



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Jaakko Nuolioja

# Ohje teollisuuskohteiden maadoitusten suunnitteluun

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

13.2.2020

Tekijä Otsikko	Jaakko Nuolioja Ohje teollisuuskohteiden maadoitusten suunnitteluun
Sivumäärä Aika	59 sivua + 10 liitettä 13.2.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	osastopäällikkö Leevi Huttunen lehtori Sampsa Kupari
<p>Insinööriytyön tavoitteena oli laatia Sweco Industry Oy:n sähkö- ja automaatio-osastolle ohje teollisuudessa tarvittavien maadoitusjärjestelmien ja -asennusten suunnittelusta. Ohje käsittelee erilaisten maadoitusjärjestelmien ja -asennuksien suunnittelussa huomioon otettavia asioita sekä käytännön maadoitussuunnittelua.</p> <p>Näitä aihealueita käsiteltiin niin voimassaolevien standardien, kirjallisuuden, Sweco Industry Oy:n suunnittelukäytäntöjen sekä käytännön maadoitussuunnittelun näkökulmasta. Työssä keskityttiin suomalaiseen näkökulmaan eli tutkittiin pääasiassa suomalaisia SFS- ja PSK-standardeja, suomalaista sähköalan lainsäädäntöä ja kirjallisuutta, ST-kortteja ja -käsikirjoja sekä Sweco Industry Oy:n omaa suunnitteludokumentaatiota.</p> <p>Työn lopputuloksena laadittiin yhtenäinen ja yleisellä tasolla laaja suunnitteluohje teollisuuskohteiden maadoituksista. Suunnitteluohjetta voidaan käyttää erityisesti uusien, vasta työuraansa aloittelevien suunnittelijoiden perehdyttämisessä teollisuuskohteiden maadoituksien suunnittelun periaatteisiin, ja se toimii yleisenä ohjeena myös kokeneemmille suunnittelijoille, jotka eivät ole vielä osallistuneet laajasti teollisuuskohteiden maadoituksien suunnitteluun.</p> <p>Vaikka insinööriytyön tuloksena laadittu suunnitteluopas teollisuuskohteiden maadoituksista on kohtuullisen laaja, ei sitä tulisi käyttää yksinään suunnittelun perustana, sillä siihen ei voinut työn rajoitetun laajuuden takia sisällyttää kaikkia yksityiskohtia suunnittelussa tarvittavista vaatimuksista. Työ kuitenkin antaa hyvän kokonaiskuvan maadoituksen suunnittelussa tarvittavista vaatimuksista ja näin ollen perehdyttää yleisellä tasolla lukijansa hyvin aiheeseen.</p>	
Avainsanat	maadoitus, teollisuus, suunnitteluohje, potentiaalintasaus

Author Title	Jaakko Nuolioja Design Instruction about Earthing Systems for Industrial Sites
Number of Pages Date	59 pages + 10 appendices 13 February 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electric Power Engineering
Instructors	Leevi Huttunen, Department Manager Sampsa Kupari, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis study was to create design instruction about designing earthing systems for industrial sites. This thesis study was made for electrification and automation department of Sweco Industry Ltd. This design instruction explains designing different earthing systems and installations.</p> <p>The topic was studied from viewpoints of valid standards, literature, design practices of Sweco Industry Ltd and practical designing. These viewpoints were dealt with focusing on Finnish viewpoint, and the material studied were Finnish SFS and PSK standards, Finnish legislation of electrification, Finnish ST cards and handbooks, and design documentation of Sweco Industry Ltd.</p> <p>As a result of this thesis study, a uniform and wide design instruction about earthing systems for industrial sites on a general level was created. This design instruction can be used to introduce new designers to principles of designing earthing systems for industrial sites. It can be used also as a general instruction for experienced designers who haven't participated widely in designing earthing systems for industrial sites.</p> <p>Although this design instruction is quite wide, it should not be used as the only instruction for the earthing system design process. It doesn't include all the details that are required for designing earthing systems, because the scale of this thesis study was limited. Despite that, this thesis informs very well about many requirements that are needed for earthing system design work and that way familiarizes the reader well with this topic on a general level.</p>	
Keywords	earthing, industry, design instruction, equipotential bonding

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Teollisuudessa yleisimmät käytössä olevat sähkönjakelujärjestelmät	2
2.1	TN-järjestelmät	2
2.2	IT-järjestelmä	6
3	Maanalaiset maadoitusjärjestelmän osat ja niihin liittyvät järjestelmät	9
3.1	Maadoituselektrodin suunnittelu	9
3.1.1	Pienjännitejärjestelmän maadoituselektrodin vaatimukset	9
3.1.2	Suurjännitejärjestelmän maadoituselektrodin vaatimukset	11
3.2	Salamasuojauksen huomioiminen maadoituselektrodin suunnittelussa	15
3.3	Laajan maadoitusjärjestelmän maadoituselektrodiverkko	16
3.4	Maadoituselektrodin sekä maadoituselektrodin ja -johtimen väliset liitokset	17
4	Teollisuuden pienjännitejärjestelmien maadoituksen suunnittelu	20
4.1	Maadoitusjärjestelmän johdinten suunnittelu ja mitoittaminen	20
4.2	Maadoituskiskojen suunnittelu, mitoittaminen ja liitokset	23
4.3	Maadoitettavat osat ja laitteet	25
4.3.1	Sähkökeskukset ja niihin liittyvät muuntajat sekä kiskosillat	25
4.3.2	Moottorit	30
4.3.3	Nosturit	30
4.4	Potentiaalintasaus	30
4.4.1	Pääpotentiaalintasaus	31
4.4.2	Lisäpotentiaalintasaus	33
4.5	Työmaadoitus	35
5	Teollisuuden suurjännitejärjestelmien maadoitusten suunnittelu	35
5.1	Suurjännitejärjestelmän maadoitusjärjestelmän suunnittelun vaiheet	35
5.2	Maadoitusjärjestelmän johdinten sekä maadoituskiskojen suunnittelu ja mitoittaminen	36

5.3	Maadoitettavat osat ja laitteet	38
5.3.1	Suurjännitekojeistot	38
5.3.2	Kaapelit	39
5.3.3	Ylijännitesuojat	39
5.3.4	Muuntajat	40
5.3.5	Muuntamot	40
5.3.6	Moottorit	41
5.3.7	Sähköasemia ympäröivät aidat	41
5.4	Potentiaalintasaus	41
5.5	Työmaadoitus	46
5.6	Suurtaajuisten häiriövaikutusten minimointi	47
6	Pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoituksen yhdistäminen	48
6.1	Yleiset vaatimukset	48
6.2	Laaja maadoitusjärjestelmä	50
6.3	Esimerkki teollisuuskohteen suur- ja pienjännitejärjestelmien yhteisen maadoituksen toteuttamisesta	51
7	Teollisuuden automaatiojärjestelmien maadoituksen suunnittelu	52
7.1	Järjestelmäkaapit ja muut vastaavat laitteistot	52
7.2	Ohjauspulpetit, -paneelit, -kotelot ja sekä kenttälaitteet	53
7.3	Häiriösuojaus	53
7.4	Kaapelit	55
8	Maadoitusjärjestelmän dokumentointi	55
8.1	Yleiset vaatimukset	55
8.2	Laadittavat piirustukset ja kaaviot sekä muut dokumentit	56
9	Yhteenveto	56
	Lähteet	58
	Liitteet	
	Liite 1. Suur- ja pienjännitejärjestelmän maadoituselektrodien minimimitat	
	Liite 2. Suurjännitejärjestelmän maadoitusjärjestelmien suunnitteluun liittyvät olennaiset virrat	
	Liite 3. Maadoitusjohdinten ja -elektrodien poikkipinnan määrittämiseen tarvittavat virrat	
	Liite 4. Maadoituselektrodin maadoitusresistanssin laskenta	

- Liite 5. Salamasuojauksen maadoituselektrodin materiaalit ja minimimitat
- Liite 6. Kertoimen  $k$  arvot erilaisille suojajohtimille
- Liite 7. Erityistoimenpiteiden M kuvaus
- Liite 8. Kosketusjännite ja kehon kautta kulkeva virta
- Liite 9. Esimerkki suur- ja pienjännitejärjestelmien yhdistämisestä
- Liite 10. Esimerkki automaatiojärjestelmän kenttäkaapeloinnin maadoituksen toteuttamisesta, kun parikaapelien vaipat on yhdistetty suojamaadoitukseen (PE)

## Lyhenteet

$BF$	Kehon kerroin. Arvo saadaan julkaisusta IEC/TS 60479-1.
Cadweld	Eksoterminen hitsausprosessi. Perustuu sulan metallin tuottamiseen nopeatoimisen kemiallisen prosessin seurauksena.
FE	Toiminnallinen maadoitus. Mahdollistaa häiriöttömän maadoitukseen.
G	Oikosulkuvirran tiheys. Muodostuu oikosulkuvirran ja elektrodin/johtimen poikkipinta-alan tulosta.
GIS-kojeisto	Kaasueristeinen metallikoteloitu kojeisto.
$HF$	Sydämen virtakerroin. Arvo saadaan julkaisusta IEC/TS 60479-1.
$I'_{KEE}$	Kaksoismaasulkuvirta. Arvon laskennassa käytetään standardin SFS-EN 60909 vaatimuksia.
$I_C$	Kapasitiivinen maasulkuvirta. Voi olla mitattu tai laskettu arvo.
IT	Sähkönjakelujärjestelmä. Perustuu jännitteisten osien eristämiseen maasta tai niiden yhdistämiseen impedanssin kautta maahan yhdestä pisteestä.
LMK, EB	Lisämaadoituskisko.
LPK	Lisäpotentiaalintasauskisko.
$I_B$	Kehon kautta kulkeva virta.
$I_{Bp}$	Sallittu kehon virta.
$I_B(t_i)$	Kehon kautta kulkevan virran raja-arvo vian kestoajan funktiona.
$I_E$	Maavirta. Maadoitusjännitteen aiheuttava osa maasulkuvirtaa.

$l$	Vaakaelektrodin minimipituus.
MK, EB	Maadoituskisko.
MK KEVI	Kuparijohdin, joka on eristetty keltavihreäraidallisella muovieristeellä. Käytetään suojamaadoitusjohtimena.
PE	Suojajohtimesta käytetty lyhenne.
PMK, MEB	Päämaadoituskisko.
$r_e$	Tasopinnan keskisäde.
$t_i$	Vikavirran kesto aika.
TN-C	Sähkönjakelujärjestelmä. Järjestelmässä on vaihejohtimet L1, L2, L3 sekä PEN-johdin, joka yhdistää erillisen nollajohtimen N ja suojajohtimen PE toiminnot samaan johtimeen. Järjestelmän maadoitus on toteutettu virtapiirin yhden pisteen suoralla maadoittamisella.
TN-C-S	Sähkönjakelujärjestelmä. TN-S ja TN-C -sähkönjakelujärjestelmiä sisältävä järjestelmä.
TN-S	Sähkönjakelujärjestelmä. Muuten sama kuin TN-C -järjestelmä, mutta PEN-johtimen sijasta käytetään nollajohdinta N ja suojajohdinta PE.
$U_E$	Maadoitusjännite. Muodostuu maavirran $I_E$ ja maadoitusimpedanssin $Z_E$ tulosta.
$U_T$	Kosketusjännite.
$U_{Tp}$	Sallittu kosketusjännite.
$Z_T$	Kehon impedanssi. Arvo saadaan julkaisusta IEC/TS 60479-1.
$Z_E$	Maadoitusimpedanssi.



## 1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena on laatia Sweco Industry Oy:n sähkö- ja automaatio-osastolle ohje teollisuudessa tarvittavien maadoitusjärjestelmien ja -asennusten suunnittelusta. Ohjeen on tarkoitus käsitellä kattavasti erilaisten maadoitusjärjestelmien ja -asennuksien suunnittelussa huomioonotettavia asioita sekä käytännön maadoitussuunnittelua.

Näitä aihealueita käsitellään niin voimassaolevien standardien, kirjallisuuden, Sweco Industry Oy:n suunnittelukäytäntöjen sekä käytännön maadoitussuunnittelun näkökulmasta. Edellä mainittujen näkökulmien käsittelyssä keskitytään suomalaiseen näkökulmaan eli tutkitaan pääasiassa suomalaisia SFS- ja PSK-standardeja, suomalaista sähköalan lainsäädäntöä ja kirjallisuutta, ST-kortteja ja -käsikirjoja sekä Sweco Industry Oy:n omaa suunnitteludokumentaatiota.

Työn tilaaja

Sweco Industry Oy on suunnittelualan asiantuntijayritys, joka on erikoistunut teollisuuteen. Sweco Industry on osa Sweco-konsernia, joka on Pohjoismaiden johtava asiantuntijayritys suunnittelualalla. [1.]

Sweco Industryn palvelutarjontaan kuuluu teollisuuden tuotannossa, laitoshankkeissa sekä teknologian ja tuotteiden kehittämisessä tarpeellisia suunnittelu-, projektinjohto- ja konsultointipalveluja. Tarjottavia suunnittelupalveluja ovat esi-, perus- ja toteutussuunnittelu muun muassa sähkö-, automaatio-, laitos- ja prosessisuunnittelun alalla. Sweco Industryn pääliiketoiminta-alueita ovat kemian-, kaivos-, petrokemian-, massa- ja pape-riteollisuus sekä meriteollisuuden offshore-suunnittelu. Muita toiminta-alueita ovat valmistava teollisuus sekä lääke- ja elintarviketeollisuus. [1; 2.]

Sweco Industryn palveluksessa on 500 asiantuntijaa ja toimitusjohtajana toimii Erik Skogström [2]. Sweco Industryn liikevaihto vuonna 2018 oli 52,4 miljoonaa euroa [3].

## Työn tekniset perusteet

Sain kesäharjoittelun aikana mahdollisuuden tehdä insinööriksi Sweco Industry Oy:n sähkö- ja automaatio-osastolle. Aiheen valintaan oli mahdollisuus itse vaikuttaa, minkä perusteella aiheeksi valikoitui teollisuuskohteiden maadoitusten suunnitteluohje. Tämänkaltaiselle suunnitteluohjeelle on tarve osastolla, sillä laajaa ja yhtenäistä ohjeistusta teollisuuden maadoitusasennuksista ja -järjestelmistä ei ole saatavilla, vaan tarvittava tieto on hajallaan monessa eri lähteessä. Yhtenäinen ja yleisellä tasolla laaja ohje auttaa perehdyttämään erityisesti uusia, vasta työuraansa aloittavia suunnittelijoita teollisuuskohteiden maadoitusten suunnittelun periaatteisiin sekä toimii yleisenä ohjeena myös kokeneemmille suunnittelijoille, jotka eivät ole vielä osallistuneet laajasti teollisuuskohteiden maadoitusten suunnitteluun.

## 2 Teollisuudessa yleisimmät käytössä olevat sähköjakelujärjestelmät

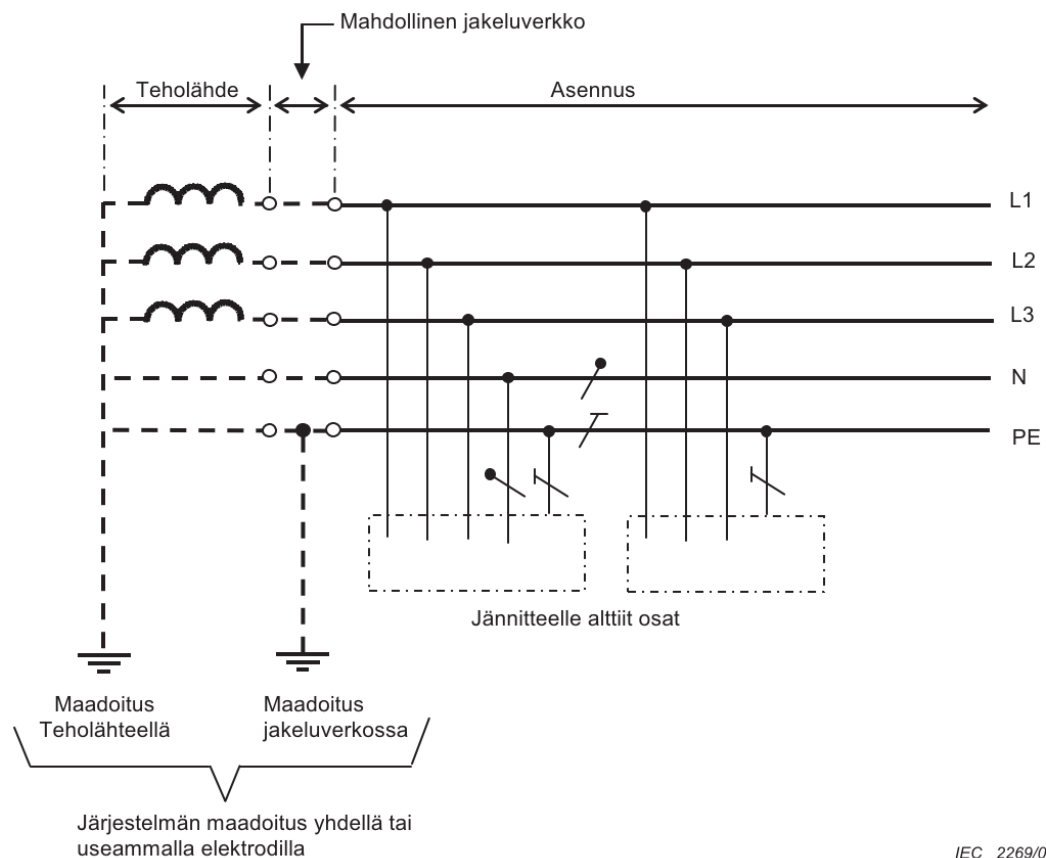
Teollisuudessa käytössä olevat yleisimmät sähköjakelujärjestelmät ovat TN-S, TN-S ilman nollajohdinta, TN-C-S ja IT [4, s. 7]. Näiden järjestelmien rakenne ja maadoitustavat on selostettu edempänä tässä luvussa.

### 2.1 TN-järjestelmät

TN-järjestelmissä on erilliset vaihejohtimet L1, L2, L3. TN-S-järjestelmässä on erillinen nollajohdin N ja suojajohdin PE, TN-C-järjestelmässä on molempien edellä mainittujen johtimien toiminnallisuudet yhdistävä PEN-johdin ja TN-C-S-järjestelmässä on N-, PE ja PEN-johtimet. Lisäksi tietyissä tapauksissa TN-S-järjestelmässä, kuten esimerkiksi 690 V:n järjestelmässä, voidaan nollajohdin jättää kokonaan pois. [4, s. 7; 5, s. 53–55.]

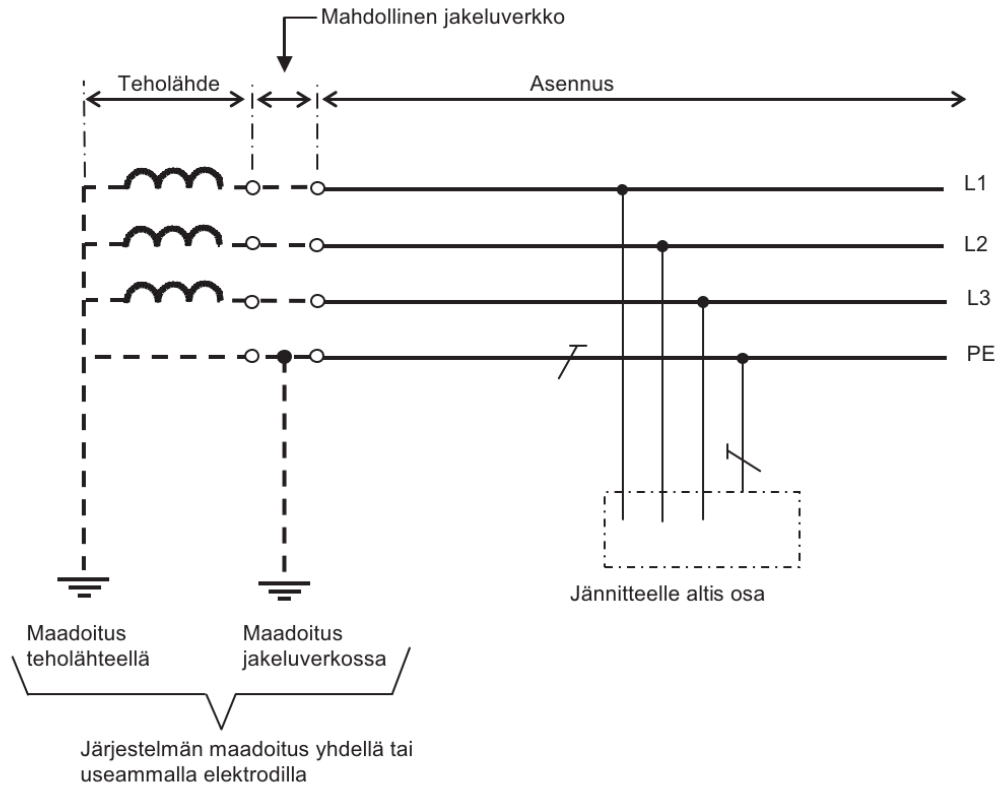
Maadoitus TN-järjestelmissä toteutetaan siten, että järjestelmän tähtipiste maadoitetaan tehonsyöttölähteen eli muuntajan tai generaattorin luona. Järjestelmän jännitteelle alttiit osat liitetään päämaadoituskiskon kautta suoraan muuntajan tai generaattorin tähtipisteeseen tai vaihtoehtoisesti muuntajan tai generaattorin lähellä oleviin pääkeskuksiin. [5, s. 76; 6, s. 33.]

Kuvassa 1 näkyy TN-S-jakelujärjestelmän rakenteen periaatekuva, jossa on kolme vaihejohtinta, L1, L2 ja L3, sekä nollajohdin N ja suojajohdin PE. Jännitteelle alttiit osat on yhdistetty metallikuoresta, -rungosta tai muusta paljaasta johtavasta osasta suojajohtimeen PE, joka taas yleensä yhdistyy päämaadoituskiskon kautta järjestelmän maadoitettuun pisteeseen. Mikäli asennuksen ja teholähteen välillä on sähköliittymän sisäistä jakeluverkkoa, voidaan siihen tehdä lisämaadoituksia tarvittaessa. Tämän lisäksi on suositeltavaa tehdä asennuksen sisällä useampia lisämaadoituksia, jotta vikatapauksissa varmistetaan suojajohtimen oman potentiaaloin olevan mahdollisimman lähellä asennuksen maaperän potentiaalia. [5, s. 76.]



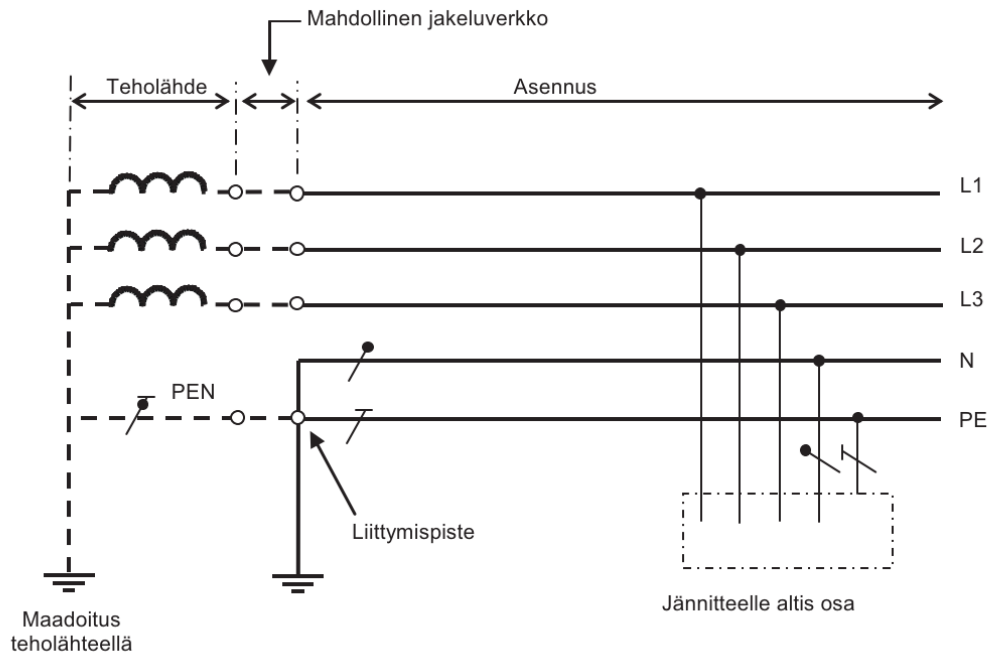
Kuva 1. TN-S-järjestelmän rakenne [7, s. 40].

Kuvassa 2 on esitetty TN-S-järjestelmän rakenne ilman nollajohdinta, se eroaa kuvan 1 TN-S-järjestelmästä ainoastaan nollajohtimen puuttumisen osalta. Tämänlaista järjestelmää käytetään teollisuudessa yliaallottomissa ja symmetrisissä kuormitustilanteissa, kuten esimerkiksi moottorikäytöissä 500 V:n ja 690 V:n jännitetasoilla [4, s. 7; 8, s. 63].



Kuva 2. TN-S-järjestelmän rakenne ilman nollajohdinta N [7, s. 53].

TN-C-S-järjestelmässä (kuva 3) on yleensä vaihejohtimet L1, L2, L3 sekä yhdistetty nolla- ja suojajohdin PEN, nollajohdin N ja suojajohdin PE. Jännitteelle alttiit osat on yhdistetty metallirungosta, -kuoresta tai muusta paljaasta johtavasta osasta PE-johtimella päämaadoituskiskoon ja sitä kautta järjestelmän maadoitettuun pisteeseen PEN-johtimella. Mahdollisen sähköliittymän sisäisen rakennusten ulkopuolisen jakeluverkon PEN-johdin on maadoitettava jokaisen vähintään 200 metriä pitkän johtohaaran päässä tai enintään 200 metrin päässä johtohaaran päästä, minkä lisäksi suositellaan PEN- ja PE-johtimien maadoittamista rakennuksen sisääntulokohdassa. Lisäksi, kun sähköliittymää syötettäessä käytössä on PEN-johdin, vaaditaan sähköliittymään maadoituselektrodin sisältävä maadoitusjärjestelmä. [5, s. 76.]



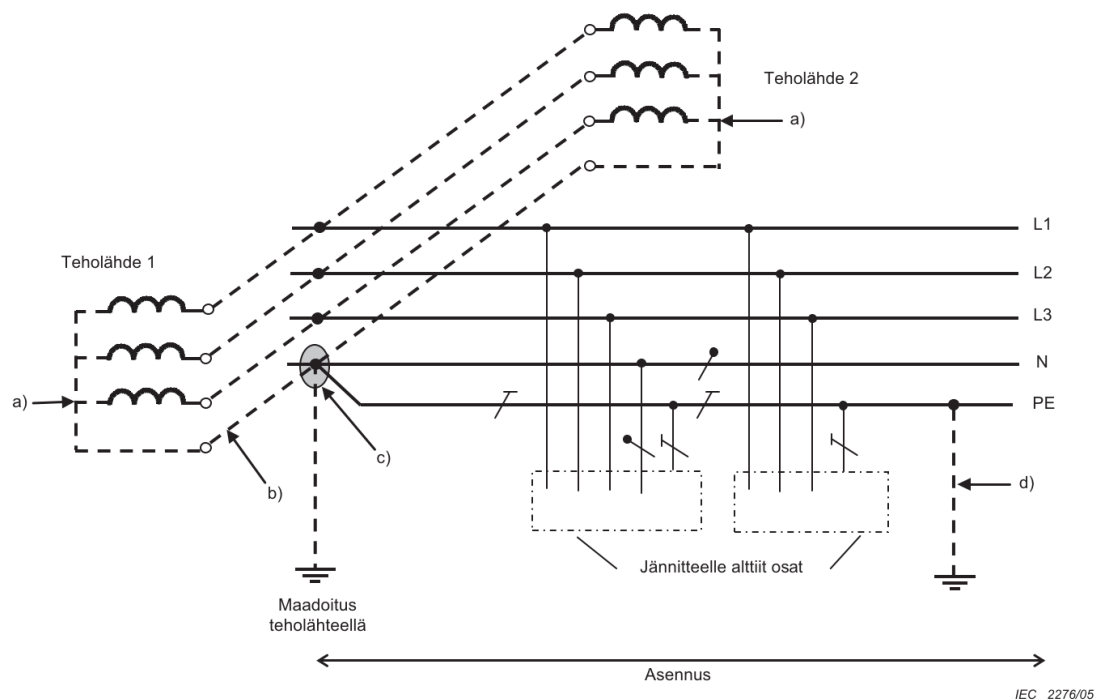
Kuva 3. TN-C-S-järjestelmän rakenne [7, s. 54].

Tavallisesti teollisuudessa käytetään TN-S-järjestelmää johtimien poikkipinta-alasta riippumatta pääkeskukselta tai muuntajalta asti, minkä lisäksi uusissa asennuksissa TN-C-järjestelmän käyttö liittymiskohdan jälkeen on kielletty. Edellä mainittujen seikkojen lisäksi TN-C-S-järjestelmässä on PEN-johtimen nolla- ja suojajohtimiksi erottamisen jälkeen otettava huomioon, että niitä ei saa enää yhdistää takaisin PEN-johtimeksi, minkä takia TN-C-järjestelmän osuus on sijoitettu aina liittymiskohdan eli pääkeskuksen syöttävän verkon puolelle. Lisäksi teollisuudessa TN-C-S-järjestelmää ei suositella käytettäväksi ja tietyissä kohteissa sen käyttö on kokonaan kielletty. [4, s. 7; 6, s. 33; 8, s. 64, 67.]

Useasta teholähteestä syötettyjen TN-järjestelmien suunnittelussa tulee olla tarkka, sillä väärin suunniteltu järjestelmä voi aiheuttaa käyttövirran kulkeutumista vääriä reittejä pitkin. Tästä voi seurata sähkömagneettisia häiriöitä, tulipaloja ja korroosiota. Lisäksi täytyy huomioida se, että generaattorin tähtipistettä tai muuntajan nollanapaa ei saa yhdistää suoraan maahan. Teholähteiden tähtipisteet tulee yhdistää eristetyllä johtimella yhteen pisteeseen ja siitä maahan.

Edellä mainittu tähtipisteet yhdistävä johdin toimii PEN-johtimen tavalla ja siihen ei saa liittää kulutuskojeita. Asennuksen suojajohdin tulee liittää yhdellä liitännällä teholähteiden yhdistettyyn tähtipisteeseen pääkeskuksessa. [5, s. 55–56.]

Kuvassa 4 näkyy esimerkki oikein suunnitellusta useasta teholähteestä syötetystä TN-C-S-järjestelmästä, jossa tapahtuu mahdollisimman vähän käyttövirran kulkeutumista väriä reittejä pitkin. Teholähteiden tähtipisteet yhdistävä johdin on merkitty kirjaimella b ja yhdistetty tähtipiste kirjaimella c.

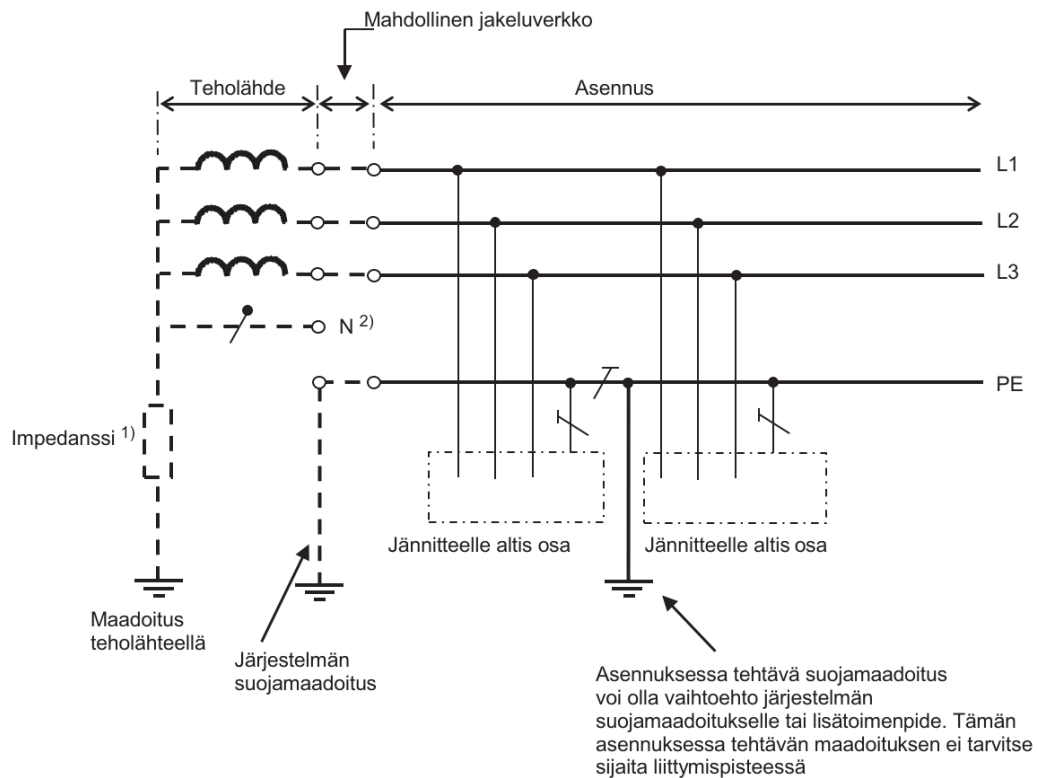


Kuva 4. Useasta teholähteestä syötetty TN-C-S-järjestelmän rakenne [7, s. 43].

## 2.2 IT-järjestelmä

IT-järjestelmä perustuu jännitteisten osien eristämiseen maasta tai niiden yhdistämiseen impedanssin kautta maahan yhdestä pisteestä. Yhdistyspiste voi olla asennuksen tähtipiste tai keinotekoinen tähtipiste. Mikäli kokonaisnollaimpedanssi on arvoltaan tarpeeksi suuri, voidaan keinotekoinen tähtipiste yhdistää myös suoraan maahan. Vaihejohdin on mahdollista yhdistää tarpeeksi suuren impedanssin kautta maahan, mikäli tähtipiste puuttuu. Kaikki jännitteelle alltiit osat voidaan yhdistää erikseen tai ryhmissä erillisiin

maadoituselektrodeihin tai vaihtoehtoisesti kaikki osat yhdistetään yhteiseen maadoituselektrodiin suojajohtimilla. IT-järjestelmässä (kuva 5) on tavallisesti vaihejohtimet L1, L2 ja L3 sekä suojajohdin PE. Nollajohtimen N käyttö ei ole suositeltavaa, mutta sitä on mahdollista tarvittaessa käyttää. [5, s. 78; 8, s. 66.]



IEC 2280/05

Kuva 5. IT-järjestelmän rakenne [7, s. 46].

Maasulkuvalvontaa tulee käyttää silloin, kun IT-järjestelmä on yhdistetty maahan. Maasulkuvalvonta voidaan toteuttaa vastuksella, joka kytketään maan ja järjestelmän keskipisteen välille. Vastuksen suuruus teollisuudessa määräytyy tähtipisteen resistanssista aiheutuvan resistiivisen maasulkuvirran mukaan. Edellä mainitun resistiivisen maasulkuvirran suuruus tulee olla yhtä suuri tai suurempi kuin kapasitiivinen virta, joka aiheutuu kaapeliverkon maakapasitanssista. Yleensä vastuksen arvona on käytetty 250  $\Omega$ , joka on riittävä aiheuttamaan tarpeeksi suuren resistiivisen maasulkuvirran useimmissa tapauksissa. [4, s. 11–12; 8, s. 66.]

IT-järjestelmä mahdollistaa maasulusta aiheutuvan käyttökeskeytyksen estämisen tai siirtämisen myöhemmäksi, minkä takia sitä käytetään teollisuudessa mm. prosessisähköjakelussa [8, s. 69]. Yksittäisen vian aikana ei vaadita syötön automaattista poiskytkentää, mikäli kaavan 1 ehdot täyttyvät [5, s. 79]:

$$R_A \times I_d \leq 50 V \quad (1)$$

$R_A$  on jännitteelle alltiiden osien suojamaadoitusjohtimen ja maadoituselektrodin resistanssien summa ( $\Omega$ )

$I_d$  on ensimmäisen vian vikavirta (A) äärijohtimen ja jännitteelle alltiin osan välillä, kun vikaimpedanssia ei oteta huomioon.

Mikäli yksittäisen vian aikana ei käytetä syötön automaattista poiskytkentää, tulee silloin vian ilmaisemiseen käyttää eristystilan valvontalaitetta. Eristystilan valvontalaitetta on mahdollista käyttää yhdessä eristysvian ilmaisujärjestelmän kanssa. Eristystilan valvontalaite kytketään joko yhden vaiheen ja suojamaan, vaiheiden ja suojamaan tai tähtipisteen ja suojamaan välille. Lisäksi täytyy ottaa huomioon, että vastusta ei saa käyttää järjestelmän tähtipisteen yhdistämisessä suojamaahan. Eristystilan valvontalaitteen ja/tai eristysvian ilmaisujärjestelmän sijasta voidaan myös käyttää vikavirtavalvontajärjestelmää. Vikavirtavalvontajärjestelmän käytön kanssa on kuitenkin otettava huomioon se, ettei se pysty havaitsemaan symmetristä vikaa ja vikavirran suuruus tulee olla tarpeeksi suuri, jotta järjestelmä pystyy sen havaitsemaan. Edellä mainittujen järjestelmien lisäksi voidaan käyttää myös standardin SFS-EN 61557-9 vaatimusten mukaista eristysvian paikannusjärjestelmää. [4, s. 11–12; 5, s. 79.]

Mikäli ennen IT-järjestelmää sähköliitymässä on TN-järjestelmä, tulee IT-järjestelmä yhdistää TN-järjestelmään muuntajan kautta. IT-järjestelmän jännitteelle alltiit osat yhdistetään suoraan suojajohtimen kautta TN-järjestelmän suojajohtimeen, jonka kautta IT-järjestelmän suojajohtimet yhdistyvät TN-järjestelmän maadoituselektrodiin. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että pääsääntöisesti galvaanisesti yhtenäisten IT-järjestelmien tulisi sijaita saman haltijan hallinnoimissa sähkölaitteistoissa, sillä silloin ensimmäisen maasulun vian paikantaminen ja korjaaminen on helpompi suorittaa sekä saadaan toteutettua vaaditut vikajännitteisiin liittyvät ehdot. [8, s. 68–69.]



### 3 Maanalaiset maadoitusjärjestelmän osat ja niihin liittyvät järjestelmät

#### 3.1 Maadoituselektrodin suunnittelu

Teollisuudessa voidaan käyttää pien- ja suurjännitejärjestelmien kanssa yhteistä maadoituselektrodia. Maadoituselektrodin tulee tällöin täyttää SFS 6000- ja 6001-standardeissa maadoituselektrodeja koskevat vaatimukset, jotka on esitelty edempänä. Maadoituselektrodin rakenteena voidaan käyttää rakennusperustusten betoniraudoitusta, maadoituslevyjä, rakennusperustusten kaivantoihin asennettua maadoitusköyttä, maahan pystyyn upotettuja tankoja tai putkia käyttäen rakennettua elektroodia, kaapelioihin asennettua maadoitusköyttä tai edellä mainittujen yhdistelmää. Mikäli on tarve rakentaa erilliset elektrodit, tulee noudattaa maadoituselektrodia suunnitellessa edempänä esitettyjä ko. järjestelmän maadoituselektrodille asetettuja vaatimuksia. [6, s. 74.]

Todellisessa teollisuuskohteiden suunnittelussa on usein käytetty maadoituselektrodin rakennusmateriaalina 50, 70 tai 120 mm<sup>2</sup>:n kuparitankoa tai -johdinta, riippuen suunnittelukohteen vaatimuksista. [9.]

##### 3.1.1 Pienjännitejärjestelmän maadoituselektrodin vaatimukset

Liitteen 1 taulukossa 1 on esitetty standardin SFS 6000 pienjännitejärjestelmän maadoituselektrodille vaatimat minimimitat ja materiaalit. Taulukko on esikuvastandardin HD 60364-5-54 vastaavasta taulukosta laadittu yksinkertaistettu versio, jota on muokattu suomalaisten vaatimuksien mukaiseksi. Näitä vaatimuksia ovat 16 mm<sup>2</sup> kuparin minimipoikkipinnan salliminen sekä maadoituselektrodien poikkipintaprofiilien käyttö ilman erityisvaatimuksia. Taulukon minimipaksuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä yksittäisen langan halkaisijaa köydessä tai levyn tai nauhan paksuutta. Lisäksi huomautuksena on mainittu, että betoniin upotettua terästä käytettäessä maadoituselektrodissa ei vaadita korroosiosuojausta. [5, s. 376; 6, s. 35.]

Pienjännitejärjestelmän maadoituselektrodin malliksi suositellaan perustusmaadoituselektrodia, joka voidaan toteuttaa kupariköydellä tai -langalla, perustuksiin upotetulla teräksellä tai edellä mainittujen yhdistelmällä. Elektrodin toteutukseen ei saa käyttää esijännitettyä terästä. Perustusmaadoituselektrodi on rakenteeltaan suljetun verkon tai renkaan muotoinen ja se on upotettu perustusten betoniin tai asennettu perustusten alle. Elektrodin tulee ensisijaisesti koostua yhdestä tai useammasta yhteen liitetystä suorakulmiosta tai renkaasta, joiden sivun pituus tai halkaisija on maksimissaan 20 metriä. Suurissa rakennuksissa edellä mainittujen suorakulmioiden muodostamien silmukoiden suositeltu koko on 10 x 20 metriä. Lisäksi suositellaan betonirakenteiden terästen, lukuun ottamatta esijännitetyn betonin teräksiä, yhdistämistä maadoituselektrodiin aina, kun se on mahdollista. [5, s. 391–394; 6, s. 36; 10, s. 5.]

Betoniin upotetun perustusmaadoituselektrodin toteuttamiseen voidaan käyttää erityisesti elektrodikäyttöä varten suunniteltua sinkittyä lattaterästä tai perustusten normaalia betoniterästä. Tässä tapauksessa betoniteräksien tulee olla hitsattu kiinni toisiinsa tai vaihtoehtoisesti tulee käyttää niiden yhdistämiseen tarkoitettuja erityisiä jatkoksia. Mikäli perustusten betonissa on maadoituselektrodin lisäksi muita betoniteräksiä, tulee betoniteräkset yhdistää enintään kahden metrin välein elektrodin. Perustuksiin käytettävän betonin tulisi sisältää sementtiä tarpeeksi suuren johtavuuden takaamiseksi vähintään 240 kg / m<sup>3</sup>. Mikäli on tarve tuoda teräselektrodin osia betonin ulkopuolelle maahan, ei tällöin elektrodin materiaalina saa käyttää kuumasinkittyä terästä. Tässä tapauksessa tulee käyttää ruostumatonta terästä tai toteuttaa riittävä kosteussuojaus käyttäen tähän tarkoitukseen valmistettua kosteussuojausta. [5, s. 393–394; 10, s. 5.]

Mikäli perustusten kanssa käytetään sähköisesti eristävää lämpöeristystä tai kosteuden eristykseen esimerkiksi yli 0,5 mm:n muovikalvoa, tulee maadoituselektrodi sijoittaa maahan perustusten alle tai ympärille. Elektrodin materiaalina käytetään liitteen 1 taulukon 1 mukaisia materiaaleja, joista tässä tapauksessa käytetään yleensä vähintään 16 mm<sup>2</sup>:n kupariköyttä tai -johdinta. Lisäksi perustusten betoniteräkset tulee liittää maadoituselektrodiin. [5, s. 393; 10, s. 5.]

Muita hyväksytyjä pienjännitejärjestelmän maadoituselektrodin tyyppejä ovat vaaka- ja pystyelektrodit, joita voivat olla esimerkiksi levyt tai sauvat, kaapelien metallivaipat ja muut metallipäällykset sekä muut sopivat maanalaiset metallirakenteet. Kuitenkaan vesijohtoja sekä muita putkia ja putkiverkostoja ei saa käyttää maadoituselektrodina. [5, s. 376–377.]

Vaakaelektrodin rakenteena tulee käyttää vähintään 20 metriä pitkää kaapeliojaan tai rakennusten perustusten lähelle vaakasuuntaan asennettua elektrodirakennetta, joka on rakennettu liitteen 1 taulukon 1 mukaisista materiaaleista. Ehtona edellä mainitulle vaakaelektrodirakenteen käyttämiselle on estää elektrodin vahingoittuminen helposti, mikä toteutuu edellä mainituilla asennustavoilla. Mikäli ehto ei täyty, tulee vaakaelektrodin rakenteena käyttää kahta erillistä eri suuntiin asennettua ja vähintään 20 metriä pitkää vaakaelektrodia tai vaihtoehtoisesti yhtä silmukkaelektrodia, joka on vähintään 40 metriä pitkä. [5, s. 391.]

Mikäli käytetään elektrodirakenteena pystyelektrodia, tulee sen pituuden olla vähintään puolet vaakaelektrodille vaaditusta 20 metrin vähimmäispituudesta. Lisäksi vierekkäin asennettujen pystyelektrodien etäisyys toisistaan tulee olla vähintään yhtä suuri kuin pystyelektrodin pituus. [5, s. 392.]

Maadoituselektrodin sijoittamisessa tulee ottaa huomioon, että sitä ei saa sijoittaa vesistön, kuten esimerkiksi järven tai joen, veteen, mikäli on mahdollisuus elektrodin esille jäämiseen veden kuivumisen takia [5, s. 377].

### 3.1.2 Suurjännitejärjestelmän maadoituselektrodin vaatimukset

Liitteen 1 taulukossa 2 on esitetty standardin SFS 6001 vaatimat suurjännitejärjestelmän maadoituselektrodin minimimitat ja tyypit. Annettuja arvoja noudattamalla taataan elektrodin riittävä korroosiokestävyys sekä mekaaninen lujuus. Suomessa käytetään lähinnä vain kuparista valmistettuja elektrodeja, sillä kuumasinkitystä teräksestä valmistetut elektrodit syöpyvät Suomen maaperässä. Käytetyimmät maadoituselektrodit Suomessa ovat kupariköysi ja -lanka. Päällystettyä kuparia käytetään Suomessa ainoastaan erityistapauksissa silloin, kun on todettu mahdollisuus kuparin syöpymiseen. Standardi 6001 mahdollistaa myös 16 mm<sup>2</sup>:n kupariköyden käytön maadoituselektrodina

suurjännitejärjestelmissä silloin, kun mekaanisen vaurion ja korroosion riski on kokemuksen mukaan vähäinen. Edellä mainittua ehtoa voidaan kuitenkin soveltaa vain pylväsmuuntamoiden ja -erottimien maadoituksissa, joten teollisuusalueilla tulee käyttää aina vähintään 25 mm<sup>2</sup>:n kupariköyttä. [6, s. 57–58; 11, s. 112.]

Suurjännitejärjestelmissä käytetään yleisesti maahan asennettua maadoituselektrodia, joka on rakennettu käyttäen useita vaaka-, pysty- tai vinoelektrodeja. Elektrodin osana voidaan käyttää myös perustusten betoniteräksiä, teräspaaluja tai muita vastaavia luonnollisia maadoituselektrodirakenteita. [11, s. 92, 101.]

Vaakamaadoituselektrodien asennussyvyudeksi suositellaan 0,5–1,0 metriä mekaanisen suojauksen riittävän tason saavuttamiseksi. Lisäksi suositellaan, että maadoituselektrodi asennetaan maahan routarajan alapuolelle. [11, s. 101.]

Maadoituselektrodin poikkipinnan määrittämisessä käytettävät virrat erilaisille järjestelmille on esitetty liitteessä 2. Maasta erotetuissa ja sammutetuissa järjestelmissä käytetään mitoituksen perusteena kaksoismaasulkuvirtaa  $I''_{KEE}$ , joka on laskettu standardin SFS-EN 60909 mukaan. Vaihtoehtoisesti voidaan olettaa, että kaksoismaasulkuvirran  $I''_{KEE}$  suurin arvo on 85 % symmetrisen alkuoikosulkuvirran arvosta. Tämän lisäksi voidaan edellä mainituissa järjestelmätyypeissä käyttää myös kaksoismaasulkuvirran sijasta lasketun tai mitatun kapasitiivisen maasulkuvirran  $I_C$  arvoa, mikäli alle yhden sekunnin maasulun poiskytkennän ehto toteutuu. Pienen impedanssin kautta maadoitetuissa järjestelmissä mitoitusvirtana käytetään yksivaiheisen symmetrisen maasulkuvirran alkuarvoa  $I''_{k1}$ , joka tulee laskea standardin SFS-EN 60909 mukaisesti. [11, s. 94.]

Maadoituselektrodin poikkipinnan määrittäminen järjestelmissä, joissa vikavirta kestää alle 5 sekuntia, lasketaan kaavalla 2 [11, s. 113]:

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t_f}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (2)$$

$A$  on poikkipinta ( $\text{mm}^2$ )

$I$  on johtimen virran tehollisarvo (A)

$t_f$  on vikavirran kesto aika (s)

$K$  on virrallisen osan resistanssin osan materiaalista riippuva vakio

$\beta$  on virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0 °C

$\theta_i$  on alkulämpötila (°C)

$\theta_f$  on loppulämpötila (°C).

Kaavassa 2 alkulämpötilana  $\theta_i$  tulisi oletusarvoisesti käyttää 20 °C, joka tässä tapauksessa on ympäröivän maan lämpötila yhden metrin syvyydessä. Muita käytettäviä alkulämpötiloja löytyy esimerkiksi standardista IEC 60287-3-1. Loppulämpötilana  $\theta_f$  käytetään arvoa 300 °C. [11, s. 113.]

Kaavan 2 muuttujien  $\beta$  ja  $K$  arvot on esitetty taulukossa 1. Taulukossa on esitetty myös alumiinin arvot, mutta sitä ei käytetä maadoituselektrodin materiaalina [11, s. 114].

Taulukko 1. Maadoituselektrodin ja -johtimen termisen kuormitettavuuden laskennassa käytettävät materiaalivakiot [11, s. 113; 12].

Materiaali	$\beta$ (°C)	$K$ ( $A \times \sqrt{s}/\text{mm}^2$ )
Kupari	234,5	226
Alumiini	228	148
Teräs	202	78

Maadoituselektrodin ollessa asennettuna paikkaan, jossa vallitsevat normaalit olosuhteet eli tässä tapauksessa maadoituselektrodi sijaitsee maassa ja maadoitusjohdin ilmassa, voidaan käyttää elektrodin poikkipinnan määrittämisessä liitteen 3 kuvassa 1 esitettyjä oikosulkuvirran tiheyden  $G$  arvoja vikavirran kestoajan  $t_f$  funktiona. Arvoja laskettaessa on käytetty alkulämpötilana arvoa 20 °C ja loppulämpötilaa 300 °C käyrillä 1 (paljas tai sinkkipäälysteinen kupari), 3 (alumiini) ja 4 (sinkitty teräs) ja 150 °C käyrällä 2

(tinattu tai lyijyvaippainen kupari). Oikosulkuvirran tiheys on laskettu kaavalla  $G = I / A$ , jossa  $G$  on oikosulkuvirran tiheys,  $I$  on oikosulkuvirran suuruus ja  $A$  poikkipinta-ala. [11, s. 113–114.]

Mikäli järjestelmässä esiintyy yli 5 sekunnin vikavirtoja, tulee elektrodin poikkipinnan määrittämisessä käyttää liitteen 3 kuvien 2 ja 3 kuvaajia, joissa molemmissa käyrien 1 (paljas tai sinkkipäällysteinen kupari), 2 (alumiini) ja 4 (sinkitty teräs) laskennassa on käytetty loppulämpötilan arvona 300 °C ja käyrällä 3 (tinattu tai lyijyvaippainen kupari) käytetty loppulämpötilan arvo on 150 °C. Mikäli on tarvetta käyttää muuta kuin edellä mainittuja loppulämpötilan arvoja, tulee käyttää laskennassa taulukosta 2 löytyviä loppulämpötilan muunnoskerroimia. [11, s. 113–116.]

Taulukko 2. Jatkuvan virran muunnoskerroin loppulämpötilasta 300 °C toiseen lämpötilaan [11, s. 114].

Loppulämpötila °C	Muunnoskerroin
400	1,2
350	1,1
300	1,0
250	0,9
200	0,8
150	0,7
100	0,6

Suurjännitejärjestelmän maadoituselektrodin maadoitusresistanssi on suositeltavaa laskea liitteen 4 taulukossa 1 esitettyjen maaperän, betonin ja veden resistiivisyyksien  $\rho_E$  sekä liitteen 4 taulukossa 2 esitettyjen laskentakaavojen avulla. Maaperän resistiivisyyden kanssa on syytä huomioida kosteuden muutoksien aiheuttamat resistiivisyyden muutokset tiettyyn syvyyteen asti, joka on yleensä muutamia metrejä. Lisäksi tulee ottaa huomioon erilaisten maakerroksien aiheuttama maaperän resistiivisyyden vaihtelu eri syvyyksillä. Maadoituselektrodin maadoitusresistanssin  $R_E$  kanssa on syytä huomioida se, että sen suuruuteen vaikuttaa eniten elektrodin pituus poikkipinta-alan sijasta. Maadoitusresistanssin laskennassa voidaan perustuksiin asennetuista maadoituselektrodeista käyttää määritelmää, että ne ovat ympäröivään maaperään kaivettuja. [11, s. 151–152.]

### 3.2 Salamasuojauksen huomioiminen maadoituselektrodin suunnittelussa

Mikäli teollisuuskohteeseen suunnitellaan salamasuojausjärjestelmää, on suositeltavaa käyttää samaa maadoituselektrodia sähkönjakelu- ja muissa järjestelmissä sekä salamasuojausjärjestelmässä. Erillisiä elektrodeja on myös mahdollista käyttää, mutta ne tulee yhdistää toisiinsa, jotta vältetään salaman iskiessä elektrodien hallitsematon yhdistyminen eri reittejä pitkin. Lisäksi tässä tapauksessa suur- ja pienjännitejärjestelmien maadoitukset tulee yhdistää toisiinsa, koska muuten on olemassa vaara muuntajan tuhoutumisesta ylijännitteestä johtuvan muuntajan suurjännitepuolen ja pienjännitepuolen käämien sekä suojamaadoitettujen osien välisen ylilyönnin seurauksena. Vain erikoistapauksissa voidaan käyttää erillistä maadoitusta suur- ja pienjännitejärjestelmissä. [13, s. 74.]

Käytettäessä kaikkien maadoitettavien järjestelmien kanssa yhteistä maadoituselektrodia, tulee elektrodin mittojen olla minimissään liitteen 5 taulukon 1 mukainen. Kuparista valmistetun elektrodin vähimmäispoikkipinnan tulee olla 25 mm<sup>2</sup>, mutta useimmissa tapauksissa maadoituselektrodin on oltava poikkipinnaltaan 50 mm<sup>2</sup>. Lisäksi maadoituselektrodin tulee myös täyttää edellä esitetyt standardien SFS 6000 ja SFS 6001 vaatimukset minimimitoista. [5, s. 376; 10, s. 6; 13, s. 74.]

Maadoituselektrodeina voidaan käyttää teräsbetonista perustusmaadoituselektrodia, perustusten betoniin upotettua laajan pinnan kautta maahan johtavaa metallirakennetta, pystysuoraan maahan upotettua metallitankoa, noin 1 metrin syvyyteen vaakasuoraan upotettua metallista valmistettua lankaa, köyttä tai nauhaa tai muun tyyppistä metallikkoja, kaapelin metallivaippaa tai muuta maahan johtavassa yhteydessä olevaa metallista rakennetta. Käytettäviä maadoituselektrodin materiaaleja ovat kupari ja tavallinen sekä ruostumaton teräs. Alumiinia ei käytetä sen korroosioherkkyyden vuoksi maadoituselektrodin materiaalina. [13, s. 75.]

Salamasuojauksen maadoituselektrodin rakennetyyppinä suositellaan käytettäväksi perustusmaadoituselektrodia tai mikäli perustusmaadoituselektrodia ei ole mahdollista käyttää, tulee käyttää tyypin B rengaselektrodia. Tyypin B rengaselektrodilla tarkoitetaan vähintään 80 % pituudestaan maaperän kanssa kosketuksessa olevaa rengasjohdinta, joka on asennettu rakennuksen perustusten ulkopuolelle. Lisäksi on mahdollista käyttää

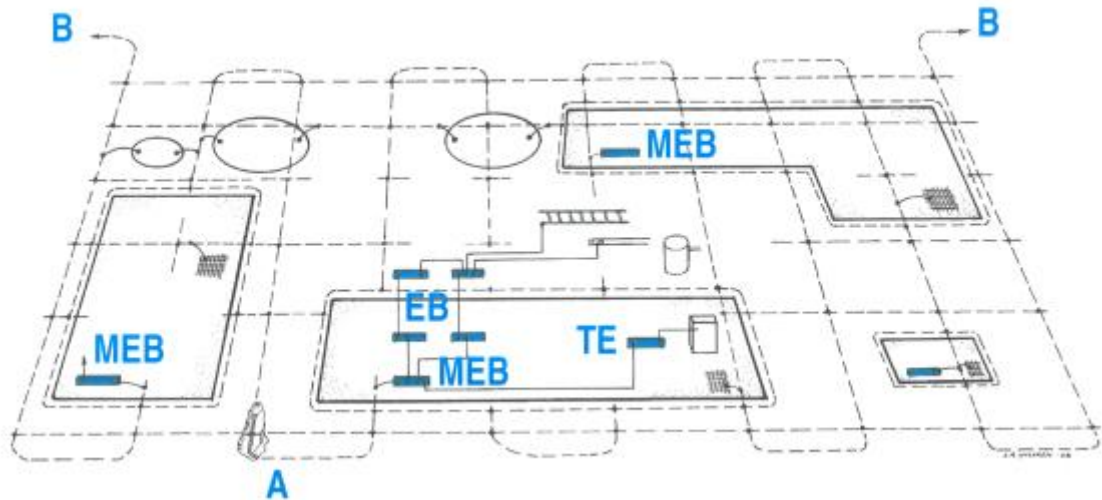
tyypin A maadoituselektrodia, joka koostuu vähintään kahdesta pysty- ja/tai vaakaelektrodista, ja se tulee olla jokaisessa salamasuojauksen alatulokohdassa erikseen. Lisäksi rengaselektrodi luokitellaan luokan A maadoituselektrodiksi, mikäli se on alle 80 % pituudestaan kosketuksissa maaperän kanssa. [13, s. 75–77.]

Perustusmaadoituselektrodia tai tyypin B rengasmaadoituselektrodia käytettäessä tulee ottaa huomioon niiden muodostaman tasopinnan keskisäteen  $r_e$  vähimmäispituuden ehto, joka on  $r_e \geq l_1$ , jossa  $l_1$  on vaakaelektrodin minimipituus. Tyypin B rengasmaadoituselektrodin tulisi sijoittaa suunnilleen 1 metrin päähän rakennuksen ulkoseinistä vähintään 0,5 m syvyyteen. Suomessa suositeltu asennussyvyys on vähintään 0,7 m. Lisäksi tulee ottaa huomioon maan jäätyminen ja kuivumisen sekä korroosion vaikutukset maadoitusresistanssiin. Edellä mainittujen asioiden vaikutukset maadoitusresistanssiin tulisi minimoida. Tästä syystä maaperän jäätyessä talviaikaan, pidetään suositeltavana, että ensimmäistä metriä maaperässä jäätyispisteeseen asti ei tulisi pitää tehollisena. [13, s. 76–77.]

### 3.3 Laajan maadoitusjärjestelmän maadoituselektrodiverkko

Kuvassa 6 on esitetty esimerkki laajan maadoitusjärjestelmän maadoituselektrodiverkon rakenne. Maadoituselektrodiverkko muodostuu kirjaimella A merkitystä kuparitangosta, joka on upotettu maahan. Se muodostaa ruudukon muotoisen koko teollisuusalueen kattavan maadoituselektrodiverkon, joka yhdistää kaikki maadoituselektrodit toisiinsa. Maadoituselektrodiverkko jatkuu läheisille teollisuusalueille, viereisille tonteille tai sähköasemille kirjaimen B osoittamissa kohdissa. Maadoituselektrodiverkkoon liitetään suoraan rakennusten päämaadoituskiskot (MEB), rakennusten betoniraidoitukset ja metallisäiliöt. Lisäksi päämaadoituskiskojen kautta maadoituselektrodiverkkoon yhdistetään maadoituskiskot (EB) ja toiminnallisen maadoituksen kiskot (FE, kuvassa merkitty TE). [14, s. 34.]





Kuva 6. Laajan maadoitusjärjestelmän maadoituselektrodiverkko [14, s. 34].

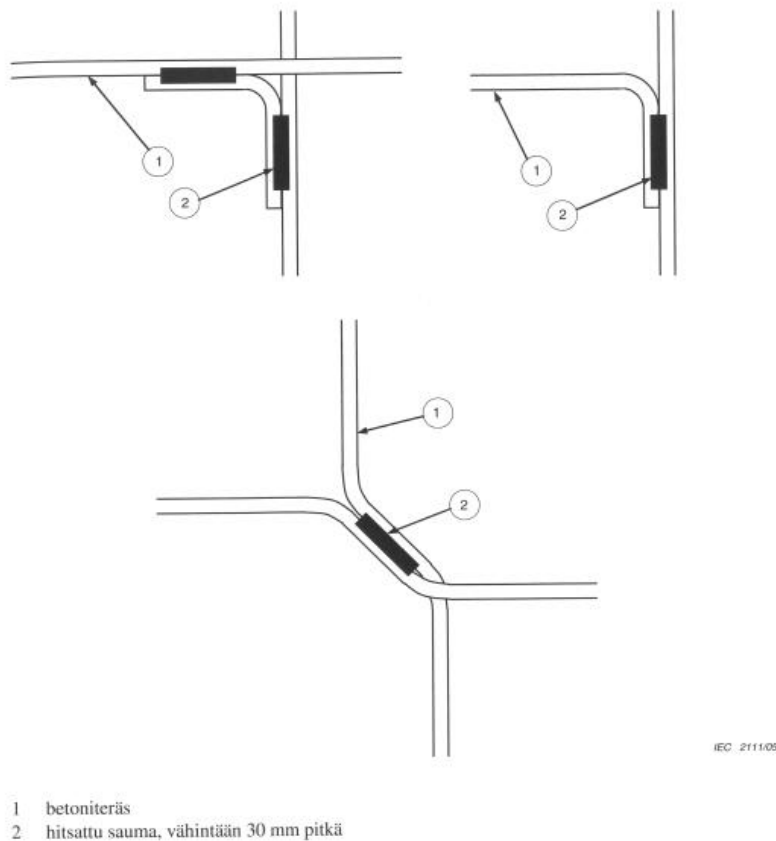
Laajaa maadoitusjärjestelmää käsitellään laajemmin aluvussa 6.2, jossa kerrotaan tarkemmin laajan maadoitusjärjestelmän määritelmästä ja vaatimuksista.

#### 3.4 Maadoituselektrodin sekä maadoituselektrodin ja -johtimen väliset liitokset

Maadoituselektrodin sekä maadoituselektrodin ja -johtimien välisissä liitoksissa käytetään yleensä hitsaus- ja puristusliitoksia. Lisäksi maadoituselektrodin ja -johtimen välisissä liitoksissa on mahdollista myös ruuviliittimien käyttö, mutta niiden käyttöä ei suositella huonon korroosiokestävyyden takia. [6, s. 140.]

Useasta yhteen liitettävästä osasta koostuvan maadoituselektrodin liitokset tulee toteuttaa käyttäen hitsausta, puristusliittimiä tai muuta luotettavaa mekaanista liitosta. Liittämisessä ei saa käyttää metallilangalla sitomista, koska se soveltuu vain parantamaan EMC-suojauksia eikä täten sovellu suojaustarkoituksiin. [5, s. 377; 10, s. 5.]

Mikäli maadoituselektrodiin on yhdistetty myös salamasuojajärjestelmä, tulee perustusten betoniraudoitusten silmukat toisiinsa yhdistävät hitsausliitokset olla kuvan 7 mukaisia. Hitsausauman vähimmäispituudeksi on asetettu 30 mm, ja se on merkitty kuvassa numerolla 2. Betoniteräkset on merkitty numerolla 1. [13, s. 91.]



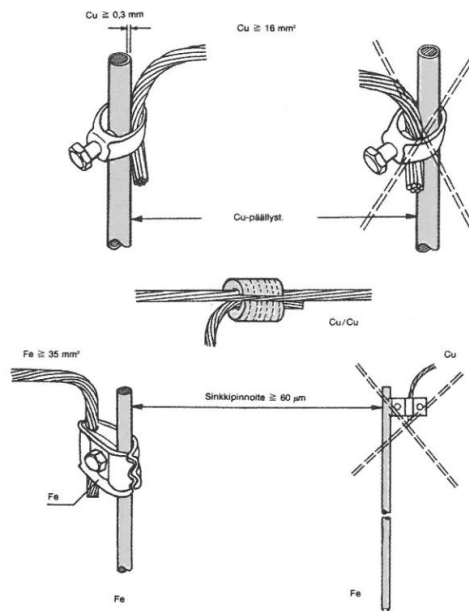
Kuva 7. Salamasuojausjärjestelmän maadoituselektrodin betoniraidoituksen silmukoiden hitsausseamat [13, s. 91].

Maadoituselektrodin vastakkaisiin päihin tulee tehdä liitokset kovajuotoksella päämaadoitusjohtimille, jotka yhdistävät maadoituselektrodin päämaadoituskiskoon. Muiden maadoitusjohtimien paikkaa ei ole erikseen määritetty. Maadoituselektrodin ja -johtimien väliset hitsausliitokset voidaan toteuttaa perinteisillä tavoilla hitsaamalla, mikäli maadoitusjohtimen ja -elektrodin materiaalit mahdollistavat sen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää liitoksien tekemiseen Cadweld-liitosmenetelmää, joka perustuu grafiittimuotin sisällä palavaan jauheeseen, joka muuttuu palaessaan sulaksi metalliksi. Sulanut metalli valuu muotin sisällä yhdistyskohtaan yhdistäen johtimet tai johtimen ja elektrodin toisiinsa. Cadweld-liitos soveltuu erinomaisesti maadoituksen korroosioherkille ja suurta johtavuutta vaativille liitoksille. Käyttökohteita maadoituselektrodeihin liittyvissä liitoksissa ovat kupariköyden liittäminen betoniraidoitukseen, toiseen kupariköyteen, teräsköyteen, maadoitussauvaan tai metallirakenteeseen. [6, s. 75, 144; 15; 16.]

Puristusliitoksia suunniteltaessa tulee ottaa huomioon, että liitokseen käytettävä liitin on valittu johtimen materiaalin ja poikkipinnan mukaan. Puristusliitoksissa voidaan käyttää esimerkiksi C-puristusliittäimiä, joilla saadaan toteutettua luotettava liitos kupariköyden ja maadoituselektrodin välille. [6, s. 140.]

Ruuviliittäimiä käytettäessä tulee valita samaa materiaalia olevat liitoksen komponentit, mikäli liitoskohta ei ole hermeettisesti suojattu esimerkiksi valamalla liitoskohta valuhartsilla. Käytettäessä maadoituselektrodin materiaalina kuumasinkittyä terästä tehdään yleensä haaroitus- ja jatkosliitokset muualla kuin maassa, esimerkiksi pylväissä. Tästä on esitetty esimerkki kuvassa 8. Liitosten tarkastamisen helpottamiseksi esimerkiksi betoniterästen ja maadoitusjohtimen liitoskohta suositellaan tehtäväksi päämaadoitusiskon lähellä. [6, s. 140–141.]

Kuvassa 8 on esimerkkejä suositusten mukaisesti oikein ja väärin tehdyistä edellä esitetyistä liitostavoista. Ylimmällä rivillä olevat esimerkit ovat ruuviliitoksesta käytettäessä kuparia, vasemmalla on oikein tehty ja oikealla väärin tehty liitos. Keskimmaisella rivillä on kahden kupariköyden välinen oikein tehty puristusliitos käyttäen C-puristusliitintä. Alimmalla rivillä vasemmalla on oikein tehty ja oikealla väärin tehty ruuviliitos käytettäessä kuumasinkittyä rautaa.



Kuva 8. Esimerkkejä suositusten mukaan oikein ja väärin tehdyistä maahan tarkoitetuista liitoksista [6, s. 141].

Muita mekaanisia liitoksia käytettäessä täytyy ottaa huomioon, että liitokset eivät saa perustua pelkästään pehmeäjuotokseen, sillä se ei takaa riittävää mekaanista kestävyyttä. [5, s. 377.]

## 4 Teollisuuden pienjännitejärjestelmien maadoituksen suunnittelu

### 4.1 Maadoitusjärjestelmän johdinten suunnittelu ja mitoittaminen

Tässä luvussa käsitellään pienjännitejärjestelmän maadoitusjärjestelmässä käytettäviä johtimia, joita ovat suojajohtimet (PE) ja maadoitusjohtimet. Suojajohtimella tarkoitetaan suojauksen takia käytettävää johdinta ja suojajohtimia ovat esimerkiksi suojamaadoitusjohdin, suojaava potentiaalintasausjohdin sekä sähköiskulta suojaamiseen käytettävä maadoitusjohdin. Maadoitusjohtimella tarkoitetaan maadoituselektrodin potentiaalintasaukseen, eli yleensä päämaadoituskiskoon tai -liittimeen, yhdistävää johdinta. [5, s. 374.]

Suoja- tai maadoitusjohdin tulee suojata mekaaniselta vaurioitumiselta seinälle asennettaessa lattiasta mitattuna 1,5 metrin korkeuteen sekä johtimen mennessä maahan vähintään 0,2 metrin syvyyteen. [14, s. 38.]

Suojajohtimena voidaan käyttää paljasta tai eristettyä johdinta kiinteästi asennettuna tai samassa kotelossa jännitteisten johtimien kanssa, monijohtimisen kaapelin johdinta sekä kaapelin armeerausta, konsentrista johdinta, metallista vaippaa tai vastaavaa. Lisäksi suojajohtimena voidaan käyttää metallikoteloitujen laitteiden ja jakelukiskojärjestelmien runkorakenteita ja metallikoteloita, mutta niiden käytölle on asetettu seuraavat ehdot: varmistetaan osien sähköinen jatkuvuus mekaanisesti ja korroosiolta suojattujen sopivien liitosten tai rakenteen avulla, käytettyjen osien johtokyky on jäljempänä tässä luvussa esitettyjen vaatimusten mukainen ja kaikille suojajohtimille on liittimet suunnitelluissa haaroituskohdissa. [5, s. 380.]

Teollisuudessa käytetään eristettyinä suojajohtimina yleisesti tyyppiä MK KEVI, jonka muovinen johdineriste on keltavihreäraitainen ja johtimen materiaalina on käytetty kuparia. Muita käytettäviä suojajohtimia ovat esimerkiksi AXMK-yksijohdinkaapelit, MCMK-kaapelien konsentriset johtimet tai MMO-kaapelien yksittäiset, muiden johtimen kanssa samanväriset johtimet. [6, s. 75; 14, s. 37–38.]

Suojajohtimen minimipoikkipinta voidaan laskea kaavalla 3 [5, s. 379; 17]:

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k} \quad (3)$$

$S$  on suojajohtimen poikkipinta ( $\text{mm}^2$ )

$I$  on suojalaitteen kautta kulkeva prospektiivisen vikavirran tehollisarvo (A), kun tapahtuu hyvin pieni-impedanssinen vika

$t$  on suojalaitteen toiminta-aika (s)

$k$  on kerroin, jonka arvo riippuu suojajohtimen materiaalista, eristyksestä jne.

Mikäli suojajohtimen minimipoikkipinnan määrittämiseen ei käytetä kaavaa 3, voidaan suojajohtimen poikkipinta-alan määrittämiseen käyttää taulukon 3 mukaisia arvoja.

Taulukko 3. Suojajohtimen minimipoikkipinnat [5, s. 379].

Äärijohtimen poikkipinta $S$ $\text{mm}^2$ kuparia	Vastaavan suojajohtimen minimipoikkipinta $\text{mm}^2$ kuparia	
	Suojajohdin on samaa materiaalia kuin äärijohtin	Suojajohdin on eri materiaalia kuin äärijohtin
$S \leq 16$	$S$	$\frac{k_1}{k_2} \times S$
$16 < S \leq 35$	$16^a$	$\frac{k_1}{k_2} \times 16$
$S > 35$	$\frac{S}{2}^a$	$\frac{k_1}{k_2} \times \frac{S}{2}$

$k_1$  on äärijohtimen materiaalista ja eristyksestä riippuva kertoimen  $k$  arvo, joka on esitetty liitteen 6 taulukossa 7.  
 $k_2$  on kertoimen  $k$  arvo, joka on esitetty liitteen 6 taulukoissa 2-6.  
<sup>a</sup> PEN-johtimen poikkipinnan pienentäminen on sallittu vain noudattamalla nollajohtimen mitoituksen sääntöjä (ks. SFS 6000-5-52).

Kaavassa 3 ja taulukossa 3 esiintyvän kertoimen  $k$  arvo voidaan määrittää kaavan 4 avulla [5, s. 386]:

$$k = \sqrt{\frac{Q_c(\beta+20\text{ }^\circ\text{C})}{\rho_{20}}} \ln\left(\frac{\beta+\theta_f}{\beta+\theta_i}\right) \quad (4)$$

$Q_c$  on johdinmateriaalin volumetrinen lämpökapasiteetti ( $\text{J}/^\circ\text{C mm}^3$ )  $20\text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa

$\beta$  on resistiivisyyden lämpötilakertoimen käänteisarvo  $0\text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa ( $^\circ\text{C}$ )

$\rho_{20}$  on johtimen materiaalin resistiivisyys  $20\text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa ( $\Omega\text{ mm}$ )

$\theta_i$  on johtimen alkulämpötila ( $^\circ\text{C}$ )

$\theta_f$  on johtimen loppulämpötila ( $^\circ\text{C}$ ).

Kaavan 4 parametrien arvoja eri johdinmateriaaleille on esitetty liitteen 6 taulukossa 1. Lisäksi liitteen 6 taulukoissa 2–6 on erilaisiin tapauksiin sopivia valmiiksi laskettuja kertoimen  $k$  arvoja erilaisille suojajohtimille.

Kaavan 3 ja taulukon 3 mukaan mitoitettujen erillisten eli joko muualle kuin vaihejohtimen kanssa samaan asennusputkeen asennetun tai vaihtoehtoisesti kaapelivaippojen ulkopuolella sijaitsevan kuparisen suojajohtimien tulee olla vähintään  $2,5\text{ mm}^2$  ja alumiinisen  $16\text{ mm}^2$ . [5, s. 380.]

Tietyntyyppisille suojamaadoitusjohtimille on asetettu lisävaatimuksia edellä esitettyjen vaatimusten lisäksi. Mikäli kiinteästi asennetun kulutuslaitteen suojamaadoitusjohtimessa esiintyy yli  $10\text{ mA}$ :n virta jatkuvasti, tulee tässä tapauksessa käyttää vahvistettua suojamaadoitusjohdinta. Vahvistetun suojamaadoitusjohtimen pienin poikkipinta-ala tulee olla laitteen sisältäessä vain yhden suojamaadoitusliittimen vähintään  $10\text{ mm}^2$  kuparia tai  $16\text{ mm}^2$  alumiinia johtimen koko pituuden osalta. Mikäli laite sisältää kaksi erillistä suojamaadoitusliitintä suojamaadoitusjohtimille, tulee asentaa toiseen liittimeen vikasuojauksen mukaan mitoitettu suojamaadoitusjohdin siihen asti, kunnes suojajohtimen poikkipinta suurenee vähintään kuparilla  $10\text{ mm}^2$ :iin tai alumiinilla  $16\text{ mm}^2$ :iin. [5, s. 384.]

Myös potentiaalintasausjohtimille on asetettu lisävaatimuksia mitoitukseen suojajohtimien yleisten mitoitusvaatimusten lisäksi. Pääpotentiaalintasausjohtimille eli päämaadoituskiskoon liitettäville suojaaville potentiaalintasausjohtimille, joita käytetään pääpotentiaalintasauksen toteuttamiseen, on asetettu minimipoikkipinnaksi vähintään puolet

suurimman asennuksessa käytetyn suojamaadoitusjohtimen poikkipinnasta. Pääpotentiaalintasausjohtimen poikkipinnan on oltava edellä mainitun minimipoikkipintavaatimuksen lisäksi vähintään 6 mm<sup>2</sup> kuparia, 16 mm<sup>2</sup> alumiinia tai 50 mm<sup>2</sup> terästä. Pääpotentiaalintasausjohtimen ei kuitenkaan tarvitse olla vaatimusten mukaan suurempi poikkipinnaltaan kuin 25 mm<sup>2</sup> kuparia tai vastaavan johtavuuden omaavaa muuta metallia. [5, s. 385.]

Lisäpotentiaalintasausjohtimille eli suojaaville potentiaalintasausjohtimille, joita käytetään yhdistämään jännitteelle alttiita osia toisiinsa tai lisäpotentiaalintasaukseen, on asetettu omat vaatimuksensa poikkipinnan mitoituksesta. Lisäpotentiaalintasausjohtimen, jota käytetään yhdistämään kaksi jännitteelle altista osaa, tulee vastata johtavuudeltaan vähintään pienimmän jännitteelle alttiin osiin kytketyn suojajohtimen poikkipintaa. Mikäli lisäpotentiaalintasausjohtinta käytetään yhdistämään laitteen jännitteelle alttiit osat muihin johtaviin osiin, tulee sen johtavuuden vastata vähintään puolta vastaavan suojamaadoitusjohtimen poikkipinnasta. Laitteiden ja lisäpotentiaalintasauksen yhdistävän lisäpotentiaalintasausjohtimen minipoikkipinnan tulee olla mekaanisen suojauksen kanssa vähintään 2,5 mm<sup>2</sup> kuparia tai 16 mm<sup>2</sup> alumiinia ja ilman mekaanista suojausta 4 mm<sup>2</sup> kuparia tai 16 mm<sup>2</sup> alumiinia. [5, s. 385.]

Maadoitusjohtimien mitoitus tapahtuu samalla tavalla kuin edellä on esitetty suojajohtimien mitoittaminen, mutta maadoitusjohtimille on asetettu lisävaatimuksia. Maadoitusjohtimen materiaalina käytetään kuparia tai terästä. Maadoitusjohtimena ei saa käyttää alumiinijohdinta. Kuparisen maadoitusjohtimen minipoikkipinta tulee olla vähintään 6 mm<sup>2</sup> ja teräksisen maadoitusjohtimen vähintään 50 mm<sup>2</sup>, mutta salamasuojajärjestelmän maadoituselektrodiin yhdistävän maadoitusjohtimen tulee olla poikkipinnaltaan vähintään 16 mm<sup>2</sup> kuparia tai 50 mm<sup>2</sup> terästä. Mikäli maadoitusjohdin on upotettu maahan, tulee sen poikkipinnan olla liitteen 1 taulukon 1 mukainen. [5, s. 377.]

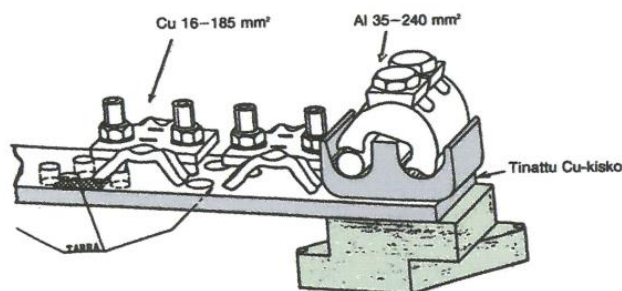
#### 4.2 Maadoituskiskojen suunnittelu, mitoittaminen ja liitokset

Maadoituskiskojen tyyppejä ovat päämaadoituskisko (PMK, MEB), lisämaadoituskiskot (LMK, EB) sekä lisäpotentiaalintasauskiskot (LPK, EB). Lisämaadoituskiskosta käytetään myös nimitystä maadoituskisko (MK, EB). Päämaadoituskisko sijoitetaan jokaisen teollisuusrakennuksen pääkytkinlaitokselle ja/tai pääkeskuksen lähelle.

Lisämaadoituskiskoja (LMK) sijoitetaan tarpeen mukaan eri tiloihin, kuten esimerkiksi jakokeskustiloihin ja muuntamoihin. Lisämaadoituskiskoihin yhdistetään suojamaadoitusjohtimen kautta ne laitteet, joiden tulee olla vaaralliselta kosketusjännitteeltä suojattuja. Kaikki kiskot tulee sijoittaa siten, että niiden luokse pääsy on vaivatonta, jotta voidaan suorittaa tarvittaessa mittauksia ja tarkastuksia. [6, s. 74–75; 14, s. 33, 35.]

Päämaadoituskisko tulee sijoittaa sellaisiin asennuksiin, joissa on käytössä suojaava potentiaalintasaus. Päämaadoituskiskoon yhdistetään maadoitus- ja suojajohtimet, suojaavat potentiaalintasausjohtimet sekä toiminnalliset maadoitusjohtimet, mikäli sellaisia on käytetty asennuskohteessa. Tässä tulee ottaa kuitenkin huomioon se, että päämaadoituskiskoon ei tarvitse yhdistää erikseen kaikkia erillisiä suojajohtimia, mikäli ne ovat jo toisten suojajohtimien kautta yhdistetty päämaadoituskiskoon. Päämaadoituskisko yhdistetään maadoituselektrodiin kahdella päämaadoitusjohtimella, joiden suositellaan kulkevan eri reittejä elektrodille. Lisäksi vähintään toisen päämaadoitusjohtimen tulee olla eristetty maassa alle kahden metrin etäisyydellä toisesta eristämättömästä maadoitusjohtimesta ja olla eristetty kokonaan kaapelikanavassa sekä -hyllyillä, jotta mahdollistetaan maadoituselektrodin ja -johtimien eheyden tarkistaminen silmukkaresistanssimitauksen avulla. [5, s. 378; 6, s. 75.]

Liitettäessä alumiinijohtimia päämaadoitus-, lisämaadoitus tai potentiaalintasauskiskoihin, joihin on yhdistetty myös kuparijohtimia, tulee kiskon olla materiaaliltaan tinattua kuparia tavallisen kuparin sijasta. Lisäksi alumiinijohtimille tulee olla erikseen omat Al- tai Alu-merkinnällä varustetut kaapelikengät tai -liittimet. Esimerkki tällaisesta kiskosta on esitetty kuvassa 9. [6, s. 141.]



Kuva 9. Päämaadoituskisko, johon voidaan liittää sekä kuparisia että alumiinisia johtimia [6, s. 142].



Kaikkien johtimien, jotka yhdistetään päämaadoituskiskoon, tulee olla erikseen yksitellen irrotettavissa ja liitoksen avaamisen tulee olla mahdollista ainoastaan työkalun avulla. Lisäksi tulee varmistaa liitoksien sähköinen ja mekaaninen luotettavuus. [5, s. 378.]

### 4.3 Maadoitettavat osat ja laitteet

#### 4.3.1 Sähkökeskukset ja niihin liittyvät muuntajat sekä kiskosillat

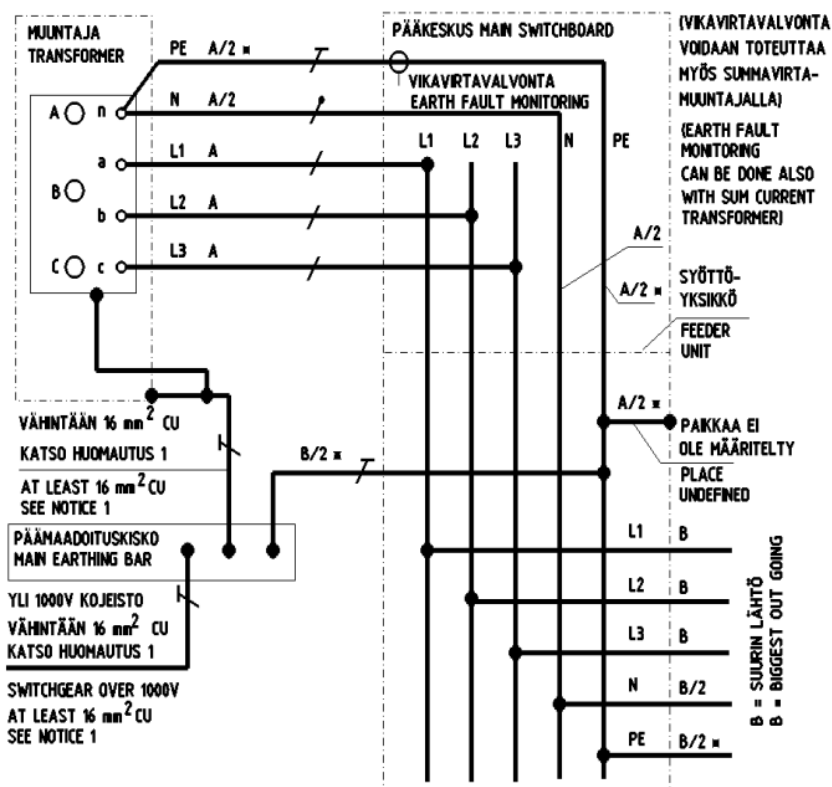
Tässä alaluvussa esitellään eri sähköjakelujärjestelmien sähkökeskusten sekä yleisellä tasolla niihin liittyvien muuntajien ja kiskosiltojen maadoittamista. Lisäksi käsitellään edellä mainittuihin laitteisiin ja osiin liittyvien suoja- ja maadoitusjohtimien mitoittamista yleisellä tasolla.

Teollisuuden sähkökeskukset varustetaan TN-S-järjestelmän osalta siten, että 230 V:n tai 400 V:n keskukset varustetaan erillisillä PE- ja N-kiskoilla sekä 500 V:n ja 690 V:n keskukset PE-kiskolla. IT-järjestelmän keskukset varustetaan PE-kiskolla. Sähkökeskuksen tai kiskosillan tapauksessa vaaditaan erikseen toteutettavaa testaamista silloin, kun halutaan käyttää näiden runkoa suojamaana (PE). Testauksessa tulee selvittää ko. rungon soveltuvuus kyseiseen käyttötarkoitukseen. [4, s. 7; 6, s. 77.]

Siinä tapauksessa, kun kotelokeskus on valmistettu muovisista suojaeristetyistä kotelosta ja kaapin arvokilvessä on merkintä suojaeristyksestä eli ns. kaksoisneliö-tunnus, ei koteloiden metallista valmistettuja asennuslevyjä suojamaadoiteta. Kuitenkin koteloiden ollessa valmistettu kokonaan metallista tulee ne suojamaadoittaa normaalisti. [14, s. 82.]

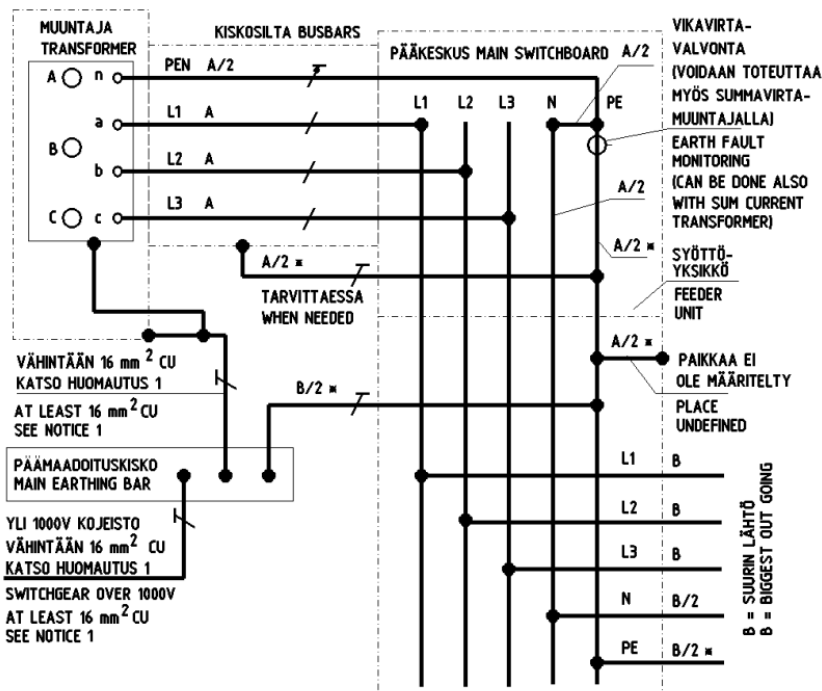
Vikavirtavalvonta TN-S-järjestelmissä voidaan toteuttaa kahdella tavalla. Ensimmäisessä tavassa pääkeskukseen asennetaan vikavirran mittaamiseen perustuva vikavirran ilmaisu- ja hälytysjärjestelmä. Mitattava vikavirta on tässä tapauksessa suojajohtimista pääkeskuksen PE-kiskoon palaavaa. Järjestelmä asennetaan TN-S- ja TN-C-S-järjestelmien pääkeskuksiin kuvien 10 ja 11 mukaisesti kohtiin. [4, s. 13.]

Kuvassa 10 on esitetty esimerkki TN-S-järjestelmän pääkeskuksen kaapeloinnista, jossa muuntajan alajännitepuoli ja pääkeskus on yhdistetty toisiinsa kaapeleilla. Suojajohdin PE ja nollajohdin N on eriytetty toisistaan jo muuntajan tähtipisteessä, minkä takia tulee ottaa huomioon se, että niitä ei saa enää sen jälkeen yhdistää toisiinsa [4, s. 11]. Tämän takia PE- ja N-kiskojen yhdistystä ei ole tehty enää keskuksessa. Muuntajan ja pääkeskuksen PE-kiskon yhdistävän PE-johtimen tulee olla vähintään puolet pääkeskusta syöttävän vaihejohtimen (merkitty kuvassa kirjaimella A) vastaavasta poikkipinta-alasta, ja vikavirtavälvonta tulee sijoittaa pääkeskuksessa PE-johtimeen. Pääkeskuksen PE-kisko tulee yhdistää päämaadoituskiskoon maadoitusjohtimella, jonka poikkipinta-ala on vähintään puolet pääkeskuksen suurimman lähdön vaihejohtimen (merkitty kuvassa kirjaimella B) vastaavasta poikkipinta-alasta, minkä lisäksi pääkeskuksen runko tulee yhdistää PE-kiskoon sopivaksi katsotussa kohdassa PE-kiskon johtokykyä vastaavalla johtimella. Muuntajan kannen ja rungon alaosan suojamaadoituskohtiot sekä yli 1000 V:n kojeisto yhdistetään vähintään 16 mm<sup>2</sup>:n suojamaadoitusjohtimella päämaadoituskiskoon.



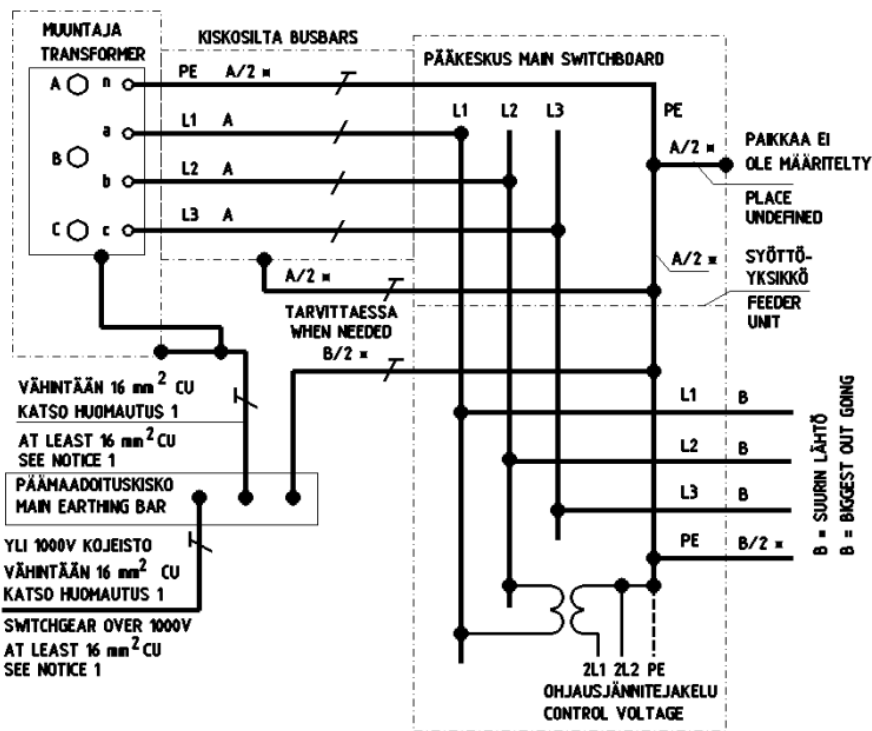
Kuva 10. TN-S-jakelujärjestelmän kaapelointi muuntajalta pääkeskukselle [4, s. 9].

Kuvassa 11 on esitetty esimerkki TN-C-S-järjestelmän pääkeskuksen kaapeloinnista. Kuvan kytkennät eroavat TN-S-järjestelmän kytkennöistä siten, että nolaa ja suojamaata ei ole erotettu muuntajan tähtipisteessä vaan vasta pääkeskuksessa. Lisäksi johtimien sijasta muuntajan ja pääkeskuksen yhdistämiseen on käytetty kiskosiltaa. Kiskosillan PEN-kisko yhdistyy pääkeskuksen PE-kiskoon, joka taas on yhdistetty keskuksen N-kiskoon. Vikavirtavalvonta tulee sijoittaa N- ja PE-kiskon yhdistyksen pääkeskuksen puoleiselle puolelle. Kiskosillan PEN-kiskon tulee olla vähintään puolet pääkeskusta syöttävän vaihevirtakiskojen (merkitty kuvassa kirjaimella A) vastaavasta poikkipinta-alasta. Pääkeskuksen PE-kisko tulee yhdistää päämaadoituskiskoon maadoitusjohtimella, jonka poikkipinta-ala on vähintään puolet pääkeskuksen suurimman lähdön vaihejohtimen (merkitty kuvassa kirjaimella B) vastaavasta poikkipinta-alasta, minkä lisäksi pääkeskuksen runko tulee yhdistää PE-kiskoon sopivaksi katsotussa kohdassa PE-kiskon johtokykyä vastaavalla johtimella. Muuntajan kannen ja rungon alaosan suojamaadoituskohdot sekä yli 1000 V:n kojeisto yhdistetään vähintään 16 mm<sup>2</sup>:n suojamaadoitusjohtimella päämaadoituskiskoon.



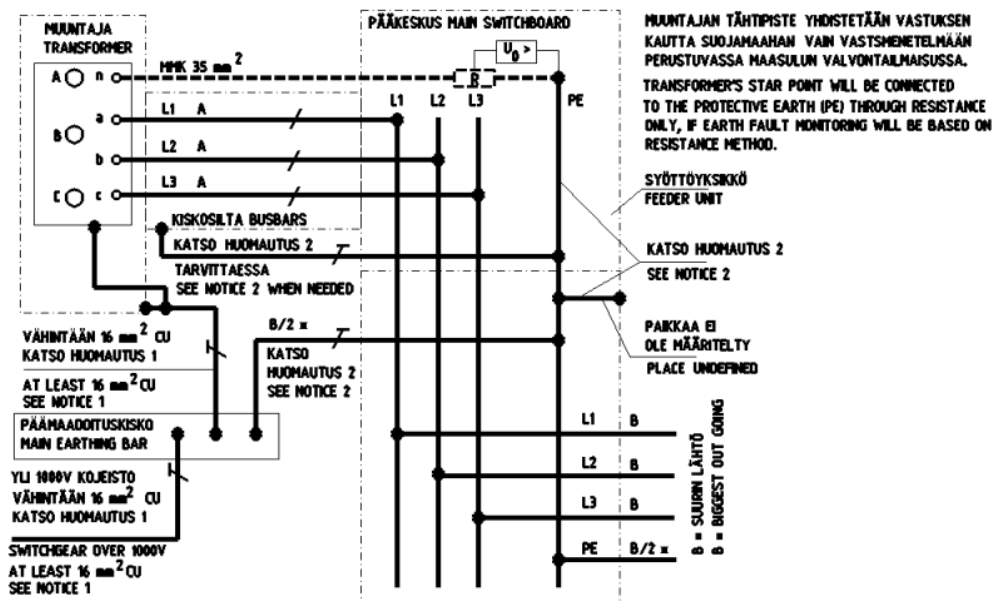
Kuva 11. TN-C-S-jakelujärjestelmän kaapelointi muuntajalta pääkeskukselle [4, s. 8].

Kuvassa 12 on esitetty esimerkki TN-S-järjestelmän kaapeloinnista muuntajalta pääkeskukselle silloin, kun käytössä ei ole N-kiskoa ja nollajohtimia. Erona kuvassa 10 esitettyyn TN-S-järjestelmän kaapelointiin on se, että tässä esimerkissä on käytetty kiskosiltaa kaapeleiden sijasta muuntajan ja pääkeskuksen yhdistämisessä, minkä lisäksi pääkeskukseen on asennettu ohjauksjännitejakelu eli yksivaiheinen vaihtovirtalähtö ohjauspiireille. Kiskosillan PE-kiskon tulee olla vähintään puolet pääkeskusta syöttävien vaihevirtakiskojen (merkitty kuvassa kirjaimella A) vastaavasta poikkipinta-alasta. Pääkeskuksen PE-kisko tulee yhdistää päämaadoituskiskoon maadoitusjohtimella, jonka poikkipinta-ala on vähintään puolet pääkeskuksen suurimman lähdön vaihejohtimen (merkitty kuvassa kirjaimella B) vastaavasta poikkipinta-alasta, minkä lisäksi pääkeskuksen runko tulee yhdistää PE-kiskoon sopivaksi katsotussa kohdassa PE-kiskon johtokykyä vastaavalla johtimella. Muuntajan kannen ja rungon alaosan suojamaadoituskohtiot sekä yli 1000 V:n kojeisto yhdistetään vähintään 16 mm<sup>2</sup>:n kuparisella suojamaadoitusjohtimella päämaadoituskiskoon.



Kuva 12. TN-S-jakelujärjestelmän kaapelointi muuntajalta pääkeskukselle, kun käytössä ei ole nollajohtinta [4, s. 10].

Kuvassa 13 on esitetty IT-järjestelmän kaapelointi muuntajalta pääkeskukselle, jossa muuntajan alajännitepuoli ja pääkeskus on yhdistetty toisiinsa kiskosillalla. Muuntajan tähtipiste ja pääkeskuksen PE-kisko yhdistetään vain siinä tapauksessa, kun käytössä on vastuksilla toteutettu maasulun ilmaisujärjestelmä. Edellä mainitussa tapauksessa muuntajan tähtipiste yhdistetään pääkeskuksen PE-kiskoon vastuksen kautta PE-johtimella, joka on tässä esimerkissä tyyppiä MMK 35 mm<sup>2</sup>. Mikäli käytössä on eristystason valvontareleeseen perustuva maasulun ilmaisujärjestelmä, pääkeskuksen PE-kiskoa ja verkon eli tässä esimerkissä muuntajan tähtipistettä ei saa kytkeä toisiinsa vastuksen kautta [4, s. 11–12]. Eristystason valvontarele sijoitetaan suojamaan (PE) ja tähtipisteen, yhden vaiheen tai vaiheiden väliin [4, s. 12]. Pääkeskuksen PE-kisko tulee yhdistää päämaadoituskiskoon maadoitusjohtimella, jonka poikkipinta-ala on vähintään puolet pääkeskuksen suurimman lähdön vaihejohtimen (merkitty kuvassa kirjaimella B) vastaavasta poikkipinta-alasta, minkä lisäksi pääkeskuksen runko tulee yhdistää PE-kiskoon sopivaksi katsotussa kohdassa PE-kiskon johtokykyä vastaavalla johtimella. Muuntajan kannen ja rungon alaosan suojamaadoituskohtiot sekä yli 1000 V:n kojeisto yhdistetään vähintään 16 mm<sup>2</sup>:n kuparisella suojamaadoitusjohtimella päämaadoituskiskoon.



Kuva 13. IT-jakelujärjestelmän kaapelointi muuntajalta pääkeskukselle [4, s. 11].

#### 4.3.2 Moottorit

Moottoreiden suojamaadoittamisessa käytetään moottoria syöttävän kaapelin konsentrista johdinta, kun moottori toimii vaihto- tai tasavirralla enintään 1000 V:n jännitteellä. Syöttävänä kaapelina käytetään yleensä 22 kW:n tehoon asti kuparista MCMK-kaapelia ja sitä isommilla tehoilla sekä kuparisia MCMK-kaapeleita että alumiinisia AMCMK-kaapeleita tilanteen mukaan. [6, s. 77; 14, s. 76.]

Todellisissa suunnittelukohteissa alle 1000 V:n moottorin maadoitus on toteutettu joissain tapauksissa siten, että maadoitetaan edellä mainitun lisäksi moottorin runko lähimpään maadoituskiskoon (EB), kun moottorin teho ylittää 90 kW. [9.]

#### 4.3.3 Nosturit

Nostureiden tapauksessa erillisellä suojajohtimella maadoitetaan nosturin rataakiskot. Suojajohtimena voidaan käyttää esimerkiksi keltavihreää 50 mm<sup>2</sup> MK-johdinta. Mikäli nosturissa käytetään laahauskiskojärjestelmää ja laahauskiskot on asennettu samaan metallikoteloon, tulee laahauskiskojen metalliset kotelot suojamaadoittaa useasta eri kohdasta. Lisäksi mahdolliset yksittäiset laahauskiskojen metallikotelon osat tulee yhdistää toisiinsa, ja lattia- tai maatasen alapuolisten laahauskiskojen metallista valmistetut kannet tulee maadoittaa ja yhdistää toisiinsa. Lattiakanavien ja metallikoteloiden kansilevyjen ja kansien yhdistäminen katsotaan toteutuneeksi suojamaadoituksen jatkuvuuden kannalta silloin, kun ne on kiinnitetty metallisaranoilla lattiakanavien tai metallikoteloiden runkoon, jolloin niiden erillistä yhdistämistä ei tarvita. [6, s. 77; 18, s. 158.]

#### 4.4 Potentiaalintasaus

Potentiaalintasaus jakaantuu pienjännitejärjestelmissä pää- ja lisäpotentiaalintasaukseen sekä muista syistä tehtäviin potentiaalintasauksiin, kuten esimerkiksi räjähdysvaarallisissa tiloissa tehtäviin potentiaalintasauksiin. Tässä luvussa käsitellään vain kahta ensin mainittua potentiaalintasausausta. [6, s. 37, 40–41.]

#### 4.4.1 Pääpotentiaalintasaus

Pääpotentiaalintasauksen tarve perustuu samanaikaisesti kosketeltavissa olevien osien välisten vaarallisten kosketusjännitteiden ehkäisemiseen. Pääpotentiaalintasaus tulee tehdä jokaisessa rakennuksessa ja siihen liitetään sähkölaitteiden jännitteelle alttiit osat sekä muut johtavat osat, jolloin ne on yhdistetty samaan potentiaaliin. Tämän seurauksena saadaan kosketeltavissa olevien johtavien osien väliset potentiaalierot poistettua, jolloin ei esiinny vaarallisia kosketusjännitteitä kahden samanaikaisesti kosketeltavan osan välillä. [6, s. 37.]

Pääpotentiaalintasausjärjestelmän liitännät tehdään yleensä päämaadoituskiskossa, joka on sijoitettu pääkeskuksen tai muun rakennusta syöttävän keskuksen lähelle. Pääkeskuksen ja kaikkien muiden rakennuksessa olevien keskusten suojakiskot tulee liittää pääpotentiaalintasausjärjestelmään. Muita pääpotentiaalintasausjärjestelmään liitettäviä suojamaadoitusjärjestelmän osia ovat rakennuksen sähköasennuksia syöttävien johtojen PEN- tai suojamaadoitusjohdin sekä päämaadoitusliittimen tai maadoitusjohtimen kautta päämaadoituskiskoon liitetty maadoituselektrodi. [6, s. 38–39.]

Edellä mainitun lisäksi pääpotentiaalintasausjärjestelmään liitetään muita johtavia osia, jotka eivät kuulu sähköasennukseen ja jotka voivat mahdollisesti johtaa jotain muuta tietynlaista potentiaalia, josta yleisin esimerkki on paikallisen maan potentiaali. Rakennukseen ulkopuolelta tulevat metalliset putket, kuten kaasu-, kaukolämpö- ja vesiputket sekä telekaapelien metallivaipat tulee liittää pääpotentiaalintasausjärjestelmään mahdollisimman lähellä niiden sisääntulokohtaa. Lisäksi on erittäin suositeltavaa suunnitella edellä mainitut putket ja tele- sekä tehonsyöttökaapelit tulemaan rakennukseen sisään samasta kohtaa, jotta saadaan estettyä mahdollisesti näitä pitkin tulevien jännitteiden, esimerkiksi ilmastollisten ylijännitteiden, leviäminen rakennuksen rakenteisiin. Edellä mainittujen ulkopuolisten syöttöjärjestelmien yhdistämistä pääpotentiaalintasaukseen ei saa kuitenkaan tehdä ilman ko. syöttöjärjestelmän operaattorin lupaa. [5, s. 164; 6, s. 38.]

Pääpotentiaalintasausjärjestelmään ei tarvitse liittää sellaisia rakennukseen tulevia putkia, joissa on eristeaineinen osuus rakennuksen sisääntulokohdassa. Myöskään sellaisia rakennukseen tulevia putkia, joissa on lyhyt johtava osa ainoastaan rakennuksen sisääntulokohdassa ja se on muuten muovista valmistettu, ei tarvitse liittää pääpotentiaalintasaukseen, mikäli metallinen osuus ei ole kosketusetäisyydellä rakennusta

syöttävästä keskuksesta tai potentiaalintasauskiskosta. Lisäksi pääpotentiaalintasaukseen ei tarvitse liittää putkiston metallisia osia, joiden katsotaan olevan niin lyhyitä, että niissä ei voi esiintyä mitään vierasta potentiaalia. Rakennuksen sisällä olevassa putkistossa tulee ohikytkeä mahdollisesti olemassa olevat johtamattomat epäjatkuvuuskohdat, kuten esimerkiksi vesimittarit, käyttäen sopivaa suojojohdinta. [5, s. 74; 6, s. 38.]

Teollisuusrakennuksessa olevat johtavasta materiaalista valmistetut yhtenäiset ja laajat keskuslämmitys- sekä ilmanvaihtojärjestelmät tulee liittää pääpotentiaalintasaukseen. Siinä tapauksessa, että ilmanvaihtojärjestelmään kuuluvien laajojen ilmanvaihtokanavien asennuksessa on käytetty esimerkiksi eristäviä jatkoksia eli ne eivät ole johtavuudeltaan jatkuvia tai ilmanvaihtojärjestelmä on kooltaan suppea, ei niitä tällöin tarvitse liittää pääpotentiaalintasausjärjestelmään. Suppealla ilmanvaihtojärjestelmällä tarkoitetaan esimerkiksi yksittäistä huippuimuria ja siihen liittyviä ilmanvaihtokanavia. Kuitenkin sellaiset laajahkot ilmanvaihtokanavien osat, joita ei normaalissa tapauksessa tarvitse liittää pääpotentiaalintasaukseen, mutta jotka sijaitsevat kosketusetäisyyden päässä rakennusta syöttävästä keskuksesta tai pääpotentiaalintasauskiskosta, tulee liittää pääpotentiaalintasausjärjestelmään. [5, s. 74; 6, s. 39.]

Pääpotentiaalintasaukseen on myös erittäin suositeltavaa, mutta ei pakollista, liittää muita kuin edellä mainittuja johtavia osia ja rakenteita. Esimerkiksi rakennusten laajat johtavat runkorakenteet sekä betoniteräksiset on suositeltavaa yhdistää pääpotentiaalintasaukseen, sillä silloin saadaan parannettua esimerkiksi häiriösuojausta. Myös kaapelihyllyjen yhdistäminen pääpotentiaalintasausjärjestelmään on erittäin suositeltavaa, sillä on mahdollista, että kaapelien kiinnikkeiden asennusvirheiden takia kaapelihyllyt voivat tulla jännitteisiksi. Lisäksi kaapelihyllyjen ja johtoteiden yhdistäminen pääpotentiaalintasaukseen on suositeltavaa, koska se parantaa häiriösuojausta. Kaapelihyllyt on todellisissa suunnittelukohteissa hyvin usein yhdistetty tietyn välimatkan välein lähimpään maadoituskiskoon (EB) tai sellaisen puuttuessa pääpotentiaalintasausjohtimeen. [6, s. 39; 9.]

Pääpotentiaalintasauksessa käytettävien liitoksien toteuttamisessa tulee käyttää luotettavasti toteutettuja liitostapoja, joita ovat soveltuvat liittimet, hitsaaminen tai juottaminen. Mikäli käytetään ruuviliittimiä, tulee huomioida, että niiden asentaminen betonin sisään tai maahan ei ole suositeltavaa. Kun liitetään pääpotentiaalintasausjärjestelmään



kanavia tai putkia, käytetään niiden yhdistämiseen pantarakenteita tai soveltuvia liittimiä. Lisäksi on mahdollista toteuttaa pääpotentiaalintasausjärjestelmään liittäminen myös putkien ja kanavien kannatusrakenteiden kautta, mikäli ne ovat sähköisesti riittävän johdovassa yhteydessä ko. putkiin ja kanaviin. [6, s. 39.]

Erityisesti suurissa rakennuksissa on mahdollista tehdä myös pääpotentiaalintasauksen kaltainen paikallinen potentiaalintasaus muualla rakennuksessa. Esimerkiksi paikallinen potentiaalintasaus voidaan suorittaa ilmanvaihtokonehuoneessa siten, että kaikki jännitteelle alttiit osat yhdistetään potentiaalintasauskiskoon, joka taas yhdistetään ilmanvaihtokonehuoneen jakokeskuksen PE-kiskoon. Tämän kaltaisen potentiaalintasauksen yhteydessä on otettava huomioon sen mahdollisesti aiheuttamat häiriövirrat siinä tapauksessa, että rakennuksessa on käytössä olevia PEN-johtimia. [6, s. 40.]

Monissa todellisissa suunnittelukohteissa, erityisesti suurissa teollisuuskohteissa, on usein käytetty potentiaalintasauksen toteutuksessa 120 mm<sup>2</sup>:n keltavihreäeristeisiä Cu-johtimia, kuten MK120 KEVI-johtimia. Muissa kuin automaatiotiloissa sijaitsevat lisämaadoituskiskot on usein yhdistetty toisiinsa molemmista päistään keltavihreillä 120 mm<sup>2</sup>:n Cu-johtimilla silmukkamaisesti. Syntynyt silmukka yhdistyy molemmista päistään rakennuksen päämaadoituskiskoon. Vaihtoehtoisesti lisämaadoituskiskot yhdistetään tilanteen vaatiessa suoraan päämaadoituskiskoon yhdellä keltavihreällä 120 mm<sup>2</sup>:n Cu-johtimella. Lisäksi on tapana liittää eri rakennusten päämaadoituskiskot toisiinsa silmukkamaisesti 120 mm<sup>2</sup>:n keltavihreällä Cu-johtimella. [9.]

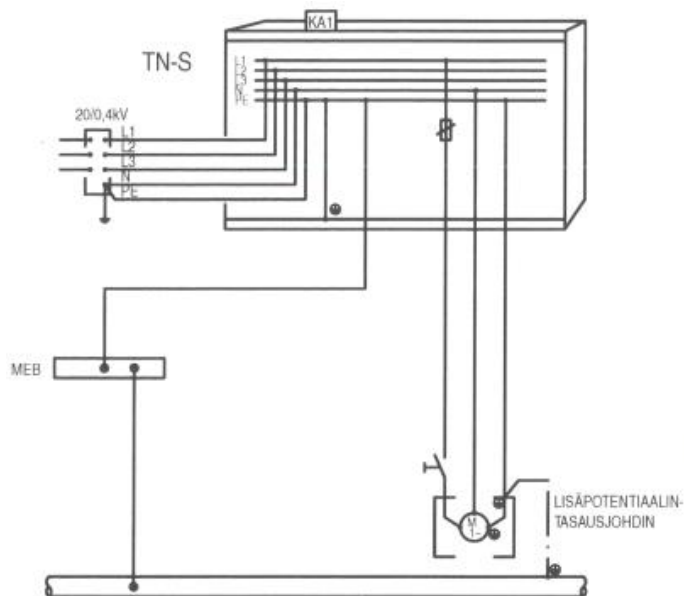
#### 4.4.2 Lisäpotentiaalintasaus

Lisäpotentiaalintasauasta käytetään silloin, kun on erityinen tarve haitallisten potentiaalierojen poistamiseen tai kosketusjännitesuojauksen toteutumista ei saada toteutettua syötön automaattisella poiskytkennällä. Lisäpotentiaalintasauksen tärkeys korostuu erityisesti silloin, kun sähkölaitetta syöttävän kaapelin tai johdon poikkipinta-ala tai pituus aiheuttavat oikosulkuvirran pienentymistä, josta aiheutuu syötön automaattisen poiskytkennän toiminta-ajan kasvaminen. [6, s. 40; 14, s. 37.]

Kaikki kiinteiden sähkölaitteiden jännitteelle alttiit osat ja muut johtavat osat sekä pistorasioden suojajohtimet tulee yhdistää lisäpotentiaalintasausjärjestelmään, ja siihen

suositellaan erityisesti yhdistettävän myös rakennuksen betoniraidoitukset. Yleensä jännitteelle alttiiden osien yhdistys lisäpotentiaalintasausjärjestelmään toteutetaan siten, että asennusta syöttävän keskuksen suojakisko liitetään lisäpotentiaalintasauskiskoon. Muut johtavat osat liitetään suoraan lisäpotentiaalintasauskiskoon. Pistorasian suoja- maadoitusliitin on mahdollista yhdistää tarvittaessa lähellä olevien johtavien rakenteiden kanssa. [6, s. 40; 14, s. 37.]

Kuvassa 14 on esitetty lisäpotentiaalintasauksen käytöstä esimerkki, jossa sähkömoottorin runko on kytketty moottoria syöttävän keskuksen PE-kiskoon suojamaadoitusjohtimella ja keskuksen PE-kisko on kytketty päämaadoituskiskoon (MEB). Sähkömoottorin runko on lisäksi yhdistetty sen lähellä olevaan metalliseen putkistoon, joka on kytketty myös päämaadoituskiskoon.



Kuva 14. Esimerkki lisäpotentiaalintasauksen käytöstä [14, s. 37].

Lisäpotentiaalintasaukselle vaihtovirtajärjestelmissä on annettu kaavassa 5 seuraava ehto, joka koskee samanaikaisesti kosketeltavien jännitteisten ja muiden osien välistä resistanssia [5, s. 88]:

$$R \leq \frac{50 V}{I_a} \quad (5)$$

$I_a$  on suojalaitteen toimintavirta (A)  
 –vikavirtasuojilla  $I_{\Delta n}$   
 –ylivirtasuojilla 5 sekunnin toiminta-aika.

#### 4.5 Työmaadoitus

Alle 1000 V:n jakokeskuksien, joiden nimellisvirta on yli 1000 A, syöttökennot tulee varustaa maadoituskytkimillä tai -kohtioilla, joilla saadaan toteutettua tarvittaessa työmaadoitus. Mikäli päädytään käyttämään maadoituskohtioita työmaadoituksen toteuttamiseen, on suositeltavaa asentaa pääkytkimen molemmille puolille oma maadoituskohtionsa. Pääkytkimestä katsottuna muuntajan puolella sijaitsevalla maadoituskohtiolla voidaan suorittaa työmaadoitus silloin, kun huolletaan tai vaihdetaan keskusta syöttävä muuntaja. Pääkytkimestä katsottuna keskuksen puoleista maadoituskohtiota voidaan käyttää varavoimakoneen liittämistä varten silloin, kun keskusta syöttävä muuntaja on huollettavana tai vaurioitunut. Lisäksi maadoituskohtioita käytettäessä tulee yli 1000 A:n pienjännitekeskuksille hankkia siirrettävät työmaadoitusvälineet. [6, s. 79; 19, s. 14, 17.]

## 5 Teollisuuden suurjännitejärjestelmien maadoitusten suunnittelu

### 5.1 Suurjännitejärjestelmän maadoitusjärjestelmän suunnittelun vaiheet

Suurjännitejärjestelmän maadoitusjärjestelmän suunnittelu tulee aloittaa selvittämällä ja keräämällä tarvittavaa tietoa, kuten esimerkiksi selvittämällä suurjänniteverkon rakenne, vian kesto aika ja maasulkuvirrat. Näiden tietojen selvittämisen ja keräämisen jälkeen aloitetaan suunnittelemaan alustavasti maadoitusjärjestelmää toiminnallisten vaatimusten näkökulmasta ja määritetään, tuleeko suunniteltava maadoitusjärjestelmä olemaan

osa jo olemassa olevaa laajaa maadoitusjärjestelmää. Mikäli suunniteltava maadoitusjärjestelmä on osa laajaa maadoitusjärjestelmää, on suunnittelu valmis, sillä silloin sallittujen kosketusjännitteiden  $U_{Tp}$  vaatimukset täyttyvät. [11, s. 95–96.]

Mikäli suunniteltava maadoitusjärjestelmä ei ole osa laajaa maadoitusjärjestelmää, tulee siinä tapauksessa määritellä asennuspaikan maaperän ominaisuudet ja niiden avulla resultoiva maadoitusimpedanssi, jolla tarkoitetaan kahden tai useamman maadoitusjohtimilla yhteen kytketyn maadoituselektrodin maadoitusimpedanssia. Tämän jälkeen selvitetään maavirta  $I_E$ , joka on maadoitusjännitteen aiheuttava osa maasulkuvirtaa, sekä kokonaismaadoitusimpedanssi  $Z_E$ , joka saadaan rinnakkaisten maadoitusjärjestelmien, verkon rakenteen ja maaperän ominaisuuksien avulla määritettyä. Näiden perusteella voidaan laskea maadoitusjännite  $U_E$ , jota verrataan määriteltyyn sallittuun kosketusjännitteeseen  $U_{Tp}$ . Tästä on kerrottu laajemmin alaluvussa 5.4. Suunnittelu on valmis, mikäli asetetut sallittujen kosketusjännitteiden  $U_{Tp}$  ja alaluvussa 6.1 esitetyn taulukon 4 vaatimukset täyttyvät. [6, s. 72; 11, s. 23, 26, 96.]

Siinä tapauksessa, että maadoitusjännite on suurempi kuin sallittu kosketusjännite, eivät taulukon 4 vaatimukset täyty, tulee selvittää, ylittääkö kosketusjännite  $U_T$  sallitun kosketusjännitteen  $U_{Tp}$ :n arvon, onko olemassa vaarallisia siirtyviä potentiaaleja tai muuntajien kiertävien nollavirtojen aiheuttamia suuria potentiaalieroja. Edellä mainituista asioista kerrotaan enemmän alaluvussa 5.4. Lisäksi selvitetään mahdolliset liian suuret pienjännitejärjestelmään siirtyvät rasisusjännitteet, joista on kerrottu enemmän edellä alaluvussa 6.1. [11, s. 96.]

## 5.2 Maadoitusjärjestelmän johdinten sekä maadoituskiskojen suunnittelu ja mitoittaminen

Suurjännitejärjestelmän maadoitusjärjestelmässä käytettävät johtimet ovat suoja-, maadoitus- ja potentiaalintasausjohtimia. Suoja-, maadoitus- ja potentiaalintasausjohtimien vähimmäispoikkipinnat ovat kuparilla 16 mm<sup>2</sup>, alumiinilla 35 mm<sup>2</sup> ja teräksellä 50 mm<sup>2</sup>. [6, s. 59, 75; 11, s. 92.]

Poikkeuksena edellisessä kappaleessa mainituista vähimmäispoikkipinnoista on mittamuuntajan toisiopiirin maadoitus, jota ei koske vaatimus kuparin 16 mm<sup>2</sup>:n

vähimmäispoikkipinta-alasta. Mekaanisesti suojatun mittamuuntajan toisiopiirin maadoitusjohtimen poikkipinta-ala tulee olla vähintään 2,5 mm<sup>2</sup> kuparia ja mekaanisesti suojaamattoman maadoitusjohtimen vähintään 4 mm<sup>2</sup> kuparia. [11, s. 121.]

Suoja- ja maadoitusjohtimen termisen lujuuden mitoitus tapahtuu samalla tavalla kuin maadoituselektrodin vastaava mitoitus. Suojajohtimen tapauksessa käytetään mitoituksen perusteena yleensä aina yksivaiheista maasulkuvirtaa. Suoja- ja maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinta voidaan laskea alaluvun 3.1.2 kaavalla 2, kun vikavirran kesto on rajoitettu alle viiteen sekuntiin. Yli viisi sekuntia kestävien vikatapauksien esiintyessä tulee vähimmäispoikkipinnan määrityksessä toimia alaluvun 3.1.2 yli viisi sekuntia kestävien vikatapauksien ohjeiden mukaan. Potentiaalintasausjohtimien mitoitus on suositeltavaa tehdä samoilla perusteilla kuin maadoitusjohtimien mitoitus. [6, s. 59, 75; 11, s. 113–116.]

Kun käytetään maadoitusjohtimen termisen lujuuden mitoituksen laskennassa loppulämpötilana 300 °C, tulee tällöin maadoitusjohtimien olla paljaita. Edellä mainittua sääntöä voidaan käyttää yleissääntönä maadoitusjohtimien kohdalla. Mikäli käytetään eristettyjä maadoitusjohtimia, tulee ottaa huomioon laskettaessa johtimen termistä lujuutta johtimen eristyksen suurin sallittu loppulämpötila oikosulun jälkeen.

Esimerkiksi PVC-eristeisen johtimen edellä mainittu sallittu loppulämpötila on 160 °C. Eristepäällysteisten suojajohtimien termistä lujuutta mitoittaessa tulee aina ottaa huomioon johtimen eristyksen sallittu loppulämpötila oikosulun jälkeen. [6, s. 61–62, 75.]

Maadoitusjohtimien tulisi olla mahdollisimman lyhyitä, kun ne liitetään maadoituselektrodiin, minkä lisäksi maanpinnan yläpuolelle asennettavat maadoitusjohtimet on asennettava tavalla, joka mahdollistaa niiden luokse pääsemisen helposti. Maadoitusjohtimien ollessa kosteassa asennustilassa sijoitettuna kaapelihyllylle, joka on materiaaliltaan kuumasinkittyä terästä tai alumiinia, tulee metallien välinen korroosio estää joko käyttämällä eristettyjä maadoitusjohtimia tai muulla soveltuvalla tavalla. Betoniin upotettujen maadoitusjohtimien molemmissa päissä tulee olla asennettuna helposti saavutettavissa olevat liittimet. Mekaanista suojausta on käytettävä tarpeen vaatiessa maan pinnan yläpuolelle ja maahan asennettavien maadoitusjohtimien tapauksessa, minkä lisäksi tulee

kiinnittää huomiota korroosion estämiseen erityisesti maahan ja betoniin menevien maadoitusjohtimien kohdalla. [6, s. 61; 11, s. 129.]

Suurjännitejärjestelmien maadoituskiskojen suunnittelussa pätevät samat periaatteet kuin pienjännitejärjestelmien vastaavissa. Nämä periaatteet on esitetty alaluvussa 4.2.

### 5.3 Maadoitettavat osat ja laitteet

#### 5.3.1 Suurjännitekojeistot

Suurjännitekojeiston maadoitus toteutetaan siten, että sen molemmat päät maadoitetaan käyttäen suojajohtimia. Esimerkiksi 10 kV:n kojeiston maadoittamisessa suojajohtimena voidaan käyttää kuparista 50 mm<sup>2</sup>:n MK-johdinta. [6, s. 76, 80–84.]

Kaasueristeisille metallikoteloiduille kojeistoille eli GIS-kojeistoille on annettu lisävaatimuksia maadoituksen suhteen. Siinä tapauksessa, kun GIS-kojeisto on yksivaiheisesti koteloitu, on kojeiston kaikki kolme koteloä liitettävä lyhyillä johtimilla toisiinsa. Mikäli on käytetty laippaliitoksia, jotka soveltuvat johtamaan suuritaajuisia virtoja riittävän kosketuspaineen ansiosta, ei siinä tapauksessa tarvitse käyttää erillisiä johtimia koteloiden yhdistämiseen. GIS-kojeiston koteloon tulee suoraan yhdistää nimellisjännitteeltään yli 1 kV:n kaapelien osalta niiden kosketussuojat, armeeraukset tai muut metallivaipat. Lisäksi mahdollisesti asennetut ylijännitesuojat, jotka suojaavat GIS-kojeistoa, tulee yhdistää mahdollisimman lyhyitä johtimia käyttäen kojeiston koteloon. [11, s. 56–57.]

On erittäin suositeltavaa, että GIS-kojeiston kotelo yhdistetään maadoitusjärjestelmään sen kennoissa vähintään kaapelipäätteen, katkaisijan, mittamuuntajan sekä ilman ja SF<sub>6</sub>-kaasun välisen läpiviennin läheisyydessä. Lisäksi on erittäin suositeltavaa tehdä GIS-kojeiston kotelosta yhdistykset maadoitusjärjestelmään kojeiston kiskoston päissä sekä kiskojen pituuden mukaan mahdollisesti myös niiden päiden välissä. [11, s. 57; 12.]

### 5.3.2 Kaapelit

Tässä luvussa tarkoitetaan suurjännitteellä yli 110 kV:n ja keskijännitteellä alle 110 kV:n jännitetasoa [11, s. 17].

Suurjännitekaapeleiden suojavaipat tulee maadoittaa sen molemmista päistä silloin, kun kaapeli on pituudeltaan yli 100 m. Tällä estetään kaapelin oikosulkuilanteissa kaapelin maadoittamattoman pään vaippaan muodostuvan vaarallisen jännitteen syntyminen. Kun kaapelin vaipan kumpikin pää on maadoitettu, kaapelin kuormitettavuus laskee noin 10 %:n verran johtuen kaapelin vaippaan indusoituvan jännitteen aiheuttamasta vaippavirrasta. Suurjännitekaapelin vaippa maadoitetaan molemmista päistä myös silloin, kun käytetään kaapelipäätteitä, jotka ovat kosketussuojattuja sekä varustettu johtavalla vaipalla. Mikäli näin ei tehdä, voivat kaapelipäätteet vaurioutua. [6, s. 72.]

Keskijännitteellä kaapeleiden metallivaipan maadoittamisessa käytetään yleissääntönä, että kaapelin vaippa maadoitetaan molemmista päistä. Maadoitusköyden sisältävä AHXAMK-W-kaapeli tulee maadoittaa siten, että sen maadoitusköysi maadoitetaan molemmista päistä, minkä lisäksi kaapelin lähtöpään maadoitusköyden maadoitusjohdin tulee viedä summavirtamuuntajan läpi. Lisäksi kaapelipäätte tulee aina eristää kojeiston rungosta. [6, s. 73, 76.]

Siinä tapauksessa, että käytetään suurivirtaisia lyhyitä kaapeleita, kaapelit on mahdollista maadoittaa vain toisesta päästään. Tällaisia kaapeleita ovat esimerkiksi 110/20 kV:n muuntajien 20 kV:n kaapelit. Ehtona tässä ratkaisussa on se, että kaapelin pituus on lyhyt, joka käytännössä tarkoittaa enintään noin 50 metrin pituutta, ja käytettävät kaapelipäätteet eivät ole kosketussuojattuja. [6, s. 73.]

### 5.3.3 Ylijännitesuojat

Ylijännitesuojien asennuksessa tulee ottaa huomioon se, että ne tulee aina kytkeä mahdollisimman lyhyillä johtimilla suoraan suojattavan järjestelmän, laitteiston, laitteen tai muun kohteen rinnalle. Ylijännitesuojien maadoitusjohdin tulee suunnitella siten, että se kulkee mahdollisimman lyhyttä reittiä maadoituselektrodiin, jonka olisi erittäin suositeltavaa olla pienemmän aaltovastuksen takia useampihaarainen elektrodi. Suositeltava

elektrodin rakenne on sellainen, että se sisältää 3–4 kpl haaroja, joiden pituus on 10 m, ja elektrodi asennetaan maahan 0,5–0,7 m:n syvyyteen. [6, s. 73.]

#### 5.3.4 Muuntajat

Uudet muuntajat on varustettu suojamaadoituskohtioilla, jotka sijaitsevat muuntajan kannella ja alaosassa. Suojamaadoituskohtiot yhdistetään muuntamon maadoituskiskoon suojamaadoitusjohtimilla, jotka voivat olla esimerkiksi kuparisia 50 mm<sup>2</sup>:n MK KEVI -johtimia. Pelkkä muuntajan kannen maadoituskohtion yhdistäminen maadoituskiskoon suojajohtimella riittää silloin, kun muuntajan valmistaja on näin ilmoittanut. [6, s. 76; 19, s. 15.]

Siinä tapauksessa, että muuntamoon on asennettu ylijännitesuojat muuntamon liittymiskaapelien yhdistyessä suoraan ilmajohtoon, tulee muuntajan n-napa yhdistää suoraan muuntajan vaippaan mieluiten muuntajan kannella, sillä se on turvallisinta tapa tehdä ko. yhdistys. Yhdistämiseen käytetään samankokoista suojamaadoitusjohtinta kuin muissakin muuntamon suurjänniteasennuksissa. Harhanollavirtojen välttämiseksi tulisi suorittaa PE- ja N-johdinten jakaminen jo muuntajan n-navassa. Mikäli kuitenkin käytetään PEN-johdinta erillisten PE- ja N-johtimien sijasta, muuntamon maadoituskiskon ja päämaadoituskiskon välistä yhdistystä ei saa tehdä edellä mainittujen harhanollavirtojen takia. [6, s. 65–66; 19, s. 16.]

#### 5.3.5 Muuntamot

Muuntamoissa tulee muuntajan lisäksi maadoittaa kaikki kosketeltavissa olevat metalliosat muuntamon maadoituskiskoon. Näitä maadoitettavia metalliosia ovat esimerkiksi kaapelipäätehylyt ja -telineet, metalliovet sekä aluskiskot. Suojajohtimena käytetään 50 mm<sup>2</sup>:n Cu-johtimia, kuten esimerkiksi MK50 KEVI -johtinta. [6, s. 76, 80–86.]

Hajamagneettikenttien välttämiseksi on kuitenkin huomioitava se, että muuntamon ulkopuolelle ulottuvat jännitteelle alttiit johtavat osat, kuten esimerkiksi kaapelihylyt ja ilmanvaihtoputkistot, tulee liittää päämaadoituskiskoon. Lisäksi tulee tarvittaessa käyttää esimerkiksi eristäviä aluslevyjä, joilla varmistetaan, että muuntamon muuntajat tai kojeistot



eivät ole yhteydessä rakennuksen maadoitettaviin osiin, kuten esimerkiksi betoniraudoituksiin. [6, s. 64.]

### 5.3.6 Moottorit

Yli 1000 V:n moottoreiden suojamaadoittamisessa käytetään vähintään 50 mm<sup>2</sup>:n Cu-johtimia, jotka voivat olla esimerkiksi MK50 KEVI -johtimia. Todellisissa suunnittelukohteissa on käytetty yli 1000 V:n moottorien maadoituksessa niiden syöttökaapelin suojaohdinta, joka on yhdistetty moottorin liitännäkotelosta syöttävän keskuksen suojakiskoon, minkä lisäksi moottorin runko on yhdistetty lähimpään maadoituskiskoon (EB) 70 mm<sup>2</sup>:n Cu-johtimella. [6, s. 76; 9.]

### 5.3.7 Sähköasemia ympäröivät aidat

Sähköasemia ympäröivät aidat on maadoitettava siinä tapauksessa, että ne ovat rakenteeltaan paljaita metallista valmistettuja aitoja. Maadoittaminen tulee toteuttaa siten, että aita yhdistetään useasta kohdasta joko suurjännitejärjestelmän omaan maadoitusjärjestelmään tai aidalle voidaan tehdä tarvittaessa omat maadoituselektrodit.

Maadoitusjärjestelmään yhdistäminen voidaan toteuttaa esimerkiksi yhdistämällä aita jokaisesta kulmastaan maadoitusjärjestelmään, minkä lisäksi vaarallisten jännitteiden estämiseksi myös aidassa olevat portit ja muut aukot tulee yhdistää maadoitusjärjestelmään. Mikäli sähköasemaa ympäröivän aidan päällystämässä on käytetty eristävää materiaalia, ei tällöin ko. aidan paljaita metallisia osia tarvitse yhdistää maadoitusjärjestelmään. [11, s. 120.]

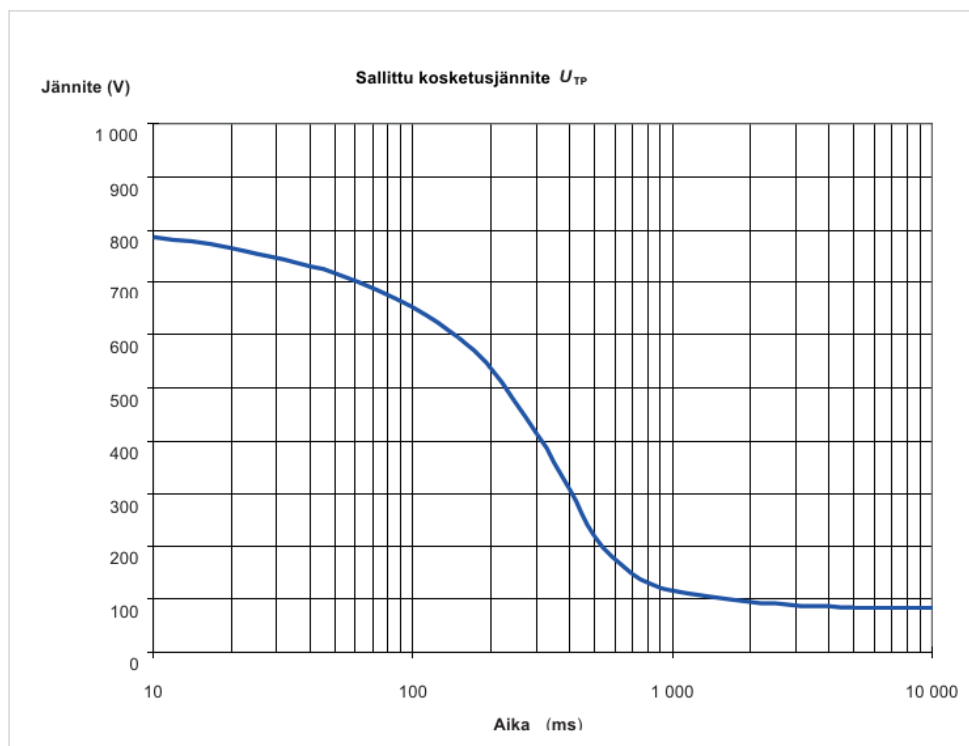
## 5.4 Potentiaalintasaus

Sallittujen kosketusjännitteiden  $U_{Tp}$  vaatimusten täyttäminen

Suurjännitejärjestelmän suunnittelussa tulee ottaa korroosiokestävyyden sekä mekaanisen ja termisen lujuuden lisäksi myös huomioon vikatapauksissa syntyvien sallittujen kosketusjännitteiden  $U_{Tp}$  vaatimusten toteutuminen. Sallittujen kosketusjännitteiden

arvojen voidaan katsoa toteutuvan, mikäli seuraavista ehdoista vähintään yksi toteutuu: suurjännitejärjestelmä kuuluu laajaan maadoitusjärjestelmään; tai todetaan laskemalla ja/tai mittaamalla maadoitusjännitteen olevan enintään kaksinkertainen verrattuna kuvassa 15 esitettyyn sallittuun kosketusjännitteen arvoon  $U_{Tp}$ . Mikäli kumpikaan edellä mainituista ehdoista ei toteudu, toteutetaan liitteessä 7 esitetyt tapaukseen soveltuvat erityistoimenpiteet M, jotka ovat riippuvaisia vian kestoajasta sekä maadoitusjännitteen suuruudesta. Mikäli kosketusjännitteelle sallitut arvot toteutuvat, voidaan yleissääntönä katsoa vaatimuksien täyttyvän myös askeljännitteen osalta, sillä askeljännitteiden sallitut arvot ovat huomattavasti suurempia verrattuna kosketusjännitteiden sallittuihin arvoihin. Sallitun kosketusjännitteen  $U_{Tp}$  arvona reilusti yli 10 sekunnin vioissa voidaan käyttää 80 V. [11, s. 91–93, 95, 97.]

Kuva 15 on laadittu siten, että kosketusjännite muodostuu paljaasta kädestä toiseen paljaaseen käteen tai paljaaseen jalkaan, ja kuvassa näkyvä käyrä on muodostettu usean erityyppisen kosketusjännitetapauksen painotetusta keskiarvosta. Tämänlaisia tapauksia, joita ko. käyrän laskemiseen on käytetty, on neljä ja niiden painotus on laadittu siten, että kosketusjännite vasemmasta tai oikeasta kädestä jalkaan sekä kosketusjännite molemmista käsistä jalkoihin on painotettu kertoimella 1,0 ja kosketusjännite kädestä käteen on painotettu kertoimella 0,7. Käyrän laatimisessa on käytetty standardin SFS 6001 liitteissä A ja B esitettyjä laskentatapoja, joita myös esitellään osittain tässä työssä edempänä. Liitteen 8 taulukossa 1 on esitetty ko. käyrän muutamien pisteiden valmiiksi laskettuja arvoja. [11, s. 91, 95, 105, 108.]



Kuva 15. Sallittu kosketusjännite  $U_{Tp}$  suurjännitejärjestelmässä [20, s. 93].

Sallitun kosketusjännitteen  $U_{Tp}$  arvo voidaan laskea myös kaavalla 6 [11, s. 105]:

$$U_{Tp} = I_B(t_f) \times \frac{1}{HF} \times Z_T(U_T) \times BF \quad (6)$$

$U_{Tp}$  on sallittu kosketusjännite  
 $I_B(t_f)$  on kehon kautta kulkevan virran raja-arvot  
 $HF$  on sydämen virtakerroin  
 $Z_T(U_T)$  on kehon impedanssi  
 $BF$  on kehon kerroin.

Kehon kautta kulkevan virran raja-arvo  $I_B(t_f)$  saadaan julkaisun IEC/TS 60479-1 kuvan 20 käyrästä  $c_2$  ja taulukosta 11, jolloin niiden perusteella saatujen arvojen perustana on alle 5 %:n todennäköisyys sydänkammiovärinäen syntymisestä. Liitteen 8 taulukossa 2 on esitetty edellä mainituilla oletuksilla laskettuja arvoja sallitusta kehon kautta kulkevasta virrasta  $I_B$  eri vian kestoajoilla  $t_f$ . Sydämen virtakertoimen  $HF$  arvoina käytetään 1,0 virtatien ollessa vasemmasta kädestä jalkoihin, 0,8 virtatien ollessa oikeasta kädestä jalkoihin ja 0,4 virtatien ollessa kädestä käteen. Edellä mainitut arvot ovat peräisin julkaisun IEC/TS 60479-1 taulukosta 12. Standardissa SFS 6001 on käytetty kehon impedanssin

$Z_T$  arvona julkaisun IEC/TS 60479-1 taulukon 1 ja kuvan 3 arvoja, jotka ovat kehon impedanssin maksimiarvoja 50 %:lla ihmisväestöstä. Kehon impedanssin  $Z_T$  arvoja on esitetty liitteen 8 taulukossa 3. Kehon kertoimen  $BF$  arvoina käytetään 0,75 kosketusjännitteen ollessa kädestä jalkoihin ja 0,5 kosketusjännitteen ollessa käsistä jalkoihin julkaisun IEC/TS 60479-1 kuvan 3 mukaan. [11, s. 105.]

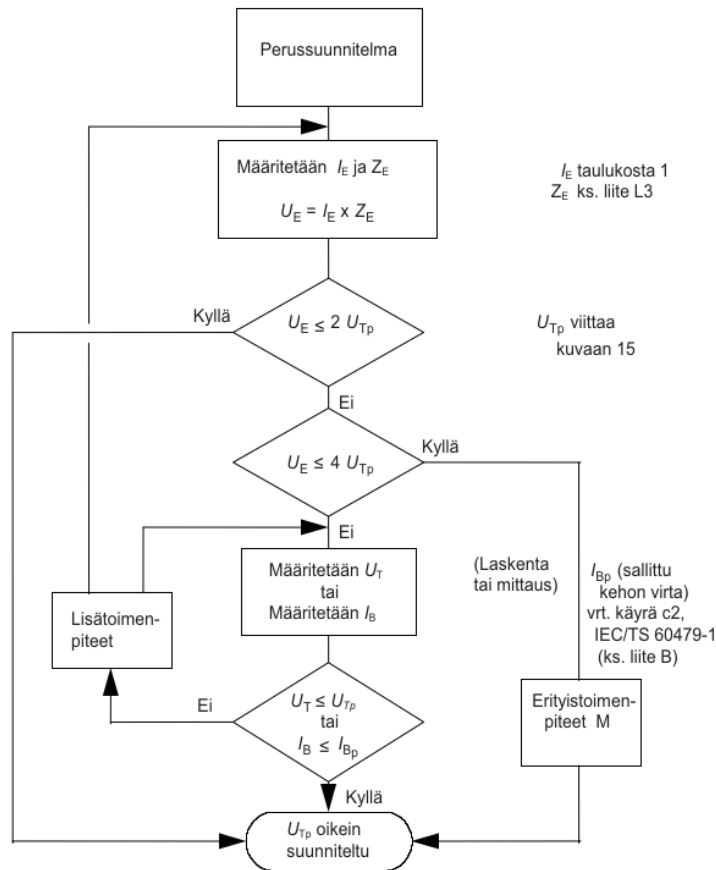
Teollisuusympäristöissä suositellaan käytettäväksi laajaa maadoitusjärjestelmää, jota käyttämällä saadaan toteutettua sallittujen kosketusjännitteiden arvojen toteutuminen suurjännitejärjestelmässä, minkä lisäksi täytetään myös standardissa SFS 6000-4-41 esitetyt pienjännitejärjestelmien kosketusjännitevaatimukset täytyvät suurjännitevikojen aikana. Laajaa maadoitusjärjestelmää käsitellään laajemmin alaluvussa 6.2. [11, s. 91.]

Mikäli teollisuuslaitoksen tai -kohteen suurjännitejärjestelmä ei ole osa laajaa maadoitusjärjestelmää, tulee toimia kuvassa 16 esitetyn lohkokaaavion mukaan. Perussuunnitelman laatimisen jälkeen määritetään maavirta  $I_E$  ja maadoitusimpedanssi  $Z_E$ , joiden avulla saadaan laskettua maadoitusjännite  $U_E$  kaavalla 7 [11, s. 133]:

$$\underline{U}_E = \underline{Z}_E \cdot \underline{I}_E \quad (7)$$

$\underline{U}_E$  on maadoitusjännite  
 $\underline{Z}_E$  on maadoitusimpedanssi  
 $\underline{I}_E$  on maavirta.

Maadoitusimpedanssin  $Z_E$  ja maavirran  $I_E$  määrittämisestä sekä maadoitusjännitteen  $U_E$  laskemisesta kaavalla 7 on kerrottu tarkemmin standardin SFS 6001 liitteessä L [11, s. 131–135].



Kuva 16. Laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattoman maadoitusjärjestelmän suunnittelu käyttäen maadoitusjännitteen  $U_E$  ja/tai kosketusjännitteen  $U_T$  vertaamista sallittuun kosketusjännitteeseen  $U_{Tp}$  [20, s. 94].

Mikäli maadoitusjännite  $U_E$  on pienempi tai yhtä suuri kuin kuvan 15 perusteella määritetty sallitun kosketusjännitteen  $U_{Tp}$  arvo kaksinkertaisena eli  $U_E \leq 2 \times U_{Tp}$ , on siinä tapauksessa täytetty kosketusjännitteelle asetetut vaatimukset ja suunnittelu on tältä osin valmis [11, s. 96]. Maadoitusjännitteen ollessa suurempi kuin sallitun kosketusjännitteen kaksinkertainen arvo mutta pienempi kuin sallitun kosketusjännitteen nelinkertainen arvo eli  $2 \times U_{Tp} \leq U_E \leq 4 \times U_{Tp}$ , tulee siinä tapauksessa tehdä soveltuvat erityistoimenpiteet M liitteen 7 taulukon 1 mukaan.

Mikäli maadoitusjännite on suurempi kuin sallitun kosketusjännitteen nelinkertainen arvo eli  $U_E > 4 \times U_{Tp}$ , on siinä tapauksessa määritettävä mittaamalla tai laskemalla kosketusjännite  $U_T$  tai kehon kautta kulkeva virta  $I_B$  ja verrattava niitä sallittuun kosketusjännitteeseen  $U_{Tp}$  tai sallittuun kehon virtaan  $I_{Bp}$ , joka saadaan esimerkiksi liitteen 8 taulukosta 2,

joka on laskettu julkaisun IEC/TS 60479-1 perusteella [11, s. 107]. Kehon virta  $I_B$  ja kosketusjännite  $U_T$  voidaan laskea soveltamalla kaavaa 8 [11, s. 109–110]:

$$I_B = \frac{U_T}{Z_T} \quad (8)$$

$I_B$  on kehon virta  
 $U_T$  on kosketusjännite  
 $Z_T$  on kehon impedanssi.

Mikäli kosketusjännite  $U_T$  on pienempi tai yhtä suuri kuin sallittu kosketusjännite  $U_{Tp}$  tai vaihtoehtoisesti kehon virta  $I_B$  on pienempi tai yhtä suuri kuin sallittu kehon virta  $I_{Bp}$ , täyttyy silloin sallittujen kosketusjännitteiden vaatimukset ja suunnittelu on tältä osin valmis.

## 5.5 Työmaadoitus

Työmaadoittamiselle on asetettu vaatimus standardissa SFS 6001, että mahdollisuus työmaadoittamiseen on oltava jokaisessa laitteistosta erotettavissa olevassa osassa. Tämän lisäksi on esitetty vaatimus, että työmaadoituksen toteuttaminen on oltava mahdollista kaikkien laitteiden välittömässä läheisyydessä lukuun ottamatta sellaisten laitteiden työmaadoitusta, jonka toteuttaminen ei ole tarkoituksenmukaista tai käytännöllistä. Työmaadoittaminen on tehtävä siinä tapauksessa työmaadoitettavan laitteen ensiö- ja toisiopuolen syöttökennoissa. Muuntajan työmaadoitus on yleensä oltava mahdollista tähtipisteen sekä jokaisen käämin tapauksessa. Erilaisten työmaadoitusvälineiden hankkimisesta sovitaan käyttäjän ja toimittajan kesken, ja niitä voivat olla mm. maadoitusvaunut ja -erottimet, siirrettävät työmaadoitusvälineet ja ohjattavat työmaadoitusvälineet. [11, s. 70.]

Uudet suurjännitekojeistot tulee varustaa maadoituskytkimillä siten, että jokaiseen kennoon asennetaan maadoituskytkin, eli käytännössä sellainen tulee asentaa jokaista kiskosta, kaapelilähtöä ja muuntajaa varten. Muuntajan maadoituskytkin tulee asentaa siten, että se mahdollistaa muuntajan suurjännitesulakkeen turvallisen vaihtamisen maadoittamalla ko. sulakkeen molemmat navat. Muuntajan maadoituskytkin voidaan asentaa myös muulla tavalla, jos sulakkeen turvallinen vaihtaminen on mahdollista suurjännitesulakkeen napojen maadoittamatta jättämisestä huolimatta. Mikäli maadoituskytkimen

asentaminen suurjännitekojeiston maadoituskennoon on hankalaa, on silloin mahdollista korvata ko. kennon maadoituskytkin maadoituskohtioilla ja siirrettävillä työmaadoitusvälineillä. Lisäksi suurjännitekojeistojen liityntäkaapeleille sekä kaikille kaapeli- ja muuntajalähdöille tulee olla jännitteenilmaisimien. Erityisesti jännitteenilmaisimien on tarpeellinen, kun kaapeli- tai muuntajalähdössä on mahdollisuus takasyöttöön. Ilmaeristeisiä kojeistoja varten tarvitaan jännitteenilmaisimien lisäksi jännitteenkoettimet, mikäli kojeistoa ei ole varustettu maadoituskytkimillä. [6, s. 79; 19, s. 17.]

## 5.6 Suurtaajuisten häiriövaikutusten minimointi

Maadoitusjärjestelmässä on otettava huomioon suurtaajuisten virtojen ja jännitteiden aiheuttamien häiriöiden minimointiin liittyvät vaatimukset käyttötaajuisten virtojen asettamien vaatimusten lisäksi jo suunnitteluvaiheessa, sillä maadoitusjärjestelmän muuttaminen rakentamisen jälkeen on erittäin kallista. Suurtaajuisia virtoja ja jännitteitä ovat esimerkiksi transienttivirrat ja -jännitteet. Salamaniskut sekä suurjännitejärjestelmissä tehtävät kytkennät, kuten esimerkiksi kaasueriteisten erottimien käyttö tai pitkien kaapeliyhteyksien kytkeminen, aiheuttavat transienttivirtoja ja -jännitteitä, jotka voivat aiheuttaa häiriöitä mm. suoja- ja ohjauslaitteiden toimintaan. Useita rakennuksia tai erillisiä tiloja sisältävässä teollisuuskohteessa kaikki maadoitusjärjestelmät tulee yhdistää toisiinsa. [11, s. 101, 119.]

Suurtaajuisten häiriöiden poistamiseksi tai vähentämiseksi on maadoitusjärjestelmän suunnittelussa huomioitava muutamia asioita. Ensimmäisenä on kiinnitettävä huomiota mahdollisimman pieneen virtateiden induktanssiin. Virtateiden induktanssia voidaan pienentää suunnittelemalla maadoituselektrodit ja -johtimet siten, että ne muodostavat suuren määrän silmukoita. Sellaisissa paikoissa, joissa esiintyy todennäköisesti suuria transienttivirtoja, tulee maadoitusruudun silmukkatihedys olla suurempi kuin muualla asennuskohteessa. Tämänlaisia asennuskohteita ovat lähinnä GIS-kojeistot, ylijännitesuojat ja virta- sekä jännitemuuntajat. [11, s. 119.]

Edellä mainitun lisäksi tulee tehdä myös muita toimenpiteitä virtateiden induktanssin vähentämiseksi. Maadoitusruudukkoon tulee yhdistää maadoitusliittimistään esimerkiksi suurjännitelaitteet, releet ja ohjauskennot, minkä lisäksi maadoitusjärjestelmään yhdistämiseen tulee käyttää mahdollisimman lyhyitä maadoitusjohtimia. Siinä tapauksessa,

että maadoitusjohtimet risteävät, tulee ne yhdistää toisiinsa, minkä lisäksi edellä mainituissa tilanteissa syntyvät silmukat on erikseen oikosuljettava, jos ne eivät ole jo valmiiksi oikosuljettu. Lisäksi rinnakkaisten maadoitusjohtimien tai -elektrodien tapauksessa on mahdollista pienentää niiden aiheuttamaa keskinäisimpedanssia, kun ne sijoitetaan toisistaan erilleen vähintään 0,5 m:n verran tai vaihtoehtoisesti käytetään osiin jaettua maadoitusjohdinta, jonka osajohtimet on asennettu toisistaan erilleen. Mikäli maadoitusjohdin on asennettu kaapelikanavaan, jossa on muita kaapeleita, tulee niiden asennus suorittaa siten, että ne kulkevat muiden kaapelien kanssa rinnan. Kaapelien kosketussuojat olisi yhdistettävä edellä mainitussa tapauksessa molemmista päistään maadoitusjärjestelmään, missä on kuitenkin huomioitava kaapelien kosketussuojien kyky johtaa suurta osaa maasulkuvirrasta. [11, s. 119.]

Sähkömagneettisen suojauksen parantamiseksi rakennuksien betoniteräkset ja metalliset rakennusosat tulee yhdistää maadoitusjärjestelmään. Sähkömagneettisen suojauksen parantamisen lisäksi edellä mainittu yhdistys tarjoaa pieni-induktanssisen kulkureitin virralle. [11, s. 119.]

## **6 Pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoituksen yhdistäminen**

### **6.1 Yleiset vaatimukset**

Kokemuksen perusteella Suomessa on päädytty siihen, että suur- ja pienjännitejärjestelmien maadoitukset on yleisesti aina yhdistettävä. Tämä kokemus perustuu siihen, että on huomattu edellä mainittujen järjestelmien erillisten maadoitusten pyrkimys yhdistyä verkon maasulkujen aikana. Tämä ei kuitenkaan välttämättä koske vähintään 110 kV:n verkkoon kuuluvia sähköasemia, sillä niissä on mahdollista käyttää erillistä maadoitusta suur- ja pienjännitejärjestelmien osalta. [11, s. 146.]

Teollisuusasennuksissa ei voida pien- ja suurjännitelaitteiden läheisyyden takia käyttää erillisiä maadoitusjärjestelmiä, minkä takia pien- ja suurjännitejärjestelmissä käytetään yhteistä maadoitusjärjestelmää. Taulukossa 4 on esitetty maadoitusjännitevaatimukset pien- ja suurjännitejärjestelmien yhdistämiselle. [11, s. 100.]



Taulukko 4. Maadoitusjänniterajoihin perustuvat vähimmäisvaatimukset suur- ja pienjännite-maadoitusten yhdistämiselle [11, s. 100].

Pienjännitejärjestelmä <sup>a, b</sup>		Maadoitusjännitevaatimukset		
		Maadoitusjännite	Rasitusjännite <sup>c</sup>	
			Vian kestoaika $t_f \leq 5 \text{ s}$	Vian kestoaika $t_f > 5 \text{ s}$
TT		Ei sovellettavissa	$U_E \leq 1200 \text{ V}$	$U_E \leq 250 \text{ V}$
TN		$U_E \leq F \times U_{Tp}$ <sup>d, e</sup>	$U_E \leq 1200 \text{ V}$	$U_E \leq 250 \text{ V}$
IT	Suojamaadoitusjohtimet mukana verkossa	Kuten TN-järjestelmässä	$U_E \leq 1200 \text{ V}$	$U_E \leq 250 \text{ V}$
	Suojamaadoitusjohtimia ei ole mukana verkossa	Ei sovellettavissa	$U_E \leq 1200 \text{ V}$	$U_E \leq 250 \text{ V}$

<sup>a</sup> Pienjännitejärjestelmät, katso SFS 6000-1.  
<sup>b</sup> Tietoliikennelaitteille tulisi noudattaa ITU:n suosituksia.  
<sup>c</sup> Rajoja voidaan nostaa, jos käytetään soveliaita pienjännitelaitteita tai jos maadoitusjännitteen asemasta sovelletaan laskelmiin tai mittauksiin perustuvia paikallisia potentiaalieroja.  
<sup>d</sup> Jos pienjännitejärjestelmän PEN- tai nollajohdin on maadoitettu vain suurjännitemaadoituksen yhteydessä, suureen  $F$  arvo tulee olla 1.  
<sup>e</sup>  $U_{Tp}$  arvo saadaan kuvasta 15.  
 HUOM. Tavallinen kertoimen  $F$  arvo on 2. Suurempia arvoja voidaan käyttää, jos PEN-johdella on lisäyhdistyksiä maahan. Tietyissä maaperissä  $F$ :n arvo voi olla jopa 5. Harkintaa tulee käyttää, kun tätä sääntöä noudatetaan suuriresistiivisissä maaperissä, joissa pintakerroksen resistiivisyys on alla olevia kerroksia suurempi. Kosketusjännite voi tällöin ylittää 50 % maadoitusjännitteestä.

Rasitusjännitteitä ei esiinny pienjännitejärjestelmään kuuluvissa laitteissa silloin, kun pienjännitejärjestelmän jakelujärjestelmänä käytetään TN-järjestelmää ja pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoitukset on yhdistetty. Teollisuusverkon pienjänniteverkko on tyypillinen IT-jakelujärjestelmän käyttökohde. Yleensä näissä teollisuusverkoissa käytetään laajaa maadoitusjärjestelmää tai vaihtoehtoisesti IT-järjestelmä on yhtenäisten ja suppeiden teollisuusalueiden tapauksessa kokonaan suurjännitejärjestelmän maadoitusjärjestelmän sisäpuolella, jolloin kaikki suur- ja pienjännitejärjestelmien suoja- ja järjestelmämaadoitukset on yhdistettävä yhteiseen maadoitusjärjestelmään. Edellä mainitun takia tässä tapauksessa pienjännitejärjestelmälle esitytetyt vaatimukset täyttyvät myös IT-järjestelmän tapauksessa. [6, s. 54; 11, s. 148.]

## 6.2 Laaja maadoitusjärjestelmä

Laajalla maadoitusjärjestelmällä tarkoitetaan sellaista yhtenäistä maadoitusjärjestelmää, jossa kaikki paikalliset maadoitusjärjestelmät on yhdistetty toisiinsa, ja se mahdollistaa sen, ettei suuria kosketusjännitteitä pääse syntymään yhdistettyjen maadoitusjärjestelmien läheisyyden takia. Laajan maadoitusjärjestelmän voidaan katsoa muodostavan näennäisen tasapotentiaalipinnan, sillä tämänlaisessa järjestelmässä paikallisen maadoitusjärjestelmän potentiaalin nousu pienenee johtuen maasulkuvirtojen jakautumisen tavasta. [11, s. 24.]

Laajan maadoitusjärjestelmän perustana on se, että ko. maadoitusjärjestelmän alueella ei esiinny potentiaalieroja tai mahdollisesti esiintyvät potentiaalierot ovat hyvin pieniä. Laajan maadoitusjärjestelmän tunnistamiseen ei ole olemassa yksiselitteisiä sääntöjä, vaan tunnistamisessa tulee ottaa huomioon monia asioita. Yleisesti voidaan katsoa, että laajaan maadoitusjärjestelmän toteutumista edesauttavia asioita ovat pienet vikavirrat, pieni kokonaisresistanssi, lyhyet vian kestoajat sekä vikavirran jakautuminen kaapeli-vaippojen ja/tai ukkosjohtimien ansiosta siten, että maapotentiaalin nousu jää hyväksyttävälle tasolle. [11, s. 138.]

Laajan maadoitusjärjestelmän turvallisuusmääräysten täyttämiseksi on mahdollista käyttää paikallisten olosuhteiden perusteella soveltuviksi määriteltyjä menetelmiä. Laajan maadoitusjärjestelmän suunnitelmien tarkastaminen on mahdollista tehdä soveltuvin laskelmin tai mittauksin. [11, s. 138.]

Suomessa laaja maadoitusjärjestelmä on rakenteeltaan tavallisesti verkkomaisesti silmukoituva, minkä lisäksi muuntamot sijaitsevat lähellä toisiaan. Maadoitusjärjestelmä tulee olla rakennettu siten, että jokaisen maadoitusjärjestelmän muuntopiirin maadoitukset yhdistyvät ainakin kahden muun maadoitusjärjestelmän muuntopiirin maadoitusten kanssa. Lisäksi tulee tehdä enemmän kuin kaksi yhdistystä sopivan mittaisten välimatkojen välein muiden muuntopiirien maadoituksiin. Yhdistäminen eri muuntopiirien maadoitusten välillä on mahdollista toteuttaa käyttämällä PE- tai PEN- johdinta, kaapelin keskusköyttä, erillistä johdinta tai kaapelin kosketussuojaa, mikäli sen poikkipinta-ala on

riittävän suuri. Olosuhteiden takia tavanomaisia laajan maadoitusjärjestelmään kuuluvia alueita Suomessa ovat mm. laajat ja maadoitusjärjestelmältään galvaanisesti yhtenäiset teollisuusalueet. [11, s. 153.]

Laajan maadoitusjärjestelmän dokumentointivaatimukset on esitetty alaluvussa 8.2 (s. 56) ja esimerkki ko. järjestelmän maadoituselektrodista on esitetty alaluvussa 3.3 (s. 17).

### 6.3 Esimerkki teollisuuskohteen suur- ja pienjännitejärjestelmien yhteisen maadoituksen toteuttamisesta

Liitteen 9 kuvassa 1 on esitetty esimerkki suur- ja pienjännitejärjestelmien yhteisestä maadoituksesta, kun käytössä on 690 V:n IT-järjestelmä. Suurjännitekojeiston maadoituskisko (EB) ja päämaadoituskisko (MEB) on yhdistetty molemmista päistään toisiinsa MK120 KEVI -johtimella, kun taas muuntajahuoneen maadoituskisko (EB) on yhdistetty päämaadoituskiskoon MK50 KEVI -johtimella. Tässä esimerkissä muihin tiloihin ei ole sijoitettu lisämaadoituskiskoja (EB), mutta lisämaadoituskiskojen yhdistämiseen päämaadoituskiskoon käytetään yleensä MK50 KEVI -johdinta [6, s. 81–83]. Toiminnallisen maadoituksen kiskon (FE) mahdollinen sijoituspaikka on esitetty kuvassa. Toiminnallisten maadoitusten maadoituskiskot yhdistetään päämaadoituskiskoon käyttäen mustaa MK50 MU -johdinta, jonka päihin on merkitty FE.

10 kV:n kojeisto ja sen syöttökaapeli muuntajalle on suojamaadoitettu molemmista päistä MK50 KEVI -johtimilla maadoituskiskoihin siten, että kojeisto on yhdistetty suurjännitekojeiston maadoituskiskoon molemmista päistään. Muuntajaa syöttävä kaapeli on suurjännitekojeiston päästä yhdistetty 10 kV:n kojeiston omaan maadoitusliitäntään ja toinen pää muuntajahuoneen maadoituskiskoon. Lisäksi muuntajahuoneen maadoituskiskoon on liitetty mm. kaapelihyllyt ja muut johtavat metalliosat MK50 KEVI -johtimilla.

Muuntajan ja pääkeskuksen välinen syöttö on toteutettu kiskosillalla. Kiskosilta ei sisällä suojamaadoituksen (PE) ja nollan (N) kiskoja tai PEN-kiskoa, joten muuntajan n-navan ja pääkeskuksen suojamaadoituskiskon (PE) välillä ei ole yhteyttä. Muuntajan molemmat suojamaadoituskohtiot on yhdistetty muuntajahuoneen maadoituskiskoon käyttäen MK50 KEVI-johtimia.

Pääkeskus on yhdistetty suojamaadoituskiskostaan (PE) päämaadoituskiskoon kahdella MK50 KEVI -johtimella, minkä lisäksi kiskosillan runko on yhdistetty kahdella MK120 KEVI -johtimella pääkeskuksen suojamaadoituskiskoon. Pääkeskukselta syöttönsä saava 400 V:n alakeskus on yhdistetty pääkeskukseen 690/400 V:n muuntajan välityksellä. Alakeskuksen suojamaadoituskisko on yhdistetty syöttökaapelin suojajohtimella pääkeskuksen suojamaadoituskiskoon, minkä lisäksi 690/400 V:n muuntajan runko on yhdistetty edellä mainittuun suojajohtimeen. Pää- ja alakeskuksen rungot on yhdistetty keskusten omiin suojamaadoituskiskoihin.

Ryhmäkäyttöjen moottorien suojamaadoitus on toteutettu moottorin syöttökaapelin suojajohtimella, joka on yhdistetty moottorin suojamaadoitusliittimeen ja keskuksen suojamaadoituskiskoon. Apujännitteiden signaalinollat ja ohjauskaapeleiden parisuojat on yhdistetty pääkeskuksen ohjaus- ja säätöjärjestelmän toiminnallisen maadoituksen kiskoon (FE), joka taas tässä tapauksessa on yhdistetty ohjaus- ja säätöjärjestelmän suojamaadoituskiskoon (PE). Edellä mainittu suojamaadoituskisko on yhdistetty MK16 KEVI -johtimella päämaadoituskiskoon (MEB). Mikäli käytettäisiin erillistä toiminnallisen maadoituksen verkkoa, ei tällöin tehdä edellä mainittua ohjaus- ja säätöjärjestelmän kiskojen yhdistystä, vaan toiminnallisen maadoituksen yhdistys päämaadoituskiskoon tapahtuisi erillisen FE-kiskon kautta MK16 MU- ja MK50 MU -johtimilla, joiden molempiin päihin on merkattu tunnus FE.

## **7 Teollisuuden automaatiojärjestelmien maadoituksen suunnittelu**

### **7.1 Järjestelmäkaapit ja muut vastaavat laitteistot**

Järjestelmäkaappien ja vastaavien laitteistojen suojamaadoituksessa käytetään ko. kaappia syöttävän sähkökaapelin suojamaadoitusjohdinta. Tämän lisäksi järjestelmäkaapin päämaadoitusliitin tulee yhdistää automaatiotilan maadoituskiskoon (EB) ko. kaapin valmistajan ohjeiden mukaisella suojajohtimella, joka on kuitenkin poikkipinnaltaan vähintään 16 mm<sup>2</sup>:n kuparikaapeli, esimerkiksi MK16 KEVI -johdin. [6, s. 78, 88.]

## 7.2 Ohjauspulpetit, -paneelit, -kotelot ja sekä kenttälaitteet

Ohjauspulpettien ja -paneelien suojamaadoittamisessa käytetään 16 mm<sup>2</sup>:n kuparista suojajohdinta, joka voi olla esimerkiksi MK16 KEVI. Maadoituskiskolta (EB) tuodaan suojajohdin, joka yhdistetään ohjauspaneelien ja -pulpettien metallisiin runkoihin. [6, s. 78.]

Ohjauskoteloitten suojamaadoittaminen toteutetaan siten, että suojajohtimena käytetään ko. kaapin ohjauskaapelin keltavihreää johdinta. Mikäli ohjauskaapelin johtimet ovat samanvärisiä, tulee käyttää suojamaadoitusjohtimena keltavihreällä, esimerkiksi muoviletkulla, merkittyä kaapelin viimeisintä johdinta. [6, s. 78.]

Kenttälaitteiden, kuten esimerkiksi lähettimien ja rajakytkimien, suojamaadoitus toteutetaan samalla tavalla kuin edellisessä kappaleessa esitelty ohjauskoteloitten suojamaadoitus. Mikäli kenttälaitteen käyttöohjeissa on mainittu muita vaatimuksia ko. laitteen suojamaadoittamisesta, toimitaan näiden ohjeiden mukaan. [6, s. 78.]

## 7.3 Häiriösuojaus

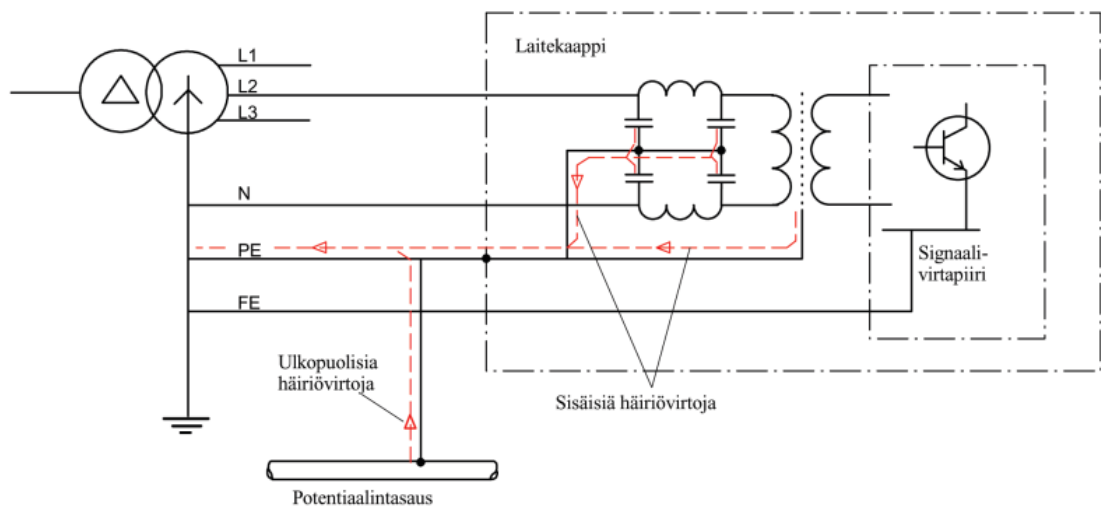
Automaatiojärjestelmien häiriösuojauksen osalta tässä työssä käsitellään ainoastaan toiminnallinen maadoitus (FE) aiheen rajaamisen vuoksi. Tarkempia ohjeita häiriösuojauksen toteuttamisesta esitetään mm. standardin SFS 6000-4-44 luvussa 444 ja ST-käsikirjassa 37 EMC ja rakennusten sähkötekniikka.

### Toiminnallinen maadoitus (FE)

Teollisuuden automaatiojärjestelmissä käytetään häiriöiltä suojaamiseen tarvittaessa toiminnallista maadoitusta (FE). Toiminnallinen maadoitus eroaa suojamaadoituksesta siten, että sitä ei tehdä laitteen suojauksen takia vaan laitteen toiminnan mahdollistamiseksi. Toiminnallisen maadoituksen käyttö perustuu siihen, että sen avulla muodostetaan ilman häiriöitä maan potentiaalissa oleva referenssipinnan, jota tietyt olemassa olevat elektroniset laitteet tai laitteistot tarvitsevat toimintaansa varten. Edellä mainittu referenssipinnan saadaan toteutettua toiminnallisella maadoitusjohtimella (FE), joka on

erillään suojamaadoitusjohtimesta (PE). Aiemmin käytetty termi toiminnallisesta maadoituksesta on häiriötön maadoitus (TE). [6, s. 41, 78; 5, s. 170; 21, s. 52.]

Kuvassa 17 on esitetty toiminnallisen maadoituksen toimintaperiaate. Kuvassa näkyvä signaalivirtapiiri on eristetty muusta laitekaapista ja yhdistetty toiminnallisen maadoitusjohtimen kautta maahan, jolloin kuvassa punaisella näkyvät suojajohtimissa (PE) kulkevat häiriövirrat eivät pääse häiritsemään signaalivirtapiiriä. Suojajohdin on yhdistetty verkkomuuntajan sekä -suodattimen ensiö- ja toisiokäämien välisiin metallisuojausten maadoitusliittimiin sekä laitekaapin runkoon.



Kuva 17. Toiminnallisen maadoituksen (FE) toimintaperiaate [21, s. 53.]

Herkkiä virtapiirejä sisältävien laajojen automaatiojärjestelmien tapauksessa on suositeltavaa toteuttaa toiminnallinen maadoitus. Toiminnallisen maadoitusjärjestelmän toteuttaminen onnistuu parhaiten silloin, kun häiriöherkät elektroniset laitteet signaalivirtapiireineen eristetään verkkosuodattimen maadoituksista ja laitekaapin rungosta. Suomalaisessa teollisuudessa toiminnallista maadoitusta on käytetty automaatiojärjestelmissä erityisesti prosessi- ja puunjalostusteollisuudessa. Uusissa asennuksissa toiminnallista maadoitusta ei kuitenkaan enää käytetä niin usein kuin ennen sitä syystä, että toiminnallisen maadoituksen verkosto muodostuu usein laajaksi pitkien toiminnallisten maadoitusjohtimien takia. Tämä aiheuttaa mahdollisen alttiuden suurtaajuisten häiriöiden esiintymiselle koko toiminnallisen maadoituksen järjestelmässä. [21, s. 53.]

## 7.4 Kaapelit

Automaatiojärjestelmän kaapeloinnin maadoittamisessa voidaan toimia kahdella tavalla riippuen tilanteesta. Ensimmäisessä vaihtoehdossa kaapelien vaippasuojat yhdistetään suojamaahan (PE) ja parisuojat yhdistetään toiminnalliseen maadoitukseen (FE). Toisessa vaihtoehdossa sekä vaippa- että parisuojat yhdistetään toiminnalliseen maadoitukseen. Käytettävän parisuojatun kaapelin vaippa- ja parisuojien eristämiseen tulee käyttää kahta eri väristä muovilettoa. Suositeltava väri vaippasuojan muoviletolle on kirkas ja parisuojan vastaavalle musta vaaleanpunaisin merkinnöin. Kaapeloinnin toteuttamistavasta tulee sopia automaatiojärjestelmän toimittajan sekä ko. järjestelmän tilaajan kanssa. Liitteen 10 kuvissa 1 ja 2 on esitetty esimerkki automaatiojärjestelmän kenttäkaapeloinnin maadoituksesta siinä tapauksessa, kun parikaapelien vaipat on kytketty suojamaadoitukseen (PE). [6, s. 78–79.]

## 8 Maadoitusjärjestelmän dokumentointi

Tässä luvussa ei käsitellä mittauksiin liittyviä dokumentteja aiheen rajauksen takia.

### 8.1 Yleiset vaatimukset

Sähköasennusten dokumentoinnista on säädetty sähköturvallisuuslain 1135/2016 kohdassa 48 § Sähkölaitteiston huolto ja kunnossapito-ohjelma ja valtioneuvoston asetuksen 1434/2016 liitteen kohdassa 21. Julkaisun Tukes-ohje 16/2017 Sähkölaitteistot ja tarkastukset kohdassa 3 Sähkölaitteistojen kunnossapito sekä standardin SFS 6000:2017 kohdissa 132.1, 514.5.1 ja 514.5.2 on annettu tarkempia ohjeita dokumenttien laatimisesta sähköturvallisuuslain ja valtioneuvoston asetuksen vaatimusten pohjalta. [22, s. 4–5.]

## 8.2 Laadittavat piirustukset ja kaaviot sekä muut dokumentit

Maadoitusjärjestelmästä tulee laatia asemapiirustus, jossa on esitetty maadoituselektrodien ja -johtimien sijoitus sekä maadoituselektrodien asennussyvyys, käytetty materiaali ja haaroituspisteet rakennusalueella. Lisäksi laaditaan kaavio, johon on merkitty suoja- maadoituksen (PE), toiminnallisen maadoituksen (FE) ja potentiaalintasauksen kiskot tunnuksineen ja sijoituspaikkoineen. Sähköenergian käyttö- ja jakelujärjestelmistä tulee laatia maadoitusten osalta vähintään maadoitus- ja potentiaalintasausjärjestelmien kaaviot, joista ilmenee ko. järjestelmän toteutustapa sekä käytetyt johdintyypit. Suojattujen kaapeleiden tapauksessa niiden maadoituksen tyyppi tulee merkitä johdotuskaavioihin eli onko maadoitustapa PE vai FE. Luokkaan 2 tai 3 kuuluville sähkölaitteistoille on laadittava laitteiston sähköturvallisuuksi ylläpitävä kunnossapito-ohjelma, jossa on mm. esitetty tarvittavat maadoitusta ja potentiaalintasausausta koskevat kunnossapito-, huolto- ja korjaustyöt. Edellä mainitun kunnossapito-ohjelman laatimisesta huolehtii sähkölaitteiston haltija. [6, s. 79; 11, s. 136; 22, s. 4–7.]

Todellisten suunnittelukohteiden tapauksessa tehdään myös maadoituskiskoista (EB, MEB, FE) kiskokohtaiset liitännäkuvat, joissa näkyy kaikki yksittäiseen kiskoon yhdistyvät johtimet. Johtimien yhteyteen merkitään johtimien tunnuksat, poikkipinnat sekä tyyppi. Lisäksi näissä kuvissa on näytetty kiskon todellinen rakenne mittakaavassa. [9.]

Laajan maadoitusjärjestelmän tapauksessa tulee laatia sen käytön perusteista tarvittavat dokumentit. Näihin perusteisiin sisältyvät tiedot mm. ko. järjestelmään liittyvistä sähköasemista ja jakelumuuntajista sekä niiden välisestä maadoitusten yhdistämisestä. [11, s. 153.]

## 9 Yhteenveto

Insinööriyössä laadittiin Sweco Industry Oy:n sähkö- ja automaatio-osastolle ohje teollisuudessa tarvittavien maadoitusjärjestelmien ja -asennusten suunnittelusta. Ohje käsittelee kattavasti erilaisten maadoitusjärjestelmien ja -asennuksien suunnittelussa huomi- onotettavia asioita sekä käytännön maadoitussuunnittelua.



Näitä aihealueita käsiteltiin niin voimassaolevien standardien, kirjallisuuden, Sweco Industry Oy:n suunnittelukäytäntöjen sekä käytännön maadoitussuunnittelun näkökulmasta. Edellä mainittujen näkökulmien käsittelyssä keskityttiin suomalaiseen näkökulmaan eli tutkittiin pääasiassa suomalaisia SFS- ja PSK-standardeja, suomalaista sähköalan lainsäädäntöä ja kirjallisuutta, ST-kortteja ja -käsikirjoja sekä Sweco Industry Oy:n omaa suunnitteludokumentaatiota.

Työn lopputuloksena saatiin yhtenäinen ja yleisellä tasolla laaja suunnitteluohje teollisuuskohteiden maadoituksista. Suunnitteluohjetta voidaan käyttää erityisesti uusien, vasta työuraansa aloittelevien suunnittelijoiden perehdyttämisessä teollisuuskohteiden maadoitusten suunnittelun periaatteisiin, ja se toimii yleisenä ohjeena myös kokeneemille suunnittelijoille, jotka eivät ole vielä osallistuneet laajasti teollisuuskohteiden maadoitusten suunnitteluun.

Työn tavoitteet täytyivät hyvin. Käsiteltäviä aihealueita saatiin käsiteltyä pääasiallisesti laajasti ja monipuolisesti. Siitä huolimatta alkuperäisestä työsuunnitelmasta jouduttiin jättämään kokonaan pois aiheen rajaamisen vuoksi mm. varavoima- ja UPS-järjestelmien, teollisuuden lämmityskaapeleiden ja räjähdysvaarallisten tilojen maadoitusten käsittely.

Vaikka insinööriyön tuloksena laadittu suunnitteluopas teollisuuskohteiden maadoituksista on kohtuullisen laaja, ei sitä tulisi käyttää yksinään suunnittelun perustana, sillä siihen ei voinut työn rajoitetun laajuuden takia sisällyttää kaikkia yksityiskohtia suunnittelussa tarvittavista vaatimuksista. Työ kuitenkin antaa hyvän kokonaiskuvan maadoituksen suunnittelussa tarvittavista vaatimuksista ja näin ollen perehdyttää yleisellä tasolla lukijansa hyvin aiheeseen.

Itselläni ei ollut ennen tämän työn tekemistä kunnollista kokonaiskuvaa maadoituksen suunnittelun vaatimuksista, sillä koulussa näitä asioita opetettiin hyvin pintapuolisesti todennäköisesti lähiopetustuntien vähyyden takia. Pääsin tutustumaan käytännössä teollisuuden maadoitusten suunnitteluun viime kesänä työharjoitteluni aikana, jolloin tällaisesta laajasta suunnitteluohjeesta olisi ollut huomattavasti hyötyä. Se olisi auttanut hahmottamaan maadoitussuunnittelun kokonaiskuvan helposti, jolloin sen toteuttaminen käytännössä olisi sujunut helpommin jo alusta alkaen.

## Lähteet

- 1 Heiskari, Kreetta. 2018. Yhtiön lyhyt esittelyteksti. Verkkoaineisto. Sweco Group <<https://intranet.swecogroup.com/fi/Inside-Sweco/Tietoa-Swecosta/Business-areas/Sweco-Finland/Sweco-Industry-Oy/Yhtion-lyhyt-esittelyteksti/>>. Luettu 30.10.2019. Vaatii käyttöoikeuden.
- 2 Heiskari, Kreetta. 2019. Sweco Industry Oy. Verkkoaineisto. Sweco Group. <<https://intranet.swecogroup.com/fi/Inside-Sweco/Tietoa-Swecosta/Business-areas/Sweco-Finland/Sweco-Industry-Oy/>>. Luettu 30.10.2019. Vaatii käyttöoikeuden.
- 3 Sweco Industry Oy. 2019. Verkkoaineisto. Suomen Asiakastieto Oy. <<https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/sweco-industry-oy/03509419/taloustiedot>>. Luettu 30.10.2019.
- 4 PSK 1801 Prosessiteollisuuden jakokeskus. 2000. PDF-dokumentti. PSK Standardisointi. <<https://www.psk-standardisointi.fi/Standard/Ryhma18/Psk1801.pdf>>. Haettu 4.11.2019. Vaatii käyttöoikeuden.
- 5 SFS-käsikirja 600-1-1. Pienjännitesähköasennukset. Osa 1-1: Yleisvaatimukset (SFS 6000 osat 1-6). 2017. 1. painos. Helsinki: Suomen Standardisoiimisliitto SFS ry.
- 6 Tiainen, Esa; Nurmi, Tapani; Koivisto, Pekka; Ylinen, Timo & Kauppila, Jenna. 2019. Maadoituskirja. 7., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 7 SFS 6000-1:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 1: Peruseriaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät. 2017. PDF-dokumentti. SFS Online. <<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSSahko/SFS/ID2/6/533944.html.stx>>. Haettu 7.11.2019. Vaatii käyttöoikeuden.
- 8 Tiainen, Esa (toim.). 2017. D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 25. painos. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 9 Arkistoitu maadoitussuunnitteludokumentaatio. 2020. Yrityksen sisäinen dokumentti. Sweco Industry Oy.
- 10 ST 53.21 Rakennusten sähköasennusten maadoitukset ja potentiaalintasaukset. 2018. PDF-dokumentti. Sähköinfo Severi. <<https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.metropolia.fi/item/580?search=53.21>>. Haettu 15.11.2018. Vaatii käyttöoikeuden.
- 11 SFS-käsikirja 601:2018. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. 2018. 3. painos. Helsinki: Suomen Standardisoiimisliitto SFS ry.

- 12 SFS 6001:2018/Korjaus 2:2018. Suurjännitesähköasennukset. 2018. PDF-dokumentti. SFS Online. <<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/720448.html.stx>>. Haettu 17.1.2020. Vaatii käyttöoikeuden.
- 13 SFS-käsikirja 609. Rakennusten ja rakenteiden salamasuojaus. 2009. 1. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- 14 Kallio, Raimo; Mäkinen, Markku J. J. & Tantarimäki, Reijo. 2009. Prosessiteollisuuden sähkö- ja automaatioasennukset. 4. painos. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.
- 15 Cadwelds: what they are, how they work. 2015. Verkkoaineisto. The Nuclear Electrical Engineer. <<http://www.nuclearelectricalengineer.com/cadwelds-work/>>. Luettu 13.11.2019.
- 16 Tuotteet – Cadweld liitostarvikkeet. 2019. Verkkoaineisto. Tampereen Sähköpalvelu Oy. <<https://www.tsp.fi/suomeksi/tuotteet/tuoteryhma/cadweld-liitostarvikkeet/action/list/>>. Luettu 18.11.2019.
- 17 SFS 6000-5-54:2017/Korjaus:2019. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-54: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Maadoittaminen ja suojajohtimet. 2019. PDF-dokumentti. SFS Standardien verkkokauppa. <<https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/753488.html.stx>>. Haettu 13.11.2019.
- 18 SFS-EN 60204-32. Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 32: Vaatimukset nostokoneille. PDF-dokumentti. SFS Online. <<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/113000.html.stx>> Haettu 19.12.2019. Vaatii käyttöoikeuden.
- 19 ST 53.11. Kuluttajamuuntamot. 2018. PDF-dokumentti. Sähköinfo Severi. <<https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.metropolia.fi/item/516?search=53.11>>. Haettu 15.11.2019. Vaatii käyttöoikeuden.
- 20 SFS 6001:2018. Suurjännitesähköasennukset. 2018. PDF-dokumentti. SFS Online. <<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/679252.html.stx>>. Haettu 15.11.2019. Vaatii käyttöoikeuden.
- 21 ST-käsikirja 37 EMC ja rakennusten sähkötekniikka. PDF-dokumentti. Sähköinfo Severi. <<https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.metropolia.fi/item/3174?search=EMC%20ja%20rakennusten%20sahkotekniikka>>. Haettu 16.1.2020. Vaatii käyttöoikeuden.
- 22 ST 13.30. Sähkö- ja tietoteknisten järjestelmien käyttökäytännöt. 2017. PDF-dokumentti. Sähköinfo Severi. <<https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.metropolia.fi/item/3670?search=ST%2013.30>>. Haettu 17.1.2020. Vaatii käyttöoikeuden.

## Liite 1. Suur- ja pienjännitejärjestelmän maadoituselektrodien minimimitat

Taulukko 1. Pienjännitejärjestelmän maadoituselektrodin minimimitat [5, s. 376].

Materiaali	Poikkipinta-ala mm <sup>2</sup>	Halkaisija Ø mm	Minimipaksuus mm <sup>a</sup>	Korroosiosuojaus- kerroksen paksuus µm
Kupari	16		1,6	-
Kuumasinkitty teräs	90	10	3	45
Ruostumaton teräs	90	10	3	-
Betoniin upotettu teräs	90	10	3	- <sup>b</sup>
Kuparivaipalla varus- tettu teräs		15		2000
Sähköisesti kuparilla päällystetty teräs		14 (vaakata- sossa 10)		250 (vaakaelektrodilla 70)

<sup>a</sup> Nauhan tai levyn paksuus tai köyden yksittäisen langan halkaisija Ø.  
<sup>b</sup> Betoniin upotetulla perustusmaadoituselektrodilla ei tarvita korroosiosuojausta.

Taulukko 2. Suurjännitejärjestelmän maadoituselektrodin minimimitat [11, s. 112].

Materiaali	Elektrodin tyyppi	Vähimmäismitta					
		Ydinosa			Pinnoite/vaippa		
		Halkaisija mm	Poikki- pinta mm <sup>2</sup>	Paksuus mm	Yksittäi- nen arvo µm	Keskiarvo µm	
Teräs	Kuumasinkitty	Nauha <sup>b</sup>		90	3	63	70
		Profiili (ml. levy)		90	3	63	70
		Putki	25		2	47	55
		Sauvaelektrodin pyörötanko	16			63	70
		Vaakamaadoitus- elektrodin pyöreä lanka	10				50
	Lyijyvaipalla <sup>a</sup>	Vaakamaadoitus- elektrodin pyöreä lanka	8			1000	
	Päällystetyllä kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	15			2000	
	Elektrolyytti- kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2			90	100
Kupari	Paljas	Nauha		50	2		
		Vaakamaadoitus- elektrodin pyöreä lanka		25 <sup>c</sup>			
		Köysi	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>			
		Putki	20		2		
	Tinattu	Köysi	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>		1	5
	Sinkitty	Nauha		50	2	20	40
	Lyijyvaipalla <sup>a</sup>	Köysi	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>		1000	
		Pyöreä lanka		25 <sup>c</sup>		1000	

<sup>a</sup> Ei sovellu asennettavaksi suoraan betoniin. Lyijyn käyttöä ei suositella ympäristösyistä.

<sup>b</sup> Valssattu tai leikattu nauha pyöristetyin reunoin.

<sup>c</sup> 16 mm<sup>2</sup> poikkipintaa voidaan käyttää erityisolosuhteissa, joissa kokemuksen mukaan korroosion ja mekaanisen vaurioitumisen riski on vähäinen.

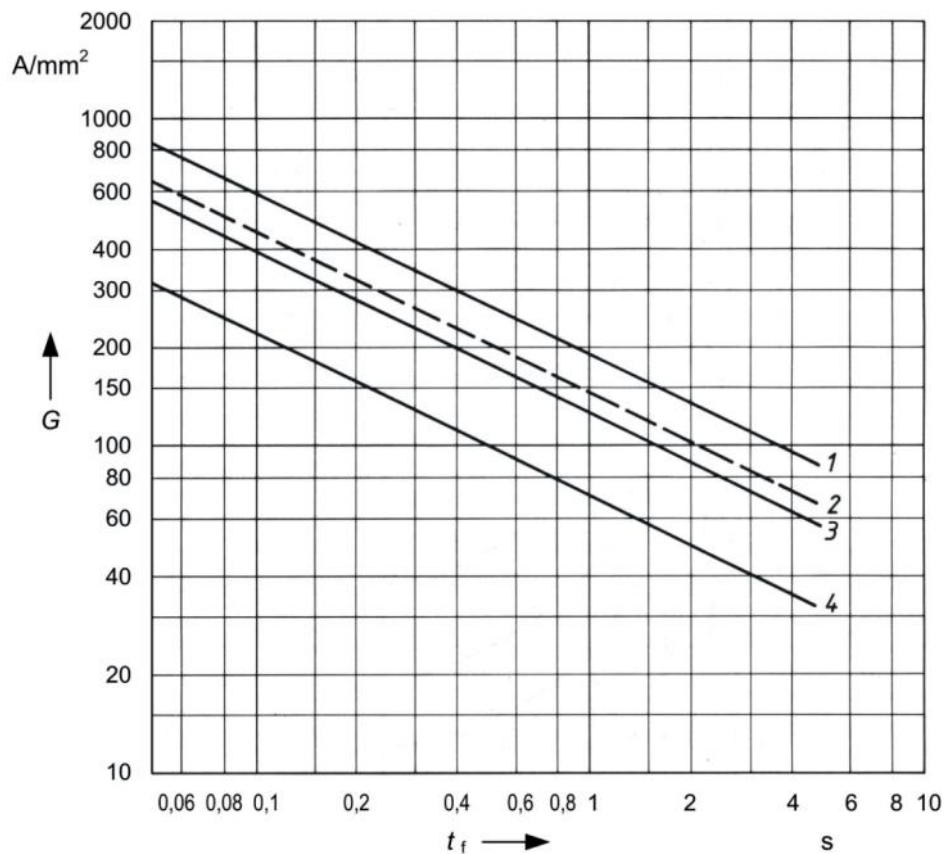
<sup>d</sup> Yksittäiselle langalle.

## Liite 2. Suurjännitejärjestelmän maadoitusjärjestelmien suunnitteluun liittyvät olennaiset virrat

Suurjännitejärjestelmän tyyppi	Termiseen kuormitukseen liittyvä virta <sup>a e</sup>		Maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteisiin liittyvä virta
	Maadoituselektrodi	Maadoitusjohdin	
<b>Maasta erotetut järjestelmät</b>			
	$I''_{kEE}$ <sup>i</sup>	$I''_{kEE}$ <sup>i</sup>	$I_E = r \cdot I_C$ <sup>b</sup>
<b>Sammutetut järjestelmät</b>			
Sisältäen lyhytaikaisen maadoittamisen vianilmaisua varten			
Järjestelmät ilman sammutuskeloja <sup>f</sup>	$I''_{kEE}$ <sup>i</sup>	$I''_{kEE}$ <sup>i</sup>	$I_E = r \cdot I_{RES}$ <sup>b</sup>
Järjestelmät, joissa on sammutuskelat	$I''_{kEE}$ <sup>i</sup>	$I''_{kEE}$ <sup>ci</sup>	$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{R_{vs}}^2}$ <sup>b h</sup>
<b>Pienen impedanssin kautta maadoitetut järjestelmät</b>			
Sisältäen lyhytaikaisen maadoittamisen laukaisua varten <sup>g</sup>			
Järjestelmä, jossa ei ole tähtipisteen maadoitusta	$I''_{k1}$	$I''_{k1}$	$I_E = r \cdot I''_{k1}$
Järjestelmä, jossa on tähtipisteen maadoitus	$I''_{k1}$	$I''_{k1}$	$I_E = r \cdot (I''_{k1} \cdot I_N)$ <sup>d</sup>
<p><sup>a</sup> Jos virralla on useita kulkuteitä, virran jakautuminen voidaan ottaa huomioon.</p> <p><sup>b</sup> Jos maasululle ei ole automaattista poiskytkentää, kaksoismaasulkujen huomioon ottamisen tarve riippuu käyttökokemuksista.</p> <p><sup>c</sup> Petersenin kelan eli maasulkuvirran sammutuskelan maadoitusjohdin pitää mitoittaa kelan maksimivirran mukaan.</p> <p><sup>d</sup> On tarkistettava, voiko aseman ulkopuolinen vika olla määräävä.</p> <p><sup>e</sup> <a href="#">Liitteen C</a> mukaiset vähimmäispoikkipinnat pitää ottaa huomioon.</p> <p><sup>f</sup> Jos järjestelmä ei ole riittävän hyvin kompensoitu, yleistä arvoa 10 % arvosta <math>I_C</math> ei voi soveltaa. Jäännösvirran reaktiivinen/kapasitiivinen komponentti on lisäksi otettava huomioon.</p> <p><sup>g</sup> Sammutetuissa järjestelmissä oletetaan, että lyhytaikainen maadoittaminen (vastuksen kytkeminen sammutuskelan rinnalle) alkaa automaattisesti 5 s kuluttua maasulun havaitsemisesta.</p> <p><sup>h</sup> Kun vika sattuu sähköasemalla, pitää ottaa huomioon kapasitiivinen vikavirta <math>I_C</math>. Jos sähköaseman ulkopuolisessa verkossa on muita sammutuskeloja, ne pitää ottaa huomioon.</p> <p><sup>i</sup> <b>(E)</b> Maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa, joissa maasulku kytketään pois alle 1 sekunnissa, suuretta <math>I_C</math> voidaan käyttää maadoituselektrodien ja -johtimien termisen kuormitettavuuden mitoituksessa määräävänä tekijänä. Tällöin maasulun poiskytkentäaikaan käytetään ekvivalenttista poiskytkentäaikaa. <b>(E)</b></p> <p><b>Selitykset:</b></p> <p><math>I_C</math> Laskettu tai mitattu kapasitiivinen maasulkuvirta</p> <p><math>I_{RES}</math> Maasulun jäännösvirta (katso <a href="#">kuva 3b</a>). Jos tarkkaa arvoa ei ole käytettävissä, arvoksi voidaan olettaa 10 % arvosta <math>I_C</math>.</p> <p><math>I_L</math> Kyseessä olevan sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa</p> <p><math>I''_{kEE}</math> Standardin SFS-EN 60909 mukaisesti laskettu kaksoismaasulkuvirta. Virran <math>I''_{kEE}</math> maksimiarvon voidaan olettaa olevan 85 % symmetrisen alkuoikosulkuvirran arvosta</p> <p><math>I''_{k1}</math> Standardin SFS-EN 60909 mukaan laskettu yksivaiheisen symmetrisen maasulkuvirran alkuarvo</p> <p><math>I_E</math> Maavirta (katso <a href="#">kuva 2</a>)</p> <p><math>I_N</math> Muuntajan tähtipistevirta (katso <a href="#">kuva 2</a>)</p> <p><math>r</math> Reduktiokerroin (katso <a href="#">liite I</a>)</p> <p>Jos asemalta lähtevillä ilmajohtoilla ja kaapeleilla on erilaiset reduktiokerroimet, tulee tarvittava rezultoiva virta määrittää <a href="#">liitteen L</a> mukaisesti.</p>			

Kuva 1. Suurjännitejärjestelmän maadoitusjärjestelmien suunnitteluun liittyvät olennaiset virrat [20, s. 90].

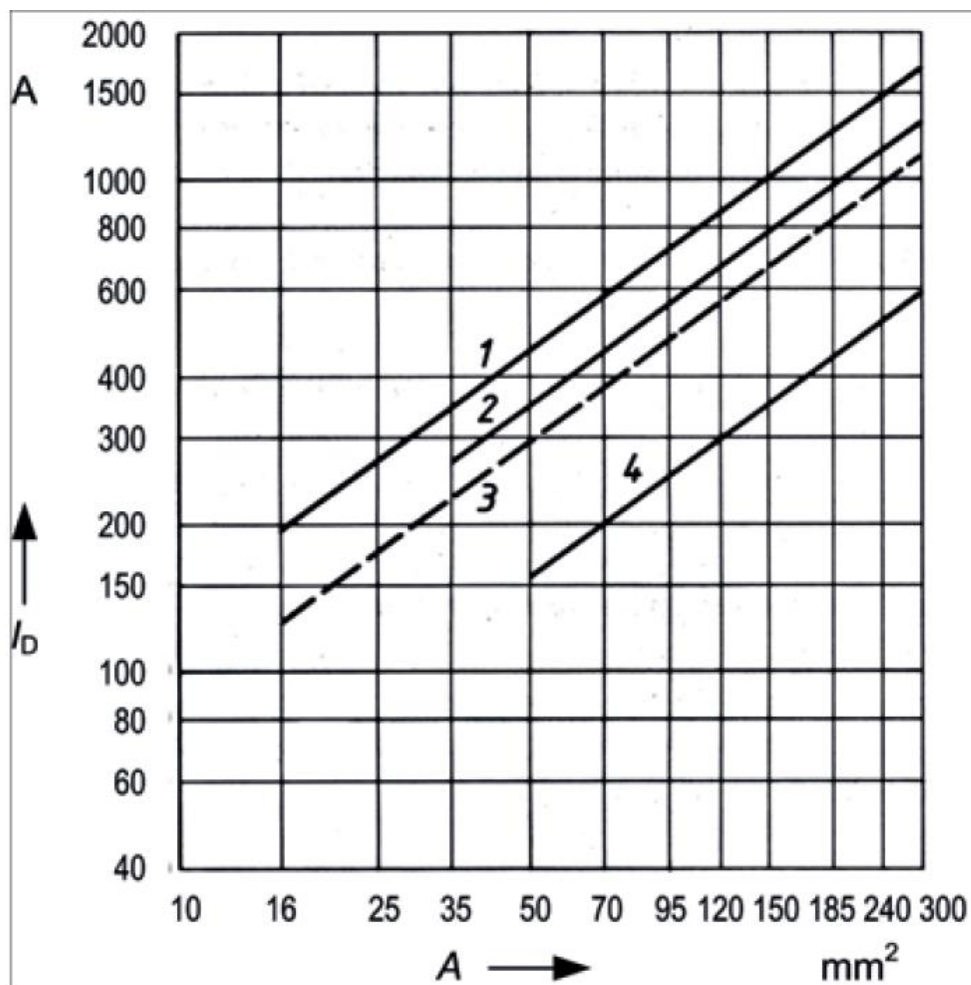
### Liite 3. Maadoitusjohdinten ja -elektrodien poikkipinnan määrittämiseen tarvittavat virrat



Viivat 1, 3 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, suora 2 pätee loppulämpötilalle 150 °C.

- 1 Paljas tai sinkkipäällysteinen kupari
- 2 Tinattu tai lyijyvaippainen kupari
- 3 Alumiini (vain maadoitusjohtimena)
- 4 Sinkitty teräs

Kuva 1. Maadoitusjohtimien ja maadoituselektrodien sallittu oikosulkuvirran tiheys  $G$  vikavirran kestoajan  $t_f$  funktiona [20, s. 110].



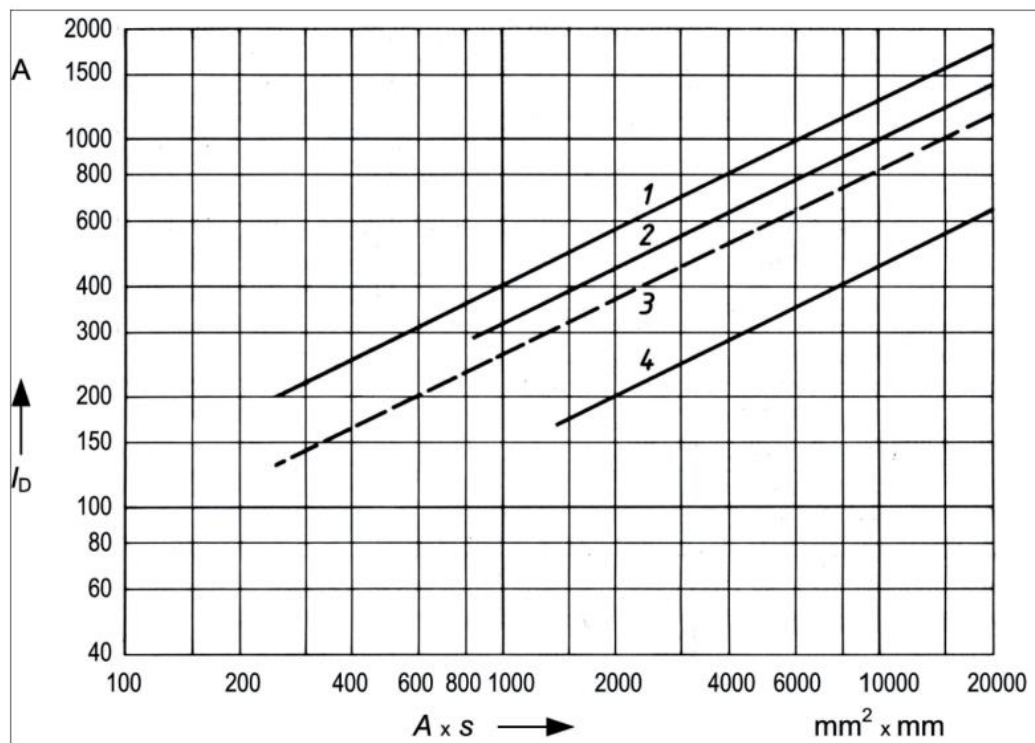
a) Poikkipinnaltaan ( $A$ ) pyöreän maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta  $I_D$

Viivat 1, 2 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, ja suora 3 pätee loppulämpötilalle 150 °C.  
[Taulukossa D.2](#) on esitetty muunnoskertoimet toisille loppulämpötiloille

- 1 Paljas tai sinkkipäällysteinen kupari
- 2 Alumiini
- 3 Tinattu tai lyijyvaippainen kupari
- 4 Sinkitty teräs

Kuva 2. Poikkipinnaltaan pyöreän maadoitusjohtimen tai -elektrodin sallittu jatkuva virta  $I_D$  [20, s. 111].





**b) Poikkipinnaltaan suorakulmaisen maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta  $I_D$  poikkipinnan  $A$  ja profiilin ympärysmittan  $s$  tulon ( $A \times s$ ) funktiona**

Viivat 1, 2 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, suora 3 pätee loppulämpötilalle 150 °C. [Taulukossa D.2](#) on esitetty muunnoskertoimet muille loppulämpötiloille

- 1 Paljas tai sinkkipäällysteinen kupari
- 2 Alumiini
- 3 Tinattu tai lyijyvaippainen kupari
- 4 Sinkitty teräs

Kuva 3. Poikkipinnaltaan suorakulmaisen maadoitusjohtimen tai -elektroodin sallittu jatkuva virta  $I_D$  [20, s. 112].

**Liite 4. Maadoituselektrodin maadoitusresistanssin laskenta**

Taulukko 1. Maaperän, betonin ja veden resistiivisyydet [11, s. 151].

Aine	Keskimäärin $\Omega\text{m}$	Tavallisimmat vaihteluvälit $\Omega\text{m}$
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

Taulukko 2. Maadoituselektrodien maadoitusresistanssin laskentakaavoja [11, s. 152].

Elektrodin laatu	Kaava	Huomautukset
Pallo pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	
Levy pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2D}$	$s \ll D$
Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d} \times \frac{2h + L}{4h + L}$	$d \ll L$
Vaakasuorajohdin pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Vaakasuorajohdin upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}$	$d \ll 4h$
Ruudukko	$R_E = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L}$	
<p><math>L</math> = Elektrodin pituus (m)  <math>D</math> = Pallon, levyn tai ruudukon halkaisija (m)  <math>d</math> = Johtimen halkaisija tai puolet nauhan leveydestä (m)  <math>s</math> = Levyn paksuus (m)  <math>\rho_E</math> = Maaperän resistiivisyys (<math>\Omega\text{m}</math>)  <math>h</math> = Elektrodin upotussyvyys (m)</p>		

## Liite 5. Salamasuojauksen maadoituselektrodin materiaalit ja minimimitat

Taulukko 1. Salamasuojauksen maadoituselektrodin materiaalit ja minimimitat [13, s. 97].

Materiaali	Muoto	Minimimitat			Huomautukset
		Tanko	Johdin	Levy	
Kupari	Köysi <sup>b x</sup>		50 mm <sup>2</sup>		Säikeen minimihalkaisija 1,7 mm
	Pyörötanko <sup>b x</sup>		50 mm <sup>2</sup>		8 mm <sup>φ</sup>
	Nauha <sup>b x</sup>		50 mm <sup>2</sup>		Minimipaksuus 2 mm
	Pyörötanko	15 mm <sup>φ</sup>			
	Putki	20 mm <sup>φ</sup>			Minimiseinämä 2 mm
	Levy			500 x 500 mm <sup>2</sup>	Minimipaksuus 2 mm
	Levyverkko <sup>h</sup>			600 x 600 mm <sup>2</sup>	25 x 2 mm nauha ja 8 mm <sup>φ</sup> pyörölanka
Teräs	Sinkitty pyörötanko <sup>c</sup>	16 mm <sup>φ</sup>	10 mm <sup>φ</sup>		
	Sinkitty putki <sup>c</sup>	25 mm <sup>φ</sup>			Minimiseinämä 2 mm
	Sinkitty nauha <sup>c</sup>		90 mm <sup>2</sup>		Minimipaksuus 3 mm
	Sinkitty levy <sup>c</sup>			500 x 500 mm <sup>2</sup>	Minimipaksuus 3 mm
	Sinkitty levyverkko <sup>c h</sup>			600 x 600 mm <sup>2</sup>	30 x 3 mm nauha ja 10 mm <sup>φ</sup> pyörölanka
	Kuparipinnoitettu pyörötanko <sup>e</sup>	14 mm <sup>φ</sup>			99,9 % kuparin minimipaksuus 250 μm
	Paljas pyörötanko <sup>f</sup>		10 mm <sup>φ</sup>		
	Paljas tai sinkitty nauha <sup>f g</sup>		75 mm <sup>2</sup>		Minimipaksuus 3 mm
	Sinkitty köysi <sup>f g</sup>		70 mm <sup>2</sup>		Säikeen minimihalkaisija 1,7 mm
	Sinkitty ristikkoprofiili <sup>c</sup>	50 x 50 x 3 mm			
Ruostumaton teräs	Pyörötanko	16 mm <sup>φ</sup>	10 mm <sup>φ</sup>		
	Nauha		100 mm <sup>2</sup>		Minimipaksuus 2mm

<sup>a</sup> Sallittu toleranssi 3 %

<sup>b</sup> Voi olla myös tinattu

<sup>c</sup> Pinnoitteen tulee olla tasainen, jatkuva ja tahraton vähintään 350 g/m<sup>2</sup> pyörötangolla ja 500 g/m<sup>2</sup> nauhallalla. Mittaus noin 200 mm pituiselta näytteeltä joko EN ISO 1460 tai EN ISO 1461:1999 mukaan.

<sup>d</sup> Kierteet on koneistettava ennen sinkitystä

<sup>e</sup> Kupari on sitoutettava teräkseen. Mittaus elektronisella pinnoitteen paksuusmittarilla.

<sup>f</sup> Upotettava betoniin vähintään 20 mm syvyyteen

<sup>g</sup> Yhdistettävä maakosketuksessa oleviin betoniteräksiin vähintään 5 m välein.

<sup>x</sup> Kokemusten mukaan 25 mm<sup>2</sup> on katsottu riittäväksi Suomessa

## Liite 6. Kertoimen $k$ arvot erilaisille suojajohtimille

Taulukko 1. Kertoimen  $k$  laskemiseen tarvittavien parametrien arvot eri johdinmateriaaleilla [5, s. 386].

Materiaali	$\beta^a$ °C	$Q_c^a$ J/°C mm <sup>3</sup>	$\rho_{20}^a$ Ωmm	$\sqrt{\frac{Q_c(\beta + 20\text{ °C})}{\rho_{20} \frac{A(\sqrt{s})}{\text{mm}^2}}}$
Kupari	234,5	$3,45 \times 10^{-3}$	$17,241 \times 10^{-6}$	226
Alumiini	228	$2,5 \times 10^{-3}$	$28,264 \times 10^{-6}$	148
Teräs	202	$3,8 \times 10^{-3}$	$138 \times 10^{-6}$	78

<sup>a</sup> Arvot otettu IEC 60949:stä.

Taulukko 2. Kertoimen  $k$  arvot eristetyille erillisille suojajohtimille, jotka eivät sisälly kaapeliin eivätkä ole niputettu yhteen muiden kaapelien kanssa [5, s. 386].

Johtimen eriste	Lämpötila °C <sup>b</sup>		Johtimen materiaali		
	Alku	Loppu	Kupari	Alumiini	Teräs
			Arvot kertoimelle $k^c$		
70 °C PVC	30	160/140 <sup>a</sup>	143/133 <sup>a</sup>	95/88 <sup>a</sup>	52/49 <sup>a</sup>
90 °C PVC	30	160/140 <sup>a</sup>	143/133 <sup>a</sup>	95/88 <sup>a</sup>	52/49 <sup>a</sup>
90 °C PEX, EPR	30	250	176	116	64
60 °C EPR-kumi	30	200	159	105	58
85 °C EPR-kumi	30	220	166	110	60
185 °C Silikonikumi	30	350	201	133	73

<sup>a</sup> Alemmat arvot ovat poikki-pinnaltaan yli 300 mm<sup>2</sup> PVC-eristeisille johtimille.  
<sup>b</sup> Lämpötilarajat erityyppisille eristeille on annettu IEC 60724:ssa.  
<sup>c</sup> Kertoimen  $k$  laskentamenetelmä on annettu kohdassa 4.1 esitettyssä kaavassa 4.

Taulukko 3. Kertoimen  $k$  arvot eristämättömille suojajohtimille, jotka koskettavat kaapelivaip-  
poja, mutta eivät ole niputettu yhteen muiden kaapelien kanssa [5, s. 387].

Kaapelin päällyste	Lämpötila °C <sup>a</sup>		Johtimen materiaali		
			Kupari	Alumiini	Teräs
	Alku	Loppu	Arvot kertoimelle $k^c$		
PVC	30	200	159	105	58
Polyeteeni	30	150	138	91	50
CSP <sup>b</sup>	30	220	166	110	60

<sup>a</sup> Lämpötilarajat erityyppisille eristeille on annettu IEC 60724:ssä.  
<sup>b</sup> CSP = polykloorisulfonieteeni  
<sup>c</sup> Kertoimen  $k$  laskentamenetelmä on annettu kohdassa 4.1 esitetystä kaa-  
vassa 4.

Taulukko 4. Kertoimen  $k$  arvot eristämättömille suojajohtimille, jotka ovat kaapelien johtimia tai  
niputettu yhteen muiden kaapelien tai johtimien kanssa [5, s. 387].

Johtimen eriste	Lämpötila °C <sup>b</sup>		Johtimen materiaali		
			Kupari	Alumiini	Teräs
	Alku	Loppu	Arvot kertoimelle $k^c$		
70 °C PVC	70	160/140 <sup>a</sup>	115/103 <sup>a</sup>	76/68 <sup>a</sup>	42/37 <sup>a</sup>
90 °C PVC	90	160/140 <sup>a</sup>	100/86 <sup>a</sup>	66/57 <sup>a</sup>	36/31 <sup>a</sup>
90 °C PEX, EPR	90	250	143	94	52
60 °C Kumi	60	200	141	93	51
85 °C Kumi	85	220	134	89	48
185 °C Silikonikumi	180	350	132	87	47

<sup>a</sup> Alemmat arvot ovat poikkipinnaltaan yli 300 mm<sup>2</sup> PVC-eristeisille johtimille.  
<sup>b</sup> Lämpötilarajat erityyppisille eristeille on annettu IEC 60724:ssä.  
<sup>c</sup> Kertoimen  $k$  laskentamenetelmä on annettu kohdassa 4.1 esitetystä kaa-  
vassa 4.

Taulukko 5. Kertoimen  $k$  arvot, kun suojajohtimena toimii kaapelin metallinen rakennekerros, kuten armeeraus, metallivaippa, konsentrinen johdin jne. [5, s. 387].

Johtimen eriste	Lämpötila °C <sup>a</sup>		Johtimen materiaali		
	Alku	Loppu	Kupari	Alumiini	Teräs
			Arvot kertoimelle $k^c$		
70 °C PVC	60	200	141	93	51
90 °C PVC	80	200	128	85	46
90 °C PEX, EPR	80	200	128	85	46
60 °C Kumi	55	200	144	95	52
85 °C Kumi	75	220	140	93	51
PVC:llä pinnoitettu mineraali <sup>b</sup>	70	200	135	-	-
Paljas mineraali	105	250	135	-	-

<sup>a</sup> Lämpötilarajat erityyppisille eristeille on annettu IEC 60724:ssa.  
<sup>b</sup> Tätä arvoa käytetään myös paljaille johtimille, jos ne ovat kosketeltavissa tai koskettavat palavia materiaaleja.  
<sup>c</sup> Kertoimen  $k$  laskentamenetelmä on annettu kohdassa 4.1 esitettyssä kaavassa 4.

Taulukko 6. Kertoimen  $k$  arvot eristämättömille johtimille, kun johtimen kuumeneminen ei voi vahingoittaa lähiympäristön materiaaleja [5, s. 388].

Asennusolosuhteet	Alkulämpötila °C	Johtimen materiaali					
		Kupari		Alumiini		Teräs	
		$k$ arvo	Maksimi- lämpötila °C	$k$ arvo	Maksimi- lämpötila °C	$k$ arvo	Maksimi- lämpötila °C
Näkyvässä ja sähkötilassa	30	228	500	125	300	82	500
Normaalit olosuhteet	30	159	200	105	200	58	200
Palovaara	30	138	150	91	150	50	150



Taulukko 7. Kertoimen *k* arvot äärijohtimille [5, s. 121].

Ominaisuus/olosuhde	Johtimen eristys							
	PVC		PVC 90 °C		EPR, PEX	Kumi 60 °C	Mineraali	
							PVC Päällystetty	Paljas Päällystämätön
Johtimen poikkipinta-ala mm <sup>2</sup>	≤ 300	> 300	≤ 300	> 300				
Alkulämpötila °C	70		90		90	60	70	105
Loppulämpötila °C	160	140	160	140	250	200	160	250
Johtimen materiaali:								
Kupari	115	103	100	86	143	141	115	135 - 115 <sup>a</sup>
Alumiini	76	68	66	57	94	93	-	-
Kuparijohtimien tinajuotetut liitokset	115	-	-	-	-	-	-	-
<sup>a</sup> Tätä arvoa pitää käyttää kosketeltavissa oleville paljaille johtimille. HUOM. 1 Muut kertoimen <i>k</i> arvot ovat harkittavana: <ul style="list-style-type: none"> <li>- pienille johtimille (erityisesti alle 10 mm<sup>2</sup> poikkipinnoille)</li> <li>- muun tyyppisille johtimien liitoksille</li> <li>- paljaille johtimille</li> </ul> HUOM. 2 Oikosulkusuojan mitoitusvirta voi olla suurempi kuin kaapelin kuormitettavuus HUOM. 3 Ylläolevat arvot perustuvat julkaisuun IEC 60724. HUOM. 4 Kertoimen <i>k</i> laskemiseksi katso SFS 6000-5-54 liite 54A.								

## Liite 7. Erityistoimenpiteiden M kuvaus

Taulukko 1. Erityistoimenpiteiden M käyttö sallittujen kosketusjännitteiden  $U_{Tp}$  takaamiseksi [11, s. 117; 12].

Vian kestoaika $t_f$	Maadoitusjännite $U_E$	Asennuksia ympäröivät aidat ja ulkoseinät	Asennustyyppi	
			Sisäasennus	Ulkoasennus
$t_f > 5$ s	$U_E \leq 4 \times U_{Tp}$	M 1 tai M 2	M 3	M 4.1 tai M 4.2
	$U_E > 4 \times U_{Tp}$	Osoitettava, että $U_T \leq U_{Tp}$	M 3	M 4.2
$t_f \leq 5$ s	$U_E \leq 4 \times U_{Tp}$	M 1 tai M 2	M 3	M 4.2
	$U_E > 4 \times U_{Tp}$	Osoitettava, että $U_T \leq U_{Tp}$		

Erityistoimenpiteiden M kuvaukset [11, s. 117–118]:

- M 1 Erityistoimenpiteet sisäasennuksia sisältävien rakennusten ulkoseinille ja niitä ympäröiville aidoille. Erityistoimenpiteitä M 1.1 – M 1.3 voidaan käyttää ulkopuolisilta kosketusjännitteiltä suojautumiseen.
- M 1.1 Ulkoseinissä käytetään johtamatonta materiaalia, (esim. kiviainesta tai puuta) ja vältetään ulkopuolelta kosketeltavissa olevia maadoitettuja metalliosia.
- M 1.2 Toteutetaan potentiaalinhjaus maadoitusjärjestelmään yhdistetyllä vaakamaadoituselektrodilla, joka asennetaan noin 1 m etäisyydelle ulkoseinän ulkopuolelle enintään 0,5 m syvyyteen.
- M 1.3 Käyttöpaikka eristetään. Eristävien osien tulee olla mitoiltaan riittäviä, jotta eristyksen ulkopuolelta on mahdotonta koskettaa käsin maadoitettuja johtavia osia. Jos koskettaminen on mahdollista vain sivuttaissuunnassa, eristävän osan leveydeksi riittää 1,25 m.
- Käyttöpaikan eristäminen on riittävä toimenpide seuraavissa tapauksissa:
- eristyksen muodostaa vähintään 100 mm paksu kivimurskakerros
  - eristyksen muodostaa asfalttikerros, jolla on sopiva maapohja (esim. sora)
  - eristyksen muodostaa eristematto, jonka pinta-ala on vähintään 1 000 mm × 1 000 mm ja jonka paksuus on vähintään 2,5 mm tai jokin muu menetelmä, joka takaa vastaavan eristyksen

- M 2 Erityistoimenpiteet ulkoasennuksia ympäröiville aidoille
- Ulkoisilta kosketusjännitteiltä suojautumiseen voidaan soveltaa erityistoimenpiteitä M 2.1 – M 2.3. Porttien osalta voidaan käyttää myös erityistoimenpidettä M 2.4.
- M 2.1 Käytetään johtamattomasta materiaalista tai muovipäällysteisestä metallilankaverkosta valmistettuja aitoja (joissa voi olla myös paljaita johtavia lamelleja).
- M 2.2 Käytettäessä johtavasta materiaalista tehtyä aitaa, toteutetaan potentiaalinhajaus aitaan yhdistetyllä vaakamaadoituselektrodilla, joka on noin 1 m etäisyydellä aidan ulkopuolella enintään 0,5 m syvyydellä. Aidan yhdistäminen maadoitusjärjestelmään on valinasta (katso kuitenkin erityistoimenpide M 2.4).
- M 2.3 Käyttöpaikka eristetään erityistoimenpiteen M 1.3 mukaisesti ja maadoitetaan aita joko liitteen G mukaisesti tai yhdistämällä se maadoitusjärjestelmään.
- M 2.4 Jos ympäröivien aitojen portit on yhdistetty maadoitusjärjestelmään suoraan tai henkilökunnan kulunvalvontajärjestelmien tms. suojaohjelmien tai kaapelien metallivaippojen välityksellä, potentiaalinhajaus tai käyttöpaikan eristys porttien avausalueella on toteutettava erityistoimenpiteen M 1.3 mukaisesti.
- Jos erillisesti maadoitetun johtavan aidan portit yhdistetään päämaadoitusjärjestelmään, portit on eristettävä aidan johtavista osista siten, että muodostuu vähintään 2,5 metrin sähköinen erotus. Tämä voidaan toteuttaa käyttämällä johtamattomasta materiaalista olevaa aidan osaa tai johtavaa aitaa, jonka päissä on eristävät kiinnikkeet. On huolehdittava siitä, että sähköinen erotus säilyy porttien ollessa täysin auki.
- M 3 Erityistoimenpiteet sisäasennuksissa
- Sisäasennuksissa voidaan käyttää erityistoimenpiteitä M 3.1 – M 3.3.
- M 3.1 Toteutetaan potentiaalinhajaus rakennuksen perustusten sisällä olevilla ruudukon muotoisilla elektrodeilla (esim. käytetään elektrodeja, joiden poikkipinta on vähintään 50 mm<sup>2</sup> ja ruudukon leveys enintään 10 m tai rakenneteräsverkkoja), jotka yhdistetään maadoitusjärjestelmään vähintään kahdesta eri kohdasta.
- Terästen virranjohtokyky on laskennallisesti tarkistettava, jos betoniteräksiä käytetään tarkoituksellisesti vikavirran kulkutienä.

Jos käytetään rakenneteräsverkkoja, vierekkäiset verkot on yhdistettävä toisiinsa ainakin yhdestä pisteestä ja kaikki verkot yhdessä on yhdistettävä maadoitusjärjestelmään vähintään kahdesta pisteestä.

Olemassa olevilla rakennuksilla voidaan käyttää ulkoseinien lähelle maahan kaivettua vaakamaadoituselektrodiä, joka yhdistetään maadoitusjärjestelmään.

M 3.2 Käytetään metallisia rakenneosia, esim. metalliruudukkoa tai metallilevyä, joka yhdistetään käyttöpaikalta kosketeltavissa oleviin maadoitettaviin metalliosiin.

M 3.3 Käyttöpaikka eristetään maadoitusjännitteeltä erityistoimenpiteen M1.3 mukaisesti. Potentiaalın tasaamiseksi kaikki käyttöpaikalta samanaikaisesti kosketeltavissa olevat maadoitettavat metalliosat yhdistetään toisiinsa.

M 4 Erityistoimenpiteet ulkoasennuksissa

M 4.1 Käyttöpaikoilla:

Toteutetaan potentiaalınohjaus vaakamaadoituselektrodilla, joka asennetaan noin 1 m etäisyydelle käytettävistä laitteista noin 0,2 m syvyyteen. Tämä vaakamaadoituselektrodi yhdistetään kaikkiin käyttöpaikalta kosketeltavissa oleviin maadoitettaviin metalliosiin.

tai

Käyttöpaikoilla käytetään metallista rakenneosaa (esim. hoitotaso, metalliritilä tai metallilevy), joka yhdistetään käyttöpaikalta kosketeltavissa oleviin maadoitettaviin metalliosiin.

tai

Paikka eristetään erityistoimenpiteen M 1.3 mukaisesti. Samanaikaisesti käyttöpaikalta kosketeltavissa olevat metalliosat tulee yhdistää toisiinsa ja maadoittaa potentiaalın tasaamiseksi.

M 4.2 Rakennetaan asennusta ympäröivä vaakamaadoituselektrodi maahan suljetun renkaan muotoon. Renkaan sisäpuolelle asennetaan maadoitusruudukko, jonka yksittäisen ruudun koko on enintään 10 m × 10 m. Renkaan ulkopuolella sijaitsevien asennusten yksittäisillä osilla, jotka on yhdistetty maadoitusjärjestelmään (esim. valaisinmastot, jotka yhdistetään suojajohtimilla maadoitusjärjestelmään) on käytettävä noin 1 m etäisyydellä ja noin 0,2 m syvyydellä olevaa potentiaalınohjauselektrodiä.

**Liite 8. Kosketusjännite ja kehon kautta kulkeva virta**Taulukko 1. Sallittu kosketusjännite  $U_{Tp}$  vian kestoajan  $t$  funktiona [11, s. 108].

Vian kesto aika $t$ s	Sallittu kosketusjännite $U_{Tp}$ V
0,05	716
0,10	654
0,20	537
0,50	220
1,00	117
2,00	96
5,00	86
10,00	85

Taulukko 2. Sallittu kehon kautta kulkeva virta  $I_B$  vian kestoajan  $t$  funktiona [11, s. 107]

Vian kesto aika $t$ s	Kehon kautta kulkeva virta $I_B$ mA
0,05	900
0,10	750
0,20	600
0,50	200
1,00	80
2,00	60
5,00	51
10,00	50

Taulukko 3. Ihmiskehon kokonaisimpedanssi  $Z_T$  kosketusjännitteen  $U_T$  funktiona, kun virtatie kulkee kädestä käteen [11, s. 108].

Kosketusjännite $U_T$ V	Ihmiskehon kokonaisimpedanssi $Z_T$ $\Omega$
25	3250
50	2500
75	2000
100	1725
125	1550
150	1400
175	1325
200	1275
225	1225
400	950
500	850
700	775
1000	775

Taulukkoa 3 käytettäessä tulee ottaa huomioon, että annetut ihmiskehon kokonaisimpedanssien arvot on esitetty taulukossa oletuksella, että virtatie kulkee kädestä käteen. Mikäli halutaan saada vastaavat arvot virtatien ollessa kädestä jalkaan, tulee käyttää korjauskerrointa 0,75. [11, s. 108.]







