiteltävän jännekertoimen avulla.

Salamavirtojen suuruudet vaihtelevat suuresti, joten keskiarvon käyttö laskennassa ei ole perusteltua. Sen sijaan salamavirran suuruuden kumulatiivinen todennäköisyysjakauma voidaan laskea kaavalla

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}}, \quad (13)$$

jossa I on salamavirta kiloampeereina. Kaavan jakauma esittää todennäköisyyden, jolla huippuvirta ylittää annetun virran I suuruuden. (IEEE 1985) Näin ollen todennäköisyysjakauman mukaisia arvoja voidaan käyttää laskennassa salamavirralla. Kaavalla laskettu salamavirran todennäköisyysjakauma on nähtävissä kuvassa 18.



Kuva 18. Salamavirran kumulatiivinen todennäköisyysjakauma (IEEE 1985).

Salaman iskun seurauksena voimajohtoon vaikuttaa aaltomuotoinen virta, joten salamavirran suuruuden lisäksi laskentaa varten täytyy tietää myös virran aaltomuoto. Myös virran aaltomuodot vaihtelevat salamaniskujen kesken. Käytettävässä laskennassa rinnan nousuajalla ei ole kuitenkaan suurta merkitystä tulokseen. (CIGRE 1991). Tästä syystä aallon rinnan nousuaikana käytetään tässä työssä yleisesti käytettyä 1,2 μ s. Rinnan nousuajan vaikutuksen varmistamiseksi on laskenta testattu myös 2 μ s sekä 0,8 μ s nousuajoilla. Vaikutus mainituilla nousuajoilla takaiskutiheyteen on tuhannesosan suuruusluokkaa. Tuhansien ohmimetrien maaperässä vaikutus voi olla sadanosan

suuruusluokkaa 40, 80 ja 140 metrin lisäsäteillä laskettuna. Tämä ei kuitenkaan ole käytännön kannalta kriittistä, sillä kyseisillä ominaisresistansseilla takaiskutiheys on jo niin suuri, ettei mainittuja lisäsäteitä ole edes järkevää käyttää. Toisin sanoen takaiskutiheyden tarkastelussa nousuajan vaikutus ei ole merkittävän suuri. Näin ollen 1,2 μ s voidaan käyttää vaikuttamatta tulosten tarkkuuteen merkittävästi.

Syöksyaallon selän puoliaika puolestaan vaikuttaa laskennan tulokseen merkittävästi. Syöksyaallon selän puoliaika eristinketjun yli vaikuttavassa jännitteessä kuitenkin eroaa yleisesti käytetystä standardiaaltomuodosta 1,2/50 μ s. Aallon selän puoliajat eristinketjun yli vaihtelevat 2–10 μ s:n välillä. (CIGRE 2021) Lisäksi Chisholmin tutkimuksen (2010) mukaan aallon selän puoliaikaan ketjun yli ei vaikuta käytetty aaltomuoto, jännepituus tai maadoitusresistanssin suuruus. Tässä työssä syöksyaallon selän puoliajalle käytetään arvoa 10 μ s, sillä myöhemmin esiteltävässä kaavassa 10 μ s on rajoittavana alarajana. Lisäksi 10 mikrosekunnilla laskettuna saadaan kriittisimmän tilanteen mukainen laskenta. Ottaen huomioon laskennassa tehtävät yleistykset on kriittisimmän tilanteen laskenta perusteltua.

Eristinketjujen jännitelujuudet ilmoitetaan yleensä standardiaaltomuodon 1,2/50 μ s suhteen. Yllä on kuitenkin mainittu, ettei työssä käytetä kyseistä aaltomuotoa. Täytyy eristinketjun jännitelujuus siis mukauttaa käytettyyn aaltomuotoon. Jännitelujuus standardiaaltomuodosta poikkeavalle aaltomuodolle saadaan kaavalla

$$U_{50NS} = U_{50} \left(0,977 + \frac{2,82}{\tau} \right) \left(1 + \frac{\Delta U}{U_F} \right) \left[1 - 0,2 \left(1 + \frac{\Delta U}{U_F} \right) \left(\frac{U_{PF}}{U_{50}} \right) \right] \left[1 - 0,9 \left(1 - \frac{10}{\tau} \right) \left(\frac{\Delta U}{U_F} \right) \right] e^{-\frac{\Delta U t_F}{U_F^{13}}}, \quad (14)$$

jossa U_{50} on eristinketjun jännitelujuus standardiaallolla 1,2/50 μ s, ΔU pylvään jännitehäviö, U_F maadoituksen aiheuttama jännite eristinketjun yli, U_{PF} vaihejännite iskun aikana, t_F aallon rinnan nousuaika ja τ on aallon selän puoliaika. Vaihejännitteestä U_{PF} laskennassa käytetään 0,83 kertaista arvoa vaihejännitteen huippuarvosta. Kaava soveltuu laskentaan, jos syöksyaallon selän puoliaika on 10–100 μ s, osamäärän $\Delta U/U_F$ tulos on 0,5–5 ja aallon nousuaika on välillä 0,5–5 μ s. (CIGRE 1991) Pylvään jännitehäviö ΔU sekä maadoituksen aiheuttama jännite eristinketjun yli U_F saadaan laskettua kaavoilla

$$\Delta U = \alpha_T + Z_T \frac{t_F - CT_T}{t_F} I \quad \text{sekä} \quad (15)$$

$$U_F = (1 - C)R_i I. \quad (16)$$

Kaavoissa C on kytkentäkerroin (engl. coupling factor), R_i on impulssiredusoitu maadoitusresistanssi, Z_T on pylvään aaltoimpedanssi, I on salamavirta, T_T on aallon kulku-aika maasta pylvään huippukohtaan eli ukkosorteen, t_F on aallon nousuaika. Kaavaan 15 α_T saadaan kaavalla

$$\alpha_T = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i}. \quad (17)$$

Pylväiden aaltoimpedanssit riippuvat pylväiden rakenteista sekä pylvästyypistä ja tämän seurauksena myös α_T riippuu pylvästyypistä ja -rakenteista. (CIGRE 1991) Tässä työssä tarkastellaan H-, Hx- sekä T-pylväitä. Pylvästyypit on esitelty aiemmin aluvuossa 2.5. H- ja Hx-pylväille aaltoimpedanssi voidaan laskea kaavoilla

$$Z_T = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (18)$$

$$Z_1 = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{2H_t}{r} \right) - 1 \right] \text{ ja} \quad (18)$$

$$Z_2 = \frac{d_60 \ln \left(\frac{2H_t}{r_p} \right) + H_t Z_2}{H_t + d_p}. \quad (20)$$

Kaavoissa H_t on koko pylvään korkeus, r_p pylvään säde ja d_p pylväsalkojen välinen etäisyys. (CIGRE 2021) T-pylväälle aaltoimpedanssi voidaan laskea kaavoilla

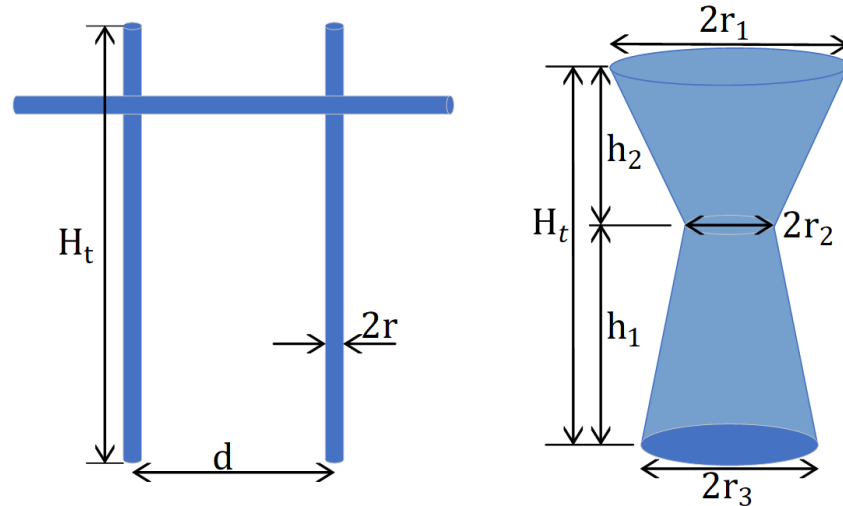
$$Z_T = 60 \left\{ \ln \left[\cot \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] \right\}. \quad (21)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r_{av}}{H_t} \right), \quad (21)$$

$$r_{av} = \frac{r_1 h_2 + r_2 H_t + r_3 h_1}{H_t}, \quad (22)$$

$$r_{eq} = \frac{(a+b)}{\pi} \text{ sekä} \quad (24)$$

Kaavoissa r_1 on pylvään yläosan säde, r_2 pylvään keskiosan säde, r_3 pylvään alaosan säde, h_1 korkeus pylvään keskiosaan, h_2 korkeus pylvään keskiosasta yläosaan ja H_t koko pylvään korkeus. Koska T-pylvään rakenne on tyyppi-piirrustuksessa poikkileikkaukseltaan neliö, täytyy r_{1-3} -arvoina käyttää r_{eq} -arvoa, jossa a on pylväsjalan leveys ja b syvyys. (CIGRE 2021) Edellä olleissa kaavoissa esiintyy useita eri muuttujia korkeuksille sekä säteille. Kuvasta 19 nähdään mihin pylvään kohtaan eri muuttujat viittaavat.



Kuva 19. Pylväiden periaatteelliset kuvat aaltoimpedanssin laskuun tarvittavilla muuttujilla esitettynä.

Kuvassa vasemmanpuoleinen pylväs esittää periaatteellisesti H-pylvästä ja oikeanpuoleinen T-pylvästä. Käytännössä T-pylvään yläosan säde on kuvasta eroten Fingridin pylväillä yleensä pienempi tai yhtä suuri kuin keskikohdan säde.

Kaavassa 15 esitellään aika T_T , joka aallolla kestää kulkea pylvään pituus. Myös aallon matka-ajat riippuvat pylväsrakenteista ja samalla pylvästyypistä. H-pylväille aika T_T voidaan laskea kaavalla

$$T_T = \frac{1}{cZ_T} \frac{H_t Z_1 (d + H_t) Z_2}{H_t Z_1 + (d + H_t) Z_2}, \quad (25)$$

jossa c on valonnopeus ja Z_1 sekä Z_2 saadaan kaavoilla 18 ja 19. T-pylväälle aika T_T saadaan kaavalla

$$T_T = \frac{H_t}{0,85c}. \quad (26)$$

Kaavassa kerroin 0,85 johtuu orsista. Orrettomalla pylväällä nimittäjänä toimii pelkkä valonnopeus. (CIGRE 2021) Parametrit eri pylväsrakenteille ja pylvästyypeille perustuvat tyyppiirrustuksiin, joilla pyritään kuvaamaan yleistä tapautta. Lisäksi pylväsalkojen välisestä etäisyydestä on käytetty keskiarvoa. Näin saadaan laskettua yleiselle tapaukselle takaiskutiheys. Maadoitussuunnittelun kannalta ei ole järkevää laskea jokaiselle yksittäiselle tapaukselle takaiskutiheyttä, sillä se monimutkaistaa prosessia.

Ukkosjohtimessa kulkeva salamavirta indusoi jännitteen muihin johtimiin, jonka seurauksena jännite-ero eristinketjun yli pienenee. Kaavassa 15 tätä ilmiötä kuvataan kytkentäkertoimen avulla. Toisin sanoen suurempi kytkentäkerroin johtaa pienempään

takaiskutiheyteen olettaen, että muut parametrit pysyvät vakioina. Koska kytkentäkerroin kuvaa indusointia, riippuu se johtimien asettelusta sekä korkeudesta. Toisin sanoen kytkentäkerroin riippuu pylväsrakenteesta. Lisäksi kytkentäkertoimeen suurentavasti vaikuttaa koronailmiö. Kytkeäkerroin voidaan laskea kaavalla

$$C = \frac{\sqrt{\ln\left[\frac{(H_1+H_2)^2+D_d^2}{(H_1-H_2)^2+D_d^2}\right]}}{\ln\left(\frac{2H_1}{r_{k1}}\right)}, \quad (27)$$

joka huomioi koronailmiön. Kaavassa H_1 on salamavirrallisen johtimen korkeus, H_2 on normaalitilassa olevan johtimen korkeus, D_d on vaakasuuntainen etäisyys johdinten välillä ja r_{k1} on salamavirrallisen johtimen säde korona huomioiden. (CIGRE 1991)

Koronan säde johtimen ympärillä saadaan iteroimalla kaavaa

$$r_c = \frac{U_c}{E_0 \ln\left(\frac{2h_s}{r_c}\right)}, \quad (28)$$

jossa h_s on salamavirrallisen johtimen korkeus maanpinnasta, U_c on arvio eristinketjun ylilyöntijännitteestä takaiskun hetkellä. Arvona U_c :lle laskennassa käytetään 1,8 kertaista eristinketjun positiivisen polariteetin jännitelujuutta. (CIGRE 2021) Kaavaan 28 koronan alkamiseen vaadittu sähkökentän voimakkuus E_0 saadaan laskettua

$$E_0 = 2300 \left(1 + \frac{1,22}{r_{eq}^{0,37}}\right), \quad (29)$$

jossa r_{eq} on johtimen kaarevuutta kuvaava ekvivalenttinen säde. Johtimella ekvivalenttinen säde vastaa johtimen halkaisijaa. (CIGRE 1991).

Aiemmin käsiteltyjen lähtötietojen pohjalta voidaan laskea eristinketjun yli vaikuttava huippujännite, joka saadaan kaavalla

$$U_I = IK_{sp} \left[R_e(1 - C) + \alpha_T Z_T \frac{(T_A - CT_T)}{t_F} \right] + U_{PF}, \quad (30)$$

jossa I on salamavirta, K_{sp} jännekerroin (engl. span factor), C kytkentäkerroin, α_T saadaan kaavalla 17, Z_T on pylvään aaltoimpedanssi, t_F aallon rinnan nousuaika, T_T aallon kulkuaika pylvään läpi, T_A aallon kulkuaika vaihejohtimen korkeudelle ja U_{PF} 0,83 kertainen vaihejännitteen huippuarvo. Kaavaan 30 R_e saadaan kaavalla

$$R_e = \frac{Z_g R_i}{Z_g + 2R_i}, \quad (31)$$

jossa Z_g on ukkosjohtimen aaltoimpedanssi ja R_i impulssireduoitu maadoitusresistanssi. Jännekertoimesta käytetään teknisen dokumentin 63 suosittelemaa arvoa 0,6. Kuten aiemmin on mainittu, pohjautuu laskenta vain pylvääseen osuviin salamaniskuihin. Näin kuitenkin päädytään todellisia takaiskutiheyksiä korkeampiin arvoihin, joten jännekertoimella pyritään huomioimaan myös jänteelle osuvat salamaniskut. (CIGRE 1991) Edellä olevissa kaavoissa esiintyy R_i , joka on impulssireduoitu maadoitusresistanssi. Laskennassa kuitenkin käytetään kyseisen resistanssin sijasta impulssi-impedanssia Z_p . Impulssi-impedanssin käyttö perustuu CIGRE:n teknisen dokumentin 839 (2021) suositukseen. Impulssi-impedanssi määritettiin laskentaa varten impulssikertoimen ja maadoitusresistanssin avulla.

Ratkaisemalla kaavasta 30 salamavirta I ja sijoittamalla huippujännitteen U_I tilalle U_{50NS} saadaan kaava

$$I_C = \frac{U_{50NS} - U_{PF}}{K_{Sp} \left[R_e(1-C) + a_T + Z_T \frac{(T_A - CT_T)}{t_F} \right]}. \quad (32)$$

Koska kaavaan sijoitetaan jännitteen huippuarvoksi eristinketjun aaltomuotokorjattu jännitelujuus, saadaan tulokseksi kriittinen salamavirta I_C . Toisin sanoen saadaan virta, jolla takaisku todennäköisesti tapahtuu. Tulee huomioida, että jännitelujuudet ilmoitetaan eristinketjuille 50 % arvoina eli läpilyönti tai ylilyönti tapahtuu 50 %:lle tapauksista. Toisin sanoen myös kriittinen virta edustaa 50 %:n arvoa eli takaisku voi tapahtua myös pienemmällä tai suuremmalla salamavirran arvolla. Kriittisen salamavirran avulla voidaan muodostaa takaiskutiheyden keskiarvolle kaava

$$BFR = 0,6N_L \int_{I_C}^{\infty} f(I) dI = 0,6N_L P(I_C), \quad (33)$$

jossa N_L on vuosittaiset salamaniskut voimajohtoon sataa kilometriä kohden ja $P(I_C)$ on todennäköisyys, että kriittinen virta ylittyy. Kaavassa 0,6 edustaa aiemmin esiteltyä jännekerrointa K_{Sp} . (CIGRE 1991; CIGRE 2021) Viimeisimpien tutkimusten perusteella jännekerroin saattaa kuitenkin olla yli 230 kV voimajohdoilla alle 0,6 ja alle 230 kV:n johdoilla yli 0,6. Lisätutkimuksia kuitenkin tarvitaan kattavamman ohjeistuksen luomiseksi. Tulee siis huomioida, että jännekerroin voi todellisuudessa erota käytetystä. Kertoimen 0,6 käyttö on kuitenkin kattavan tutkimustiedon puuttuessa perusteltua kaikilla jännitetasoilla. (CIGRE 2021)

Työn yhtenä tavoitteena on luoda maadoitussuunnitteluun tavoitearvojärjestelmä. Alaluovussa 3.2 päädyttiin luomaan tavoitearvojärjestelmä, joka pohjautuu ukkoshäiriötiheyteen. Käytännön maadoitussuunnittelun kannalta on järkevää kiinnittää järjestelmä maadoitusresistanssiin sekä maan ominaisresistanssiin, sillä molemmat arvot ovat helposti

ymmärrettävissä ja mitattavissa. Näin ollen yllä esitetyillä kaavoilla lasketaan tavoiteltavat maadoitusresistanssin arvot eri maan ominaisresistansseilla. Toisin sanoen muodostetaan käyrä, kun eri pisteet yhdistetään toisiinsa. Näin ollen muodostettava käyrä tulee vastaamaan logiikaltaan nykyistä käytössä olevaa käyrää. Laskentaa varten työssä on luotu Excel-tiedosto, joka laskee automaattisesti Visual Basic -koodia hyödyntäen takaiskutiheydet halutuille maan ominaisresistansseille sekä maadoitusresistansseille. Laskutuloksena tiedostolla saadaan myös kyseisiä maadoitusresistansseja vastaavat elektrodipituudet sekä suuntaa antava kustannusarvio kyseiselle maadoituselektrodille.

Nykyisessä 110 kV:n verkossa ukkosten aiheuttamien maasulkujen vuosittainen määrä on noin 0,71 maasulkua sataa johtokilometriä kohden ja 400 kV:lla noin 0,13 maasulkua sataa johtokilometriä kohden. Maasulkutiheydet perustuvat vuosien 2001–2021 Fingridin häiriötilastoihin sekä johtopituuksiin. Kyseiset maasulkutiheydet koostuvat kuitenkin kaikista maasuluista eikä arvoja näin ollen voi suoraan käyttää takaiskutiheyden tarkastelussa. Takaiskujen määrää kaikista ukkosen aiheuttamista maasuluista ei ole tilastoitu, joten puhtaasti tilastoihin perustuvaa arvoa ei voida käyttää tarkastelussa. Näin ollen tässä työssä 110 kV:n nykyverkon takaiskutiheydestä käytetään arvoa 0,6, jolla pyritään huomioimaan takaiskujen osuus kaikista ukkosen aiheuttamista maasuluista. Arvoon päädytään, koska oletettavasti suurin osa 110 kV:n verkon ukkosen aiheuttamista maasuluista ovat takaiskuja. 400 kV:n verkossa suurin osa maasuluista on oletettavasti suoraan vaihejohtimeen osuvien salamaniskujen seurausta, joten takaiskutiheyden arviointi ei onnistu kuten 110 kV:n verkossa. (Jalonen 2023a)

Käyttämällä takaiskutiheytenä 110 kV:n verkolle 0,6 ja hyödyntämällä aiempaa laskentaa, voidaan muodostaa eri pylvästyytypeille valittuja takaiskutiheyksiä noudattavat käyrät. Laskennassa käytetään lähtökohtana takaiskutiheyttä 0,6, koska näin pyritään tilanteeseen, ettei uudella tavoitearvokäyrällä häiriöiden määrä lisääntyisi. Laskennassa käytetyt lähtöarvot esitetään taulukossa 13.

Taulukko 13. Takaiskutiheyden laskentaparametrit 110 kV:n pylvälle.

	H-Pylväs	Hx-Pylväs	T-Pylväs
U_{50} (kV)	468	468	468
ρ (Ωm)	10–10000	10–10000	10–10000
GFD (vuosittaiset maasalamat neliökilometrillä)	0,44	0,44	0,44
t_F (μs)	1,2	1,2	1,2
τ (μs)	10	10	10
K_{sp}	0,6	0,6	0,6
N_L	8	11,2	10,3
H_t (m)	21,8	36,703	34,2
T_T (ns)	84	143,9	134,1
T_A (ns)	66,5	81,9	72,9
b (m)	6,2	13,1	3,2
Z_T (Ω)	163	163	224
C_1	0,326	0,228	0,242
C_2	0,317	0,223	0,283
C_3	0,277	0,215	0,335

Taulukossa U_{50} on eristinketjun jännitelujuus standardiaallon 1,2/50 μs vaikutuksen alaisena. Koska Fingridin vähimmäisvaatimus 110 kV:n eristinketjun syöksyjännitelujuudelle on 468 kV, käytetään sitä laskennassa lähtötietona. Laskennassa vuosittaisena maasalamatiheytenä käytetään 0,44 salamaa neliökilometriä kohden, joka on kaikkien Fingridin voimajohtojen sijaintien maasalamatiheyksien keskiarvo. Pohjoisessa Suomessa on huomattavasti vähemmän Fingridin voimajohtoja kuin eteläisessä Suomessa, joten myös keskiarvo painottuu etelän johtojen mukaan. Salamatiheyden keskiarvo kuitenkin luonnehtii ukkosolosuhteita riittävällä tarkkuudella tämän työn tarpeisiin. Salamavirran aaltomuotona laskennassa käytetään 1,2/10 μs :n lyhytaaltoa, kuten aiemmin on jo määritelty.

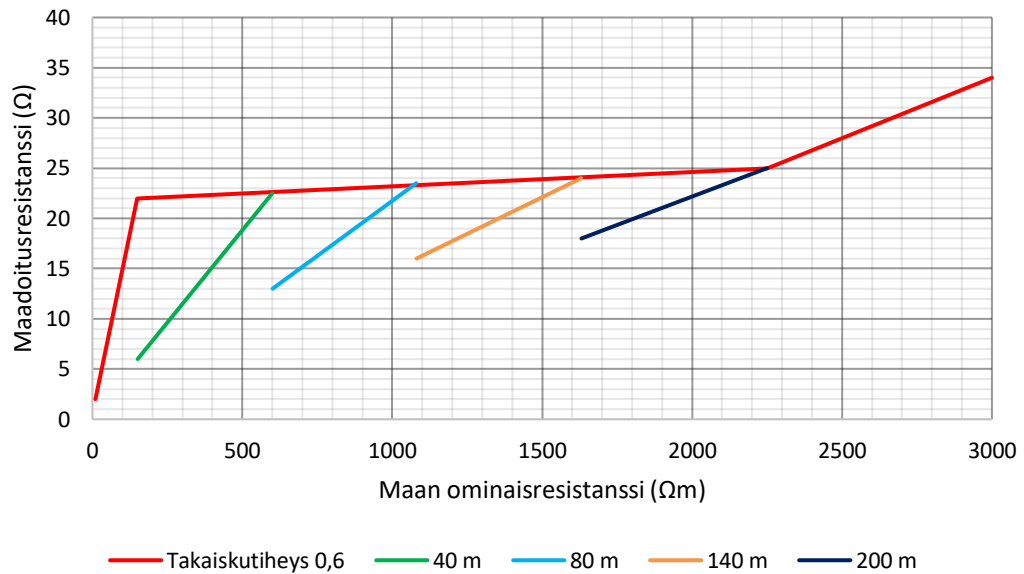
Taulukon arvoista huomataan, että Suomen salamaolosuhteissa voimajohtoon osuvat salamamäärät pysyvät suhteellisen lähellä toisiaan erilaisilla pylväsrakenteilla. Prosentuaalisesti Hx-pylväistä koostuvaan johtoon osuu vuodessa noin 39 % enemmän salamoita sataa kilometriä kohden kuin H-pylväistä koostuvaan johtoon. Toisin sanoen esimerkiksi päiväntasaajan seudulla, jossa salamatiheys voi olla 8 salamaa neliökilometrillä vuodessa (CIGRE 2021), olisi pylväsrakenteilla suurempi merkitys takaiskutiheyteen. Suomen salamaolosuhteissa vaikutus jää kuitenkin suhteellisen pieneksi.

Taulukon kytkentäkertoimet on laskettu kaavalla 27 ja alaindeksit kertovat minkä vaihejohtimen suhteen kytkentäkerroin on laskettu. Portaalipylväällä indeksit 1 ja 3

edustavat reunimmaisii vaiheita ja T-pylväällä ylintä ja alinta. Alaindeksi 2 edustaa keskimmäisen vaiheen suhteen laskettua kytkentäkerrointa. Kertoimet on laskettu vain toisen ukkosjohtimen suhteen. Toisen ukkosjohtimen suhteen laskettaessa kertoimet olisivat portaalipylväillä peilikuvat ja T-pylväillä identtiset. Taulukosta nähdään, että Hx-pylväällä kytkentäkertoimet C_{1-3} ovat huomattavasti pienemmät kuin H-pylväällä. Toisin sanoen samoissa olosuhteissa sekä samalla maadoitusresistanssilla Hx-pylväällä on suurempi takaiskutiheys kuin H-pylväällä kytkentäkertoimen vaikutuksesta. Tulee kuitenkin huomioida, että kyseessä on vain Hx-pylvään 110 kV:n virtapiiri eikä sekä 110 kV:n että 400 kV:n virtapiirit.

Laskenta on suoritettu tarkoilla arvoilla mutta maadoitusresistanssista on käytetty kokonaislukuja, jolloin käyrien tarkkoihin pisteisiin muodostuu virhettä. Maadoitussuunnittelussa ohmin tarkkuuteen pääseminen on riittävää, jolloin myös käyrien muodostuksessa voidaan käyttää kyseistä tarkkuutta. Lisäksi virhettä laskentaan luo impulssikertoimen laskennassa käytetty kaava, joka arvioi kerrointa. Salamavirran todennäköisyysjakauma puolestaan ei noudata CIGRE:n muodostamaa jakaumaa ääriosissa. Takaiskutiheyden laskenta on kuitenkin aina arviointia, sillä esimerkiksi eristinketjun syöksyjännitelujuus sekä salamavirran suuruus pohjautuvat todennäköisyyksiin. Lisäksi tämän työn laskennassa on tehty keskiarvoistuksia ja yleistyksiä esimerkiksi salamatiheydestä, joka edelleen vie takaiskutiheyden tulosta arvion suuntaan. Näin ollen edellä mainitun virheen suuruus ei ole tarkastelun kannalta liian suuri.

Ensimmäisenä tarkastellaan 110 kV:n H-pylväälle muodostettua takaiskutiheyttä 0,6 muikailevaa käyrää. Laskenta käyrää varten toteutettiin yhden ohmimetrin välein sädepituudesta riippuville maadoitusresistansseille taulukon 13 lähtöarvoilla. Saaduista arvoista ei kuitenkaan muodostettu puhtaasti takaiskutiheyttä noudattavaa käyrää. Sen sijaan käyrän alkua ja loppua muokattiin. Muodostettu käyrä esitetään kuvassa 20.



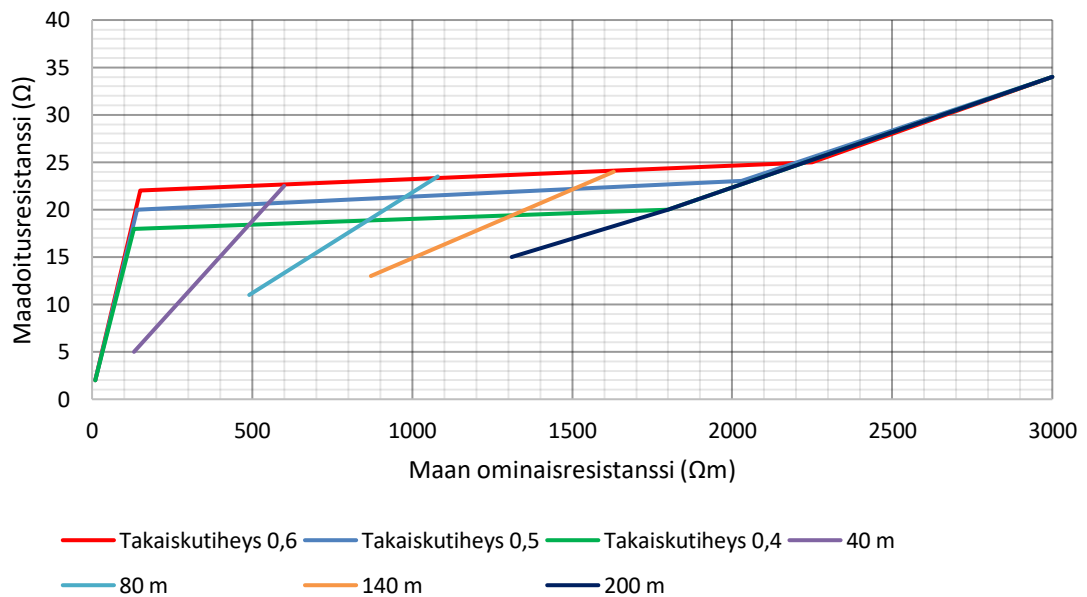
Kuva 20. H-pylvään takaiskutiheyttä 0,6 mukaileva kuvaaja sisältäen lisämaadoituksilla aikaansaattavat maadoitusresistanssit.

Käyrän alku muokattiin seuraamaan perusmaadoituksella aikaansaatua maadoitusresistanssia, kunnes perusmaadoitus ei riitä alittamaan 0,6 takaiskutiheyttä. Käyrän ensimmäinen käännepiste 150 Ω :n kohdalla edustaa tätä pistettä. Käyrän toinen käännepiste 2250 Ω :n kohdalla edustaa pistettä, jossa 0,6 takaiskutiheys edellyttää yli 200 metrin lisämaadoituksen. Koska 200 metriä on suurin lisämaadoitusten kokonaispituus Fingridin pylväsmaadoituksilla, valittiin tämä toiseksi käännepisteeksi käyrälle. Käännepisteiden välissä käyrä noudattaa arvoa 0,6 takaiskua vuodessa sataa johtokilometriä kohden. Käännepisteet sijoitettiin käyrälle jo tässä vaiheessa nopeuttamaan myöhempää tavoitearvokäyrän muodostamista.

Kuvan 20 kuvaajassa esitetään lisäksi eri lisämaadoituksilla aikaansaattavat maadoitusresistanssit. Kun maadoitusresistanssin kuvaaja kohtaa takaiskutiheyden käyrän, vaaditaan suurempi elektrodipituus alittamaan valittu takaiskutiheys. Toisin sanoen tiettyä elektrodipituutta käytetään, kunnes resistanssi saavuttaa käyrän eli valitun maksimitakaiskutiheyden. Koska Fingridin asennuksissa käytetään vakiopituutena yhdelle maadoituselektrodille 40 metriä, johtaa se kuvan 20 nouseviin käyriin. Jos elektrodipituudet optimoitaisiin jokaisella maan ominaisresistanssin arvolla, vastaisi myös maadoitusresistanssi kuvaajan takaiskutiheyden käyrää. Kuvan sädepituuksista 40 metriä vastaa yhtä lisäsädettä, 80 metriä kahta, 140 metriä kolmea ja 200 metriä neljää lisäsädettä. Kuvassa 20 sekä myöhemmissä kuvissa, jos toisin ei mainita, säteiden resistanssikäyrät edustavat saavutettavia maadoitusresistansseja. Kuvasta huomataan, että neljä sädettä saavuttaa takaiskutiheyden 0,6 noin 2250 Ω :n kohdalla. Luvussa 2.4 mainittiin Suomessa maan ominaisresistanssin keskiarvoksi yleisesti käytetty 2300 Ω m sekä Fingridin

mittauksiin perustuva 2050 Ωm . Alaluvun 2.4 taulukosta 5 huomataan myös maan ominaisresistanssin suuret vaihteluvälit. Näistä syistä voidaan olettaa olevan tilanteita, joissa edes neljällä säteellä ei päästä takaiskutiheyteen 0,6. Toisin sanoen käyttämällä kuvan 20 käyrää päädyttäisiin 110 kV:n verkossa todennäköisesti nykyistä suurempaan takaiskutiheyteen.

Eri pylvästyyteille ja jännitetasoille muodostettiin myös muut kuin takaiskutiheyttä 0,6 mukailevat kuvaajat. Näistä kuvaajista pyrittiin tarkastelemaan, kuinka suuria maadoitusresistanssin pienennyksiä eri takaiskutiheystasot vaatisivat. H-pylvälle muodostetut käyrät esitetään kuvassa 21.



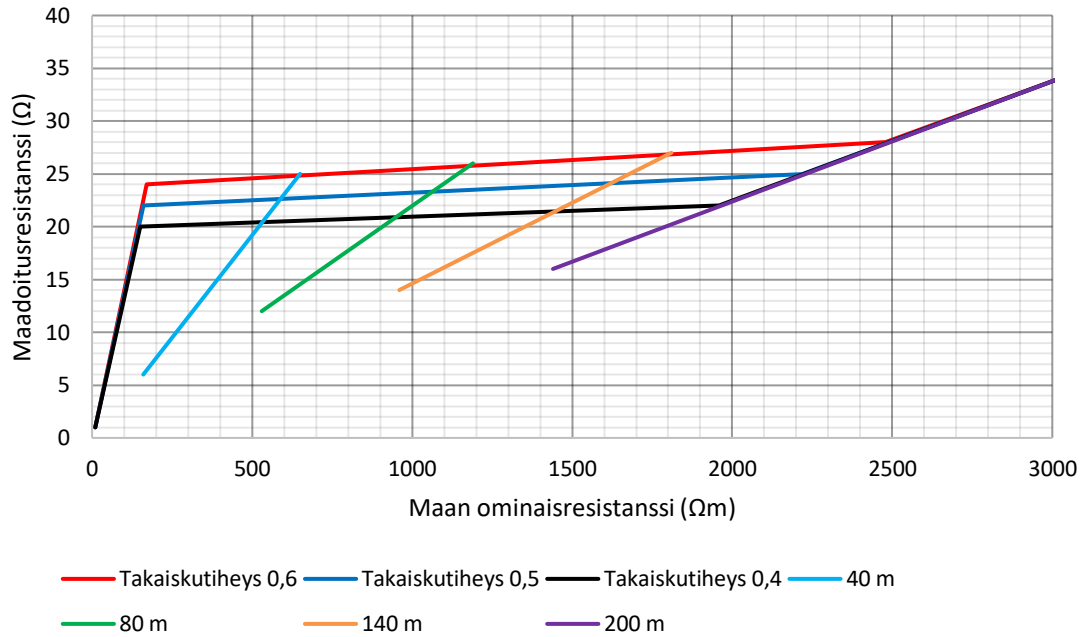
Kuva 21. Eri takaiskutiheyksiä mukailevat kuvaajat H-pylvälle eristinketjun syöksyjännitelujuudella 468 kV.

Kuvasta huomataan, että takaiskutiheydet sekä maadoitusresistanssit ovat yhteydessä toisiinsa. Havainto noudattaa teoriaa, sillä pienempi maadoitusresistanssi johtaa pienempään impulssi-impedanssiin, joka edelleen johtaa pienempään pylvään potentiaaliin. Oletuksena on, että elektrodipituus on alle efektiivisen pituuden, sillä muuten impulssi-impedanssi ei pienene maadoitusresistanssin pienentyessä. Kuvaajaan perustuen voidaan siis ajatella vakiosuuruisten muutosten maadoitusresistanssissa johtavat vakiosuuruisiin muutoksiin takaiskutiheyksissä. Kuvan 21 kuvaajasta sekä muista samanlaisista kuvaajista huomataan, että takaiskutiheyden pysyessä vakiona, muuttuu vaadittava maadoitusresistanssi hyvin vähän. Maan ominaisresistanssin kasvaessa yli kymmenkertaiseksi muuttuu takaiskutiheyden vaadittava maadoitusresistanssi vain kahdella ohmilla. Maadoitusresistanssin sekä impulssi-impedanssin yhteys toisiinsa suhteessa

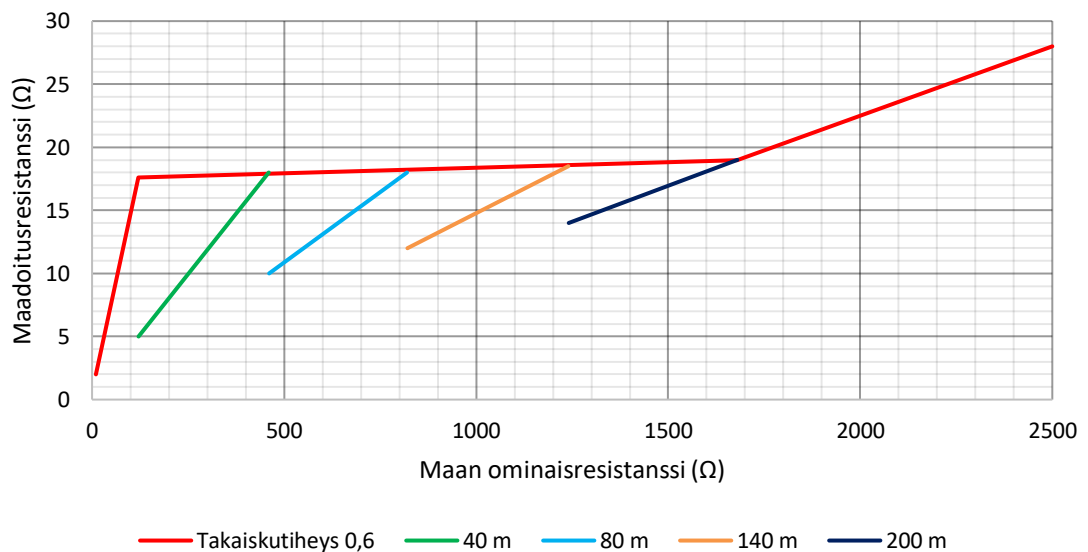
maan ominaisresistanssiin selittää tätä pientä nousua vaaditussa maadoitusresistanssissa. Alaluvussa 2.3 esiteltiin impulssikerroin, joka kuvastaa tätä suhdetta.

Yhtä tai useampaa kuvan 21 kuvaajista voitaisiin käyttää tavoitearvokäyränä, ainakin 110 kV:n H-pylväille. Käyttämällä esimerkiksi takaiskutiheyden 0,6 kuvaajaa, päädytään alle valitun rajan niin kuin lisämaadoitusten suorista huomataan. Luonnollisesti neljän säteen suora leikkaa aina jossain vaiheessa takaiskutiheyden käyrän, jos hyväksyttävä takaiskutiheys on valittu käytännölliseen suuruusluokkaan. Aiemmin todettiin, että voidaan olettaa useiden pylväspaikkojen olevan ominaisresistanssin keskiarvoa suuremmassa maaperässä. Näin ollen usealla pylväällä saavutetaan valittua takaiskutiheyttä suurempi arvo, sillä neljä sädetäkään ei riitä valittuun arvoon. Toisaalta käyrän alkuosassa saavutettava takaiskutiheys on pienempi kuin valittu taso. Tämä osa käyrästä on kuitenkin suhteellisen pieni ja tuskin riittää kompensoimaan käyrän loppuosasta syntyvää kasvanutta takaiskutiheyttä. Toisin sanoen käyttämällä edellä mainittua käyrää päädyttäisiin todennäköisesti valittua suurempaan takaiskutiheyteen koko johto huomioiden. Huomioiden Suomen maaperän ominaisuudet ei takaiskutiheyteen 0,6 pohjautuvan käyrän käyttöä tavoitearvokäyränä voida oikeuttaa edes vain 110 kV:n H-pylväille. Tavoitearvokäyrän luonti edellyttää lisätarkasteluja.

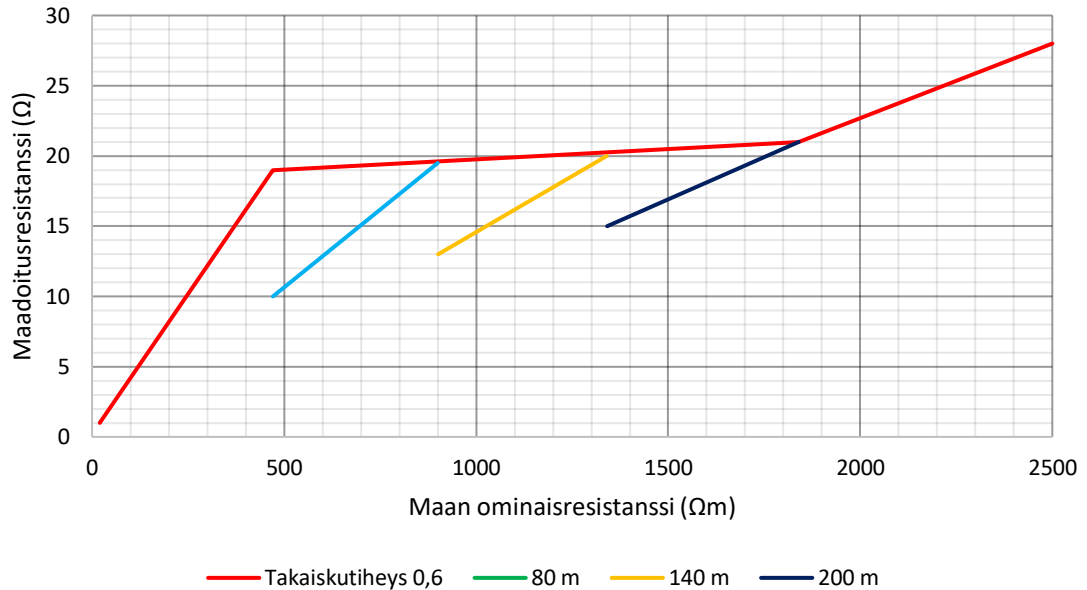
Eristinketjujen mittauksissa positiivisen polariteetin 50 %:n syöksyjännitelujuuden on havaittu olevan 110 kV:n ketjuilla noin 520 kV:n suuruusluokkaa. Näin ollen voidaan olettaa, että ainakin testatut ketjutyyppit kestävät todellisuudessa noin 520 kV. H-pylväälle laskenta suoritettiin eristinketjun syöksyjännitelujuudella 500 kV. Valittu jännitelujuus on pienempi kuin testeissä havaittu, jotta saadaan muodostettua konservatiivisempi kuvaus ketjun jännitelujuudesta. Laskennan perusteella luotiin samanlainen kuvaaja kuin edellä. Maadoitussuunnittelua tai tavoitearvokäyrää ei ole järkevää mitoittaa testeistä saadun arvon mukaan, sillä sitä ei eristinketjuilta vaadita. Koska 500 kV:n jännitelujuustasoa ei vaadita, ei voida olettaa, että kaikki eristinketjut myöskään olisivat jännitelujuudeltaan vähintään 500 kV. Sen sijaan tavoitearvokäyrän muodostamisessa käytetään eristinketjuilta vaadittua 468 kV:a. Edellä esitettyyn jännitelujuuteen perustuvan käyrän lisäksi kuvan 20 käyrää vastaavat kuvaajat muodostettiin myös muille taulukon 13 pylvästyypeille. Muodostetut käyrät esitetään kuvissa 22–24.



Kuva 22. Eri takaiskutiheyksiä mukailevat kuvaajat H-pylväälle eristinketjun syöksyjännitelujuudella 500 kV.



Kuva 23. Takaiskutiheyttä 0,6 mukaileva kuvaaja Hx-pylväälle eristinketjun syöksyjännitelujuudella 468 kV.

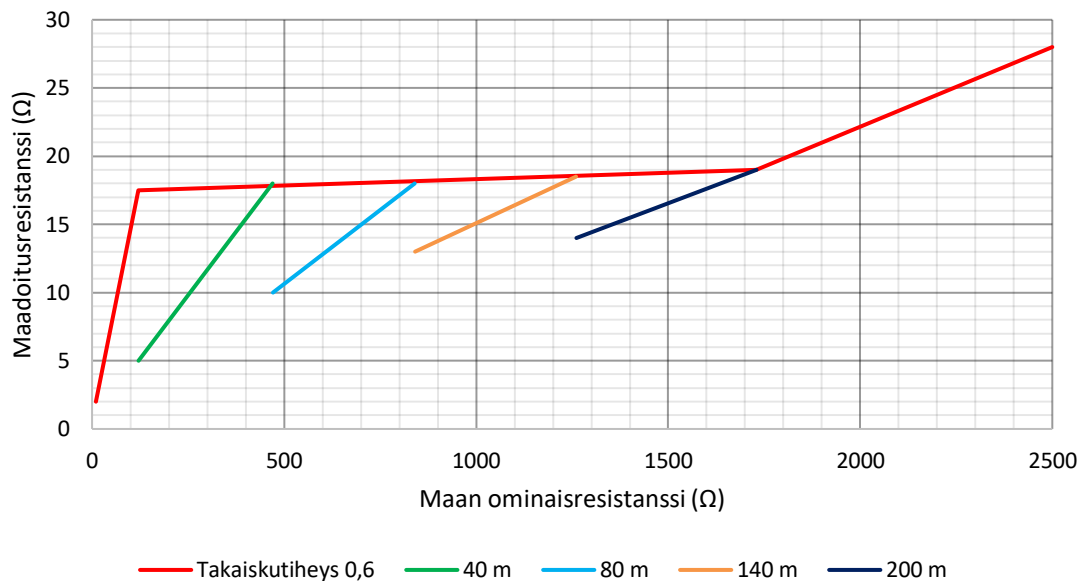


Kuva 24. Takaiskutiheyttä 0,6 mukaileva kuvaaja T-pylväälle eristinketjun syösyjännitelujuudella 468 kV.

Verrattaessa kuvan 20 käyrää kuvan 22 käyriin, huomataan eristinketjujen jännitelujuudella 468 kV takaiskutiheyden 0,6 vastaavan noin 0,5 takaiskutiheyttä, jos jännitelujuus onkin 500 kV. Kuten aiemmin on mainittu, tavoitearvokäyrän luonnissa eristinketjun jännitelujuutena käytetään 468 kV:a. Jos jännitelujuudeksi kuitenkin oletetaan kaikilla tai suurella osalla pylväistä testien mukainen suurempi jännitelujuus, päädytään todellisuudessa pienempiin takaiskutiheyksiin kuin mihin tavoitearvokäyrä pyrkii. Vaikka jännitelujuus olisikin vain osalla ketjuista suurempi kuin 468 kV, on vaikutus takaiskutiheyteen aina positiivinen. Aiemmin todettiin, että todennäköisesti on runsaasti tilanteita, jolloin neljä sädettä ei riitä saavuttamaan takaiskutiheyttä 0,6. Tämän kappaleen havainnon perusteella tilanne ei todellisuudessa olisi kuitenkaan niin epäedullinen ja takaiskutiheys 0,6 saavutettaisiin myös suuremmilla maan ominaisresistansseilla kuin kuvan 20 käyrällä. Neljällä säteellä sekä eristinketjun jännitelujuudella takaiskutiheys saavutetaan noin 2480 ohmimetriin asti. Yläraja on kuitenkin silti lähellä maan ominaisresistanssin keskiarvoa ja tilanteita, joissa neljä sädettä ei riitä on todennäköisesti silti useita. On kuitenkin myös runsaasti tilanteita, jolloin valittuun takaiskutiheyteen päästään. Nämä tilanteet osaltaan kompensoivat käyrän loppuosaa, jolloin kokonaisuutena johdon takaiskutiheys pienenee.

Kuvista 23 ja 24 huomataan, että kyseisillä pylvästyypeillä takaiskutiheys 0,6 edellyttää noin 3–5 ohmia pienemmän maadoitusresistanssin verrattuna H-pylväeseen. T-pylväällä perusmaadoitukseen kuuluu jalat yhdistävän vaakaelektrodin lisäksi yksi 40 metrin säde. Näin ollen T-pylvään kuvaajan alku eroaa selkeästi muista kuvaajista. Muut erot

kuvaajissa selittää pylväsrakenteet, sillä muut laskennassa käytetyt arvot ovat identtiset kuin H-pylväälle. Koska valittuun takaiskutiheyteen pääseminen edellyttää parempia maadoituksia, voi olla perusteltua muodostaa erillinen käyrä eri pylvästyypeille. Toisaalta T-pylväällä perusmaadoitus johtaa automaattisesti pienempään takaiskutiheyteen. Useiden tavoitearvokäyrien tarvetta ja näkökulmia tarkastellaan luvussa 6. Useisiin tavoitearvokäyriin voi johtaa myös eroavat salamaolosuhteet. Kuvassa 25 esitetään takaiskutiheyttä 0,6 mukaileva käyrä H-pylväälle salamatiheyden GFD ollessa 0,7.



Kuva 25. Takaiskutiheyttä 0,6 mukaileva kuvaaja H-pylväälle salamatiheyden ollessa 0,7.

Salamatiheydellä 0,7 pyritään laskemaan takaiskutiheys voimajohdolle, joka kulkee salamatiheyden kannalta Suomen ääriolosuhteissa. Arvo ei ole alaluvussa 5.1 esitellyn salama-aineiston maksimiarvo Suomessa. Yksittäisillä alueilla salamatiheyden keskiarvo lähestyy aineiston mukaan noin 0,8 maasalamaa vuodessa neliökilometrillä. Voimajohdot kuitenkin todennäköisesti kulkevat läpi alueiden, joilla on erisuuret salamatiheydet. Näin ollen maksimiarvo ei kuvaisi koko voimajohdon olosuhteita. Käyttämällä arvoa 0,7 voidaan kuvata koko johdon olosuhteita riittävällä tarkkuudella. Kuvasta huomataan, että kuvaaja vastaa suhteellisen läheisesti kuvan 23 kuvaajaa eli Hx-pylvään kuvaajaa. Eri salamaolosuhteet, kuten erilaiset pylvästyypitkin, saattavat johtaa erilaisiin tavoitearvokäyriin tilanteen mukaan.

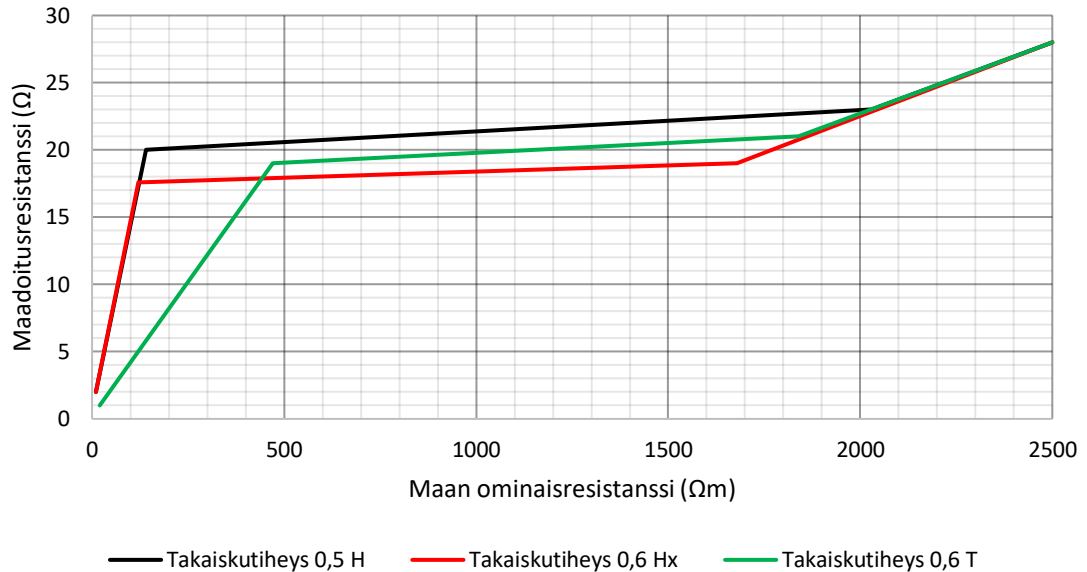
Tähän mennessä on tarkasteltu pelkästään 110 kV:n jännitetason takaiskutiheyteen perustuvia kuvaajia. Työ toteutettiin tarkastelemalla ensin 110 kV:n jännitetaso loppuun asti eli aina tavoitearvokäyrän luontiin saakka. Tämän jälkeen siirryttiin tarkastelemaan 400 kV:n jännitetasoa. Tarkastelujen järjestys johtuu siitä, että 110 kV:n pylväillä takaiskut

ovat suuremmissa asemassa kuin 400 kV:lla. Koska 110 kV:n tarkastelussa tehtiin 400 kV:n tarkasteluun vaikuttavia valintoja, ei tässä luvussa esitellä 400 kV:n tarkastelua.

6. UUDEN TAVOITEARVOKÄYRÄN MUODOSTAMINEN

Tavoitearvokäyrä muodostetaan pohjautumaan takaiskutiheyteen eli käyrää varten täytyy valita jokin tavoiteltava takaiskutiheys. Takaiskutiheydeksi voitaisiin valita nykyistä suurempi arvo, jos valinnalle olisi riittävät perusteet. Työn aikana tällaisia perusteita ei kuitenkaan ole löydetty. Häiriötiheyden kasvattamista ei myöskään voi pitää järkevänä huomioiden nykyinen yhteiskunnallinen kehitys tarpeesta kohti pienentyviä häiriömääriä. Edellä oleva laskenta on jo pohjautunut samasta syystä nykyiseen takaiskutiheyden arvoon. Näin ollen valitaan 0,6 vuosittaista takaiskua sataa johtokilometriä kohti myös tavoitearvokäyrän perustaksi. Takaiskutiheyteen vaikuttavat pylväsrakenteet eli 0,6 takaiskua edellyttää eri pylväillä eri maadoitusresistanssia. Alaluvussa 5.2 huomataan, että Hx- ja T-pylväillä vaaditaan pienempi maadoitusresistanssi kuin H-pylväällä samaan takaiskutiheyteen. Havainnon perusteella yksi tavoitearvokäyrä ei siis riittäisi maadoitus-suunnitteluun.

Tavoitearvokäyrästä kuitenkin halutaan mahdollisimman tehokas ja helppokäyttöinen, joten yksi yhteinen käyrä on tästä näkökulmasta parempi kuin pylvästyypikohtainen ratkaisu. Kaikista vuoden 2010 jälkeen käyttöön otetuista 110 kV:n pylväistä noin puolet on H-pylväitä, noin viidesosa Hx-pylväitä ja alle 10 % T-pylväitä. Muut pylvästyypit kattavat jäljelle jäävän osan. Toisin sanoen H-pylväät kattavat suurimman osan uusista asennuksista. Hx-pylväiden osuus on toiseksi suurin mutta silti alle puolet muiden H-pylväiden määrästä. Kuten luvussa 3.2 todetaan, ei tavoitearvokäyrällä voida huomioida kaikkia eri näkökulmia ja tilanteita. Tästä syystä on kannattavampaa luoda tavoitearvokäyrä, joka pohjautuu yleisimpään tilanteeseen, jolloin kokonaisuutena päästään haluttuun tulokseen. Lisäksi alaluvussa 5.2 todetaan, että todellisuudessa eristinketjujen syöksyjännitelujuus on suurempi kuin vähimmäisvaatimus. Tämän seurauksena takaiskutiheys 0,6 syöksyjännitelujuudella 468 kV mitoitettuna vastaisikin todellisuudessa takaiskutiheyttä 0,5 H-pylväällä. Kuvassa 26 esitetään H-pylvään takaiskutiheys 0,5 suhteessa 0,6 takaiskutiheyksiin Hx- ja T-pylväillä.



Kuva 26. H-pylvään takaiskutiheyttä 0,5 sekä Hx- ja T-pylvään 0,6 mukailevat kuvaajat.

H-pylvään 0,5 takaiskutiheyttä mukaileva kuvaaja on suhteellisen lähellä Hx- sekä T-pylväiden takaiskutiheyttä 0,6 mukailevia kuvaajia. Luonnollisesti T-pylvään käyrän alku on vieläkin erilainen perusmaadoituksen takia. Täysin kuvaajat eivät vastaa toisiaan mutta verrattuna H-pylvään 0,6 takaiskutiheyden käyrään on ero huomattavasti pienempi. Toisin sanoen H-pylvääseen perustuvalla käyrällä suunnitellessa, ei Hx- ja T-pylväillä valittua takaiskutiheyttä ylitettäisi yhtä suuresti kuin alun perin vaikutti. T-pylvään kuvaajan alkuun vaikutus jää kuitenkin pieneksi. Tämä havainto kuitenkin edelleen tukee yleiseen tilanteeseen eli H-pylvääseen pohjautuvaa tavoitearvokäyrää.

Tavoitearvokäyrä voisi perustua myös Hx- tai T-pylvääseen, jolloin tavoitearvokäyrä mittaaisi maadoitukset kriittisimmän tilanteen mukaan. Tämä kuitenkin johtaisi suureen ylimitoitukseen H-pylväillä, jotka muodostavat enemmistön pylväistä. Kun huomioidaan eristinketjujen syöksyjännitelujuuden todelliset vaatimuksia suuremmat arvot, olisi maadoitusten mitoitus vieläkin ylimitoitettumpaa. Yhtä tavoitearvokäyrää tukee lisäksi alaluvun 4.3 tilastot suunniteltujen ja mitattujen maadoitusresistanssien eroista. Esimerkiksi kosteuden muutokset sekä maaperän epähomogeenisyys kasvattavat eroa suunnitellun ja toteutuneen maadoitusresistanssin välillä. Näin ollen tavoiteltu ja toteutunut maadoitusresistanssi eivät kaikkina ajankohtina vastaa toisiaan. Näin ollen ylimääräisten pylväskohtaisten tavoitearvokäyrien vaikutus jäisi pieneksi, kun muiden muuttujien vaikutus huomioidaan.

Lähtökohtana tavoitearvokäyrälle toimii siis kuvan 20 kuvaaja. Aiemmin on kuitenkin todettu, että käyrän alkuosa tuskin riittää kompensoimaan käyrän lopun aikaansaamaa

suurempaa takaiskutiheyttä. Toisin sanoen käyrän alkuosaa täytyy muokata niin, että mahdolliset yli 2250 $\Omega\text{m:n}$ maaperässä olevat maadoitukset saadaan kompensoitua mahdollisimman tehokkaasti. Käyrälle täytyy siis löytää yksi tai useampi käännepeiste, jolla tähän tavoitteeseen päästään. Tavoitearvokäyrän laskeminen 0,6 takaiskutiheyden määrittämisen rajan alle lisää luonnollisesti kustannuksia, sillä maadoitusmateriaalia käytetään enemmän. Samalla ukkosen aiheuttamien takaiskujen määrä kuitenkin pienenee. Nykyisessä Energiaviraston valvontamallissa keskeytyksistä aiheutuviksi haitoiksi (KAH) lasketaan myös pika- ja aikajälleenkytkennöistä muodostuva haitta. (Energiavirasto 2023) Salaman aiheuttamat maasulut ovat yksi edellä mainittujen jälleenkytkentöjen aiheuttaja. Parantamalla maadoituksia vähenevät pikajälleenkytkentöjen määrä ja näin ollen myös KAH pienenee. Jos KAH pienenee riittävästi suhteessa vaadittaviin maadoituskustannuksiin, on maadoitusten parantaminen kannattavaa. Pienentynyt rahallinen haitta keskeytyksistä ikään kuin maksaa parempiin maadoituksiin vaadittavan lisäinvestoinnin. Todellisissa rahavirroissa tilanne ei esiinny edellä esitetyllä tavalla, vaan tilanne täytyy ajatella asiakkaille pienentyneen haitan näkökulmasta. Koska kantaverkkoyhtiö on yksi kansallisen infrastruktuurin ylläpitäjistä, voidaan tarkastelu perustella suoritettavaksi tästä näkökulmasta.

Keskeytyksistä aiheutuvan haitan pienenemisestä saadun hyödyn laskentaa varten tarkasteltiin 110 kV:n esimerkkijohtoa, jonka pituus on 100 kilometriä. Tämän mittaisella 110 kV voimajohtolla voidaan olettaa olevan 300 pylvästä, kun kilometrillä on keskimäärin 3 pylvästä. Käyttöikä johdolle laskennassa käytetään 70 vuotta ja laskentakorkona neljää prosenttia. Koska laskenta suoritetaan 70 vuodelle, on epävarmuus tuloksissa huomattavaa, esimerkiksi KAH:n arvostus voi muuttua merkittävästi tulevaisuudessa. Laskennassa ei siis pyritä tarkkoihin tuloksiin, vaan suuntaa antaviin tuloksiin, jolla tavoitearvokäyrää voidaan mahdollisesti säätää.

Laskentaa varten täytyy ensin tietää yhden häiriön keskimääräinen keskeytyksestä aiheutunut haitta rahassa mitattuna. Kaikkien ukkosten aiheuttamien häiriöiden keskimääräinen vuosittainen KAH on noin 659,8 k€. Arvo perustuu vuosien 2016–2022 KAH-raporttiin. Tähän arvoon kuuluvat kuitenkin kaikki ukkosten aiheuttamat viat, joten luku täytyy kertoa maasulkujen suhteellisella osuudella. Ukkosen aiheuttamista vioista vuosina 1998–2021 maasulkuja oli noin 77 % Fingridin häiriöraportin perusteella. Näin ollen ukkosen aiheuttamien maasulkujen vuosittaiseksi KAH:n keskiarvoksi saadaan noin 509,8 k€. Kun tämä luku jaetaan Fingridin 110 kV:n verkon kokonaispituuden keskiarvolla saadoissa kilometreissä ilmoitettuna, saadaan vuosittainen KAH sataa kilometriä kohden. Arvoksi saadaan noin $5722 \frac{\text{€}}{100 \text{ km}}$. Verkon kokonaispituuden keskiarvo on laskettu vuosien 2001–2021 johtopituuksista ja kokonaispituudella tarkoitetaan kaikkien 110 kV:n

voimajohtojen yhteenlaskettua pituutta. Vuosittainen ukkosen aiheuttama maasulkutiheys 110 kV:n verkossa on noin 0,71 maasulkua sataa kilometriä kohden. Näin ollen kertomalla KAH sataa kilometriä kohden maasulkutiheydellä, saadaan keskiarvo yhdelle ukkosen aiheuttamalle maasulun KAH:lle. Arvoksi saadaan noin 8036 €. Edellä olevan laskennan luvut esitetään taulukossa 14.

Taulukko 14. Keskeytyksestä aiheutuvan haitan laskennan arvot ja tulokset.

Vuosittaisten ukkosen aiheuttamien maasulkujen KAH keskiarvo (k€)	509,8
110 kV:n verkon kokonaisjohtopituuden keskiarvo (100 km)	89,08
KAH 100 km kohden (€/100 km)	5722
Vuosittainen ukkoshäiriötiheys (maasulku/100 km)	0,71
Yhden ukkosen aiheuttaman maasulun KAH keskimäärin (€)	8036

Yhden ukkosen aiheuttaman maasulun KAH on edellä laskettu kaikille ukkosen aiheuttamille maasuluille. Tavoitearvokäyrä kuitenkin pohjautuu takaiskutiheyteen eikä maasulkutiheyteen. Laskennassa päädytään kuitenkin samaan tulokseen KAH:n keskiarvolle, vaikka käytettäisiin takaiskutiheyttä, sillä häiriötiheys ja vuosittainen KAH kokonaisarvo muuttuvat samassa suhteessa. Saadulla arvolla voidaan laskea edellä mainitulle esimerkkijohdolle käyttöiän aikainen KAH:n kokonaiskustannus eri häiriötiheyksillä. Laskennan perustilanteena käytetään takaiskutiheyttä 0,6. Nettonykyarvolaskentaa hyödynnetään kokonaiskustannusten aika-arvon huomioimisessa. Nettonykyarvo kaikille johdon käyttöiän takaiskuille saadaan hyödyntämällä kaavaa

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+r_{lk})^n}. \quad (34)$$

Kaavassa *NPV* tarkoittaa nettonykyarvoa (engl. Net Present Value), *n* on aikaperiodi ja *N* aikaperiodien määrä, *C_n* on rahavirta aikaperiodilla ja *r_{lk}* on laskentakorkokanta. (Gallo 2014) Laskennassa aikaperiodina on vuosi ja periodien määrä on 70. Laskentakorkona käytetään 4 % ja rahavirtaa periodilla edustaa vuosittainen KAH valituilla häiriötiheyksillä. Käytännössä laskenta toteutettiin Excel-ohjelmiston *NPV*-funktiolla, mutta laskenta tapahtuu samoin periaattein. Periodien määränä käytettiin 70, joka edustaa johdon esimerkkikäyttöaika. Maadoitukset ovat pylväillä koko käyttöajan eikä niille haluta lähtökohtaisesti tehdä muutoksia johdon elinaikana. Näin ollen johdon käyttöikä voidaan käyttää myös maadoitusten käyttöikä. Muutoksia maadoituksille ei haluta tehdä, sillä se ei ole kustannustehokasta verrattuna siihen, että alkuperäinen asennus mitoitetaan riittävästi. Taulukossa 15 esitetään nettonykyarvon laskennan tulokset.

Taulukko 15 KAH-kustannusten nettohyötyarvon laskennan tulokset.

Vuosittainen takaiskutiheys (takaisku / 100 km)	Nettohyötyarvo (€)	Nettohyötyarvojen erotus (€)	Erotus pylväskohtaisena (€)
0,6	112801	-	-
0,5	94001	18800	63
0,4	75201	37600	125
0,3	56400	56400	188
0,2	37600	75201	251
0,1	18800	94001	313

Nettohyötyarvojen erotukset laskettiin vähentämällä takaiskutiheydellä 0,6 lasketusta arvosta muilla arvoilla laskettu nettohyötyarvo. Pylväskohtaiseksi nettohyötyarvojen erotus saatiin jakamalla arvo 300 eli esimerkkijohdon pylväsmäärällä. Pylväskohtainen tulos kertoo kuinka suuren lisäinvestoinnin maadoitukseen KAH:n pienentyminen mahdollistaisi yhdellä pylväällä. Pylväsmaadoituksen suuntaa antavana kokonaiskustannuksena voidaan pitää 15 euroa metriltä (Sorri 2022). Koska Fingridin pylväsmaadoituksissa käytetään vakioelektrodipituutena 40 metriä, maksaa yhden säteen lisääminen siis vähintään 600 €. Jos säteen lisääminen edellyttää säteitä yhdistävää osaa, on kustannus 900 €. Taulukon arvoista huomataan, ettei yhdelläkään takaiskutiheydellä pylväskohtainen arvo ole yli 600 €. Toisin sanoen KAH:n pienentyminen maadoituksia parantamalla ei koskaan mahdollista lisäinvestointeja täysin. Laskennan perusteella KAH kuitenkin kattaisi lisäinvestoinnit, jos elektrodille ei käytetä vakioipituutta. Koska maadoitussuunnittelussa täytyy ottaa huomioon myös mahdolliset muutokset tulevaisuudessa, ei voida olettaa, että elektrodeille käytetty vakioipituus on pysyvä käytäntö. Lisäksi KAH:n pienentyminen kattaa osan lisäinvestoinnista, vaikka lisättäisiinkin vakioipituuden mukainen elektrodi. Tavoitearvokäyrän muodostamisessa voidaan siis käyttää edellä olevaa laskentaa hyödyksi huomioiden tulosten tarkkuuden rajallisuuden.

Edellä saatiin selville KAH:n pienentymisen mahdollistama lisäinvestointi pylväskohtaisesti. Pelkästään taulukon 15 arvoista ei kuitenkaan voida suoraan löytää yhteyttä tavoitearvokäyrään, sillä arvoja ei ole sidottu maan ominaisresistanssiin tai maadoitusresistanssiin. Takaiskutiheyden pienentäminen edellyttää maadoitusresistanssin pienentämistä, joka edellyttää maadoituselektrodin pidentämistä. Alaluvun 5.2 laskentaa hyödyntäen pystytään tarkastelemaan, kuinka monta lisämetriä vaaditaan eri maan ominaisresistansseilla, jotta saavutetaan alempi takaiskutiheys. Kertomalla lisämetrit maadoitusten kustannuksella $15 \frac{\text{€}}{\text{m}}$, saadaan tulokseksi lisämetrien kustannus. Kun verrataan lisämetrien kustannuksia KAH:n mahdollistamaan lisäinvestointiin, voidaan löytää maan

ominaisresistanssi, jossa lisäinvestointi sekä lisäkustannus ovat yhtä suuret. Tätä raja-arvoa pienemmillä maan ominaisresistansseilla KAH:n pienentyminen kattaa lisäkustannuksen maadoitukseen kokonaan. Raja-arvoa suuremmilla maan ominaisresistansseilla KAH:n pienentyminen kattaa vain osan lisäkustannuksesta. Käytännössä KAH:n mahdollistama lisäinvestointi ja lisämaadoitusten aiheuttama kustannus eivät tässä tarkastelussa koskaan kohtaa toisiaan. Tämä johtuu siitä, että lisäkustannuksen minimiarvo on 15 € eli yksi lisämetri eivätkä KAH:n mahdollistamat lisäinvestoinnit ole viidellätoista jaollisia. Tämän takia raja-arvoiksi valittiin viimeiset arvot, joilla KAH:n mahdollistamat lisäinvestoinnit kattavat lisäkustannukset.

Raja-arvojen laskennassa hyödynnettiin alaluvun 5.2 laskentaa ja maan ominaisresistanssille käytettiin 10 Ω m:n väliä. Lisäksi maadoitusresistanssit pyöristettiin kokonaisluvuiksi. Laskennassa tehtyjen valintojen takia jokaiselle maan ominaisresistanssin arvolle ei löydy valittujen takaiskutiheyksien arvoja. Tästä syystä laskennassa käytettiin valittua arvoa lähimpänä olevaa lukua, esimerkiksi 0,59 takaiskutiheyttä käytettiin 0,6 sijasta. Valinnat luovat laskentaan virhettä mutta vaikutus jää suhteellisen pieneksi. Laskennassa suoritettujen kokeilujen perusteella raja-arvot muuttuivat keskimäärin kymmenellä tai kahdellakymmenellä ohmimetrillä. Näin ollen virhe jää riittävän pieneksi, kun huomioidaan laskennan suuntaa antava luonne.

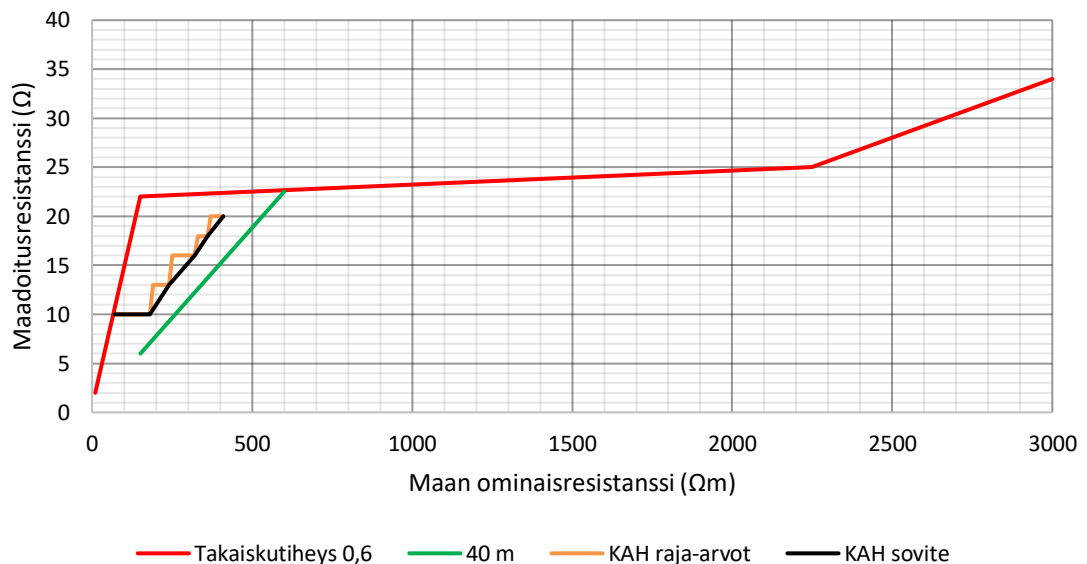
Lisäinvestointien ja lisäkustannusten raja-arvojen laskennassa tulee huomata, että jokaiselle pylväälle oletettiin vähintään perusmaadoitus, jota kuvattiin 10 metrin vaakaelektrodilla. Löydetty raja-arvot esitetään taulukossa 16.

Taulukko 16. KAH:n mahdollistaman lisäinvestoinnin raja-arvot.

Maan ominaisresistanssi (Ω m)	Maadoitusresistanssi (Ω)	Vuosittainen takaiskutiheys (takaisku / 100 km)
70	10	0,1
180	10	0,1
190	13	0,2
240	13	0,2
250	16	0,3
320	16	0,3
330	18	0,4
360	18	0,4
370	20	0,5
410	20	0,5

Taulukossa esitetään myös jokaisen raja-arvon ylärajan lisäksi kyseisiä takaiskutiheyksiä vastaavat alarajat, jotka johtuvat siirtymisestä toiseen takaiskutiheyteen. Toisin sanoen alarajaa pienemmillä maan ominaisresistansseilla KAH mahdollistaa pienemmän

takaiskutiheyden saavuttamisen. Taulukon arvoista huomataan, että jokaisella takaiskutiheydellä resistanssien arvot pysyvät vakiona takaiskutiheyden pysyessä vakiona. Toisin sanoen pienimmästä takaiskutiheydestä siirrytään portaittain kohti perustilannetta eli 0,6. Lisämaadoituksista aiheutuvat kustannukset siis kasvavat suhteessa suuremmiksi maan ominaisresistanssin kasvaessa. Kuvassa 27 esitetään taulukon arvoista muodostetut kuvaajat yhdessä tavoitearvokäyrän pohjaksi valitun kuvaajan kanssa.

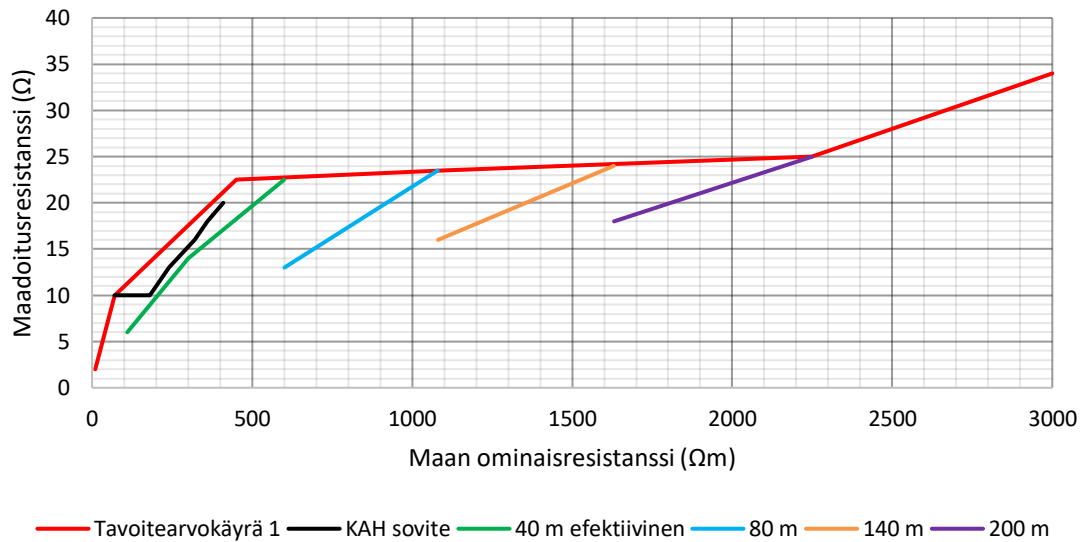


Kuva 27. KAH-tarkastelun raja-arvot tavoitearvokäyrän pohjan kanssa esitettynä.

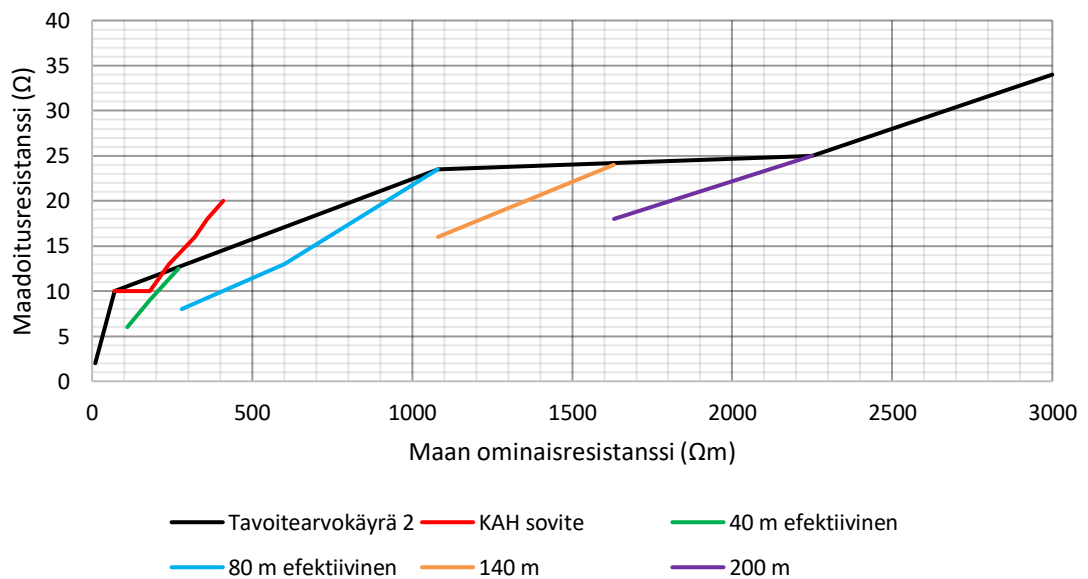
Kuvassa raja-arvojen perusteella on luotu sovite, joka kulkee ylärajasta ylärajaan. Sovite saavutetaan, jos maadoitukset optimoidaan laskennan perusteella täysin. Kuvassa on esitetty myös 40 metrin lisäsäde, joka vastaa kulmaltaan KAH-sovitetta mutta kulkee eri kohdassa. Jos lisäsäde toteutettaisiin lyhyemmällä elektrodipituudella, kulkisi sovite sekä säteen maadoitusresistanssin käyrä lähes samassa kohdassa. Maadoituselektrodien vakiopituuksien muuttamista ei kuitenkaan tämän työn havainnoilla voida perustella.

Uudella tavoitearvokäyrällä ei haluta päätyä suurempaan takaiskutiheyteen kuin nykyisellä tavoitearvokäyrällä. Näin ollen voidaan uuden tavoitearvokäyrän ensimmäinen käännealue kiinnittää samaan kohtaan kuin Imatran Voiman luomalla käyrällä. Ensimmäinen käännealue sijaitsee 70 Ωm:n ja 10 Ω:n kohdalla. Piste voitaisiin kiinnittää myös pienemmän resistanssin ja maan ominaisresistanssin kohtaan. Tämä kuitenkin johtaisi siihen, että käytännössä aina asennettaisiin vähintään yksi lisäsäde. Vaikka tavoitearvokäyrän suurten maan ominaisresistanssien puolta pyritään kompensoimaan, ei ole perusteltua myöskään ylivoimaisesti maadoituksia liiallisesti. Vaikka KAH-sovite mukailisikin täysin 40 metrin säteen suoraa, on KAH-laskenta vain suuntaa antavaa. Näin ollen ei pelkästään kyseisellä laskennalla voisi perustella ensimmäisen käännealueen

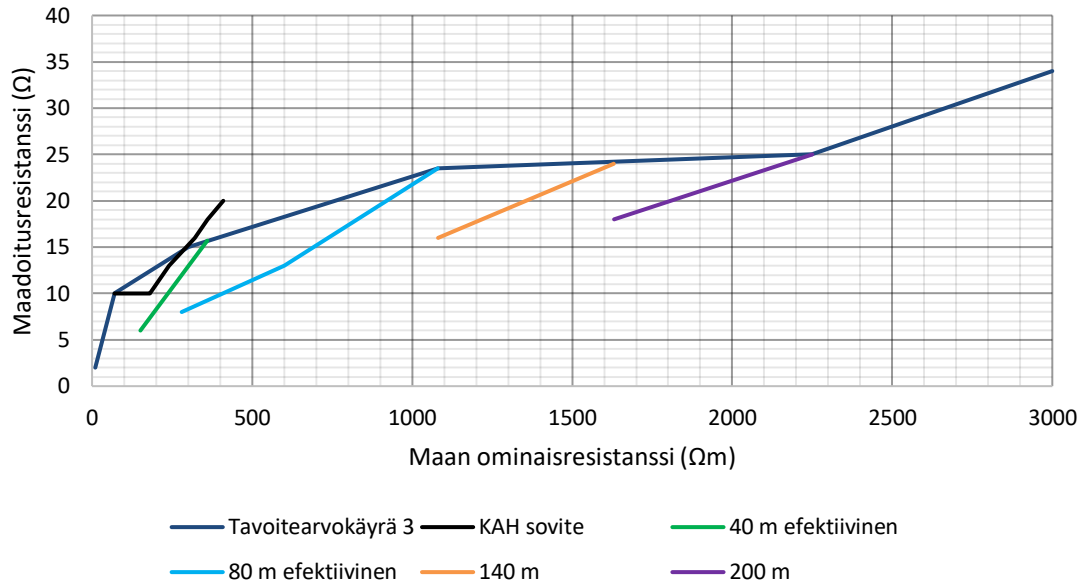
alentamista, sillä vaikutukset ovat kuitenkin suhteellisen suuret kustannusten näkökulmasta. KAH-laskennan tarkkuuden rajallisuuden huomioiden on laskenta pyritty huomioimaan muiden käännepestien sijoituksessa. Kuvissa 28–30 esitetään kolme osittain eri perustein luotua alustavaa tavoitearvokäyrää.



Kuva 28. Muodostettu mahdollinen uusi tavoitearvokäyrä 1.



Kuva 29. Muodostettu mahdollinen uusi tavoitearvokäyrä 2.



Kuva 30. Muodostettu mahdollinen uusi tavoitearvokäyrä 3.

Tavoitearvokäyrä 1 pyrkii hyödyntämään KAH:sta saatavan hyödyn kokonaisuudessaan. Käyrä ei noudata täysin KAH-sovitetta, koska se ei ole tarpeen huomioiden kiinteä elektrodipituus. Tavoitearvokäyrän 2 toinen käänneaste on sijoitettu kahden säteen ylärajalle eli pisteeseen, jossa kahdella säteiselektrodilla ja perusmaadoituksella saavutetaan 0,6 takaiskutiheys. Tavoitearvokäyrän 3 toinen käänneaste on sijoitettu niin, että KAH:sta saatavasta hyödystä pyritään huomiomaan noin puolet ja kolmas käänneaste on kahden säteen ylärajalla. Käänneasteeksi valittiin kahden säteen yläraja, sillä näin pystytään hyödyntämään kaksi sädettä mahdollisimman laajasti. Käänneaste voitaisiin sijoittaa myös kolmen säteen tai neljän säteen ylärajalle, joka johtaisi huomattavasti alempana kulkevaan tavoitearvokäyrään. Tämä johtaisi alempaan takaiskutiheyteen mutta myös suurempiin kustannuksiin, joita ei voida tämän työn tarkasteluin perustella. Lisäksi ei ole perusteltua olla hyödyntämättä kahta sädettä mahdollisimman laajasti. Myös maadoitus-elektrodin termisen kestävyuden kannalta kaksi sädettä on parempi tilanne kuin yksittäinen säde. Näin ollen paine termisen kestävyuden näkökulmasta pienenee kasvavien maasulkuvirtojen suhteen.

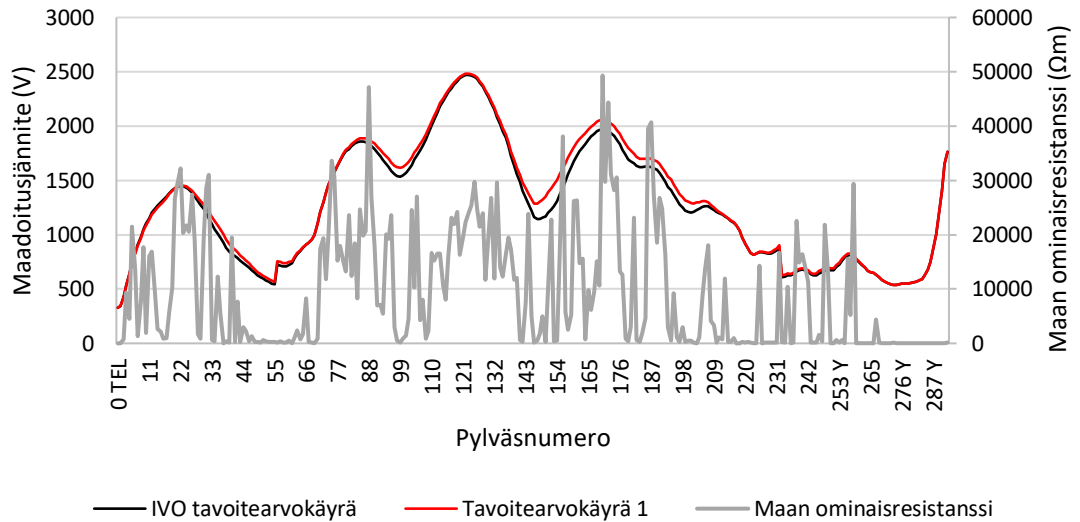
Kuvissa esitetään aikaisemmista kuvaajista poiketen efektiivisiä pituuksia huomioivia maadoitusresistansseja, joka ei vastaa todellista maadoitusresistanssia. Tavoitearvokäyrän luonnissa efektiiviset pituudet kuitenkin vaikuttavat säteiden käyttörajoihin, sillä vain efektiivinen pituus vaikuttaa impulssi-impedanssiin. Kuten kuvista huomataan, vaikuttaa efektiivinen pituus vain ensimmäisellä ja toisella säteellä. Kahden säteen tapauksessa efektiivinen pituus ei vaikuta koko käyttöalueella, kuten 80 metrin kuvaajan käänneasteesta havaitaan.

Uuden tavoitearvokäyrän valitseminen kolmesta luodusta edellyttää tarkastelua käyrien toimivuudesta suunnittelussa. Tätä tarkastelua varten kaikilla kolmella käyrällä suoritettiin alustava maadoitussuunnittelu olemassa olevalle 110 kV:n voimajohdolle. Suunnittelussa huomioitiin pelkästään tavoitearvokäyrä eikä muihin vaatimuksiin otettu kantaa. Tästä syystä ei tuloksia myöskään voida suoraan verrata johdon olemassa oleviin maadoituksiin. Tarkastelua varten jokaiselta kolmelta käyrältä katsottiin jokaiselle sädemäärälle maan ominaisresistanssin raja-arvot. Säteiden käyttörajoissa huomioitiin elektrodien efektiiviset pituudet. Efektiivinen pituus vaikuttaa tarkastelussa kuitenkin vain yhden säteen käyttörajaan. Säteiden käyttörajat esitetään taulukossa 17.

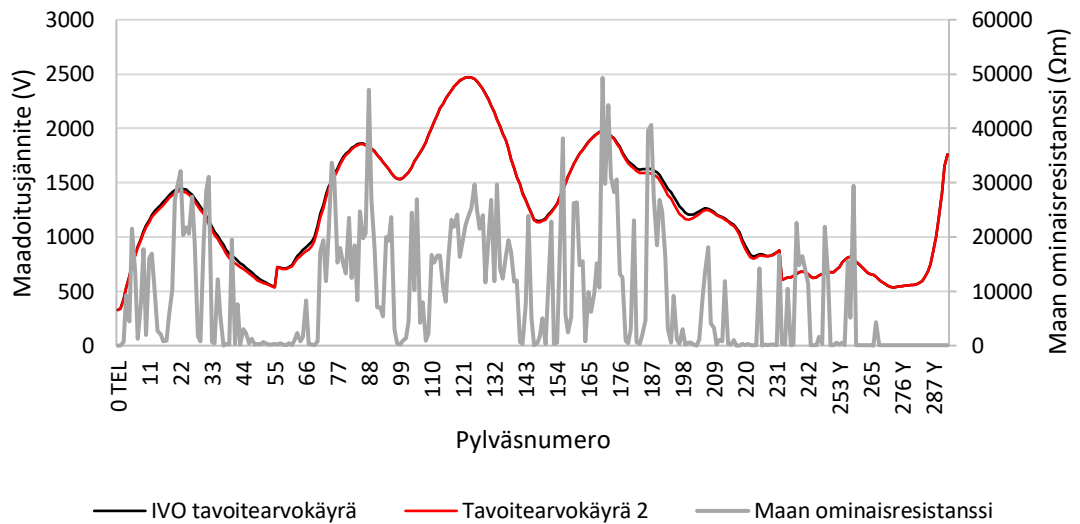
Taulukko 17. Maadoitusten käyttörajat eri tavoitearvokäyrillä.

	Tavoitearvokäyrä 1	Tavoitearvo- käyrä 2	Tavoitearvo- käyrä 3	IVO tavoitear- vokäyrä
Perusmaadoitus (Ωm)	0–70	0–70	0–70	0–70
1 säde (Ωm)	71–600	71–275	71–350	71–300
2 sädettä (Ωm)	601–1080	276–1080	351–1080	301–1075
3 sädettä (Ωm)	1081–1630	1081–1630	1081–1630	1076–2210
4 sädettä (Ωm)	1631–	1631–	1631–	2211–

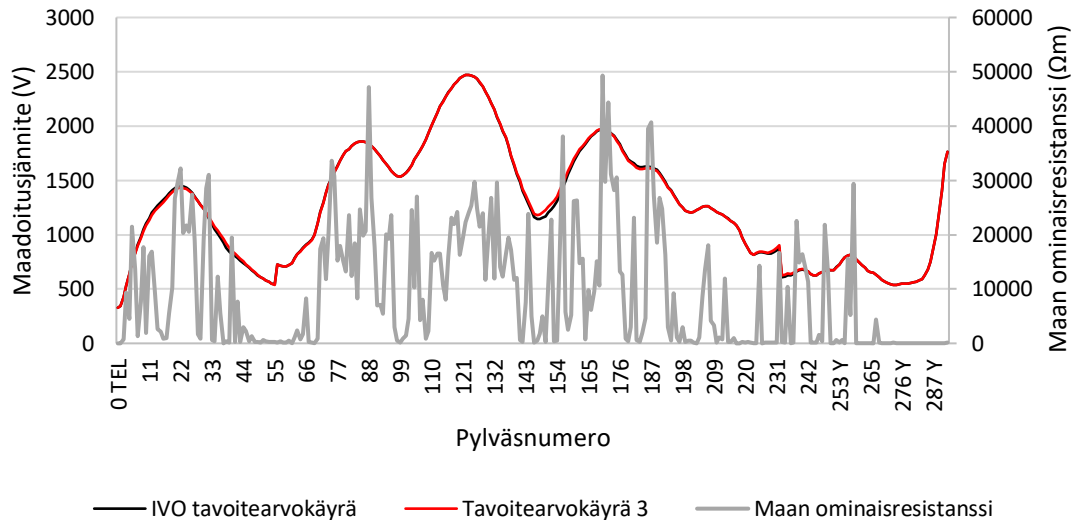
Tarkastelun voimajohdon pylvässijaintien maan ominaisresistanssit luettiin maadoituspöytäkirjoista, jonka jälkeen maadoitukset suunniteltiin pylväille käyttörajoja hyödyntäen. Maan ominaisresistanssin perusteella voitaisiin ensin lukea maadoitusresistanssille tavoitearvo. Tarkastelussa tavoitearvoja ei kuitenkaan muodostettu, vaan maan ominaisresistanssin perusteella laskettiin suoraan maadoitusresistanssi huomioiden säteiden käyttörajat. Koska elektrodeille käytetään vakiopituuksia, ei tavoitearvon lukeminen ole tässä tarkastelussa oleellista. Maadoitusresistanssien laskuissa hyödynnettiin samoja periaatteita kuin luvussa 3.1 on esitetty. Maadoitusresistanssien avulla voimajohdolle muodostettiin potentiaalikuvaajat hyödyntäen Vaarajännite-sovellukseen pohjautuvaa Excel-tiedostoa. Tiedosto laskee automaattisesti pylväiden maadoitusjännitteet ekvivalenttisen impedanssin \bar{Z}_E sekä ekvivalenttisen virran \bar{I}_E avulla. Ekvivalenttiset arvot esiteltiin luvussa 2. Edellä olevat toimenpiteet suoritettiin voimajohdolle myös nykyistä Imatran Voiman luomaa tavoitearvokäyrää hyödyntäen. Vaikka tavoitearvokäyrä ei tavoittelekaan tiettyjä potentiaaleja tai turvallisuusvaatimusten täyttymistä, kuvaavat potentiaalikuvaajat käytännönläheisesti käyrien suoriutumista. Kuvissa 31–33 esitetään käyrillä 1–3 muodostetut potentiaalikuvaajat verrattuna nykyisellä käyrällä muodostettuun potentiaalikuvaajaan.



Kuva 31. *Tavoitearvokäyrällä 1 ja IVO:n tavoitearvokäyrällä aikaansaavat potentiaalikuvaajat.*



Kuva 32. *Tavoitearvokäyrällä 2 ja IVO:n tavoitearvokäyrällä aikaansaavat potentiaalikuvaajat.*



Kuva 33. *Tavoitearvokäyrällä 3 ja IVO:n tavoitearvokäyrällä aikaansaavat potentiaalikuvaajat.*

Kuvista huomataan, että tavoitearvokäyrällä 2 saavutetaan paikoittain pienemmät maadoitusjännitteet kuin IVO:n käyrällä. Tavoitearvokäyrällä 1 ja 3 puolestaan saavutetaan paikoittain suuremmat maadoitusjännitteet kuin IVO:n käyrällä. Erot potentiaalikuvaajissa ovat suhteellisin pieniä riippumatta käytetystä tavoitearvokäyrästä. Tämä johtuu osittain siitä, että ensimmäinen käännepiste on kiinnitetty kaikissa tavoitearvokäyrissä samaan kohtaan. Varmaa tietoa ei ole miten maadoitukset on historiallisesti suunniteltu mutta voidaan olettaa, että IVO:n käyrää on käytetty yleisesti, sillä se esiintyy aiheeseen liittyvässä kirjallisuudessa usein. Lisäksi työssä tehdyn kyselyn perusteella useat suunnittelijat käyttävät IVO:n käyrää. Näin ollen nykyinen takaiskutiheys on seurausta ainakin osittain IVO:n tavoitearvokäyrästä. Koska uusien käyrien pohjaksi valittiin nykyinen takaiskutiheys, ohjaa tämä edelleen lähemmäs IVO:n käyrää. Näin ollen potentiaalikuvaajien läheisyys on odotettavissa.

Tavoitearvokäyrällä 1 päädytään potentiaalikuvaajan perusteella suurempiin maadoitusjännitteisiin kuin IVO:n käyrää käyttämällä. Näin ollen päädyttäisiin myös suurempaan takaiskutiheyteen. Taulukon 17 säteiden käyttörajoja tarkastelemalla kuitenkin huomataan, että tietyillä maan ominaisresistansseilla puolestaan päästäisiin IVO:n käyrää pienempiin takaiskutiheyksiin. Tavoitearvokäyrää muodostamisessa tavoitteena on kuitenkin pyrkiä kompensoimaan suurten ominaisresistanssien aikaansaamia korkeita takaiskutiheyksiä. Tämä kompensointi on tehokkaampaa suorittaa pienen ominaisresistanssin maaperässä. Esimerkiksi 1500 Ωm :n maaperässä 40 metrin lisäys 140 metrin maadoituselektrodiin laskee takaiskutiheyden noin 0,57 suuruudesta noin 0,37 takaiskutiheyteen. 130 Ωm :n maaperässä 40 metrin lisäys perusmaadoituksen rinnalle puolestaan laskee takaiskutiheyden noin 0,5 suuruudesta noin 0,02 suuruuteen. Suhteellisesti

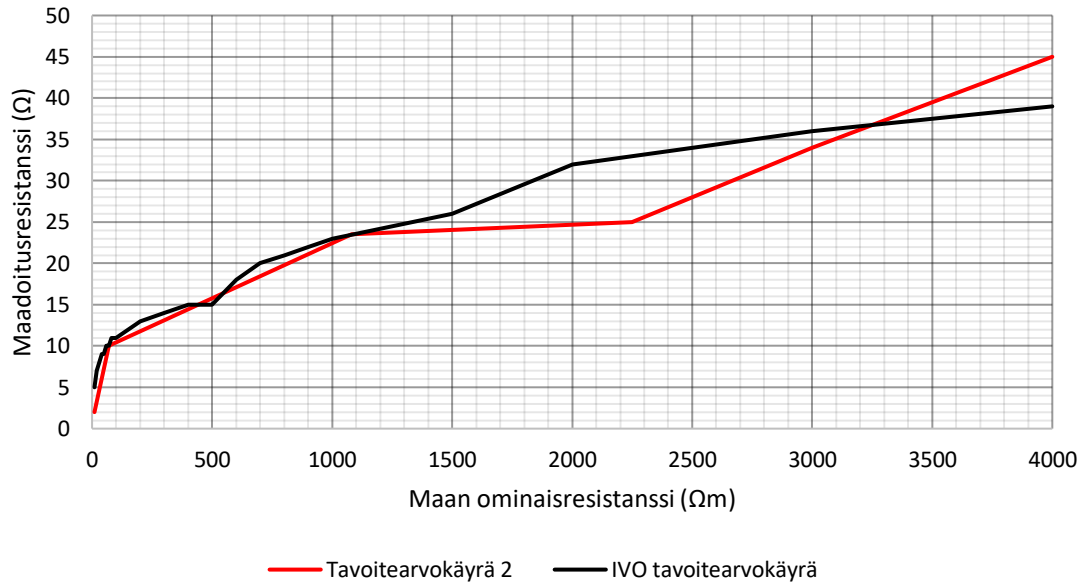
takaiskutiheys pienenee 1500 Ω m:n maaperässä noin 34 % ja 130 Ω m:n maassa noin 95 %. Edellä mainituista syistä tavoitearvokäyrä 1 käyttöönottoa ei voida perustella.

Tavoitearvokäyrien 2 ja 3 avulla muodostettujen potentiaalikuvaajien erot ovat suhteellisen pienet. Tavoitearvokäyrällä 3 päädytään paikoittain suurempiin potentiaaleihin kuin IVO:n käyrää hyödyntämällä. Tavoitearvokäyrällä 2 puolestaan päädytään aina pienempiin potentiaaleihin. Tavoitearvokäyrissä ainoa ero on käyrällä 3 oleva ylimääräinen käännepeiste, joka siirtää yhden säteen käyttörajaa. Käyttöraja kuitenkin kasvaa yli IVO:n käyttörajan, joka johtaa suurempiin potentiaaleihin sekä takaiskutiheyksiin. Toisaalta tavoitearvokäyrän kolmen säteen käyttöraja loppuu aiemmin kuin IVO:n käyrällä. Tämä todennäköisesti kompensoisi takaiskutiheyttä riittävästi, jolloin kokonaistakaiskutiheys olisi pienempi kuin IVO:n käyrää käyttämällä.

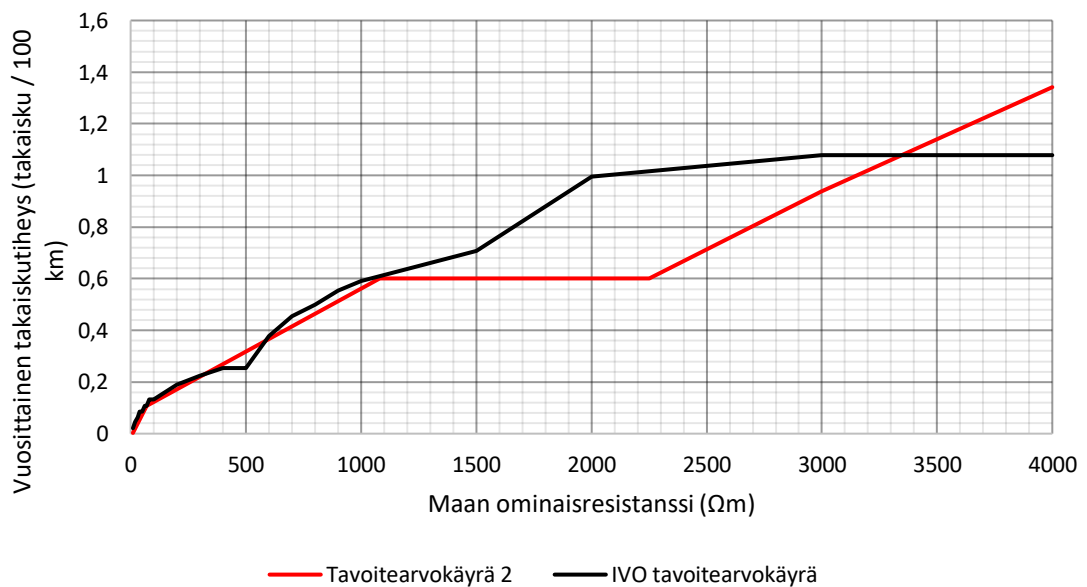
Tavoitearvokäyrä 3 huomioi KAH:sta saatavaa hyötyä suhteessa enemmän kuin tavoitearvokäyrä 2. Kuitenkin tulee huomioida, ettei kummassakaan tapauksessa KAH-sovite ole yhteneväinen yhden säteen maadoitusresistanssisuoran kanssa. Lisäksi KAH-tarkastelu perustuu nykyiseen Energiaviraston malliin eikä varmuutta tulevaisuuden KAH arvostamisesta ole. Toisin sanoen ylimääräisen käännepeisteen kiinnitys puhtaasti KAH-tarkastelun perusteella on kyseenalaista. Käännepeisteen ero myös luo tilanteen, jossa tavoitearvokäyrällä 3 päädytään suurempiin takaiskutiheyksiin kuin IVO:n käyrällä. Näin ollen voidaan todeta, että kolmesta luodusta käyrästä tavoitearvokäyrä 2 vaikuttaa parhaiten käyttötarkoitukseen sopivalta. Koska käyrällä päädytään nykyistä pienempiin maadoitusjännitteisiin, voidaan myös olettaa, että kosketusjännitevaatimukset täyttyvät useammin kuin IVO:n käyrää hyödyntämällä. Näin ollen maadoitus suunnittelun vaihe, jossa tarkastellaan henkilöturvallisuutta, nopeutuisi samalla laskien kustannuksia. Toisaalta maadoituskustannukset kasvavat käytetyn materiaalin suhteessa, joten vaikutus kokonaiskustannuksiin voi todellisuudessa jäädä huomaamattomaksi.

6.1 Uusi tavoitearvokäyrä

Edellä luotuja tavoitearvokäyriä on verrattu nykyiseen IVO:n tavoitearvokäyrään epäsuorasti. Vertaamalla käyriä suoraan toisiinsa nähdään erot selkeästi halutulla maan ominaisresistanssin väleillä. Kuvassa 34 ja 35 esitetään Imatran Voiman luoma tavoitearvokäyrä sekä tavoitearvokäyrä 2 maadoitusresistanssin tai takaiskutiheyden ja maan ominaisresistanssin suhteen.



Kuva 34. IVO:n tavoitearvokäyrä sekä tavoitearvokäyrä 2 esitettynä maadoitusresistanssin ja maan ominaisresistanssin suhteen.



Kuva 35. IVO:n tavoitearvokäyrä sekä tavoitearvokäyrä 2 esitettynä vuosittaisen takaiskutiheyden ja maan ominaisresistanssin suhteen.

Kuvista huomataan taulukon 17 arvoja paremmin, miten tavoitearvokäyrät eroavat toisistaan. Lisäksi taulukon 17 käyttörajat eivät suoraan kerro tavoittelevatko eri tavoitearvokäyrät kaikkialla pienempiä maadoitusresistansseja kuin IVO:n käyrä. Tämä johtuu IVO:n käyrän logaritmisesta asteikosta, joka johtaa kaarevuuteen lineaarisessa asteikossa. Näin ollen IVO:n käyrä voi alittaa luodun tavoitearvokäyrän, vaikka sen säteiden käyttörajat olisivatkin suuremmat. Maadoituselektrodien vakiopituuksia käytettäessä ei tämä kuitenkaan käytännössä vaikuta saavutettuihin maadoitusresistansseihin.

Kuvassa esitetty IVO:n tavoitearvokäyrä on luotu visuaalisesti luettujen arvojen pohjalta ja se vastaa 0,5 ohmin tarkkuudella IVO:n tarkkaa käyrää. Tavoitearvokäyrä 2 tavoittelee lähes koko kuvaajien kattamalla alueella pienempiä maadoitusresistanssien arvoja. Näin ollen vakiopituuksista luopuessakin päädyttäisiin pienempiin takaiskutiheyksiin.

Kuvasta kuitenkin huomataan, että käyrät lähestyvät toisiaan ja noin 3200–3300 ohmi-metrissä ne leikkaavat toisensa. Leikkauspisteet ovat eri kohdissa, jonka aiheuttaa todennäköisesti laskennan virhemarginaali sekä maadoitusresistanssin epäsuora suhde takaiskutiheyteen. IVO:n tavoitearvokäyrä pyrkii siis pienempiin maadoitusresistansseihin tiettyä maan ominaisresistanssia suuremmilla arvoilla. Vaikka IVO:n tavoitearvokäyrän luomisperusteita ei tiedetä varmasti, pystytään saatavilla olevasta materiaalista pääättelemään, että käyrän luonnissa on huomioitu myös läpimenevät maadoitukset. Kyseisiä maadoituksia ei kuitenkaan enää käytetä, joten niitä ei myöskään uuteen tavoitearvokäyrään ole järkevää sisällyttää. Käytännössä tällä ei ole kuitenkaan merkitystä, sillä neljä sädettä on tämänhetkisessä maadoitussuunnittelussa suurin käytetty konfiguraatio. Läpimenevien maadoitusten tarpeellisuutta ei tässä työssä tarkastella.

Tarkastelun lopputuloksena valitaan tavoitearvokäyrä 2 uudeksi 110 kV:n maadoitussuunnittelun tavoitearvokäyräksi. Aiemmin on jo todettu, ettei eri pylvästyypeille tai sala-maolosuhteille luoda omia tavoitearvokäyriään, vaan kaikille käytetään samaa käyrää. Toistaiseksi ei kuitenkaan ole vielä tarkasteltu tavoitearvokäyrää 400 kV näkökulmasta.

Vuoden 2010 jälkeen käyttöön otetuista 400 kV:n pylväistä noin kolmannes on Hx-pylväitä ja noin puolet on muita H-pylväitä. Hx-pylväiden osuus on siis suhteellisesti suurempi kuin 110 kV:n puolella. 400 kV:n puolella takaiskunäkökulma tavoitearvokäyrään on kuitenkin rajallisempi kuin 110 kV:lla. Ukkosen aiheuttamista häiriöistä 400 kV:lla maasulkuja on noin 79 % mutta kaikista maasuluista ukkonen aiheuttaa noin 31 %. Ukkosen aiheuttamien maasulkujen suhteellinen määrä on siis samaa suuruusluokkaa kuin 110 kV:n 29 %.

Eristinketjun syöksyjännitelujuus on 400 kV:n rakenteilla kuitenkin huomattavasti suurempi, jolloin voidaan olettaa takaiskujen osuuden olevan pienempi kaikista ukkosen aiheuttamista maasuluista. Tällä oletuksella takaiskujen vaikutus 400 kV:n maadoitussuunnitteluun ei ole samassa asemassa kuin 110 kV:lla. Lisäksi 400 kV:n verkossa keskeytyksistä aiheutuva haittaa ei lasketa. Toisin sanoen tavoitearvokäyrän yhdistäminen kustannusnäkökulmaan vaikeutuu. Muutkaan maadoitussuunnittelun näkökulmat eivät kuitenkaan tarjoa 400 kV:lle järkeviä lähtökohtia niin kuin eivät 110 kV:lle. Lisäksi kahden eri lähestymistavan käyttäminen eri jännitetasoille lisäisi kompleksisuutta, joka ei ole

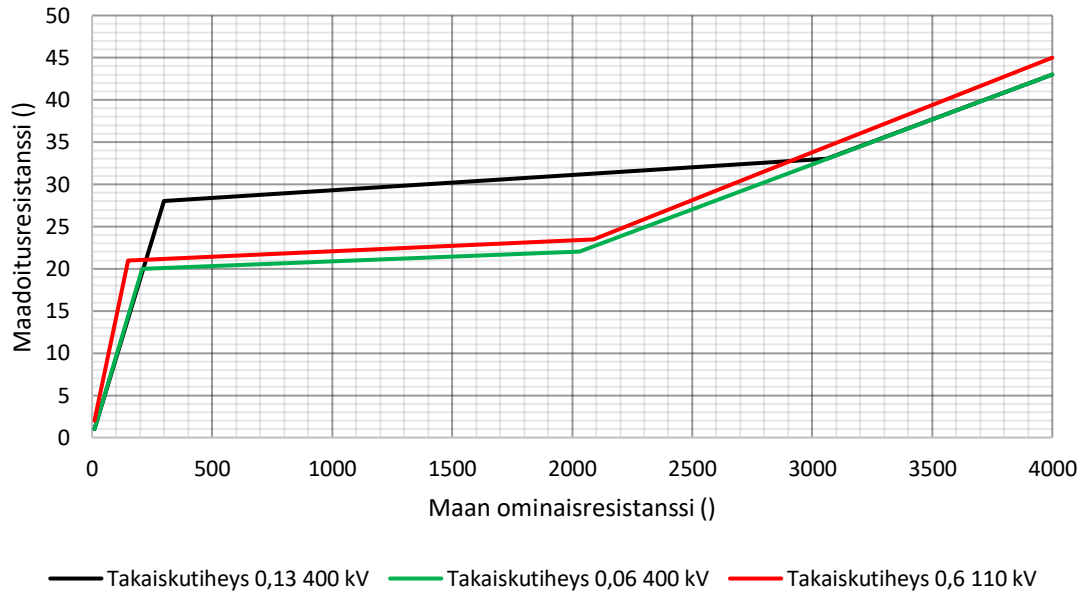
perusteltua hyötyjen puuttuessa. Tästä syystä 400 kV:n tavoitearvokäyrä lähdetään muodostamaan pohjautuen 110 kV:n tavoitearvokäyrään 2.

Ennen kuin 400 kV:lle voidaan muodostaa tavoitearvokäyrä 110 kV:n käyrään pohjautuen, täytyy muodostaa kuvaa 20 vastaava takaiskutiheyttä mukailevat kuvaaja. Tätä varten suoritettiin takaiskutiheyslaskenta samoin periaattein kuin 110 kV:lla. Laskennassa käytetyt arvot esitetään taulukossa 18.

Taulukko 18. Takaiskutiheyden laskentaparametrit 400 kV:n H-pylväälle.

H-Pylväs	
U_{50} (kV)	1352
ρ (Ωm)	10–10000
GFD (vuosittaiset maasalamat neliökilometrillä)	0,44
t_F (μs)	1,2
τ (μs)	10
K_{sp}	0,6
N_L	11
H_t (m)	34,6
T_T (ns)	134,7
T_A (ns)	102,8
b (m)	14
Z_T (Ω)	133
C_1	0,313
C_2	0,296
C_3	0,253

Koska 110 kV:n tavoitearvokäyrä pohjautuu H-pylvääseen, riittää 400 kV:n laskennassa vain H-pylvään rakenteilla lasketut takaiskutiheydet. Lisäksi 400 kV:n H- ja Hx-pylväiden rakenteet ovat suhteellisen lähellä toisiaan. Näin ollen voidaan olettaa, että myös takaiskutiheydet ovat lähellä toisiaan samoilla maadoitusresistansseilla ja maan ominaisresistansseilla. Laskennan perustella muodostettu 0,13 sekä 0,06 takaiskutiheyksiä mukailevat kuvaajat esitetään kuvassa 36. Kuvassa esitetään myös 110 kV:n H-pylvään takaiskutiheyttä 0,6 mukaileva kuvaaja.



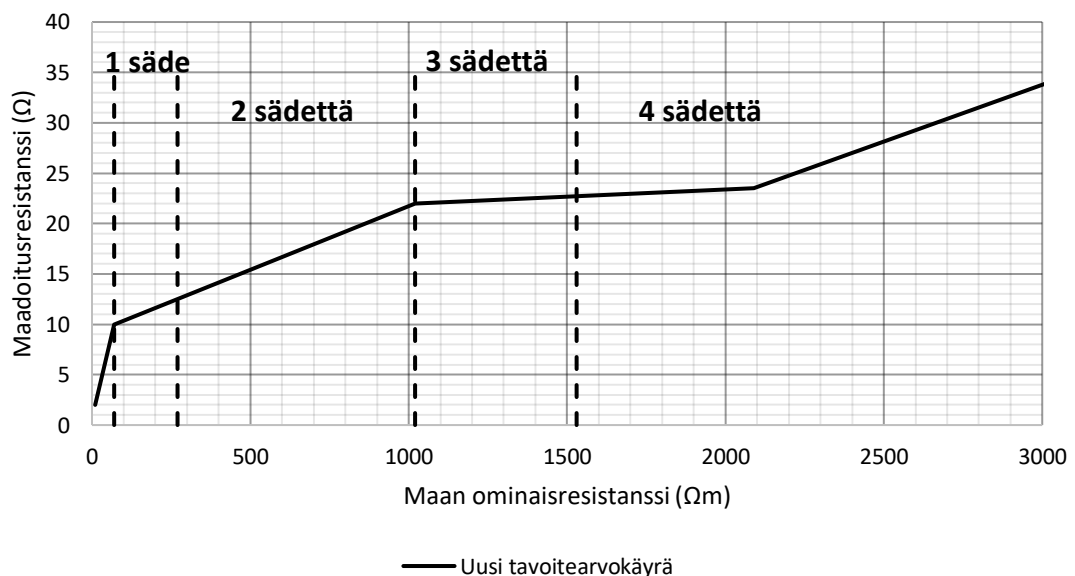
Kuva 36. 400 kV:n H-pylvään takaiskutiheyksiä 0,13 ja 0,06 mukailevat kuvaajat esitetynä 110 kV:n H-pylvään 0,6 takaiskutiheyskuvaajan kanssa.

Koska 400 kV:n pylväillä eristinketjujen jännitelujuus on huomattavasti suurempi, voidaan olettaa takaiskujen määrän olevan suhteessa pienempi kuin 110 kV:n pylväillä. On kuitenkin hankalaa arvioida, kuinka suuri osuus takaiskuilla on kaikista ukkosen aiheuttamista maasuluista. Voidaan olettaa, että maadoitussuunnittelussa on tähän mennessä todennäköisesti käytetty samaa IVO:n tavoitearvokäyrää molemmille jännitetasoille. Näin ollen tulisi 400 kV:n takaiskutiheyskäyrän vastata 110 kV:n takaiskutiheyskäyrää. Tästä syystä voidaan 400 kV:n takaiskutiheys arvioida pohjautuen 110 kV:n takaiskutiheyttä mukailevaan käyrään. Kuvasta huomataan, että 400 kV:n H-pylväällä 0,06 takaiskutiheys vastaa suhteellisen hyvin 110 kV:n H-pylvään takaiskutiheyttä 0,6. Vaikka kuvaajat eivät vastaa täysin toisiaan, ei vaikutus ole kriittinen tarkastelussa. Molemmat kuvaajat on muodostettu H-pylväille mutta tilastoidut maasulkutiheydet koostuvat kaikista pylväistä. Maadoitussuunnitteluun vaikuttaa myös suurissa määrin turvallisuuskulma, joka vaikuttaa nykyiseen takaiskutiheyteen IVO:n käyrän lisäksi. Lisäksi 110 kV:n takaiskutiheys 0,6 on jo lähtökohtaisesti arvio, jolloin tarkan takaiskutiheyden johtaminen 400 kV:lle ei ole mahdollista. Kuvan havainnon pohjalta voidaan kuitenkin olettaa, että 400 kV:n takaiskutiheys on korkeintaan suuruusluokkaa puolet maasulkutiheydestä.

Olettamalla 400 kV:n takaiskutiheys noin 0,06 tasolle, ei ole järkevää lähteä muodostamaan 400 kV:lle omaa tavoitearvokäyrää, sillä erot jäisivät hyvin pieniksi. Lisäksi yhteisellä käyrällä maadoitussuunnittelun kokonaisuus pysyy yhtenäisenä ja tehokkaana. Erot kuvan käyrien alussa ja lopussa johtuvat pylväsalkojen välisestä etäisyydestä, joka vaikuttaa perusmaadoituksen vaakaelektrodin pituuteen. Lisäksi 400 kV:n takaiskutiheys

0,06 ei vastaa täysin 110 kV:n takaiskutiheyttä 0,6, joka vaikuttaa käyrän keskikohtaan. Tämän lisäksi 400 kV laskennassa on käytetty elektrodin poikkipinnalle 25 mm², jonka vaikutus jää kuitenkin pieneksi, kuten luvussa 4 havaittiin. Edellä mainituista syistä molemmille jännitetasoille on perusteltua käyttää samaa tavoitearvokäyrää. Suurin yksittäinen tekijä yhteiseen käyrään molemmille jännitetasoille on historialliset syyt. Vaikka 400 kV:lle käytettäisiin jotain muuta tavoitearvokäyrää, täytyisi käyrän pyrkiä silti samoihin tai alempiin maadoitusresistansseihin. Muuten takaiskutiheys kasvaisi nykyisestä, mitä on vaikea perustella.

Aiemmin esitetyt muodot tavoitearvokäyrästä ovat havainnollistavia, mutta käytännön kannalta ne eivät ole kovinkaan hyödyllisiä. Esimerkiksi lisämaadoitusten suorilta ei ole järkevää lukea aikaansaattua maadoitusresistanssia, sillä tarkkaan tulokseen päästään yhtä nopeasti laskemalla saavutettava maadoitusresistanssi. Tuloksen tarkkuus käyrältä luettuna sinänsä riittäisi, sillä maadoitusresistanssin ei tarvitse olla laskettuna kymmenesosien tarkkuuteen. Tämä johtuu siitä, ettei todellisuudessa saavutettava maadoitusresistanssi kuitenkaan vastaa yhtä tarkasti laskettua arvoa. Esimerkiksi maan epähomogeenisuus sekä maan kosteuden vaihtelut vaikuttavat arvoihin, jolloin kokonaislukuun pyöristetty maadoitusresistanssin arvo riittää maadoitussuunnittelussa. Lisäksi maadoitussuunnittelun tehokkuuden kannalta esimerkiksi Excel-taulukko laskee saavutettavan maadoitusresistanssin nopeammin kuin käyrältä luettuna. Lisämaadoitusten maadoitusresistanssisuorien sijaan tavoitearvokäyrässä esitetään pystysuuntaiset rajat, jotka näyttävät mitä lisämaadoitusta tulee käyttää tavoitteeseen päästäkseen. Luotu tavoitearvokäyrä lisämaadoitusten rajoilla esitetään kuvassa 37.



Kuva 37. Työssä muodostettu uusi tavoitearvokäyrä.

Kuvan käyrä esitetään myös liitteessä 2 suurempana. Kuvan tavoitearvokäyrä ei eroa aiemmin luodusta käyrästä muuten kuin lisämaadoitusten esitystavalla. Uusi luotu tavoitearvokäyrä ei ole logaritmisella asteikolla, kuten IVO:n luoma käyrä. Näin ollen käyrän muodostaminen tarkasti muiden tahojen puolesta on yksinkertaista. Käyrän muodostamiseen tarvittavat pisteet esitetään taulukossa 19.

Taulukko 19. Luodun tavoitearvokäyrän pisteet sekä maadoitusten käyttörajat.

Tavoitearvokäyrän pisteet (Ωm , Ω)	Maadoitusten käyttörajat
(10, 2)	Perusmaadoitus: 0–70 Ωm
(70, 10)	1 säde: 71–275 Ωm
(1080, 23,5)	2 sädettä: 276–1080 Ωm
(2250, 25)	3 sädettä: 1081–1630 Ωm
(3000, 34)	4 sädettä: 1631– Ωm
(10000, 112)	

Taulukossa esitetään myös ylimääräinen piste (10000, 112), jota ei kuvan 37 käyrällä esitetä. Ylimääräisellä pisteellä käyrää voidaan jatkaa myös suuremmille ominaisresistanssin arvoille. Aiemmin on kuitenkin mainittu, että käyrä noudattaa 2250 Ωm :n jälkeen neljällä säteellä aikaansaataavaa maadoitusresistanssia. Näin ollen käyrän jatkaminen suurille ominaisresistansseille ei tuo lisäarvoa tavoitearvokäyrään. Taulukossa esitetyistä maadoitusten käyttörajoista saatavat ylärajat edustavat kuvan pystykatkoviivoja. Vapaasti seisovalla pylväällä perusmaadoitukseen kuuluu yksi säteittäinen elektrodi, joten käyttörajat eivät ole suoraan käytettävissä. Vapaasti seisovien pylväiden tapauksessa perusmaadoituksen ja yhden säteen käyttörajaa tulee käyttää yhtenäisenä. Toisin sanoen vapaasti seisovien pylväiden perusmaadoituksen käyttörajaksi muodostuu 0–275 Ωm .

Tavoitearvokäyrässä kahden säteen yläraja on määritetty 80 metrin lisämaadoituspituuksella. Toisin sanoen kahta sädettä on kuvattu kahdella radiaalisella säteellä. Kuitenkin säteiden ollessa samaan suuntaan, yhdistetään ne päistään, jolloin säteet muodostavat silmukan. Tästäkin tilanteesta kuitenkin käytetään nimitystä kaksi sädettä ja lisämaadoituksen kokonaispituus on 100 metriä. Saman suuntaisilla säteillä saavutetaan vain noin 8 % pienempi maadoitusresistanssi, joten tavoitearvokäyrään ei ole tarpeellista sijoittaa erillisiä käyttörajoja tälle tilanteelle. Maadoitusresistanssin suhteellisen pieni parannus johtuu siitä, että kaksi radiaalista sädettä kytkeytyvät molemmat rinnan perusmaadoituksen kanssa. Silmukka puolestaan kytkeytyy yhtenä kokonaisuutena rinnan perusmaadoituksen kanssa.

Asemien lähellä IVO:n tavoitearvoja käytetään kertoimella 0,5 eli tavoiteltava maadoitusresistanssi on puolet käyrän osoittamasta. Näin pyritään pienentämään asemalla

esiintyviä ylijännitteitä. Tämän työn perusteella ei ole perusteltua poistaa tätä käytäntöä. Lisäksi uusi tavoitearvokäyrä on samanlainen IVO:n käyrän kanssa, jolloin kerroin toimii ylijännitteiden pienentämisessä. Nykyisessä maadoitussuunnittelussa käytetään 0,75 kerrointa, kun maadoitukset yhdistetään rinnakkaisen johdon maadoituksiin. Alustavasti myös tämä menettely säilytetään maadoitussuunnittelussa.

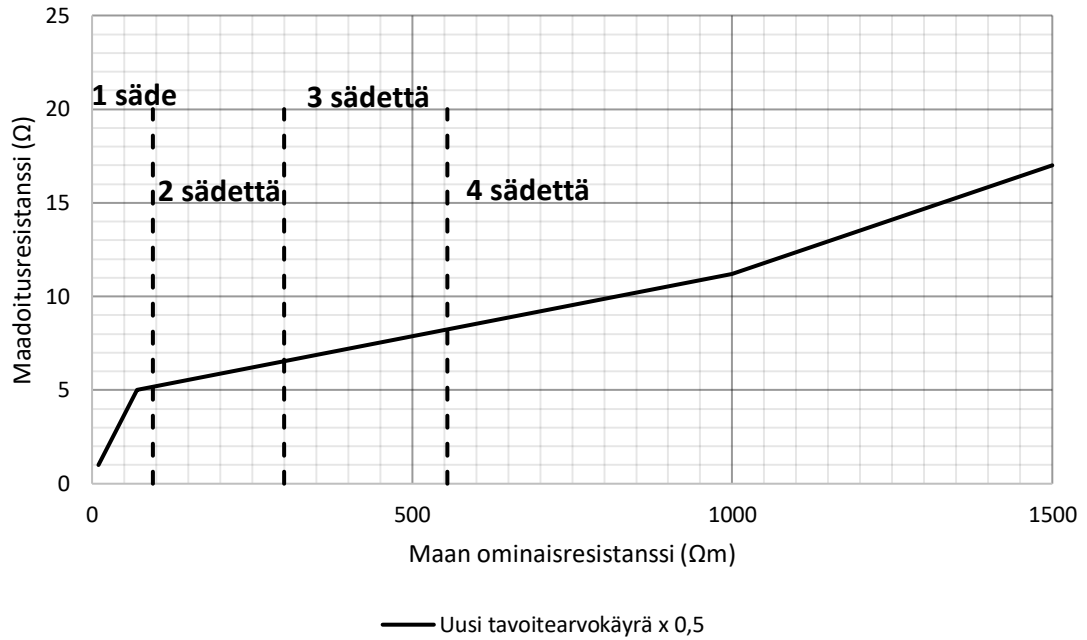
Käytettävät kertoimet laskevat tavoitearvokäyrää alemmas y-akselilla ja samalla säteiden käyttörajat siirtyvät pienemmän maan ominaisresistanssin suuntaan. Käyttörajojen kertominen samalla kertoimella kuin tavoitearvokäyrä ei kuitenkaan johda oikeisiin tuloksiin. Sen sijaan käyttörajojen sijainnit täytyy tarkastella erikseen. Kertoimilla 0,5 sekä 0,75 kerrottujen tavoitearvokäyrien säteiden käyttörajat esitetään taulukossa 20.

Taulukko 20. Lisämaadoitussäteiden käyttörajat kertoimilla 0,5 ja 0,75 kerrotun tavoitearvokäyrän tapauksissa.

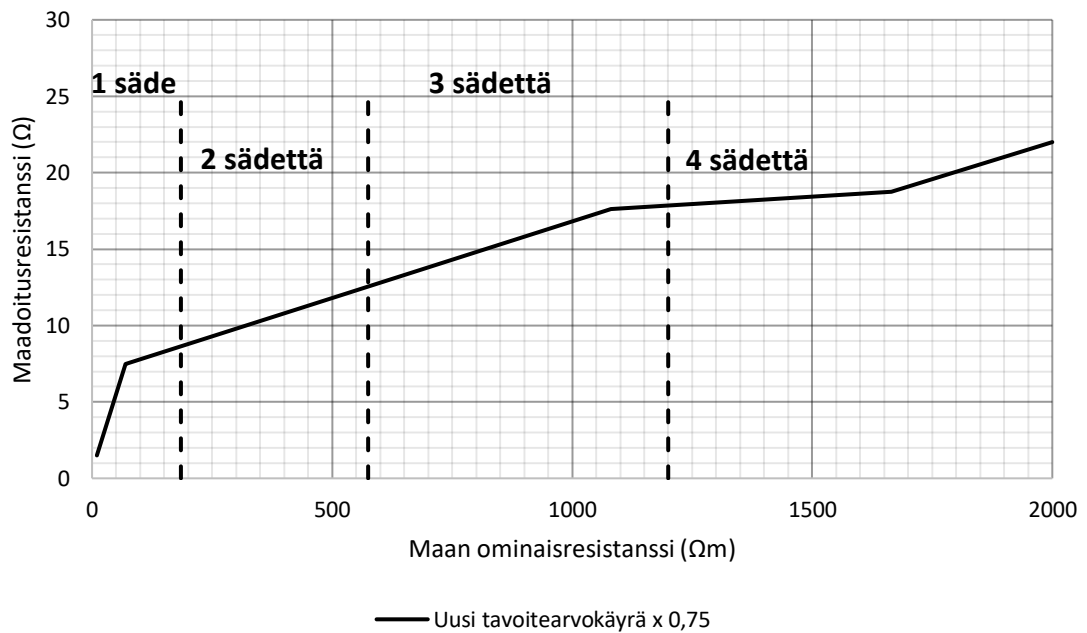
	Kerroin 0,5	Kerroin 0,75
1 säde (Ωm)	10–95	10–185
2 sädettä (Ωm)	96–300	186–575
3 sädettä (Ωm)	301–555	576–1200
4 sädettä (Ωm)	556–	1201–

Taulukossa yhden säteen alaraja on 10 Ω m, sillä pienemmän maan ominaisresistanssit eivät ole realistisia. Perusmaadoituksen käyttörajaa ei taulukoissa ole, sillä perusmaadoituksella ei päästä kertoimellisten tavoitearvokäyrien arvoihin millään maan ominaisresistanssin arvoilla. Perusmaadoituksen riittämättömyyden selittää uuden tavoitearvokäyrän alkuosan muodostusperiaate, joka seuraa perusmaalla aikaansaatua maadoitusresistanssia. Näin ollen alkuperäistä pienemmät arvot eivät ole mahdollisia pelkällä perusmaadoituksella.

Uudessa tavoitearvokäyrässä viimeinen käännepiste on neljän säteen käytön yläraja, jonka jälkeen käyrä seuraa neljällä säteellä aikaansaatavaa maadoitusresistanssia. Näin ollen kertomalla tavoitearvo kertoimella 0,5 tai 0,75 päädytään käyrään, jonka tavoitearvoja ei voida saavuttaa. Muokkaamalla käyrät taulukon 20 käyttörajojen perusteella päädytään tavoitearvoihin, jotka voidaan saavuttaa koko käyrällä. Tällä tavalla käyrät eivät kuitenkaan vastaa muodoltaan uutta tavoitearvokäyrää. Molemmilla tavoilla suunnittelussa päädytään täysin samoihin maadoitusresistansseihin, sillä käyttörajat ovat molemmilla tavoilla samat. Säilyttämällä tavoitearvokäyrän muoto päädyttäisiin visuaalisesti yksinkertaisempaan ratkaisuun. Ei ole kuitenkaan järkevää luoda tavoitearvokäyrää, jonka tavoitearvoihin ei ole mahdollista päästä. Tästä syystä kuvissa 38 ja 39 esitetään käyttörajojen perusteella muokatut kertoimelliset tavoitearvokäyrät.



Kuva 38. Uusi tavoitearvokäyrä muokattuna kertoimella 0,5.



Kuva 39. Uusi tavoitearvokäyrä muokattuna kertoimella 0,75.

Käytännössä käyrästä on muokattu vain loppuosaa ja alkuosa muodostuu kertoimen avulla. Käyrän loppuosaa seuraa neljällä säteellä saavutettavaa maadoitusresistanssia viimeisestä käännealueesta eteenpäin. Näin ollen tavoitearvokäyrän arvoihin on mahdollista päästä kaikissa käyrän sijainneissa. Käyrän muokkaus johtuu pääasiassa vakioelektrodipituudesta sekä määritetystä 200 metrin maksimipituudesta. Jos

maadoituselektrodeille ei käytetä vakio pituuksia, voitaisiin uusi tavoitearvokäyrä vain kertoa eri kertoimilla.

6.2 Maadoitussuunnittelun kokonaisuus sekä muutokset

Yhtenä työn tavoitteena on tarkastella maadoitussuunnittelua kokonaisuutena ja pyrkiä yhtenäistämään suunnittelu. Näin ollen on tarpeellista käsitellä uuden tavoitearvokäyrän käyttö ja maadoitussuunnittelun kulku ylätasolta tarkasteltuna. Samalla esitetään mahdolliset muutokset maadoitussuunnittelun kokonaisuuteen. Luotu tavoitearvokäyrä on lähellä nykyistä IVO:n käyrää. Olettaen, että IVO:n käyrä on ollut kaikilla maadoitussuunnittelutahoilla käytössä, ei maadoitussuunnittelun kokonaisuuden siis pitäisi muuttua kovinkaan suuresti.

Luotua tavoitearvokäyrää käytetään samoin periaattein kuin IVO:n käyrää. 110 ja 400 kV:lle käytetään samaa käyrää, jolloin jännitetasoa ei tarvitse tavoitearvokäyrää käyttäessä huomioida. Pylvässijainnin maan ominaisresistanssin perusteella käyrältä luetaan ominaisresistanssia vastaava maadoitusresistanssin arvo. Tavoiteltavaan maadoitusresistanssiin tai sen alle päädytään käyttämällä käyrästä määrittämää maadoitustapaa. Näin ollen erillistä tarkastelua käytettävistä sädemääristä ei tarvitse suorittaa. Käytännössä käyrältä luettu arvo toimii vain suuntaa antavana tavoitteena, sillä saavutettavan maadoitusresistanssin määrää päätetyt säteiden käyttörajat. Näin ollen suurimmassa osassa tapauksista päädytään tavoitearvoa pienempään laskennalliseen maadoitusresistanssiin. Pelkillä säteiden käyttörajoilla voitaisiin suorittaa alustava maadoitussuunnittelu, jolloin käyrää ei varsinaisessa suunnittelussa tarvita. Tavoitearvokäyrä halutaan kuitenkin säilyttää, sillä vakioelektrodipituuksien ei voida olettaa pysyvän aina samoina. Näin ollen pelkillä käyttörajoilla päädyttäisiin hyvin erilaiseen tulokseen vakio pituuksien muuttuessa. Lisäksi käyrän avulla on mahdollista selvittää säteiden käyttörajat uudelleen vaivattomasti.

Edellä esitetty tapaus koskee kuitenkin vain tilanteita, joissa käytetään 100 % tavoitearvoa. Asemien lähellä tulee käyttää 0,5 kerrottua tavoitearvokäyrää ja sen käyttörajoja. Jälleen tehokkainta on vain valita maan ominaisresistanssista riippuva maadoitustapa käyttörajojen mukaan. Jos pylvään maadoitukset yhdistetään rinnakkaisen voimajohdon maadoituksiin, tulee käyttää 0,75 kertoimellista käyrää ja sen käyttörajoja. Lisäksi molemmat maadoitukset tulee mitoittaa toimimaan itsenäisesti. Käyttämällä 0,75 kertoimellisia käyttörajoja ja tavoitearvokäyrää, mitoitetaan maadoitukset automaattisesti toimimaan itsenäisesti. Tämä johtuu siitä, että käyrä tai käyttörajat eivät huomioi muita maadoituksia.

Tavoitearvokäyrällä maadoitusresistanssille määritetään alustava tavoitearvo, joka tavoittelee tiettyä takaiskutiheyttä. Toisin sanoen erikseen täytyy tarkastella lainsäädännön ja eri vaatimusten määrittämät ehdot, jotka maadoitusten täytyy saavuttaa. Toisin sanoen muutosta aiempaan käytäntöön ei ole. Vaarajännitteet ja niiden aiheuttamat toimenpiteet tarkastellaan maapotentiaaliraportissa nykyisen ohjeistuksen mukaan. Toisin sanoen noudatetaan standardeja SFS-EN 50341 ja SFS 6001 sekä Traficomien ohjeita ja VHV-ohjeita. Standardeissa SFS-EN 50341 sekä SFS 6001 esitetään kosketusjännite-rajoiille toisistaan hieman eroavia arvoja. SFS 6001 on kansallinen velvoittava standardi (SFS 50341-2-7 2015). Näin ollen sen esittämien raja-arvojen käyttö perusteltua.

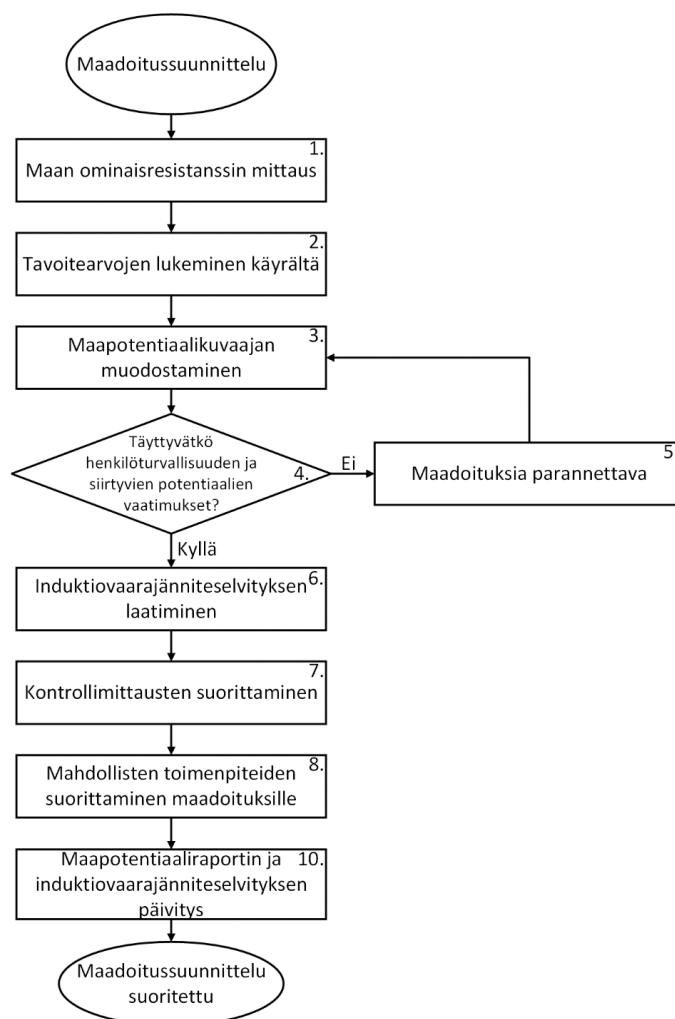
Erona nykyiseen toimintaan, tulee maadoitus suunnitteluun lisätä vaihe, jossa varmistetaan maadoituselektrodin termisestä kestävydestä. Lähtökohtaisesti 110 kV:lla tullaan kuitenkin jatkossa käyttämään 16 mm²:ä ja 400 kV:lla 25 mm²:ä kuten aiemminkin. Terminen kestoisuus muodostuu todennäköisimmin ongelmaksi yhdellä lisäsäteellä, sillä virta ei pääse jakautumaan usealle säteelle. Näin ollen termisen keston tarkastelussa erityishuomiota tulee kiinnittää sijainteihin, joihin on suunniteltu yksi lisäsäde. Koska yksittäisen pylvään maadoituksen läpi kulkevaan virtaan vaikuttavat myös muut pylvää, on tarkastelun suorittaminen koko johdolle tehokkainta. Näin ollen myös yhdestä säteestä eroavat tilanteet saadaan tarkastettua helposti. Tarkastelussa tulee kuitenkin huomioida virran jakaantuminen useammalle säteelle, jolloin virta ei todennäköisesti ole lähellä termistä kestoä. Lisäksi useampia säteitä käytetään suuremmilla maan ominaisresistansseilla, jolloin maadoitusresistanssit ovat suurempia. Näin ollen yksittäisen pylvään maadoituksen läpi kulkevat virrat ovat jo lähtökohtaisesti pienempiä. Maadoituselektrodin termisen kesto saadaan laskettua kaavalla 1. Yksittäisen pylvään maadoituksen läpi kulkeva virta voidaan laskea yksinkertaisesti kaavalla

$$\bar{I}_R = \frac{\bar{U}_P}{R_E}, \quad (35)$$

jossa \bar{I}_R on yksittäisen pylvään maadoitusten läpi kulkeva virta, \bar{U}_P on maadoitusjännite ja R_E on maadoitusresistanssi. Kompleksilukujen itseisarvoilla päästään myös riittäviin tuloksiin tarkastelua varten. Jos tarkastelun seurauksena todetaan termisen keston ylittävän yhdellä lisäsäteellä, tulee pylvääle suunnitella kaksi lisäsädettä. Toisin sanoen maadoituselektrodin poikkipinta pidetään kaikilla pylväillä yhtä suurena ja terminen kesto saavutetaan säteitä lisäämällä. Edellä mainituista syistä on epätodennäköistä, että terminen kesto ylittyy useamman säteen tapauksissa. Kaikkien pylväiden läpikäynti automatisoidussa laskennassa lisää kuitenkin työmäärää suhteellisen vähän. Lisäksi näin saadaan muodostettua kokonaiskuva voimajohtomaadoitusten termisestä kestoista.

Edellä esitetyn perusteella maadoitussuunnittelu siis koostuu teoreettisesti kahdesta alkuvaiheesta. Ensin luodaan alustava suunnitelma tavoitearvokäyrän avulla, jolla tavoitellaan valittua takaiskuteiheyttä. Tämän jälkeen varmistetaan turvallisuuskulman toteutuminen ja luodaan maapotentiaaliraportti. Todellisuudessa suunnittelu sulautuu yhtenäiseksi ja molempia vaiheita suoritetaan samanaikaisesti. Maapotentiaaliraportin lisäksi luodaan myös induktiovaarajänniteselvitys. Näiden vaiheiden jälkeen suoritetaan kontrollimittaukset sekä maapotentiaaliraportin ja induktiovaarajänniteselvityksen päivitys kuten nykyisessäkin menettelyssä. Varsinaisia suuria muutoksia maadoitussuunnittelun kokonaisuuteen ei siis ole tämän työn pohjalta perusteltua tehdä. Työn tulosten pohjalta tehdään mahdollisesti muutoksia Fingridin maadoitussuunnittelun tekniseen määrittelyyn.

Maadoitussuunnittelua ja sen mahdollisia muutoksia on kuvattu edellä. Kuvassa 40 esitetään maadoitussuunnittelun prosessikaavio, joka käsittelee maadoitussuunnittelua ylätasolta.



Kuva 40. Maadoitussuunnittelun prosessikaavio.

Prosessikaavion mukaan ensimmäinen vaihe maadoitussuunnittelussa on maan ominaisresistanssin mittaaminen pylvässijainneissa. Maan ominaisresistanssin mittaaminen on välttämätöntä, jotta seuraava vaihe eli tavoitearvon lukeminen on mahdollista. Lukemalla tavoitearvo tässä työssä muodostetulta käyrältä varmistetaan takaiskutiheyden suuruudesta. Toisin sanoen tavoitearvolla varmistetaan, ettei pylvään takaiskutiheys ylitä valittua tasoa. Kun kaikille pylväille on suunniteltu tavoitearvojen perusteella maadoitukset, voidaan johdolle luoda potentiaalikuvaaja. Tämän kuvaajan avulla voidaan tarkastella täyttyvätkö vaatimukset henkilöturvallisuuden ja siirtyvien potentiaalien kannalta. Jos vaatimukset eivät täyty, tulee maadoituksia parantaa ja luoda uusi potentiaalikuvaaja. Kuten prosessikaaviosta huomataan, tulee vaiheita 3–5 toistaa, kunnes vaatimukset täyttyvät. Potentiaalikuvaajan kanssa samassa vaiheessa tulee myös suorittaa tarkastelu maadoituselektrodin termisestä kestävydestä. Näiden vaiheiden jälkeen laaditaan induktiovaarajännite. Seuraavaksi maadoitukset asennetaan konkreettisesti pylväille, minkä jälkeen voidaan suorittaa kontrollimittaukset. Jos mittauksilla havaitaan parannustarpeita maadoituksille, suoritetaan parannukset ja päivitetään raportit. Tämän jälkeen maadoitussuunnittelu on suoritettu ylätasolta tarkasteltuna loppuun asti.

7. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli luoda nykypäivää vastaavat suuntaviivat maadoitussuunnitteluun, joiden pohjalta virallinen ohjeistus voidaan päivittää. Samalla tavoitteena oli yhtenäistää joitain maadoitussuunnittelun käytäntöjä. Työssä luodun tavoitearvokäyrän avulla myös otettiin kantaa siihen mitä maadoitussuunnittelulla tavoitellaan. Osittain erillisenäkin aiheena tarkasteltiin maadoituselektrodin poikkipinnan kasvattamisen tarvetta. Aihe kuitenkin sitoutui maadoitussuunnittelun kokonaisuuteen yhtenäistäen maadoitussuunnittelun käytäntöjä.

Maadoituselektrodin poikkipinnan kasvattamisen tarvetta tutkittiin kustannusten, terminen keston, maadoitusten ikääntymisen sekä maadoitusvaurioiden näkökulmasta. Tarkastelussa pääpaino oli 110 kV:n maadoituksissa eli tutkittiin tulisiko 16 mm²:stä siirtyä 25 mm²:iin myös 110 kV:n osalta. Myös 400 kV:n maadoitukset olivat mukana tarkasteluissa mutta niille ei tehty yhtä kattavaa tarkastelua. Tarkastelussa poikkipinnan kasvattamien yleisesti 110 kV:n maadoituksilla ei ollut kannattavaa tai välttämätöntä mistään näkökulmasta. Kustannusten kannalta suurempi poikkipinta johti aina suurempiin kustannuksiin. Maadoitusten ikääntymisen tai vaurioiden näkökulmasta poikkipinnan kasvattaminen ei vaikuta olevan välttämätöntä. Tarkkojen johtopäätösten tekeminen maadoitusten ikääntymisen kannalta ei kuitenkaan ole mahdollista tässä työssä.

Maadoituselektrodin poikkipinnan kasvattaminen voi kuitenkin olla välttämätöntä joissain tilanteissa terminen keston kannalta. Tarkastelussa havaittiin, että yleisesti terminen kesto ei edellytä suurempaa poikkipintaa maadoituselektrodeilta. Kriittisin tilanne terminen keston kannalta on pylväillä, joilla on perusmaadoituksen lisäksi yksi lisäsäde. Tulevaisuudessa maasulkuvirrat todennäköisesti kasvavat, jolloin voi yhden lisäsäteen terminen kesto ylittyä. Tästä syystä maadoitussuunnitteluun esitetään uutta vaihetta, jossa termisestä kehosta varmistutaan vähintään pylväillä, joilla on yksi lisäsäde. Yksittäisten pylväsmaadoitusten läpi kulkeva virta riippuu koko impedanssiketjusta. Käytännössä tehokkainta on siis tarkastella kaikkien pylväiden maadoituselektrodien terminen kesto riippumatta lisäsäteiden määrästä.

Uuden tavoitearvojärjestelmän muodostamista varten työssä pohdittiin eri näkökulmia, jotka vaikuttavat maadoitussuunnitteluun. Samalla pohdittiin tavoitearvojärjestelmän välttämättömyyttä. Tavoitearvojärjestelmän oleellisuus kuitenkin havaitaan nopeasti, sillä ilman jotain tavoiteltavaa arvoa maadoitusten mitoittaminen järkevästi on hankalaa. Maadoitussuunnitteluun vaikuttavista näkökulmista uuden tavoitearvojärjestelmän

lähtökohdaksi valittiin ukkoshäiriöherkkyys. Muut näkökulmat havaittiin liian monisäikeiksi yksinkertaisen ja tehokkaan tavoitearvojärjestelmän luomista varten tai näkökulma ei tarjonnut riittäviä lähtökohtia tavoitearvoihin.

Ukkoshäiriöherkkyuden näkökulmasta maadoitukset pystyvät vaikuttamaan takaiskujen määrään. Tästä syystä työssä muodostettu tavoitearvokäyrä pohjautuu lähtökohtaisesti takaiskutiheyteen. Tavoitearvokäyrän muodostusta varten eri pylvästyyppeiden ja jännite-
tasojen takaiskutiheyksiä tarkasteltiin CIGRE:n teknisten dokumenttien 63 (1991) ja 839 (2021) laskennan avulla. Lopulta päädyttiin luomaan yksi kaikille jännitetasoille ja pylvästyypeille yhteinen tavoitearvokäyrä. Yhteen käyrään päädyttiin, sillä haluttiin muodostaa mahdollisimman yksinkertainen ja tehokas työväline maadoitussuunnitteluun. Lisäksi takaiskutiheyden tarkasteluissa ei havaittu useampaan tavoitearvokäyrään pakottavia tekijöitä. Tavoitearvokäyrän muodostuksessa huomioitiin myös muita tekijöitä kuin pelkästään takaiskutiheys. Käyrä kuitenkin pohjautuu suurimmalta osin valittuun takaiskutiheyden tasoon. Toisin sanoen käyrää hyödyntämällä tavoitellaan tiettyä takaiskutiheyttä eli ukkoshäiriötasoa.

Maadoitussuunnittelu ei kuitenkaan koostu pelkästään tavoitearvokäyrällä tehdystä suunnittelusta. Koska työssä muodostettu tavoitearvokäyrä vastaa logiikaltaan nykyistä käyrää, ei se aiheuta suuria muutoksia maadoitussuunnittelun kokonaisuuteen. Tavoitearvokäyrällä muodostetaan alustava suunnitelma, jonka jälkeen täytyy vaatimusten täytyminen varmistaa. Erona nykyiseen maadoitussuunnitteluun on edellä mainittu maadoituselektrodin termisen keston varmistaminen. Lisäksi perusteellinen ero syntyy siitä, että nykyisessä maadoitussuunnittelussa suunnittelija ei tiedä mitä Imatran Voiman luoma tavoitearvokäyrä tavoittelee.

Työssä luotu tavoitearvokäyrä ohjaa hieman suurempiin maadoituksiin kuin Imatran Voiman luoma käyrä. Näin ollen maadoitusjännitteet ovat todennäköisesti pienemmät alustavan suunnittelun jälkeen kuin nykyisessä suunnittelussa. Toisin sanoen useammin voidaan alittaa kosketusjännitevaatimukset pelkkää tavoitearvokäyrää käyttämällä. Näin ollen maadoitussuunnitteluun kuuluva kokonaisaika voi lyhentyä, sillä erillistä tarkastelua vaatimusten täyttymisestä ei tarvitse suorittaa yhtä usein. Maadoitusten materiaalikus-
tannukset kuitenkin nousevat muodostetulla käyrällä ja näin ollen maadoitussuunnittelun nopeutumisesta saatava hyöty pienenee.

Uudella tavoitearvokäyrällä materiaalikusannukset todennäköisesti nousevat maadoitussuunnittelun samalla nopeutuessa hieman. Uuden käyrän käytännön vaikutuksia maadoitussuunnitteluun voi olla kannattavaa tutkia. Vaikutukset kustannuksiin, suunnitteluaikoihin sekä mahdolliset muut vaikutukset havaitaan parhaiten käyttämällä

tavoitearvokäyrää suunnittelussa. Parhaiten Imatran Voiman luoman ja työssä luodun käyrän erot havaitaan suunnittelemalla saman todellisen kohteen maadoitukset molempien käyrien avulla. Näin pystyttäisiin konkreettisesti verrata esimerkiksi kustannuksia sekä suunnitteluun kuluneita aikoja. Työssä suoritettu alustava suunnittelu molemmilla käyrillä ei riitä antamaan yhtä realistista kuvaa käyrien käytön eroista.

Työssä maadoitusten ikääntymisen tarkastelu jäi suhteellisen pintapuoliseksi ja epävarmuustekijöitä on suhteellisen paljon. Tästä syystä olisi tarpeellista suorittaa laajempi tarkastelu aiheeseen, jolla selvitetäisiin poikkipinnan vaikutus maadoitusten ikääntymiseen. Tarkastelussa voi olla perusteltua suorittaa käytännön testejä vanhoille maadoituselektrodeille. Toisin sanoen täytyisi vanhoja elektrodeja kaivaa maasta tutkimusta varten. Toisena tarpeellisena jatkotarkasteluna tulisi tarkastella tavoitearvokäyrän kanssa käytetyn 0,75-kertoimen tarpeellisuus. Kyseistä kerrointa käytetään, kun pylväsmaadoitukset yhdistetään viereisen voimajohdon pylväsmaadoituksiin. Näissä tapauksissa tavoitearvosta käytetään 0,75 kerrottua maadoitusresistanssin arvoa. Asemien lähellä käytetty 0,5-kerroin ei edellytä jatkotarkastelua samalla tavalla, sillä kertoimen tarkoitus on pienentää asemilla esiintyviä ylijännitteitä. Asemien lähellä käytettävä kerroin toimii, kuten edellä mainittu eli tavoitearvosta käytetään 0,5 kerrottua maadoitusresistanssin arvoa. Tämä kerroin voidaan lähtökohtaisesti todeta tarpeelliseksi. Kertoimen 0,75 tarpeellisuus tulisi sen sijaan varmistaa, sillä sitä ei työssä ole tarkasteltu.

Työn tavoitteiden täyttämistä tarkastellessa voidaan todeta, että suurimpaan osaan pää-tavoitteista päästiin. Tavoitearvokäyrän tausta ja valinnat on esitelty, jolloin maadoitus-suunnittelussa tiedetään mitä käyrällä todella tavoitellaan. Samalla maadoitussuunnittelun kokonaisuutta on tarkasteltu ylätasolta. Valittuihin seikkoihin on otettu kantaa samalla pyrkien yhdistämään käytäntöjä. Kaikkiin työn tavoitteista ei kuitenkaan päästy, sillä tavoitearvokäyrän kertoimien tarpeellisuutta ei työssä tutkittu. Näin ollen ei voida sanoa, että maadoitussuunnittelun kokonaisuutta olisi tarkasteltu kaikilta osin riittävästi.

LÄHTEET

- Chisholm, W. (2010). New Challenges in Lightning Impulse Flashover Modeling of Air Gaps and insulators. IEEE electrical insulation magazine 26.2. s. 14–25.
- CIGRE. (1991). Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. CIGRE.
- CIGRE. (2021). Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines – New Aspects. CIGRE.
- Cooray, V. (2010). Lightning protection. London. Institution of Engineering and Technology. s. 475–529.
- Elovaara, J. Haarla, L. (2011). Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Gaudeamus Helsinki University Press/Otatieto. s. 427–446.
- Energiavirasto. (2023). Hinnoittelun valvonta. Energiavirasto. Helsinki. Viitattu 25.5.2023. Saatavilla <https://energiavirasto.fi/hinnoittelun-valvonta>
- Eriksson, A. J. (1987). The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines. IEEE transactions on power delivery. Vol. 2 (3). s. 859–870.
- Fingrid. (2017). Mitä tarkoittavat PJK ja AJK. Fingrid lehti. Fingrid Oyj. Viitattu 11.5.2023. Saatavilla <https://www.fingridlehti.fi/mita-tarkoittavat-pjk-ja-ajk/>
- Fingrid. (2022a). S23701E1 – Maadoitus. Fingrid Oyj.
- Fingrid. (2022b). S23702E1 – Maadoitusohjeet. Fingrid Oyj.
- Fingrid. (2022c). Maximo pylväsraportti. Fingrid Oyj.
- Finnparttia Sähkötukku. (2023). Maadoituskupari – Finnparttia Sähkötukun verkkosivut. Viitattu 13.3.2023. Saatavilla https://www.finnparttia.fi/epages/finnparttia.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/2014102905/Categories/Kaapelit/Maadoituskupari
- Gallo, A. (2014). A Refresher on Net Present Value. Harvard Business Review. Harvard Business School Publishing. Viitattu 25.5.2023. Saatavilla <https://hbr.org/2014/11/a-refresher-on-net-present-value>
- Hiltunen, H, Sorri, H. (2022). Maadoitussuunnittelu – sisäinen koulutusmateriaali. Despro Engineering Oy.
- Honkanen, J. Huhtanen, U. (2022). Sähköpostikeskustelu. Fingrid Oyj.

- Huhtanen, U. (2022). Voimajohtojen maadoitukset – PowerPoint esitys. Fingrid Oyj.
- Huhtanen, U. (2023). Miksi voimajohdoille tarvitaan hyvät maadoitukset? – PowerPoint esitys. Fingrid Oyj.
- Hänninen, M. (1989). 110...400 kV johtojen pylväismaadoitusten suunnittelu (kooste). Imatran Voima Oy.
- IEEE. (1985). A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE transactions on power apparatus and systems PAS-104.4. s. 918–332.
- IEEE Std 1243-1997. (1997). IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. s. 1–44.
- IEEE Std 81-2012. (2012). IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System (Revision of IEEE Std 81-1983). New York. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. s. 19–21.
- Imatran Voima Oy. (1977). 110...400 kV johtojen pylväismaadoitusten suunnittelu. Imatran Voima Oy.
- Jalonen, M. Luojus, M. (2020). Voimajohtokoulutus: Maadoitus ja vaihejärjestys – PowerPoint esitys. Fingrid Oyj.
- Jalonen, M. (2023a). Yksityinen keskustelu. Fingrid Oyj.
- Jalonen, M. (2023b). Voimajohtojen maadoitusmittaukset – PowerPoint esitys. Fingrid Oyj.
- Kara, O. (2022). Maximo Vaarajännitteet -sovellus – ohjetiedosto. Fingrid Oyj.
- Kara, O. (2023). Sähköpostikeskustelu. Fingrid Oyj.
- Luukkainen, J. (2020). Voimajohtojen maadoitusmittaukset: Maadoitusprosessin kehittäminen. Tampereen yliopisto.
- Mäkelä, A. Sven-Erik, E. Haapalainen, J. (2014). Nordic Lightning Information System: Thunderstorm Climate of Northern Europe for the Period 2002–2011. Atmospheric research 139. s. 46–61.
- Nousmaa, I. (1979). 110...400 kV Johtojen pylväismaadoitukset. Insinöörijärjestöjen Koulutuskeskus ry.
- Pesonen, A. (1960). Suppeahkojen maadoitusten suunnittelu ja mittaus. Helsinki. Imatran Voima Oy.
- SFS-EN 50341-1. (2014). Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt. 2. Painos. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 50341-2-7. (2015). Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteellä. Osa 2-7 Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto.

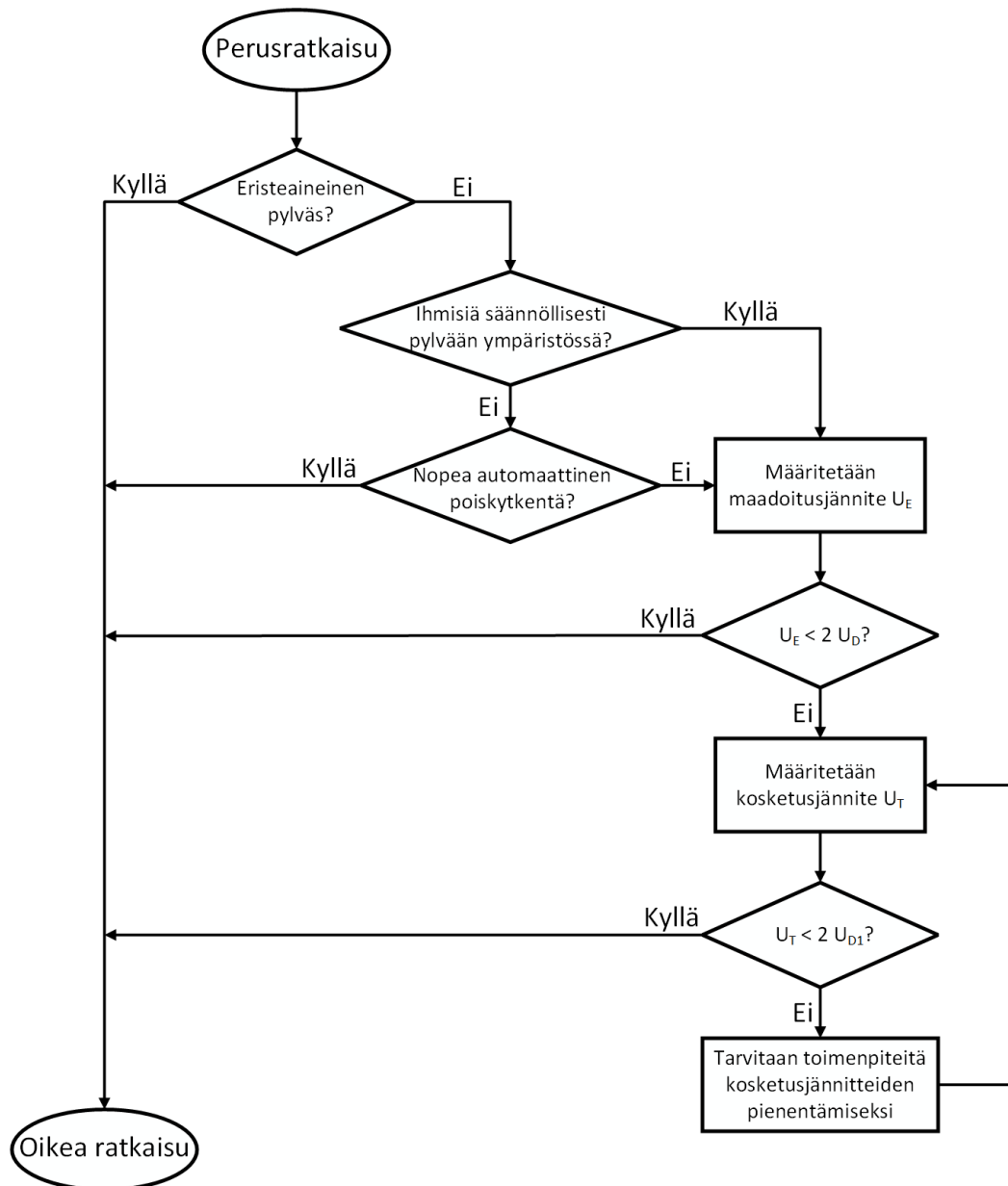
SFS 6001. (2018). Suurjännitesähköasennukset. 5. Painos Helsinki. Suomen standardisoimisliitto.

Sorri, H. (2022). Yksityinen keskustelu. Despro Engineering Oy.

Sorri, H. (2023). Voimajohtomaadoitusten suunnittelu – sisäinen koulutus. Despro Engineering Oy.

VHV. (1995). Vaara- ja häiriövaliokunta -ohje 5. Vaara- ja häiriövaliokunta.

LIITE 1: MAADOITUSSUUNNITTELUN PERIAATTEELLINEN KULKU



LIITE 2: TYÖSSÄ MUODOSTETTU TAVOITEARVOKÄYRÄ

