



Maadoituslaskenta

Valtteri Väisänen

OPINNÄYTETYÖ

Kesäkuu 2025

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

Väisänen Valtteri
Maadoituslaskenta

Opinnäytetyö 40 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Kesäkuu 2025

Tässä opinnäytetyössä perehdytään sähköverkon maadoitusjärjestelmään teorian ja käytännön avulla. Teorian käsittelyn avulla pyritään luomaan vahva ymmärrys maadoituksen toiminnasta ja keskeisistä ilmiöistä sekä käsitteistä. Teoriaosassa selostetaan asiat, jotka oleellisesti vaikuttavat maadoituksen toimintaan. Käytäntöä hahmotetaan erilaisilla esimerkeillä ja tulosten analysoinnilla ja tulkinalla.

Opinnäytetyössä suoritetaan esimerkin avulla resaltoivan maadoitusimpedanssin käsinlaskenta yhteen liitetyn maadoituksen alueelle, jota verrataan verkkotietojärjestelmän laskeman resaltoivan maadoitusimpedanssin kanssa. Tarkoituksena on varmistua maadoituslaskennan toimimisesta oikein. Opinnäytetyön tavoitteena on varmistua maadoituslaskennan toimivuudesta ja luoda siitä työn aiheenantajalle dokumentointiohje maadoituslaskentaa varten. Tätä ohjetta ei kuitenkaan julkaista opinnäytetyössä.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical and Automation Engineering
Electrical engineering

Valtteri Väisänen
Grounding calculation

Bachelor's thesis 40 pages, appendices 4 pages
June 2025

This thesis focuses on the grounding system of a power grid through both theory and practical application. The theoretical section aims to build understanding of how the grounding system works, along with the key phenomena and concepts involved. Thesis will explain the essential factors that affect the operation of grounding system thru illustrated examples and by analyzing and interpretation of the results.

As part of the thesis, a manual calculation of the grounding impedance for an interconnected grounding area is carried out. The result produced by manual calculation is then compared to the result produced by the network information system. The purpose of this is to ensure that the grounding calculation in the network information system is working correctly. The overall objective of the thesis is to verify the accuracy of the grounding calculation and to create a documentation guide for the commissioning party. However, this guide is not published as part of the thesis.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	MAADOITUSJÄRJESTELMÄ YLEISESTI	6
2.1	Maadoituksen tarkoitus	6
2.2	Resistanssiin vaikuttavat muuttujat	7
2.3	Resultoiva maadoitusimpedanssi	8
2.4	Maasulku	9
2.5	Erilaiset maadoitusjärjestelmät	10
2.5.1	Laaja maadoitusjärjestelmä	12
2.5.2	Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä	14
2.5.3	Yksittäinen maadoitusjärjestelmä	16
3	MAADOITUKSEN VAATIMUKSET	17
3.1	Maadoitusjännite	17
3.2	Tavoitetaso	19
4	MAADOITUSLASKENTA	24
4.1	Esivalmistelut	24
4.2	Resultoivan impedanssin laskenta	26
4.3	Laskennan tulokset	29
4.4	Alueen U_{TP} vaatimukset	31
4.5	Uudet alueet	33
5	LOPPUTULOKSET	36
5.1	Tarkasteltu alue	36
5.2	Uudet alueet	38
	LÄHTEET	40
	LIITTEET	41
	Liite 1. Laskennan lähtöarvot	42
	Liite 2. Laskennan tulokset kaikille muuntamoille	43
	Liite 3. Maadoituksen dokumentointi ohje	44

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on maadoituslaskennan käyttöönotto ja yhteen liitettyjen maadoitusten resurssien impedanssin laskenta. Ohessa tehdään myös sijainti-aineisto-projektiin liittyvät tehtävät, eli valmistellaan verkkoa maadoituslaskentaa varten. Työn varsinainen päämäärä on tuottaa kattava ohje yhtiön omaan käyttöön, jolloin ohjetta seuraamalla maadoituslaskenta voidaan ottaa käyttöön koko verkostoalueella ja hyödyntää jatkossa maadoitusten laskennassa ja dokumentoinnissa.

Työn toimeksiantaja on Lappeenrannan Energiaverkot Oy, joka on osa Lappeenrannan Energia-konsernia. Yhtiö on ottamassa käyttöön maadoituslaskentaa Trimble-verkkotietojärjestelmässään ja työn tavoitteena on saada maadoituslaskenta toimimaan määritellyllä tavalla, varmistua saatujen tulosten paikkaansa pitävyydestä, sekä tuottaa yhtiölle maadoituslaskentaohje. Dokumenttia on tarkoitus käyttää yhtiön työntekijöiden ohjeena maadoituslaskennan toiminnasta sekä tulosten tulkinnasta.

Opinnäytetyössä pyritään avaamaan maadoitusjärjestelmän toiminnan perusteita, vikoja, rakennetta ja sekä käsittelemään maadoitusten teoriaa. Samalla pyritään luomaan pohja laskennan tulosten ymmärtämiselle ja tulkinnalle. Ohessa tehdään myös kaikki tarpeellinen esivalmistelu, joka tulee suorittaa ennen maadoituslaskennan käyttöönottoa.

Tarkasteltavalta alueelta on valittu pieni yhteen liitetyn maadoituksen alue, jonka maadoituslaskenta suoritetaan käsin. Vertailun vuoksi sama laskenta suoritetaan myös verkkotietojärjestelmällä, jotta voidaan varmistua tulosten paikkansapitävyydestä. Tämän jälkeen laskennan käyttöönottoa laajennetaan koskemaan kaikkia yhteen liitetyn maadoituksen sekä yksittäisen maadoituksen kohteita verkostoalueella.

2 MAADOITUSJÄRJESTELMÄ YLEISESTI

Jotta laskennan tuloksista voi saada selvää, on ensin tunnettava maadoitusjärjestelmän toiminta. Ymmärtämisen kannalta on oleellista tutustua maadoitusjärjestelmään liittyvään teoriaan ja keskeiseen termistöön ja käsitteisiin. Tavoitteena on luoda kattava käsitys sekä maadoitusjärjestelmän toiminnasta että käyttötarkoituksesta sekä mistä maadoitusjärjestelmä koostuu ja mitä järjestelmän toiminnassa on huomioitava.

Vaikka työssä ei varsinaisesti käsitellä maadoitusjärjestelmää vaan siihen liittyvää laskentaa, on järjestelmän toiminta laskennan tulosten kannalta oleellista tuntea. Osa kappaleessa kaksi esitetyistä asioista liittyy suoranaisesti laskennan kannalta oleellisesti tulosten tarkasteluun ja tulkintaan. Jos maadoitusimpedanssin suuruudeksi ilmoitetaan jokin arvo, on tästä hankalaa päätellä mitään maadoituksen toiminnasta. Tämän työn tavoitteena on luoda selvitys, jonka avulla lukija osaa arvioida määritettyä maadoitusimpedanssin tulosta oikealla tavalla.

2.1 Maadoituksen tarkoitus

Sähköverkot II kirjassa on määritelty tiivistetysti mikä on maadoitusjärjestelmä. Maadoituksen tarkoituksena on kytkeä laite mahdollisimman tehokkaasti maahan, eli saavuttaa mahdollisimman pieni maadoitusimpedanssi. Maadoitusjärjestelmän tehokkuuden mittana toimii maadoitusimpedanssi ja tämän tulee olla mahdollisimman matala. Maadoituksen yhteydessä voidaan puhua myös maadoitusresistanssista. (Elovaara&Haarla II 2019)

Sähköinfon julkaisemassa maadoitusoppaassa on taas kuvailtu maadoitusjärjestelmän keskeiset tehtävät. Sähköturvallisuuden näkökulmasta maadoituksen ensisijainen tehtävä on vikatilanteissa rajoittaa kosketus- ja askeljännitteitä. Maadoituksella on myös oleellinen tehtävä estää vaarallisten jännitteiden siirtymistä järjestelmästä toiseen, sekä ehkäistä vaarallisten vuotovirtojen, kipinöiden tai valokaarien syntyminen. Maadoituksen päätehtävä on siis varmistaa sähköverkon tai muun sellaisen tilan tai laitteen käyttäjäturvallisuus. (Tielinen 2008)

2.2 Resistanssiin vaikuttavat muuttujat

Suurjännitestandardin painos SFS-6001:2018 esittää maadoitusjärjestelmälle kriteerit, joiden mukaan sen on toimittava joka tilanteessa siten, että henkilöiden turvallisuus varmistuu sellaisissa tiloissa, joihin heillä on pääsy. Standardissa myös määritetään maadoituksen mitoituksessa huomioitavat seuraavat tekijät: Maasulkuvirran suuruus, vian kestoaika sekä maaperän ja maadoituselektrodin ominaisuudet. Maadoitusimpedanssi on riippuvainen maaperän ominaisuuksista sekä maadoituselektrodin mitoista ja asennustavasta. Mitoista on huomioitavaa se, että elektrodin pituus on vaikuttavampi tekijä elektrodin poikkipinta-alan sijaan. Tosin pituuden vaikutus vähenee riittävän pitkillä elektrodeilla. (SFS-6001:2018 2018)

Nämä määritelmät ovat oleellisia myös maadoituslaskennan kannalta, koska kosketusjännitteitä laskettaessa ja tuloksia tarkasteltaessa tulee tietää maasulkuvirta sekä vian kestoaika. Vian kestoajalla tarkoitetaan turvalaitteiden laukaisuaikaa. Maaperän ominaisuudet ovat taas merkittävässä roolissa käytännön tasolla maadoitusjärjestelmän toiminnan kannalta.

Taulukossa yksi on esitettynä erilaisten maa-aineiden resistiivisyyksiä. Maaperän resistiivisyydellä tarkoitetaan maa-aineksen ominaiskykyä vastustaa sähkövirran kulkua maa-aineksessa. Maaperän resistiivisyyteen vaikuttaa maaperän tyyppi, raekoko, tiheys ja kosteus. Kosteuden muutokset voivat vaikuttaa resistiivisyyteen tilapäiseen muutokseen muutaman metrin syvyyteen asti. (SFS-6001:2018 2018)

TAULUKKO 1. Maaperän ominaisuudet (SFS-6001:2018 2018)

Maaperän tyyppi	Maaperän resistiivisyys ρ_E Ωm
Suoperäinen maa	5 – 40
Savi, hiesu, humus	20 – 200
Hiekka	200 – 2 500
Sora	2 000 – 3 000
Rapautunut kivi	yleensä alle 1 000
Hiekkakivi	2 000 – 3 000
Graniitti	50 000 saakka
Moreeni	30 000 saakka

Taulukossa yksi on esitettyinä erilaisten maa-ainesten resistiivisyyksiä. Maaperän resistiivisyydellä tarkoitetaan maa-aineksen ominaiskykyä vastustaa sähkövirran kulkua. Jos maadoitus rakennetaan hyvin johtavaan maaperään, auttaa se maadoitustavoitteiden saavuttamisessa. Tällöin maadoitusjärjestelmästä ei tarvitse rakentaa niin laajaa ja usean maadoituselektrodin varassa olevaa. Huonosti johtavassa maaperässä maadoitusjärjestelmästä tulee rakentaa riittävän laaja, jotta saavutettaisiin samat arvot. Maaperän resistiivisyys vaikuttaa siis vaadittavan maadoitusverkon laajuuteen. Tämä on erityisesti huomioitava uusien maadoitusverkkojen suunnittelussa.

2.3 Resultoiva maadoitusimpedanssi

Maadoitusjärjestelmä koostuu yleensä useista vaaka-, pysty- tai vinomaadoituselektrodeista, joille on määritelty tietty impedanssi tietyllä taajuudella. Kun useampi kuin kaksi tällaista maadoituselektrodit liitetään yhteen, voidaan puhua galvaanisesti yhteen liitetystä järjestelmästä, jonka määrittävänä arvona voidaan käyttää resultoivaa impedanssia. Yhdistysjohtimina voivat toimia, kaapelien keskusköydet, kosketussuojat tai maadoitusjohtimet. (Mäkinen 2016)

Resultoivalla maadoitusimpedanssilla on huomattavan suuri merkitys maadoitusjärjestelmien toimivuuden kannalta. Kun maadoituselektrodeja kytketään yhteen galvaanisesti, voidaan tätä järjestelmää tarkastella vikatilanteen sattuessa yhtenä järjestelmänä, jonka määrävänä tekijänä on jokaisen maadoituspisteen yhdessä muodostama resultoiva maadoitusimpedanssi. Yksittäisen muuntopiirin

maadoituselektrodien muodostamalla maadoitusjärjestelmällä on tietty maadoitusimpedanssi, joka ei välttämättä täytä standardin määrittämiä vaatimuksia. Jos tämän kyseisen muuntamopiirin maadoitusjärjestelmä saadaan galvaanisesti liitettyä yhteen muiden muuntopiirien maadoitusjärjestelmien kanssa, voidaan miitoittavana tekijänä käyttää resuloivaa impedanssia.

Resuloiva maadoitusimpedanssi vastaa teoriassa normaalia rinnankytkentää, jolloin piirin kokonaisresistanssi pienenee. Maasulun sattuessa, maasulkuvirralla on mahdollisuus jakautua resuloivan impedanssin perusteella ketjun muuntamoiden maadoitusten kesken, yksittäisen muuntopiirin maadoitusten sijaan. Resuloivaan maadoitusimpedanssiin vaikuttaa myös tarkastelupiste eli kohta, jossa maasulku syntyy. Tämän takia resuloivaa maadoitusimpedanssia laskettaessa on oltava tarkkana, sillä saatu tulos voi vaihdella tarkastelupisteen mukaan.

2.4 Maasulku

Maasulku on vikatila, joka voi aiheuttaa kosketusjännitteitä verkkoon. Maadoitusjärjestelmän ymmärtämisen kannalta on oleellista tiedostaa maasulku ilmiönä, ja mitä varten maadoitusjärjestelmä on asennettu. Kuten aikaisemmin on todettu, on maadoitusjärjestelmän tehtävä suojata ihmisiä vaarallisilta kosketus- ja askeljännitteiltä sellaisissa tiloissa, joihin heillä on pääsy ja joiden tulisi olla normaalisti jännitteettömiä. (Tielinen 2008)

Sähköjärjestelmän toimiessa normaalisti ei henkilöille vaarallisia kosketusjännitteitä pääse muodostumaan sellaisiin kosketeltaviin tai saavutettaviin kohteisiin, joiden tulisi olla jännitteettömiä. Vikatilanteen sattuessa, voi kosketusjännitteitä kuitenkin muodostua odottamattomiinkin paikkoihin ja kohteisiin.

Maasulku on siis tilanne, jossa sähköverkon jännitteinen osa joutuu johtavaan yhteyteen maan kanssa. Maasulun seurauksena vikapaikassa ilmenee maasulkuvirta, joka aiheuttaa vikapaikkaan ja sen ympäristöön hengenvaaran maadoitusjännitteen takia. (Elovaara&Haarla II 2019). Maasulkuvirran suuruus ja vaikutukset riippuvat vikaresistanssista ja verkon topologiasta. Maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa myös päämuuntajan syöttämän verkon maakapasitanssi.

Suomen maadoitusolosuhteiden takia keskijänniteverkon maadoitustapana käytetään tähtipisteestä maasta erotettua verkkoa tai sammutettua verkkoa. Jos yhtään verkon tähtipistettä ei ole kytketty maahan suoraan tai impedanssin välityksellä, on kyseessä maasta erotettu verkko. Jos tähtipisteen ja maan väliin sijoitetaan vastus tai kuristin, on kyseessä sammutettu verkko. Impedanssin mitoitustavoitus on tehtävä siten, että johtojen maakapasitanssien kautta kulkeva maasulkuvirta kumoutuu. Jos verkko on kokonaan kompensoitu, maasulkuvirta kumoutuu ja maasulku sammuu itsestään. Tästä tulee myös nimi sammutettu verkko. Tähän täydelliseen kompensointiin ei kuitenkaan koskaan pyritä, vaikkakin pitkä paloaika ja pieni maasulkuvirta mahdollistavat itsestään sammumisen. Yleensä verkkoa käytetään yli- tai alikompensoituna teknillisintä syiden takia. (Elovaara&Haarla I 2019)

Maasulkuvirran kompensointi voidaan toteuttaa joko hajautetusti tai keskitetysti, tai näiden yhdistelmällä. Kompensoinnin tarkoituksena on pienentää galvaanisesti yhteen kytkeytyneessä verkossa syntyvää kapasitiivista maasulkuvirtaa syöttämällä verkkoon induktiivista virtaa. Hajautetussa kompensoinnissa johtolähtöjen varrelle asennetaan kompensointikyvyiltään pienempiä sammutuskuristimia kompensoimaan kyseisessä johtolähdössä syntyvää maasulkuvirtaa. Keskitetyssä kompensoinnissa taas asennetaan yksi kompensointikyvyiltään suuri itsestään säätyvä kompensointikela suoraan sähköasemalle päämuuntajan alajännitepuolelle. Työssä tutkittavalla alueella on käytössä näiden yhdistelmä, eli syöttävällä sähköasemalla on kompensointikela sekä johtolähdön varrella erään muuntamon yhteydessä on myös kompensointikela. (Laukkanen 2023)

2.5 Erilaiset maadoitusjärjestelmät

Maadoitusjärjestelmiä on kolmea erilaista toteutustapaa. Näiden järjestelmien erot muodostuvat tavoista, joilla muuntopiirien maadoitukset ovat kytkeytyneet toisiinsa. Toteutus tavat ovat laaja, yhteen liitetty tai yksittäinen maadoitusjärjestelmä (Verkostosuositus RJ 22:22 2022). Tapa, jolla maadoitusjärjestelmä on toteutettu, vaikuttaa oleellisesti laskennasta saatujen arvojen suuruuteen.

Jos maadoitusjärjestelmä on osa yhteen liitettyä järjestelmää, voidaan tarkastelu suorittaa resurtoivan impedanssin arvojen perusteella. Jos maadoitus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää, ei maadoitusimpedanssia tarvitse erikseen selvittää. Tulee vain varmistua, että maadoitus on luotettavasti kytketty osaksi laajaa järjestelmää. (Verkostosuositus RJ 19:16 2016)

Yksittäisen muuntopiirin maadoitus ei välttämättä täytä standardin vaateita mutta ollessaan yhteydessä vähintään kahden muun muuntopiirin kanssa on maasulkuvirralla mahdollisuus levittäytyä kaikkien piirin muuntamoiden maadoituselektrodien kesken. Tällöin voidaan resurtoiva maadoitusimpedanssi laskea ja käyttää sen arvoja, kun tutkitaan täyttääkö muuntopiiri SFS 6001:2018 asettamat vaatimukset maadoituksen kannalta. Jos yhteyttä vähintään kahteen muuhun muuntopiiriin ei ole, on muuntamon oman maadoituksen arvo ainut määrittävä arvo tarkastelua tehtäessä. (Verkostosuositus RJ 22:22 2022)

2.5.1 Laaja maadoitusjärjestelmä

Standardissa SFS 6001:2018 määritellään laaja maadoitusjärjestelmä vain yleisellä tasolla, koska laajan maadoitusjärjestelmän määritelmän täyttävät alueet ovat hankalasti todennettavissa. Määritelmä perustuu siihen, että alueella ei ole ollenkaan tai on vähäisiä potentiaalieroja, jolloin tällaisen alueen tunnistamiseen ei ole yksinkertaisia tai yksittäisiä sääntöjä. (SFS-6001:2018 2018)

Standardin SFS 6001:2018 liitteessä O esitetään yleiset tuntomerkit laajalle maadoitusjärjestelmälle. Esimerkiksi pieni kokonaisresistanssin arvo on hyvä tunnuspiirre, mutta ei yksistään takaa määritelmän täyttymistä. Tämän takia ei myöskään esitetä resistanssiarvoon perustuvia vaatimuksia. Pienet vikavirrat ovat myös eduksi, koska maapotenttiali pysyy näin alhaisena. Kaapelivaippojen ja ukkosjohtimien reduktiovaikutuksen ansiosta maapotentiaalिन nousu pysyy kohtuullisena. Lyhyellä vian kestoajalla voidaan kasvattaa sallittua kosketusjännitettä, jolloin erot sallittuihin raja-arvoihin pienenevät. [SFS-6001:2018 2018, liite O]

Standardin liitteessä O on myös tyypillisiä esimerkkejä laajasta maadoitusjärjestelmästä. Laajaksi maadoitusjärjestelmäksi luetaan sähköasema, jota ympäröivät maadoituselektrodilla varustetut rakennukset, joiden maadoitusjärjestelmät on keskenään yhdistetty. Sähköasema, joka syöttää keskustaa tai muuta tiheästi rakennettua aluetta tai aluetta, jossa on paljon pienjännitejärjestelmän kautta yhdistettyjä maadoituselektrodeja. Sähköasema, jonka läheisyydessä sijaitsee tietty määrä muita sähköasemia. Sähköasema, jolta lähtee tietty määrä maadoituselektrodeja, tai aseman liittymät on toteutettu maadoitusvaikutusta omaavilla kaapeleilla. Sähköasema, joka syöttää laajaa teollisuusaluetta. Sähköasema on osa järjestelmää, jonka neutraalijohdin on useasta kohdasta maadoitettu. [SFS-6001:2018 2018, liite O]

Kuten standardin liitteen O esimerkeistä käy ilmi, ovat määritelmät hyvin riippuvaisia tarkasteltavasta alueesta. Esimerkkialueiden listassa mainitaan useasti termi ”tietty määrä” mutta kyseistä määrää ei kerrota. Tällä viitataan juuri tutkittavan alueen ominaisuuksiin. Tietyllä alueella luontaiset maadoitusominaisuudet ovat paremmat kuin toisaalla, jolloin tarvitaan vähemmän maadoituselektrodeja saavuttaakseen hyväksyttävän lukeman.

Laajaan maadoitusjärjestelmään liittyvissä muuntopiireissä tulee huomioida myös SFS 6001:2018 liitteen NA vaatimukset. Liitteen mukaan, kytkettäessä uusia paikallisia maadoitusjärjestelmiä jo olemassa olevaan laajaan maadoitusjärjestelmään, ei tarvitse ehtojen täyttymistä erikseen tutkia. Järjestelmä on kuitenkin mitattava ja dokumentoitava. On myös varmistuttava, että yhdysjohtimet ovat kytkeytyneet oikein. [SFS-6001:2018 2018, liite NA]

Laajan maadoitusjärjestelmän yhdistysjohtimina voivat toimia muun muassa suurjännitekaapeleiden vaipat ja keskusköydet. Keskijänniteverkossa keskusköysi ja kosketussuoja. Pienjänniteverkossa PEN-johtimet. Muuntamoita yhdistävät maadoitukset ja tarvittaessa keskijänniteilmajohdon pylväiden maadoitusjohtimet tai kaapeleiden vierellä kulkeva erillinen maadoitusjohdin. (Verkostosuositus RJ 19:16 2016 ja Verkostosuositus RJ 22:22 2022)

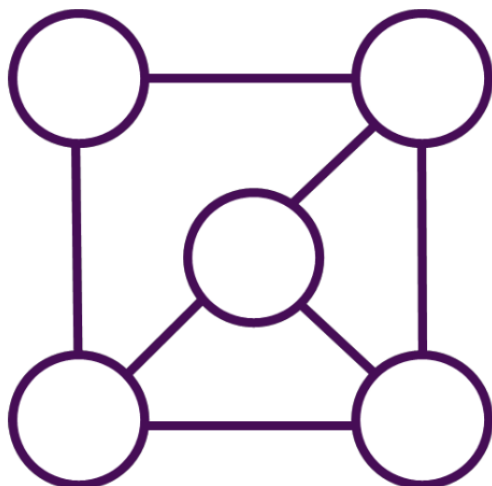
Tämän lisäksi keskijänniteverkon kautta muodostuvassa yhteydessä tulee vähintään olla 20 prosenttia sellaisia muuntamoita, joilla on kolme edellä mainittua yhdistystapaa, kolmeen muuhun muuntamoon. Pienjänniteverkon osalta yhteyksiä tulee olla siten, että vähintään 70 % laajan muuntopiirin muuntamoista on yhdistetty kolmeen muuhun muuntopiiriin. Laajan maadoitusjärjestelmän viimeinen piste ei voi kuitenkaan koskaan olla vain yhdellä yhdistävällä johtimella kytketty osaksi laajaa maadoitusjärjestelmää. (Verkostosuositus RJ 22:22 2022)

Maadoitusjärjestelmän täyttäessä kaikki standardin asettamat reunaehdot, voidaan järjestelmää pitää laajana maadoitusjärjestelmänä.

Standardissa SFS 6001:2018 määritellään yleisellä tasolla reunaehdot, joiden tulee täytyä, jotta maadoitusjärjestelmää voidaan kutsua laajaksi. Verkostosuositus RJ 22:22 tarjoaa erään tavan määritellä laaja maadoitusjärjestelmä standardin pohjalta.

Kuvassa yksi on esitettyä havainnollistava esimerkkikuva laajan maadoitusjärjestelmän kytkeytymisestä. Laajan maadoitusjärjestelmän tulee olla verkkomaisesti silmukoitunut. Eli maadoitusjärjestelmä tulee muodostaa galvaanisessa yh-

teydessä olevan verkko koko laajan maadoituksen alueella. Rengasmainen keskijännitteverkko on yleensä hyvä perusta laajalla maadoitusjärjestelmälle. Verkossa on myös oltava varakaapeliyhteyksiä syöttävien sähköasemien välillä. Pienjänniteverkon puolella on oltava riittävä määrä yhdistäviä kaapeleita muuntopiirien välillä. (Verkostosuositus RJ 22:22 2022)



KUVA 1. Esimerkki laajan maadoitusjärjestelmän kytkeytymisestä. (Verkostosuositus RJ 22:22 2022, 28)

Jokaisen muuntopiirin tulee olla yhteydessä vähintään kahden muun muuntopiirin maadoitukseen. Pääsääntöisesti ketjumaisesti saa kuitenkin olla kytkettynä vain neljä muuntopiiriä, joissa on vain kaksi yhdistystä muihin piireihin. Viidennen lisääminen on mahdollista erikoistapauksissa. (Verkostosuositus RJ 22:22 2022)

2.5.2 Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä

Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä on järjestelmä, jossa paikalliset maadoitusjärjestelmät on kytketty yhteen. Erona laajaan maadoitusjärjestelmään on se, että yhteen liitetty järjestelmä ei täytä kaikkia laajan maadoitusjärjestelmän kriteerejä.

SFS 6001:2018 määrittelee tällaisen järjestelmän seuraavasti: usean ketjussa olevan muuntamon maadoituksen muodostama. Maadoitusten tulee olla yhteydessä toisiinsa kaapelin metallivaippojen ja/tai keskusköysien kautta sekä lisäksi

mahdollisten pienjänniteverkon suoja- tai PEN-johtimien kautta. (SFS-6001:2018 2018)

Lisäksi yhdistäminen voidaan tehdä riittävän suurella poikkipinta-alalla varustetuilla keskijännitekaapelin kosketussuojilla. Verkostosuosituksessa nämä poikkipinnat on määritelty kuparille sekä alumiinille. Kuparilla vaaditaan vähintään 16 mm² poikkipinta ja alumiinilla 35 mm² poikkipinta. Tässä on myös huomioitava terminen kestävyys (Verkostosuositus RJ 22:22 2022)

Liitteen NA kohdassa II määritelmää tarkennetaan vielä lisäämällä vaatimus yhteen liitetyiden maadoitusjärjestelmien lukumäärästä. Yhteen liitettyjä järjestelmiä tulee olla vähintään kolme, jotta voidaan puhua yhteen liitetystä järjestelmästä. [SFS-6001:2018 2018, liite NA]



KUVA 2. Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä (Verkostosuositus RJ 22:22 2022, 17)

Kuva kaksi esittää visuaalisesti yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän. Ympyrä kuvastaa muuntamoita ja neliö jotain muuta suurjännitejärjestelmää. Käytännössä nämä yhdistykset ovat kuitenkin muihin muuntamoihin. Kuten kuvasta nähdään, muuntopiiri on galvaanisessa yhteydessä vain kahteen muuhun järjestelmään. Vertaamalla kuvia yksi ja kaksi saadaan paras käsitys laajan ja yhteen liitetyn järjestelmän eroista.

SFS 6001:2018 tarjoaa myös esimerkin tällaisesta järjestelmästä Suomen olosuhteissa. Tyypillisiä yhteen liitetty maadoitusjärjestelmiä ovat taajamien ja maaseudun maakaapeloidut keskijännitejakeluverkot sekä muut sähköasemat, joiden maadoitukset ovat yhteydessä joko ketjumaisesti tai silmukkamaisesti. (SFS-6001:2018 2018)

2.5.3 Yksittäinen maadoitusjärjestelmä

Sähköverkosta löytyy myös maadoitusjärjestelmiä, jotka eivät ole galvaanisesti yhteydessä muihin järjestelmiin. Tällaisia maadoitusjärjestelmiä kutsutaan yksittäisiksi maadoitusjärjestelmiksi. Hyvä esimerkki tällaisesta järjestelmästä on ilmajohdoverkkoon liittyvä jakelumuuntaja ja vastaavan keskijännitteellä toimivan järjestelmän maadoitus. (Verkostosuositus RJ 22:22 2022)

Maasulun sattuessa tällaisessa järjestelmässä ei maasulkuvirralla ole mahdollisuutta levittäytyä muiden muuntamoiden maadoituksiin, koska verkossa ei ole maadoitusjohtimia, tai muita reittejä, joiden kautta maasulkuvirta siirtyisi toisen muuntopiirin maadoituksiin. Tällaiset muuntopiirit ovat ainoastaan oman maadoituksensa varassa. Tämän takia maadoituksen on oltava riittävän tehokas pystyäkseen täyttämään alueellisesti määritetyt ehdot.

Ei galvaanisesti yhteydessä olevien järjestelmien maadoitusimpedanssille on aina määritetty vaadittu arvo, jonka tulee täytyä. Tätä noudatetaan myös tilanteessa, jossa vain kahden suurjännitejärjestelmän maadoitukset ovat kytkeytyneet toisiinsa. Yksittäisen maadoitusjärjestelmän tapauksessa pätee myös samat reunaehdot maadoitusimpedanssin suhteen kuin laajan ja yhteen liitetyn järjestelmän kohdalla. (SFS-6001:2018 2018)

3 MAADOITUKSEN VAATIMUKSET

Maadoitusjärjestelmälle on määrätty tietyt arvot, jotka sen tulee täyttää, jotta ihmisten turvallisuuden voidaan katsoa toteutuvan. Nämä arvot ovat hyvin paljon riippuvaisia vallitsevista olosuhteista ja ympäristöstä, jossa maadoitusjärjestelmä on asennettuna.

Maadoitusjärjestelmä tulee mitoittaa aina siten, että se täyttää vaaditut turvallisuuskriteerit. Standardi SFS 6001 määrittelee maadoitukselle sallitun kosketusjännitteen U_{TP} , jonka mukaan määräytyy sallittu maadoitusjännite. Maadoitusjännitteen ja maasulkuvirran avulla saadaan laskettua vaadittu maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi. Maadoituksen tulee täyttää standardin määrittämät reuna-arvot alueelliset eroavaisuudet huomioon ottaen.

3.1 Maadoitusjännite

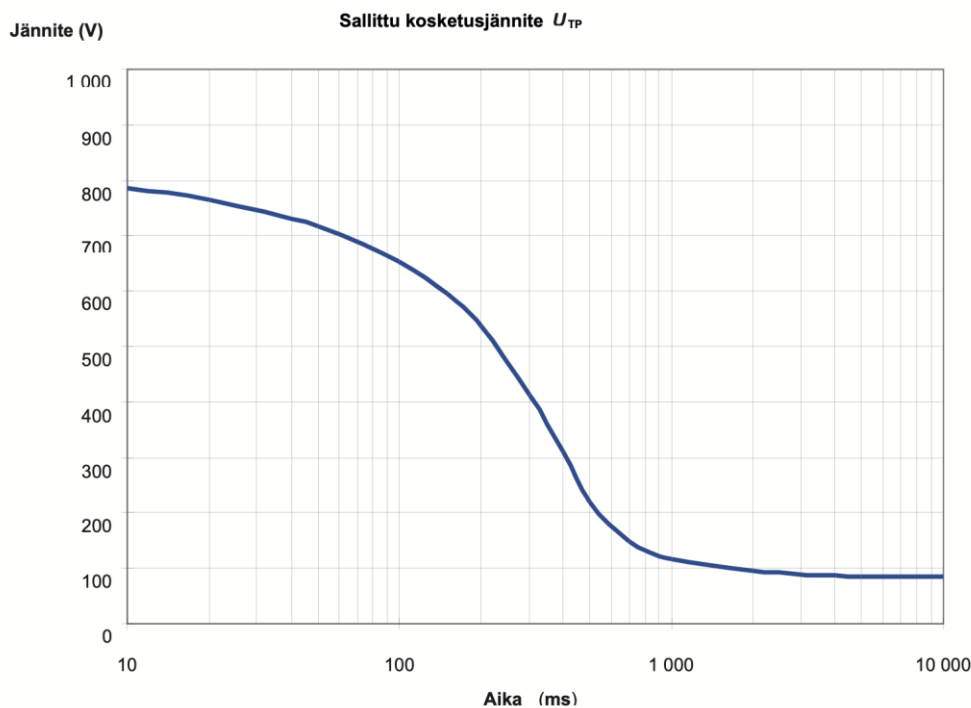
Kosketusjännite U_{TP} on suoraan riippuvainen maadoitusjännitteestä U_E , koska vain osa maadoitusjännitteestä näkyy kosketusjännitteenä. Maadoitusjännitteen suuruuteen vaikuttaa myös kerroin F . Kerroin F määräytyy muuntopiirin olosuhteiden ja toteutettujen maadoitusten mukaan. Maadoitusjännite voidaan laskea kaavalla yksi

$$U_E = F \cdot U_{TP} \quad (1)$$

Kun tiedetään maadoitusjännite, voidaan kaavan yksi tuloksen avulla laskea maadoitusimpedanssi Z_E . Maadoitusimpedanssi lasketaan kaavalla 2 hyödyntäen verkossa esiintyvää maasulkuvirtaa I_E (Verkostosuositus RJ 19:16 2016)

$$Z_E = \frac{U_E}{I_E} \quad (2)$$

Sallittu kosketusjännite on myös riippuvainen vian kestoajasta. Mitä lyhyempi kesto aika, sitä suurempi kosketusjännite on sallittu. Asiaa selventää tarkemmin alla oleva kuvaaja.



KUVAAJA 1. Sallittu kosketusjännite (SFS 6001:2018 2018, 93)

Kuvaajassa yksi pystyakselilla on esitetty kosketusjännite ja vaaka-akselilla jännitteen kesto-aika, eli yleensä suojalaitteiden toiminta-aika. Kuvaajasta yksi voidaan havaita, että mitä nopeampi suojaus piirissä on, sitä suuremman kosketusjännitteen standardi sallii. Käyrässä on kuitenkin piste, noin 1000 millisekuntin kohdalla, jonka jälkeen sallittu kosketusjännite tasoittuu noin 100 volttiin. Saadun kosketusjännitteen arvon ollessa käyrän alapuolella, on maadoitus mitoitettu oikein.

Huomioitavaa on kuitenkin, että vain osa maadoitusjännitteestä esiintyy kosketusjännitteenä. Kosketusjännitteen arvoa on hankalampi todentaa, koska siihen vaikuttaa koskettavan henkilön oma impedanssi. Edellä mainitusta syystä käytännössä seurataan vain maadoitusjännitettä ja -resistanssia. (Verkostosuositus RJ 22:22 2022)

3.2 Tavoitetaso

Maadoitusjännitteen laskentakaavassa yksi esiintyy kerroin F, joka on riippuvainen tutkittavan maadoitusverkon alueen olosuhteista. Seuraavaksi esitellään perusteet kertoimen määräytymiselle tarkasteltavassa verkossa.

Maadoitusjärjestelmä voi saada kertoimen F arvoksi kaksi, neljä tai viisi. Kerrointa kaksi tavoitellaan lähtökohtaisesti aina, koska tämä takaa matalimman maadoitusimpedanssin arvon. Matala maadoitusimpedanssin arvo on taas merkki tehokkaasta maadoituksesta, joka kykenee takamaan toimivuuden ja turvallisuuden joka tilanteessa. Jos kerrointa kaksi ei voida saavuttaa, voi kerroin olla neljä tai viisi tiettyjen ehtojen täytyessä. Kerroin F vaikuttaa suoraan maadoitusjännitteen suuruuteen ja maadoitusjännite taas vaikuttaa suoraan maadoitusimpedanssiin, joten kertoimen arvon määrittäminen oikein on tärkeää varsinkin suunnittelu vaiheessa. (Verkostosuositus RJ 19:16 2016)

Kerroin F voi saada arvon neljä silloin, jos maadoitusjärjestelmä ei teknisistä- taloudellisista syistä voi saavuttaa kertoimen kaksi tasoa ja seuraavassa kappalessa esitetyt määritelmät täyttyvät.

Muuntopiirin alueella maaperä on huonosti johtavaa ja syöttävässä suurjänniteverkossa käytetään laukaisevaa maasulkusuojausta. Muuntajan yläjännitepuolella suoran maasulun todennäköisyyttä on pienennetty sekä jokaisessa muuntamolta lähtevässä pienjänniteverkon haarassa on vähintään yksi johtohaara maadoitus sekä lisäksi pienjänniteverkon maadoitukset täyttävät SFS 6000-8-801 vaatimukset. Pienjänniteverkosta ei syötetä sellaisia kohteita, joiden ulkotiloissa voi oleskella usein ja toistuvasti ihmisiä. Sekä muuntamolla käytetään jotain SFS 6001 liitteen E mukaista erityistoimenpidettä tai kohdan NA 7.7 mukaista potentiaalinojausta. Erityistoimenpiteet M ovat erilaisia tapoja, joita käyttämällä voidaan saavuttaa sallittu kosketusjännite. Nämä toimet koskevat rakennusten ulkoja sisäasennuksia sekä näitä ympäröiviä aitoja ja ulkoseiniä. (SFS-6001:2018 2018)

Edellä mainitut määritelmät ovat standardissa esitettyjä kriteerejä, joiden tulee siis täyttyä, jotta kerrointa F voidaan käyttää arvolla neljä. Verkostosuositus RJ

19:16 tarjoaa muutamia kohteita lisää tähän listaan, mutta ne ovat vain suosituksia, joiden ei tarvitse täytyä kertoimen määrittelyn yhteydessä.

Verkostosuositus RJ 19:16 mukaan pienjännitteen rasitusjännite on hyväksyttävän suuruinen, alle 1200 V laukaisujan ollessa alle viisi sekuntia. Muuntopiirin ollessa maakaapeloitu ja jokaisessa runkoverkon jakokeskuksessa on oltava maadoituselektrodi. Mikäli kaikki liittymät ovat uusia tai, jos niissä on todettu olevan liittymämaadoitus, ei maakaapeloidun muuntopiirin liittymishaaroihin tarvitse erikseen rakentaa johtohaaramaadoituksia. (Verkostosuositus RJ 19:16 2016)

Standardin mukaan kertoimen F arvoa viisi voidaan käyttää, jos syötetään yksittäistä rakennusta tai sähkölaitteistoa ja kaikki kertoimen neljä ehdot, sekä seuraavat vaatimukset täyttyvät. Syötettävässä rakennuksessa on pääpotentialitasaus, joka on kytketty maadoituselektrodiin. Maaperä on huonosti johtavaa kaikilla todennäköisillä sähkölaitteiden käyttöpaikoilla 50 metrin etäisyydellä kiinteistä sähköasennuksista. (SFS-6001:2018 2018)

Tässäkin tapauksessa verkostosuositus RJ 19:16 tarjoaa muutamia lisäkohtia kertoimen viisi käyttöön. Nämäkin ovat vain suosituksia, joiden ei ole pakko täytyä kertoimen arvoa määritettäessä.

Verkostosuositus RJ 19:16 suosittelee, että syöttävässä verkossa on pääpotentialitasaus sekä maadoituskisko ja liittymää syöttävään pienjännite verkkoon tulee rakentaa maadoitus. Mikäli liittymäjohdot ovat kokonaan maakaapelia, asennetaan kaapeliojaan 20 metriä pitkä 16 mm² paksu kirkas kuparikaapeli ja kytketään se liittymän päämaadoituskiskoon tai PEN-kiskoon. (Verkostosuositus RJ 19:16 2016)

Kuten edellä mainituista ehdoista huomataan, on maadoitusjännitteen arvo riippuvainen tutkittavan alueen olosuhteista. Tulosten kannalta oleellista on tietää tarkkaan, mikä kertoimen F arvo tutkittavalle alueelle voidaan määrittellä. Väärällä kertoimen arvolla voi olla suuri haittavaikutus maadoituksen tehokkuuteen ja näin ollen suora vaikutus turvallisuusehtojen täyttymisen kannalta.

Aiemmin esiteltiin jo laskentakaavat sekä niissä olevat suureet. Seuraavaksi käydään läpi muutama laskentaesimerkki näitä kaavoja hyödyntäen.

Esimerkissä kertoimelle F on valittu arvot kaksi ja neljä havainnollistamaan kertoimen vaikutusta. Jokaisesta esimerkistä on kaksi tilannetta, joissa toisessa kertoimen arvo on kaksi ja toisessa neljä. Samalla esimerkissä havainnollistetaan maasulkuvirran kompensoinnin vaikutusta lopputulokseen. Kompensoitu verkko on toinen nimitys sammutetulle verkolle. Esimerkeissä käytetyt arvot ovat peräisin verkkotietojärjestelmästä, eli maasulkuvirran arvot, sallitut U_{TP} maadoitusimpedanssit sekä laukaisuaajat. Näiden lähtötietojen pohjalta on arvoista laskettu ulos kosketusjännite.

Esimerkissä yksi on esitetty tilanne, jossa koko verkko on kompensoitu ja laukaisuaika on 0,6 sekuntia. Esimerkissä kaksi on taas tilanne, jossa vain hajautettu kompensointi on käytössä. Esimerkissä kolme taas verkkoa ei ole kompensoitu ollenkaan, eli kyseessä on maasta erotettu verkko. Kahdessa jälkimmäisessä esimerkissä laukaisuaika on 0,1 sekuntia.

Esimerkki 1.

$$U_E = F \cdot U_{TP} = 2 \cdot 181 \text{ V} = 361 \text{ V}$$

$$Z_E = \frac{U_E}{I_E} = \frac{361 \text{ V}}{13.9 \text{ A}} = 26 \Omega$$

$$U_E = F \cdot U_{TP} = 4 \cdot 181 \text{ V} = 723 \text{ V}$$

$$Z_E = \frac{U_E}{I_E} = \frac{723 \text{ V}}{13.9 \text{ A}} = 52 \Omega$$

Esimerkin yksi tilanteessa kosketusjännite jää alle kuvaajan yksi esittämän käyrän, jolloin maadoitus on standardin mukainen. Täysin kompensoidussa verkossa maasulkuvirta on pieni, jolloin myös suuremmat maadoitusimpedanssin arvot täyttävät vaatimukset.

Vaikka maadoituksen toteuttaminen käyttäen määrittävänä arvona kokonaan kompensoitua maasulkuvirtaa vaikuttaa hyvältä, ei se sitä kuitenkaan ole. Maadoituksen mitoituksessa pyritään tilanteeseen, jossa standardin vaatimus kosketusjännitteestä kyetään täyttämään joka tilanteessa. Siksi mitoitusta ei voida tehdä kokonaan kompensoidun verkon tapauksessa, koska yhden laitteen rikkoutuminen voi johtaa tilanteeseen, jossa vaatimukset eivät enää täyty.

Esimerkki 2.

$$U_E = 2 \cdot 627 \text{ V} = 1254 \text{ V}$$

$$Z_E = \frac{1254 \text{ V}}{139.3 \text{ A}} = 9 \Omega$$

$$U_E = 4 \cdot 661 \text{ V} = 2647 \text{ V}$$

$$Z_E = \frac{2647 \text{ V}}{139.3 \text{ A}} = 19 \Omega$$

Esimerkki kaksi on tilanne, joka olisi mahdollinen työssä tutkittavalla alueella. Alueen maadoitustutkinta tehdään mallintaen tilannetta, jossa keskitettykompensointi ei ole käytössä. Mitoituksessa huomioidaan vain keskitetty kompensointi, koska yhden hajautetun kompensoinnin kelan pudotessa pois verkosta, kykenee keskitetty kompensointikela hoitamaan näin syntyneen lisäkompensoinnin tarpeen. Hajautetun kompensoinnin kelat eivät kykene täyttämään keskitetyn kompensointikelan jättämää tyhjiötä kompensointi tarpeeseen.

Esimerkin kaksi tilanteessa kosketusjännite täyttää kuvaajan yksi asettamat vaatimukset 0,1 sekunnin laukaisuajalla. Kertoimen kaksi arvolla laskettu tulos toimii vertailuarvona myöhemmin laskettavalle resultoivalle impedanssille. Tutkittavalla alueella maadoitusimpedanssin tulisi siis olla yhdeksän ohmia tai alle, jotta se täyttää vaatimukset.

Esimerkki 3.

$$U_E = 2 \cdot 677 \text{ V} = 1354 \text{ V}$$

$$Z_E = \frac{1354 \text{ V}}{169.3 \text{ A}} = 8 \Omega$$

$$U_E = 4 \cdot 634 \text{ V} = 2540 \text{ V}$$

$$Z_E = \frac{2540 \text{ V}}{169.3 \text{ A}} = 15 \Omega$$

Esimerkin kolme tilanne täyttää myös kuvaajan yksi asettaman vaatimuksen kosketusjännitteen suhteen sen jäädessä kuvaajan käyrän alapuolelle, kun jännitteen kestoaika on 0,1 sekuntia.

Kuten esimerkeistä havaitaan, riippuu vaadittu maadoitusimpedanssin arvo useasta tekijästä. Mitoitettaessa maasulkuvirta on arvioitava oikein, koska maasulussa syntyvän maasulkuvirran suuruus voi vaihdella. Jos maasulkuvirta nousee mitoitettua suuremmaksi, vaikuttaa se suoraan myös kosketusjännitteeseen. Tässä tilanteessa maadoitus ei olisi enää turvallinen.

Kun maadoituksen mitoitus tehdään esimerkin kaksi arvoja käyttäen, on parhaat edellytykset varmistua siitä, että maadoitus pystyy pitämään kosketusjännitteet kyllin matalina vikatilanteissa. Kuten esimerkeistä nähdään, on kertoimen F oikean asettelulla suuri vaikutus maadoitusimpedanssin suuruuteen. Väärän kertoimen käyttö voi johtaa tulosten virheelliseen tulkintaa, joka antaa väärän käsityksen maadoituksesta ja sen tehokkuudesta.

Muistutuksena vielä, että maadoitusjärjestelmän tehokkuuden mittana käytetään maadoitusimpedanssia. Mitä pienempi impedanssi on, sitä tehokkaampana maadoitusjärjestelmää voidaan pitää. Tästä syystä aina maadoitusta mitoitettaessa pyritään käyttämään kerrointa kaksi.

4 MAADOITUSLASKENTA

Työssä on tähän asti keskitytty vain teoriaan ja pyritty luomaan ymmärrystä laskennan antamien tulosten tulkinnan kannalta oleellisilta osilta. Kappaleessa neljä lasketaan tutkittavan alueen resultoiva maadoitusimpedanssi ja suoritetaan tarkastelu standardin määrittämien kriteerien perusteella. Tavoitteena on luoda selkeä käsitys tavasta, jolla laskenta on työssä suoritettu. Kappaleen alussa pohjustetaan nopeasti mitä kaikkea verkkotietojärjestelmää tulee tehdä, jotta saadaan oikeita laskentatuloksia.

Liitteessä yksi on esitettyinä kaikki lähtöarvot, joiden mukaan laskenta on suoritettu. Liitteessä kaksi on jokaisen tutkittavan alueen muuntamon laskenta ja sen tulokset. Kaikki laskennassa hyödynnetty tieto on saatu verkkotietojärjestelmästä.

4.1 Esivalmistelut

Ennen laskentaa tulee suorittaa tietyt esivalmistelut, jotta laskenta toimisi kunnolla. Työssä on käytössä Trimble NIS verkkotietojärjestelmä ja kaikki vaadittavat toimet on laadittu kyseisen järjestelmän vaatimusten mukaan. Eri järjestelmissä voi olla eroavaisuuksia vaatimusten suhteen.

Työssä nojataan vahvasti verkkotietojärjestelmän tuottamaan pohjadataan, esimerkiksi maasulkuvirtaan ja maadoitusjännitteeseen. Trimble NIS järjestelmällä nämä tulokset saadaan laskettua, mutta toimiakseen oikein on järjestelmään annettava joitakin perustietoja.

Vaadittavat perustiedot ovat kaapelien ominaisuus tiedoja, jotka yleensä löytyvät jo järjestelmästä. Laskennassa hyödynnetään kaapeleille syötettyjä tietoja ja näiden ollessa virheellisiä, ovat myös laskentatulokset virheellisiä. Virheellinen alku-data voi johtaa virheelliseen lopputulokseen, joka taas antaa vääränlaisen kuvan maadoitusjärjestelmän toimivuudesta. Tärkeintä on varmistaa, että lähtötiedot ovat kunnossa.

Työn edetessä erään käsin laskennan yhteydessä lähtöarvoiksi valikoitui kaapelille väärä reaktanssi. Väärän arvon valinta aiheutti lopputulokseen pienen virheen.

Maadoitusjohtimien osat

Jotta laskenta voisi toimia, tulee järjestelmään mallintaa maadoitukset. Trimlessä maadoitusten lisääminen tehtiin alkioiden ja osien luomisella maadoituselektrodeille. Kun osat on lisätty, tulee osille vielä lisätä ominaisuustiedot. Ominaisuustieto tarkoittaa tässä tapauksessa resistanssin, reaktanssin ja käyttökapasitanssin arvoa kilometriä kohden. Jos osat on jo luotu, on tarkastettava, että osat ovat yhtenäisiä. Jos maadoitusjohtimia ei ole dokumentoitu kunnolla ja ne eivät ole yhtenäisiä, ei laskenta voi toimia oikealla tavalla.

Muuntamoiden maadoituselektrodit

Muuntamoille tulee lisätä maadoituselektrodit. Elektrodi tulee kiinnittää samaan pisteeseen, kuin maadoitusjohtimien osat. Maadoituselektrodille tulee myös lisätä mitattu tai laskettu tieto muuntamon maadoitusimpedanssista. Tämän lisäksi elektrodille tulee määrittää, mitä tietoa käytetään. Oletusarvona on, että elektrodi käyttää laskennassa laskettua arvoa impedanssille. Tämä tulee vaihtaa käyttämään mitattua arvoa, koska muuten laskenta tulkitsee impedanssin arvon nolana, eikä näin ollen anna mitään tulosta.

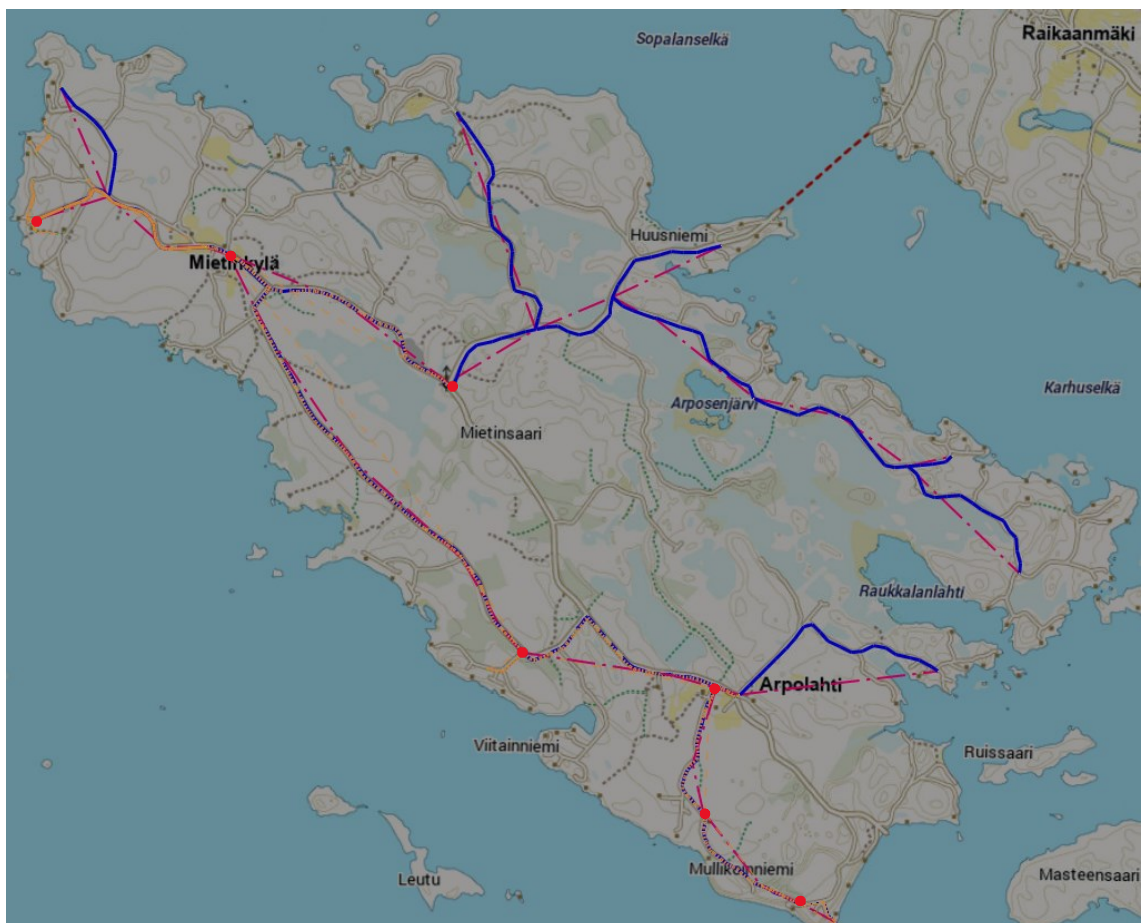
Kaapeleiden datan tarkistaminen

Tarkasteltavan muuntopiirin kaapeleiden data on myös syytä tarkastaa. Kuten edellä mainittiin, hyödynnetään laskennassa verkkotietojärjestelmän antamia tuloksia. Näin ollen varsinkin keskijännitekaapeleiden tiedot on tarkistettava ja varmistuttava, että ne ovat oikein. Kaapeleiden datasta tärkempinä tarkastettavina tietona ovat kaikki kaapelin impedanssiin vaikuttavat tekijät. Sekä maakapasitanssi, jotta järjestelmä tuottaa todenmukaisen maasulkuvirran.

4.2 Resultoivan impedanssin laskenta

Kuten luvussa kaksi todettiin, toimii maadoitusimpedanssi maadoituksen tehon mittarina ja tämän tulee olla mahdollisimman pieni. Samassa luvussa käsiteltiin resultoivaa impedanssia sekä sen muodostumista ja vaikutusta muuntopiirin maadoitukseen. Kohdassa 2.2 todettiin, että resultoivan impedanssin avulla voidaan saada yhteen liitettyjen maadoitusten maadoitusimpedanssi laskemaan vaatimusten edellyttämälle tasolle.

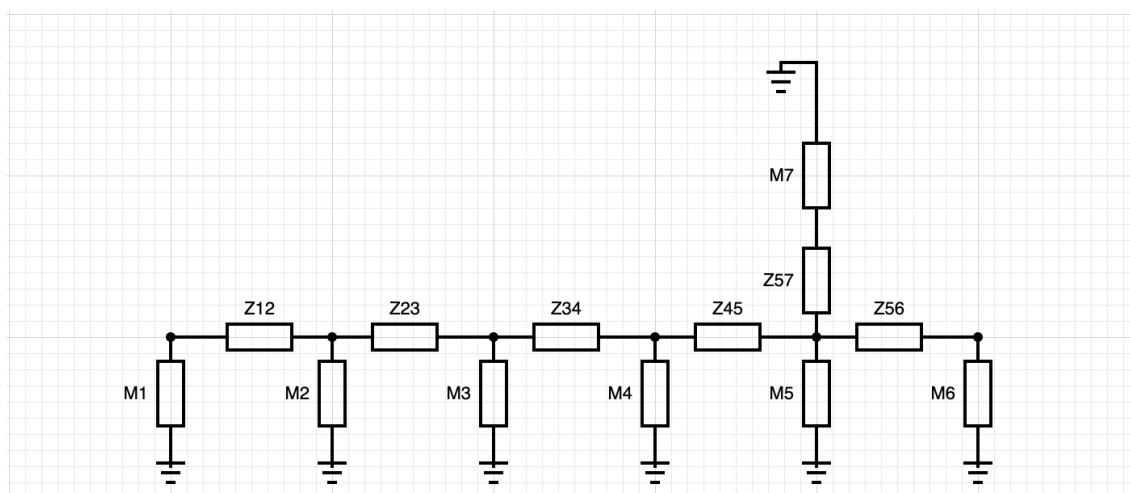
Esimerkkialueeksi on valikoitu Mietinsaari, johon muodostuu yhteen liitetyn maadoituksen alue. Mietinsaarella on riittävästi muuntamoita, jotta vertailutulos saadaan laskettua käsin. Ja sitä voidaan pitää luotettavana, kun tarkastellaan laskennan tuloksia. Kuvassa kolme on esitettyä karttakuvaa alueesta, jolle on suoritettu käsin resultoivan impedanssin laskenta. Kuvassa maadoitusjohtimet ovat oranssilla ja kaapelit punaisella viivalla. Muuntajien paikat on merkattu punaisella pisteellä.



KUVA 3. Tutkittava alue

Muuntamoiden numerointi on aloitettu alimmasta muuntamosta ja siirrytty ylöspäin siten, että ylhäällä vasemmalla on muuntamo M7 ja oikealla muuntamo M6. Laskennassa huomioitavien muuntamoiden välisten yhdistysjohtimien on katsottu olevan ne johtimet, jotka lähtevät muuntajalta.

Työssä esitettävät tulokset resultoivan impedanssin eri arvoille on saatu havainnollistamalla tutkittavaa aluetta ensin sijaiskytkennällä. Sijaiskytkentää on tämän jälkeen yksinkertaistettu muodostamalla piiriin rinnan kytkentöjä, joiden avulla on saatu tarkastelupisteestä katsoen resultoiva impedanssi. Kuva neljä esittää alueen sijaiskytkentänä, josta saa paremman käsityksen, mitä kaikkea laskennassa on huomioitu. Esimerkiksi vastus Z_{12} kuvastaa muuntamolta M1 lähtevää kaapelin ja maadoitusjohtimen rinnankytkentää.



KUVA 4. Tutkittavan muuntopiirin sijaiskytkentä

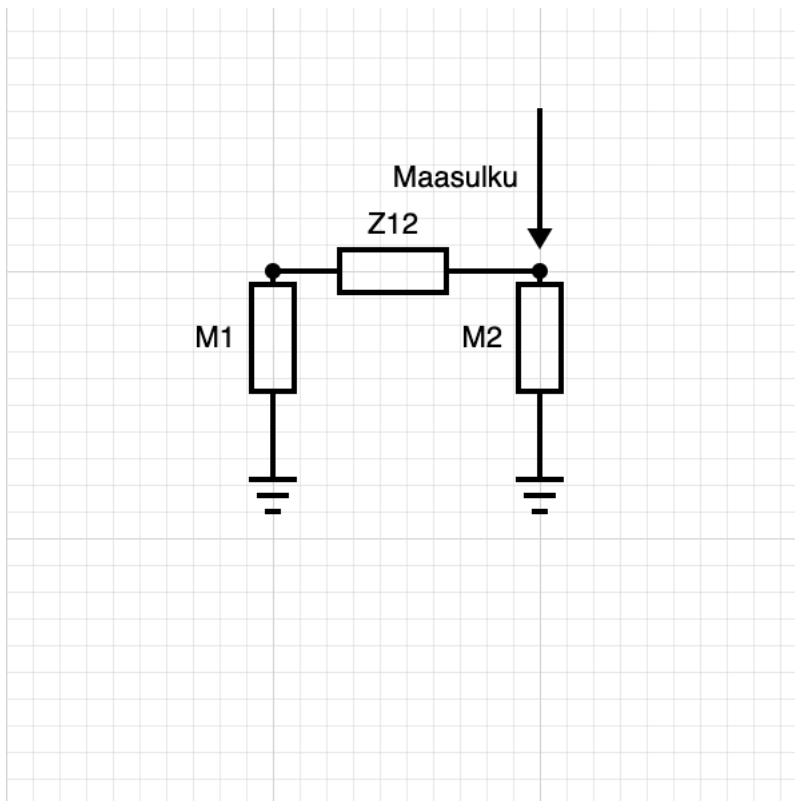
Kuvassa neljä kaikki vastukset, jotka on nimetty M kirjaimella, kuvastavat piirissä olevien muuntamoiden mitattua maadoitusimpedanssia. Kaikki vastukset, jotka on merkattu kirjaimella Z, kuvastavat muuntamoiden välisien yhteyksien impedanssia. Yhteyksiksi on katsottu kuuluvan kaikki maadoitukseen vaikuttavat tekijät. Yhteyksien muodostaman vastuksen arvo on laskettu yhdistysjohtimen ja maadoitusjohtimen muodostamien impedanssien rinnan kytkentänä.

Virtaiiristä on valittu tarkastelupisteeksi resultoivaa impedanssia laskettaessa jokaisen muuntamon kohdalla se piste, jossa kyseinen muuntamo kytkeytyy osaksi piiriä. Eli jokaista tarkastelupistettä kuvaa sijaiskytkennässä oleva musta pallo

liitoskohdassa. Tässä pisteessä vian, eli maasulun, katsotaan tapahtuvan ja viavirran levittäytyvän piiriin. Esimerkkilaskennassa tarkastelupisteeksi on valittu muuntamo M7, jolloin piirin läpikäyminen aloitetaan muuntamon M1 suunnalta. Alla esitettyä kaava kolme, jolla laskenta on suoritettu.

$$M_k = \frac{M_n \cdot (Z_x + M_{n+1})}{M_n + (Z_x + M_{n+1})} \quad 3$$

Tarkastelu on tehty kahden muuntamon paloissa kuvan viisi mukaisesti, pienentäen piiriä jokaisen laskentakerran jälkeen yhdellä muuntamolla. Paloittaisen putrun lopputulema on yksi vastus, joka kuvastaa tarkastelupisteen resultoivaa impedanssia.



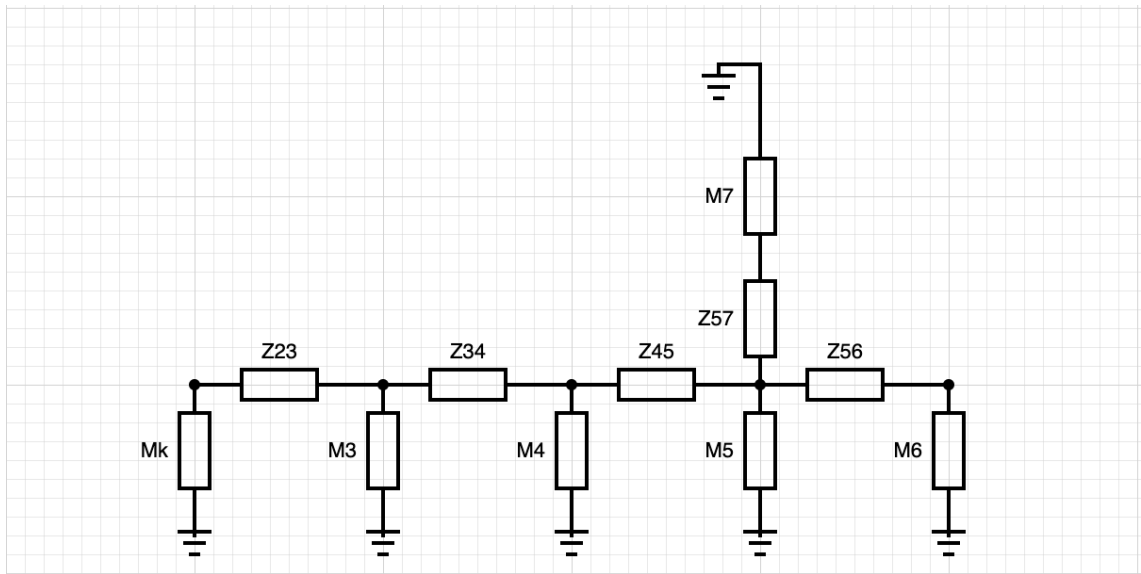
KUVA 5. Tarkasteltava piiri

Kuvassa viisi on esitettyä tarkasteltava osa. Tarkastelussa on kerrallaan kaksi muuntamoa ja niitä yhdistävä johdin. Maasulun katsotaan tapahtuvan kuvassa viisi nuolen osoittamassa kohdassa, jolloin muuntamon M2 resultoiva impedanssi lasketaan kaavalla kolme seuraavasti.

$$M_k = \frac{M_2 \cdot (Z_{12} + M_1)}{M_2 + (Z_{12} + M_1)}$$

$$M_k = \frac{0,9 \, \Omega \cdot (0,348 \, \Omega + 6,9 \, \Omega)}{0,9 \, \Omega + (0,348 \, \Omega + 6,9 \, \Omega)} = 0,80 \, \Omega$$

Tämän jälkeen muuntamot M1 ja M2 sekä näiden välillä oleva impedanssi voidaan korvata lasketulla impedanssin arvolla 0,80 Ω. Tämän jälkeen piirin tulisi näyttää kuvan kuusi mukaiselta.

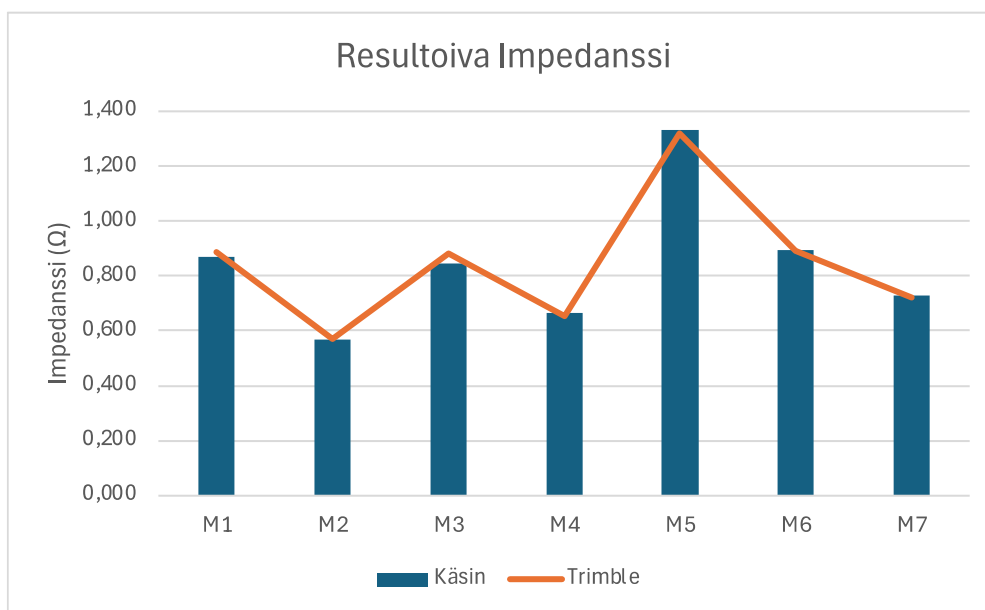


KUVA 6. Yhdellä muuntamolla supistettu piiri

Piirin läpikäymistä jatketaan samalla tavalla niin kauan, kunnes jäljellä on vain yksi impedanssi arvo. Tämä arvo on kyseisestä pisteestä katsoen kysytty resultoiva impedanssi. Samanlainen laskenta suoritetaan jokaiselle muuntamolle erikseen, jolloin tulokseksi saadaan kaikkien muuntamoiden muodostama resultoiva impedanssi.

4.3 Laskennan tulokset

Jotta voidaan varmistua Trimblen tarjoamien tulosten paikkansapitävyydestä, on niille oltava joku vertailun kohde. Tästä syystä laskenta suoritettiin aluksi käsin ja saatuja tuloksia verrataan Trimblen antamiin tuloksiin. Alla esitettynä kaaviossa yksi tulokset resultoivalle impedanssille. Kaavion alapuolella olevassa taulukossa on esitettynä samat arvot numeerisesti.



KAAVIO 1. Laskennan tulokset

Kaaviossa siniset palkit kuvastavat käsin laskettua tulosta ja oranssi viivaa taas kuvastaa verkkotietojärjestelmän tuottamaa tulosta.

TAULUKKO 2. Numeeriset tulokset

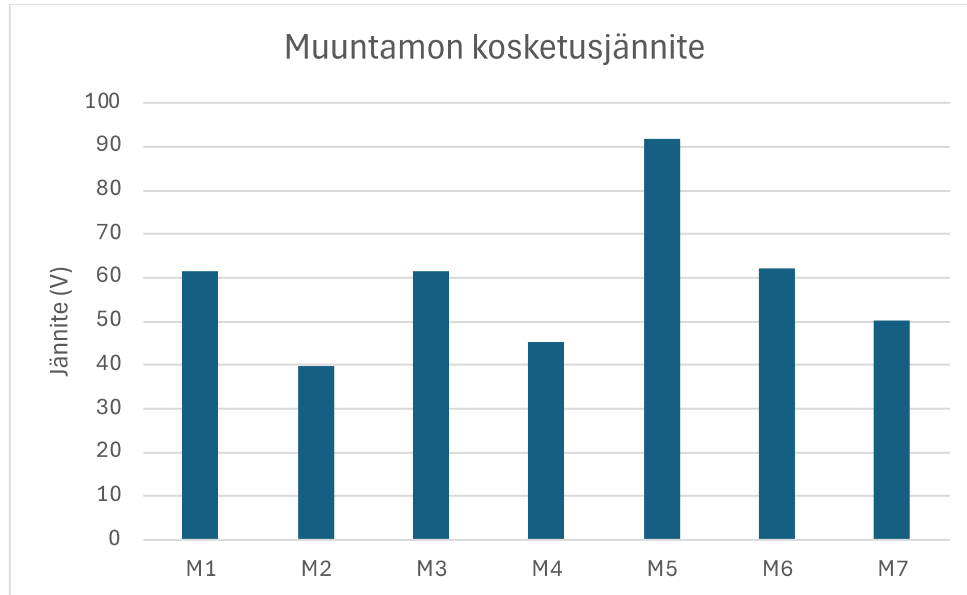
Muuntamo	Käsin	Trimble	Ero (Ω)
	Resultoiva impedanssi (Ω)		
M1	0,870	0,884	0,014
M2	0,567	0,570	0,003
M3	0,845	0,883	0,038
M4	0,665	0,651	0,014
M5	1,33	1,319	0,011
M6	0,895	0,891	0,004
M7	0,730	0,720	0,010

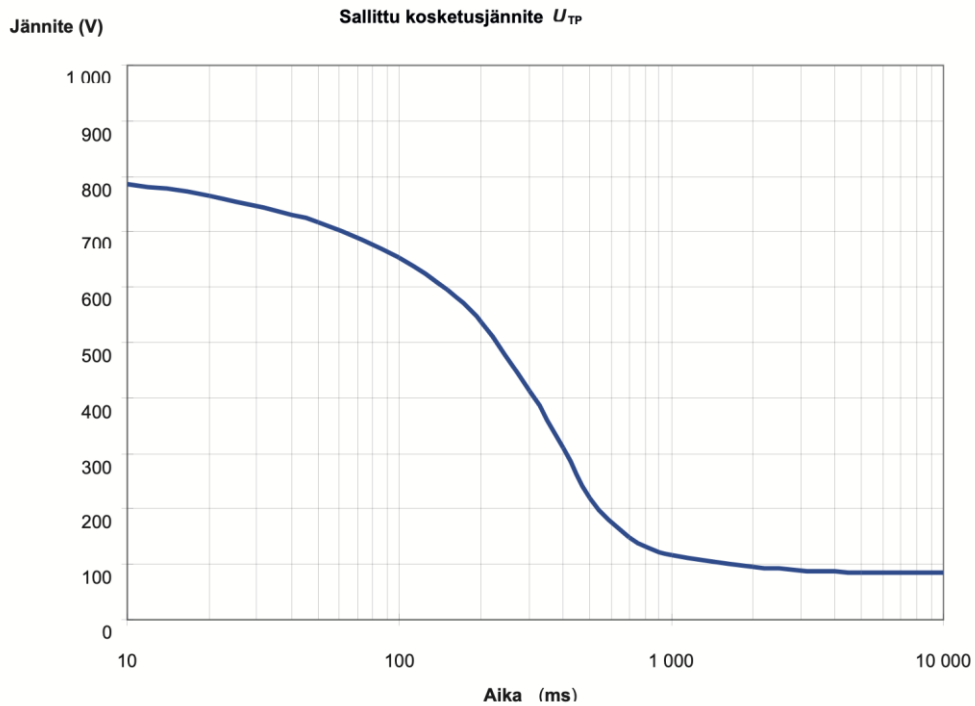
Kuten kaaviossa yksi ja taulukossa kaksi esitettävät arvot näyttävät, ovat laskennasta saadut tulokset linjassa keskenään. Tulosten välillä esiintyvät erot ovat hyvin pieniä ja eivätkä näin ollen vaikuta lopputulokseen. Mahdollisia syitä pienille heitoille on erilaiset tavat käsitellä lähtöarvoja, toisin sanoen lähtöarvoja on pyöristetty eri tavalla.

4.4 Alueen U_{TP} vaatimukset

Pyrittäessä kertoimen F arvoon kaksi olisi esimerkkialueella sallittu maadoitusimpedanssi oltava enintään yhdeksän ohmia. Edellä mainittu arvo on kriteerien mukaan yhtiön alueelle määrittämä arvo. Liitteessä yksi olevassa taulukossa on esitettyä kaikkien alueen huomioitavien muuntajien maadoitusimpedanssi.

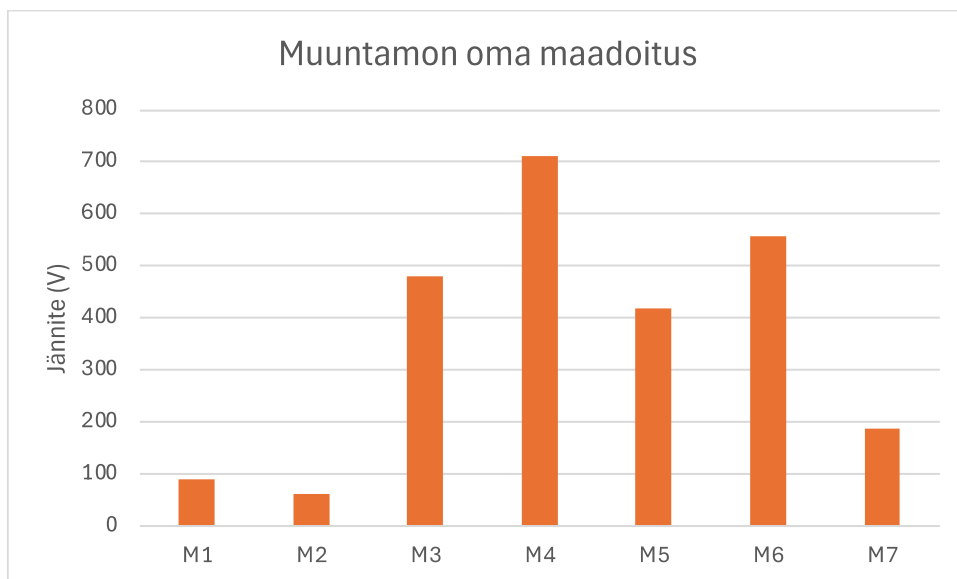
Kuten kappaleessa kolme mainittiin, tulee kosketusjännitteiden pysyä riittävän matalina, jotta turvallisuus voidaan taata. Turvallisuuden kannalta oleellisin on verkossa ilmenevä kosketusjännite. Kun tiedetään verkossa syntyvä maasulkuvirta sekä maadoitus impedanssi, voidaan kosketusjännite laskea kappaleen 3.2.1. esimerkkiä hyödyntäen. Kuvaajassa yksi on esitettyä sallittu kosketusjännite, joka piirissä voi standardin mukaan esiintyä. Kaavoja yksi ja kaksi käyttäen, kertoimen F arvolla kaksi, on jokaiselle muuntamolle laskettu siellä mahdollisesti esiintyvä kosketusjännite. Arvot ovat taulukoituna alhaalla kaaviossa kaksi ja tulosten tulkinnan helpottamiseksi myös kuvaaja yksi on esitetty samassa yhteydessä uudestaan.





KAAVIO 2. Muuntamoiden mahdolliset kosketusjännitteet ja sallittu kosketusjännite.

Kaaviossa kolme on esitettyä samojen muuntamoiden kosketusjännite, jos ne eivät olisi osana yhteen liitettyä maadoitusta. Kaikki lähtöarvot ovat samoja, kuin kaavion kaksi tapauksessa mutta nyt muuntamon omaa maadoitusimpedanssia on käytetty vaikuttava tekijänä mitoituksessa resultoivan impedanssin sijaan.



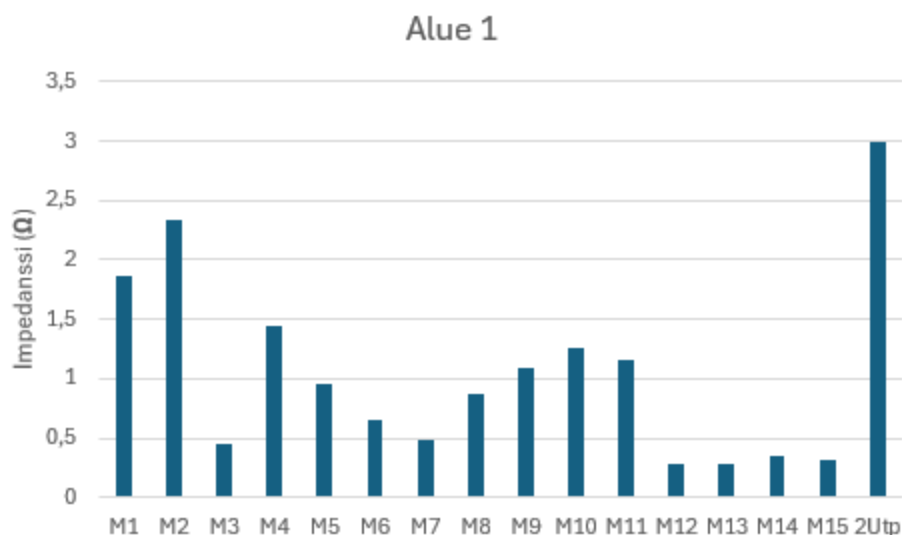
KAAVIO 3. Kosketusjännite ilman resultoivaa impedanssia

Kaavioiden kaksi ja kolme tulosten ero havainnollistaa erinomaisesti, kuinka merkittävä vaikutus sillä on, onko muuntamo osana yhteen liitettyä taikka laajaa maadoitusjärjestelmää. Ollessaan osa yhteen liitettyä järjestelmää koko piirin suurin mahdollinen kosketusjännite on hieman alle sata volttia. Yksittäisen muuntamon maadoituksen tapauksessa suurin mahdollinen kosketusjännite on jo 700 volttia.

4.5 Uudet alueet

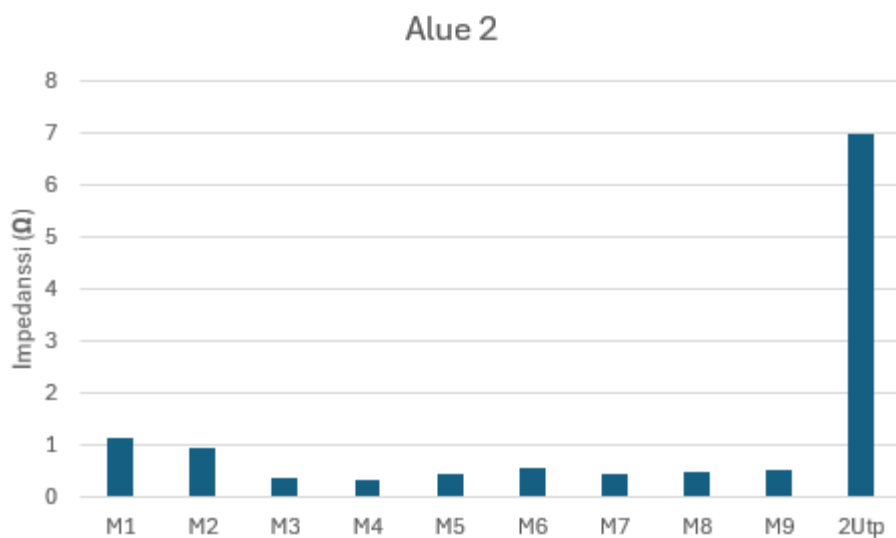
Kun maadoituslaskennan todetaan toimivan kunnolla ja oikein. Voidaan käyttöön-ottoa laajentaa alkuperäisen alueen ulkopuolelle. Verkostoalueelta valikoitui kolme uutta aluetta, jotka ovat osittain yhteen liitettyä maadoitusta mutta yhtyvät kuitenkin reunoiltaan laajaan maadoitukseen. Näillä alueilla suoritetaan myös maadoituslaskenta mutta ainoastaan verkkotietojärjestelmällä. Laskennasta saadut tulokset ovat esitettynä alhaalla kolmessa kaaviossa.

Kaavioihin on lisätty viimeiseen sarakkeeseen muuntamoiden lisäksi myös alueen tavoiteltu maadoitusarvo, eli $2U_{TP}$. Arvolla tässä yhteydessä tarkoitetaan vaadittavaa maadoitusimpedanssia, jotta kosketusjännitteen osalta saavutetaan $2U_{TP}$ taso. Jatkossa tässä opinnäytetyössä termillä $2U_{TP}$ kuvastetaan siis vaadittua impedanssiarvoa.



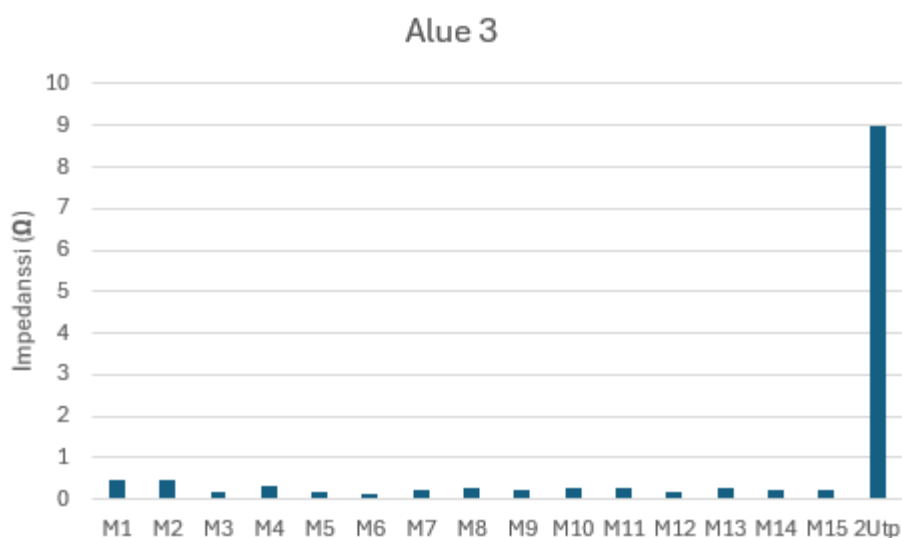
KAAVIO 4. Alue 1 resultoiva impedanssi

Kaaviossa neljä on esitettyä ensimmäinen kolmesta uudesta alueesta. Alueen yksi tapauksessa siihen liittyvä laaja maadoitus on muita kahta alueeltaan pienempi, joka näkyy myös resultoivan impedanssin arvoissa. Ne ovat hieman suurempia, kuin kahdessa muussa.



KAAVIO 5. Alue 2 resultoiva impedanssi

Kaaviossa viisi on esitettyä toinen kolmesta uudesta alueesta. Alue kaksi liittyy hieman suurempaan laajan maadoituksen alueeseen, kuin alue yksi ja sekin näkyy resultoivassa impedanssissa, joiden arvot ovat matalampia, kuin alueen yksi tapauksessa mutta eivät aivan niin matalia kuin alueen kolme tilanteessa.



KAAVIO 6. Alue 3 resultoiva impedanssi

Kaaviossa kuusi on esitettyinä viimeinen kolmesta alueesta. Alue kolme liittyy kaikkein suurimpaan laajan maadoituksen alueeseen, joka näkyy selkeästi impedanssien arvoissa.

Kaikissa kolmessa kaaviossa on esitettyinä resuloiva impedanssi. Erona ensimmäiseen tutkittuun alueeseen on se, että näillä kolmella alueella on laaja maadoitusjärjestelmä tukemassa maadoitusta. Tämä mahdollistaa maasulkuvirran jakautumisen myös laajan maadoituksen alueelle, joka laskee varsinkin alueen kolme resuloivia impedansseja todella alhaisiksi.

5 LOPPUTULOKSET

Opinnäytetyössä käsiteltiin maadoituksen teoriaa ja siihen liittyviä ilmiöitä. Käytiin muutamia laskentaesimerkkejä läpi ja perehdyttiin niiden tuloksiin. Tulosten tulokinnan yhteydessä käytiin läpi, kuinka niistä saadaan tulokset ulos ja mitä nämä tulokset tarkoittavat. Tämän jälkeen esiteltiin varsinaiset laskennan tulokset. Nyt kaikkea aikaisemmin käytyä hyödyntäen analysoidaan saadut tulokset.

5.1 Tarkasteltu alue

Käsin lasketut vertailuarvot ja verkkotietojärjestelmän tuottamat laskentatulokset ovat käytännössä yhtä suuria. Erot ovat niin vähäisiä, että ne eivät vaikuta merkittävästi lopputulokseen. Molemmat tulokset ovat riittävän pieniä täyttämään alueelle asetetun vaadittavan maadoitusimpedanssin arvon. Alueellisia maadoitusimpedanssin U_{TP} arvoja ei työssä voida esittää muuten kuin viittaamalla, koska ne sisältävät sähköverkontunnistetietoja.

Kuten aiemmin todettiin, niin maadoituksen tehokkuuden mittana käytetään maadoitusimpedanssia. Mitä pienempi se on, sitä tehokkaampi maadoituksen voidaan olettaa olevan. Kuten Mietinsaaren arvoista nähdään, ovat alueen maadoitusimpedanssin arvot kyllin matalia täyttämään U_{TP} vaatimukset. Alueen maadoituksenhan tuli olla alle yhdeksän ohmia, jotta saavutettaisiin arvo $2U_{TP}$. Tarkasteltavan alueen maadoitusominaisuudet ovat muutenkin hyvät, jolloin $2U_{TP}$ arvo saavutetaan monella muuntamolla jo ilman yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän tuomaa etua.

Liitteessä yksi on esitettynä kaikkien muuntamoiden omat maadoitusimpedanssin arvot. Alueen vaadittavan maadoituksen arvon ollessa yhdeksän ohmia päästäisiin kaikkien muiden muuntamoiden kohdalla vaadittavaan maadoitusimpedanssin arvoon muuntamon oman maadoituselektrodin avulla, muuntamoa M3 lukuun ottamatta. Muuntamon M3 maadoitusimpedanssi on yli kymmenen ohmia, joka tarkoittaa, ettei se täyttäisi kertoimen F arvon kaksi vaatimuksia. Ollessaan osa yhteen liitettyä maadoitusta resultoivan impedanssin avulla koko alue täyttää arvon kaksi vaatimukset.

Muutamalla muulla alueella muuntamoiden omat maadoitusarvot ovat niin suuria, etteivät ne yksinään täyttäisi vaadittua $2U_{TP}$ arvoa. Tällaisissa maadoituksissa, jotka on rakennettu huonompien maadoitusominaisuuksien alueelle, on yhteen liitetystä ja laajasta maadoituksesta suuri apu tavoitearvojen saavuttamisessa.

Kaaviossa kaksi on taas esitettyä kosketusjännitteet ja muuntopiirin turvalaitteiden laukaisuaikojen ollessa 0,1 sekuntia ovat jännitteet riittävästi kuvaajan yksi määrittelemän kosketusjänniterajan alapuolella. Arvot ovat jopa niin matalia, että tutkittavan alueen käyttämistä voisi teoriassa jatkaa maasulun sattuessa normaalisti. Kosketusjännite pysyttelee koko ajan kuvaajan yksi käyrän alapuolella. Muuntamon M5 kohdalla jännite on kuitenkin niin lähellä raja-arvoa, että käyttö maasulussa ei ole suositeltavaa.

Kaaviossa kolme on esitettyä jokaiselle muuntamolle mahdollisesti muodostuva kosketusjännite, jos muuntamot eivät olisi osana yhteen liitettyä maadoitusjärjestelmää. Jokaisella muuntamolla vaikuttaa samansuuruinen maasulkuvirta kuin kuvaajan kolme tapauksessa ja laukaisuaika on 0,1 sekuntia kertoimen F ollessa kaksi. Arvot pysyttelevät pääsääntöisesti tässäkin tilanteessa sallituissa rajoissa, mutta ovat huomattavasti korkeammalla, kuin yhteen liitetyn maadoituksen tilanteessa.

Esimerkissä kaksi laskettiin alueelle kosketusjännitteen arvot todellista käyttötilannetta vastaavilla arvoilla, jolloin kertoimen arvolla kaksi ja neljä sallitun kosketusjännitteen arvoksi saatiin 627 voltia tai 661 voltia. Näillä arvoilla muuntamo M4 ei saavuttaisi standardin vaatimaa tasoa kosketusjännitteestä.

Kaavioiden kaksi ja kolme erot osoittavat miten suuri vaikutus yhteen liitettyllä maadoitusjärjestelmällä on syntyviin kosketusjännitteisiin ja sitä kautta suoraan turvallisuuteen. Vertaamalla kaavioiden kaksi ja kolme muuntamon M4 kosketusjännitettä voidaan havaita yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän tuoma hyöty visuaalisesti. Kun maasulkuvirralla on mahdollisuus levittyä koko maadoitusverkon alueelle, on kaaviossa kaksi muuntamon M4 kosketusjännite pienempi kuin viereisten M3 ja M5 muuntamoiden. Kaavion kolme tilanteessa taas muuntamon M4

kosketusjännite on suurempi kuin viereisten muuntamoiden. Muuntamon M4 ollessa keskellä maadoitusverkkoa voi tällä muuntamalla syntynyt virta purkautua kahteen suuntaan muuntamolta.

Kun kaikki edellä mainittu otetaan huomioon, voidaan todeta maadoituslaskennan toimivan oikein esimerkkialueella. Laskennasta saatavat tulokset ovat luotettavia ja alueen yhteen liitetyn maadoituksen olevan riittävän tehokas täyttämään turvallisuus vaateet kosketusjännitteiden suhteen.

5.2 Uudet alueet

Koko verkon alueella on useita yhteen liitetyn maadoituksen alueita ja muutamia laajan maadoituksen alueita. Kuten edeltävässä kappaleessa todettiin tulosten tarkastelulla, toimii maadoituslaskenta oikein. Näin ollen voidaan laskennan käyttöönotto laajentaa koskemaan kaikkia maadoitusalueita. Kaikki yhteen liitetyt maadoitusalueet ja laajan maadoituksenalueet käydään läpi ja valmistellaan maadoituslaskennan käyttöönottoa varten. Kun esivalmistelut, jotka on kuvattu kappaleessa 4.1 on tehty, voidaan maadoituslaskentaa ja sen toimivuutta testata alueella.

Testaamisella ei ainoastaan varmistuta laskennan toimimisesta oikein, vaan samalla tarkastetaan, onko maadoitusverkko kytkeytynyt oikein. On mahdollista, että laskenta toimii oikein mutta maadoitusjohtimet ovat irti tai kytkeytyneet väärin muuntamoon tai toisiinsa. Nämä virheet vaikuttavat maadoitusimpedanssin suuruuteen.

Koko verkon alueelta tarkasteluun otetaan kolme sellaista aluetta, jossa yhteen liitetty maadoitusverkko liittyy laajaan maadoitusverkkoon. Tarkastelussa olevista alueista käytetään seuraavia nimityksiä: Alue yksi, Alue kaksi ja Alue kolme. Tämä siksi, että paikkatietoja ei paljasteta liikaa. Näiden alueiden maadoitusimpedanssien arvot löytyvät myös liitteenä kaavioiden lisäksi. Arvot ovat ainoastaan verkkotietojärjestelmän tuottamat, koska enää ei käsin laskemiselle ole tarvetta.

Alueille oli määritetty erisuuruisia $2U_{TP}$ arvoja toisin kuin ensimmäisellä tutkittavalla alueella, jossa oli sama arvo koko piirin alueella. Vertailuarvoksi on valittu

koko alueella vallitseva pienin $2U_{TP}$ arvo. Koska jos pienin arvo täyttyy koko alueella, voidaan olettaa myös suurempien arvojen täyttyvän muualla alueella.

Ensimmäisenä otetaan tarkasteluun alue yksi. Suurin esiintyvä resultoivan impedanssin arvo alueella on 2,3 ohmia. Ja pienin vaadittu $2U_{TP}$ arvo alueella on kolme ohmia. Alueella kaksi suurin resultoivan impedanssin arvo on 1,1 ja pienin vaadittu $2U_{TP}$ arvo seitsemän ohmia. Alueella kolme suurin resultoivan impedanssin arvo on 0,47 ohmia ja pienin $2U_{TP}$ arvo on yhdeksän ohmia.

Kaikkien kolmen uuden alueen maadoituslaskennan tulokset ovat kyllin matalia täyttämään vaaditut $2U_{TP}$ arvot. Kuten alkuperäisen alueen kohdalla, myös uusilla alueilla on muutamia muuntamoita, joiden maadoitus ei täytä haluttua $2U_{TP}$ arvoa omillaan. Ollessaan osana yhteen liitettyä maadoitusta täyttävät kuitenkin nämäkin muuntamot resultoivan impedanssin avulla $2U_{TP}$ maadoitusvaatimukset.

Jo pelkästään se, että laskenta antaa tuloksia, on verkko maadoituslaskennan edellyttämässä kunnossa. Jos piirissä olisi joitain virheitä, ei laskenta antaisi muuta tulosta kuin virhekoodin. Toisena voidaan todeta, että maadoituksen arvot ovat kaikissa tilanteissa kyllin matalia täyttämään vaaditut $2U_{TP}$ arvot. Kuten kaavioiden yksi ja kaksi tuloksista, sekä aikaisemmin esitetystä maadoitusjännitteen laskenta esimerkistä voidaan päätellä, voidaan kosketusjännitteen todeta pysyvän myös riittävän matalana näillä uusilla alueilla taatakseen turvallisuuden. Tulosten mukaan maadoitusimpedanssi on matalampi kuin vaadittu $2U_{TP}$ arvo.

LÄHTEET

Elovaara, J., Haarla, L. Sähköverkot I — Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta, 2. Painos. 2019

Elovaara, J., Haarla, L. Sähköverkot II — Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, 2. Painos, 2019.

Energiateollisuus ry. Muuntopiirien ja pylväserotinasemien maadoitukset SFS 6001 / 2015 mukaan, Verkostosuositus RJ 19:16. 2016

Energiateollisuus ry. Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen. Verkostosuositus RJ 22:22. 2022

Laukkanen, T. Maasulkuvirtojen ja kosketusjännitteiden hallinta maasulkuvirran kompensoinnilla. 2023. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/165694/Diplomity%c3%b6%20Laukkanen%20Tomi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mäkinen, A. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmistä. 2016 <https://www.elenia.fi/files/0c63041a51828c5e9af6145e9e5dc82032e8b2f0/selvitys-keskija-nniteverkon-maadoitusja-rjestelmista-.pdf>

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. SFS-6001:2018 Suurjännitesähköasennukset, 5. Painos, 2018.

Tielinen, E. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto. Sähköinfo maadoitusopas 2008

LIITTEET

Liite 1. Laskennan lähtöarvot

Kaapeli	Kaapeli (Ω)	Kupari (Ω)	Yhteensä (Ω)	Tunnus
M1	0,630279181	0,77908536	0,34841325	Z
M2	0,587578752	0,748419235	0,32915861	Z
M3	1,022725765	1,272229817	0,56695747	Z
M4	2,209608787	2,714366548	1,21805813	Z
M5	1,309349546	1,441307917	0,68608174	Z
M7			1,25485693	Z

Muuntamo	Resistanssi (Ω)
M1	6,9
M2	0,9
M3	10,2
M4	2,7
M5	8
M6	6
M7	1,3

Muuntamo	Resultoiva impedanssi (Ω)	
	Käsin	Trimble
M1	0,870	0,884
M2	0,567	0,570
M3	0,845	0,883
M4	0,665	0,651
M5	1,33	1,319
M6	0,895	0,891
M7	0,730	0,720

Liite 2. Laskennan tulokset kaikille muuntamoille

M1	Ω
Z_{67}	1,849
Z_{567}	1,502
Z_{4567}	1,355
Z_{34567}	1,617
Z_{234567}	0,615
Z_k	0,846

M2	Ω
Z_{67}	1,849
Z_{567}	1,502
Z_{4567}	1,355
Z_{34567}	1,617
Z_{234567}	0,615
Z_k	0,567

M3	Ω
Z_{4567}	1,355
Z_{12}	0,801
Z_{34567}	1,617
Z_k	0,665

M4	Ω
Z_{67}	1,849
Z_{567}	1,502
Z_{12}	0,801
Z_{123}	1,017
Z_{4567}	1,355
Z_k	0,730

M5	Ω
Z_{67}	1,849
Z_{1234}	0,998
Z_{12345}	1,736
Z_k	0,895

M6	Ω
Z_{12}	0,801
Z_{123}	1,017
Z_{1234}	0,998
Z_{12345}	1,736
Z_{123457}	1,033
Z_k	1,337

	Ω
Z_{12}	0,801
Z_{123}	1,017
Z_{1234}	0,998
Z_{12345}	1,736
Z_{123456}	1,378
Z_k	0,870

Liite 3. Maadoituksen dokumentointiohje