
Test Report No. 2014hv14

1(38)

Requested by: Energiateollisuus ry
Fredrikinkatu 51-53 B,
PL 100, FI 00100 Helsinki

Order:

Test specimen: Low voltage network touch voltages caused by medium voltage network earth faults

Test:

Standards: SFS 6001
Testing date: 2014
SUMMARY

The test results relate only to the items tested.

31.8.2014

AALTO UNIVERSITY SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING
Department of Electrical Engineering and Automation

Eero Saarijärvi
Senior Researcher, PhD

Paavo Tammi
Senior Researcher, MSc.

Matti Lehtonen
Professor, PhD

Sisällysluettelo

Symbolit ja lyhenteet	3
1 Johdanto.....	4
1.1 Projektin tausta.....	4
1.2 Tavoite ja saavutettavat hyödyt.....	4
1.3 Osallistujat	4
2 Maasulku ja kohonnut maapotentiaali.....	5
3 Virrantiheys sydämen alueella ja kosketusjännite	8
4 Kosketusjännitemittaukset.....	10
4.1 Mittausjärjestely	10
4.2 Mittausten dokumentointi	14
5 Mittaustulosten käsittely.....	16
5.1 Kertoimen k määrittely	16
5.1.1 Siirtyvä tyhjäkäyvä jännite.....	18
5.1.2 Maasulku vikaresistanssin kautta.....	18
5.1.3 Kontakti maahan.....	18
5.1.4 Muut lisäresistanssit.....	18
6 Mittaustuloksia.....	19
6.1 Esimerkki 1: Kestilä a2.....	21
6.2 Esimerkki 2: Sotkamo a1	22
6.3 Esimerkki 3: Hannusranta a1	23
7 Henkilöriskin arviointi	24
7.1 Vaaraa aiheuttavat maasulkuutilanteet	24
7.2 Altistus: märkätilat	24
7.3 Altistus: pihamaat.....	25
7.3.1 Pylväsmuuntamoviat.....	26
7.3.2 Kaapeliviat	27
7.3.3 Maaperä.....	28
8 Kuolemaan johtaneet pienjännitesähkötapaturmat 1980 - 2013	29
9 Laaja maadoitus	31
9.1 Ketjumaiset maadoitukset	31
9.2 Potentiaalın jakautuminen maassa.....	32
9.2.1 Kyyjärven taajama	34
9.2.2 Haapajärven taajama.....	35
9.2.3 Konttimäki.....	36
10 Johtopäätökset.....	37
11 Lähteet	38

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

A	pinta-ala
b	pyöreän levyelektrodin säde
D	halkaisija (palloelektrodin)
I	virta
I_m	maasulkuvirta
I_t	kosketusvirta (kehon läpi)
I_{tp}	sallittu kosketusvirta (kehon läpi)
k	suhdeluku maadoitusjännitteelle ja kosketusjännitteelle
k_1	kerroin (siirtyvä osa)
k_2	kerroin (jakosuhte jännitteelle)
$N_{as_per_mp}$	keskimääräinen henkilölukumäärä muuntopiirissä
$N_{maaviat}$	yksittäiseen muuntamoon kohdistuva tapahtumien lukumäärä
$N_{4U_{tp_mmo}}$	$4U_{tp}$ muuntamoiden lukumäärä koko maassa
r	säde (palloelektrodin)
R_{body}	kehon resistanssi
R_m	maadoitusresistanssi
$R_{kontakti}$	maakontaktin resistanssi
$R_{lisä}$	lisäresistanssit
$R_{1\ jalka}$	yhden jalan kontaktiresistanssi maahan
$R_{2\ jalkaa}$	kahden jalan kontaktiresistanssi maahan
U_m	maadoitusjännite
U_r	kohonnut maapotentiaali suhteessa kaukaiseen maahan
U_t	kuormitettu kosketusjännite (altistus)
U_{tk}	tyhjäkäyvä kosketusjännite
U_{tp}	suurin sallittu kosketusjännite
x	etäisyys, matka
λ_{EF}	maasulkujen lukumäärä vuodessa muuntamoia kohden
ρ	resistiivisyys
$\mu_{>U_{tp}}$	todennäköisyys, että jännite ylittää sallitun rajan
$\mu_{R_{lisä}}$	todennäköisyys, että riittävä lisäresistanssi on mukana
$\mu_{kontakti}$	todennäköisyys, että kontakti maadoitettuihin metallisiin osiin

Lyhenteet

KJ	keskijännite
PJ	pienjännite
PJK	pikajälleenkytkentä
p.u.	per unit
SKV	sydänkammiovärinä

1 Johdanto

1.1 Projektin tausta

Hankkeen taustalla on SFS 6001-standardin uusiminen. Standardin uusimisen yhteydessä eräät sähköalan toimijat tekivät selvityksen, jossa kyseenalaistetaan kansallisesti nykyisin käytetyt $4U_{tp}$ ja $5U_{tp}$ maadoitusjännitteet silloin, kun keski- ja pienjänniteverkon maadoitukset on yhdistetty toisiinsa. Sen seurauksena yleiseksi vaatimukseksi jäisi $2U_{tp}$. Asiasta on keskusteltu standardia valmistelevalle Seskon SK99-komiteassa ja esitettyjen turvallisuusriskien todellisuus ja todennäköisyys haluttiin selvittää. Mikäli $4U_{tp}$ ja $5U_{tp}$ kielletäisiin, johtaisi se monissa verkkoyhtiöissä investointikustannusten selvään kasvuun. Muutos koskisi uusia ja saneerattavia verkon osia.

Lähi vuosina verkon saneeraustarve kasvaa ja monin paikoin siirrytään ilmajohdoista maakaapeleihin. Samalla verkon kapasitanssi ja maasulkuvirrat kasvavat, joten maadoitusten vahvistaminen ja maasulkuvirran sammutus tulevat lisääntymään. Jos tähän vielä yhdistettäisiin $2U_{tp}$ vaatimuksen vaikutukset, kasvaisi maadoitusverkkojen vahvistamisen ja maasulkuvirtojen kompensoinnin tarve entisestään aiheuttaen merkittäviä lisäkustannuksia. Standardia valmistelevalle Seskon komitea SK99 on pyytänyt Energiateollisuutta ja verkkoyhtiöitä tekemään selvityksen, jossa tutkitaan millä ehdoin ja missä tilanteissa korkeampia U_{tp} -kertoimia (4 ja 5) voitaisiin turvallisesti käyttää.

1.2 Tavoite ja saavutettavat hyödyt

Hankkeen tehtävänä on tarkastella millaisia kosketusjännitteitä KJ-jakeluverkon maasulun aikana voi asiakkaille siirtyä ja millaisen riskin nämä jännitteet voivat aiheuttaa. Tarkasteltava tapaus on haja-asutusalueen muuntamo ja siihen liittyvä muuntopiiri, jossa nykyisen käytännön mukaan maadoitusjännite potentiaalirengasta käytettäessä voi olla $4U_{tp}$ (tai $5U_{tp}$), ja jossa muuntajan suojavaadoitus ja PJ-verkon käyttömaadoitus on yhdistetty.

1.3 Osallistujat

Hankkeen toteuttamisen päävastuu on Aalto-yliopiston Sähkötekniikan ja automaation laitoksella, jossa asiaa selvittävät tekniikan tohtori Eero Saarijärvi sekä diplomi-insinööri Paavo Tammi ja vastuuhenkilönä toimii professori Matti Lehtonen. Hankkeen ohjausryhmässä ovat mukana Energiateollisuus ry, Järvi-Suomen Energia Oy, Elenia Oy, Loiste Sähköverkko Oy, Kymenlaakson Sähköverkko Oy, Caruna Oy, Savon Voima Verkko Oy ja PKS Sähkönsiirto Oy.

2 Maasulku ja kohonnut maapotentiaali

Maadoitusjännite U_m havaitaan maadoituselektrodin ja kaukaisen maan (referenssimaa) välillä. Maadoitusjännite syntyy, kun maasulkuvirta kulkee maadoitusvastuksen R_m yli maahan. Maadoitusvastuksella R_m tarkoitetaan maasulkuvirran syöttöpisteestä nähtyä resistanssia suhteessa kaukaiseen maahan. Todellisissa jakeluverkoissa maadoitusjärjestelmä muodostuu useista yhteen kytketyistä maadoituksista (muuntamon maadoitukset, PJ-verkon lisämaadoitukset ja asiakkaan maadoitukset).

Tarkasteltaessa yksittäistä maadoituselektrodia homogeenisen maaperän tapauksessa ja siirryttäessä riittävän kauaksi maadoituselektrodista (maadoituselektrodin geometriasta riippuen), voidaan maahan elektrodin kautta menevän virran aiheuttama kohonnut maapotentiaali ilmaista jännitteenä U_r suhteessa kaukaiseen referenssimahaan,

$$U_r(x) = \frac{\rho I}{2\pi x} \quad (1)$$

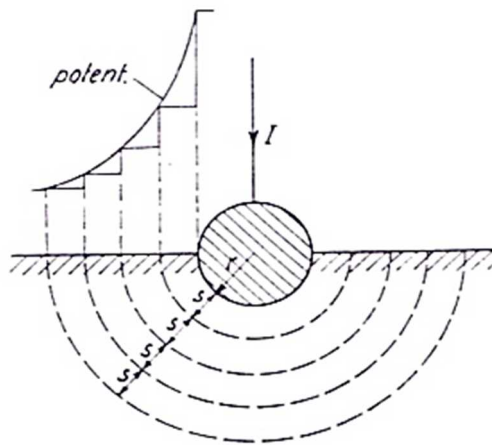
U_r on jännite suhteessa kaukaiseen maahan (V)

ρ on maaperän resistiivisyys (Ωm)

x on etäisyys maadoituselektrodiin (m)

I on virta (A)

Virta siirtyy maahan elektrodin ja maaperän rajapinnasta ja lähtee levittäytymään. Mikäli kyseessä on pinnassa oleva puolipallon muotoinen elektrodi ja homogeeninen maa, lähtee virta hajaantumaan puolipallon muotoisena rintamana [Kuva 1], jolloin jokaisen differentiaalisen paksun puolipallon muotoisen kappaleen resistanssi virran kulkutiellä riippuu maaperän resistiivisyydestä, puolipallon pinta-alasta ja differentiaalisen kappaleen paksuudesta. Näin ollen myös jokaisen differentiaalisen paksun kappaleen yli oleva jännite on kääntäen verrannollinen etäisyydestä pallon keskipisteeseen.



Kuva 1. Potentiaalilupilon muodostuminen pinnassa olevan puolipalloelektrodin ympärille. Kuva: [Suu06]

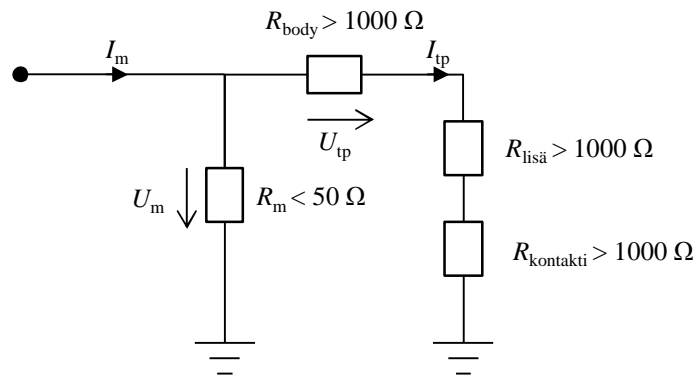
Pitkillä etäisyyksillä 50 Hz vaihtovirralla maaperän resistanssi on noin 50 m Ω /km, riippumatta maaperän resistiivisyydestä. Maasulkuvirran kulkua maassa voidaan lähialueella tarkastella kuten tasavirralla, mutta pitkillä etäisyyksillä myös virtapiirin induktanssi tulee huomioida. Maasulkuvirtapiiri muodostaa suuren silmukan, jonka pinta-ala vaikuttaa virtapiirin induktanssiin. Maasulkuvirran hakiessa kokonaisimpedanssin kannalta edullisinta reittiä myös tällä seikalla on tietyissä tilanteissa merkittävää virran kulkua ohjaavaa vaikutusta.

Suomessa maaperän resistiivisyys ρ (Taulukko 1) vaihtelee tyypillisesti savimaiden 40 Ωm :stä graniittikallion 20e3 Ωm :iin [Sfs05].

Taulukko 1. Maaperän ja eri rakennusmateriaalien resistiivisyyksiä (ρ)

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

Kuva 2 esittää tilannetta, jossa ihmiskeho (R_{body}) kytkeytyy osaksi kosketusjännitevirtapiiriä kaukana maadoituksista. Tämä tilanne edustaa henkilöturvallisuuden kannalta epäedullisinta tilannetta, sillä siinä oletetaan maadoitusjännitteen siirtyvän tyhjäksi tyhjäksi kosketusjännitteeksi täysimääräisenä. Koska sallittu kosketusvirta I_{tp} on tyypillisesti hyvin pieni verrattuna kokonaismaasulkuvirtaan I_{m} , määräytyy maadoitusjännite U_{m} käytännössä verkon maadoitusresistanssin R_{m} perusteella.

**Kuva 2.** Kosketusjännitevirtapiiri

Suoraan jalkojen alla oleva maaperä vaikuttaa voimakkaasti maakontaktin resistanssiin (R_{kontakti} , Kuva 2). Kauempana (syvemmillä maassa) virta hajaantuu laajemmalle alueelle, jolloin maaperän resistiivisyydellä ei juuri ole merkitystä potentiaaliluppon muotoon ihmiskehon suuruisella resistanssilla piiriä kuormitettaessa. Tämä tarkoittaa siis sitä, että kosketusvirtapiirissä kontaktiresistanssin takana jännitelähteenä näkyy käytännössä yhtälön (1) mukainen, etäisyydestä, virrasta ja maaperästä riippuva, jännite. Mahdollisiin muihin kosketusvirtapiirissä mukana oleviin lisäresistansseihin (R_{lisa}) sisältyvät esimerkiksi jalkineet ja käsiineet.

Tässä työssä tarkastellaan siis vaaratilannetta, jossa kosketusjännite kytketään kahden käden ja kahden jalan välille. Tässä konfiguraatiossa sallittu vikavirta kehon läpi on suoraan se, mitä standardin IEC 60479-1 rajakäyrässä esitetään (C1, Kuva 3).

Mittauksissa käytettiin 400 cm^2 kuparilevelektrodiä 50 kg painolla varustettuna mallintamaan kosketusjännitteelle altistuvan henkilön maakontaktia (R_{kontakti}). Kirjallisuudessa esitetään, että merkittävin ihmisen maakontaktiresistanssiin maan johtavuuden ohella vaikuttava parametri on kosketuspinnan pinta-ala (A). Kahden jalan kontaktissa, myös jalkojen välisellä etäisyydellä on jonkin verran vaikutusta, mutta tässä yhteydessä tätä vaikutusta ei huomioida. [Chi99] Pinnassa olevalle levyille maakontaktin resistanssi suhteessa kaukaiseen maahan voidaan laskea kaavasta [Chi99],

$$R_{\text{kontakti}} = \frac{\rho}{4b}$$

jossa b on ympyrälevyn säde. Mittauksissa käytettiin neliön muotoisia levyjä, joiden pinta-ala oli 400 cm^2 . Yhden jalan maakontaktin pinta-alalle voidaan käyttää arvoa 200 cm^2 [Chi99], jolloin tätä vastaavan pyöreän levyn säde b on

$$b = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 0.080 \text{ m}$$

Yhden jalan ekvivalenttinen resistanssi kaukaiseen maahan voidaan tällöin approksimoida yhtälöllä

$$R_{1 \text{ jalka}} = \frac{\rho}{4 \cdot 0.080 \text{ m}} = \frac{3.1}{\text{m}} \rho$$

Koska kahden jalan kontaktissa näiden erillisten kontaktien välisen resistanssin on katsottu olevan merkityksetön, voidaan kahden jalan kontaktia mallintaa suoraan kahdella suhteessa kaukaiseen maahan rinnan kytketyllä yhden jalan kontaktilla ja näin ollen saadaan

$$R_{2 \text{ jalkaa}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{4 \cdot 0.080 \text{ m}} = \frac{1.6}{\text{m}} \rho$$

Käytännössä maaperän johtavuus on hyvin vaihtelevaa ja tyypillisesti hyvinkin johtavan maaperän päällä saattaa olla huonommin johtava kerros, esimerkiksi nurmikkoa, varvikkoa, kariketta, soraa jne. Tällaisen pintakerroksen vaikutusta voidaan arvioida erilaisin menetelmin [Chi99]. Verrattuna tilanteeseen, jossa maaperän oletetaan olevan homogeenista, huonommin johtava pintakerros tarkoittaa edullisempaa jakosuhdetta kosketusjännitteelle altistuvan henkilön kannalta.

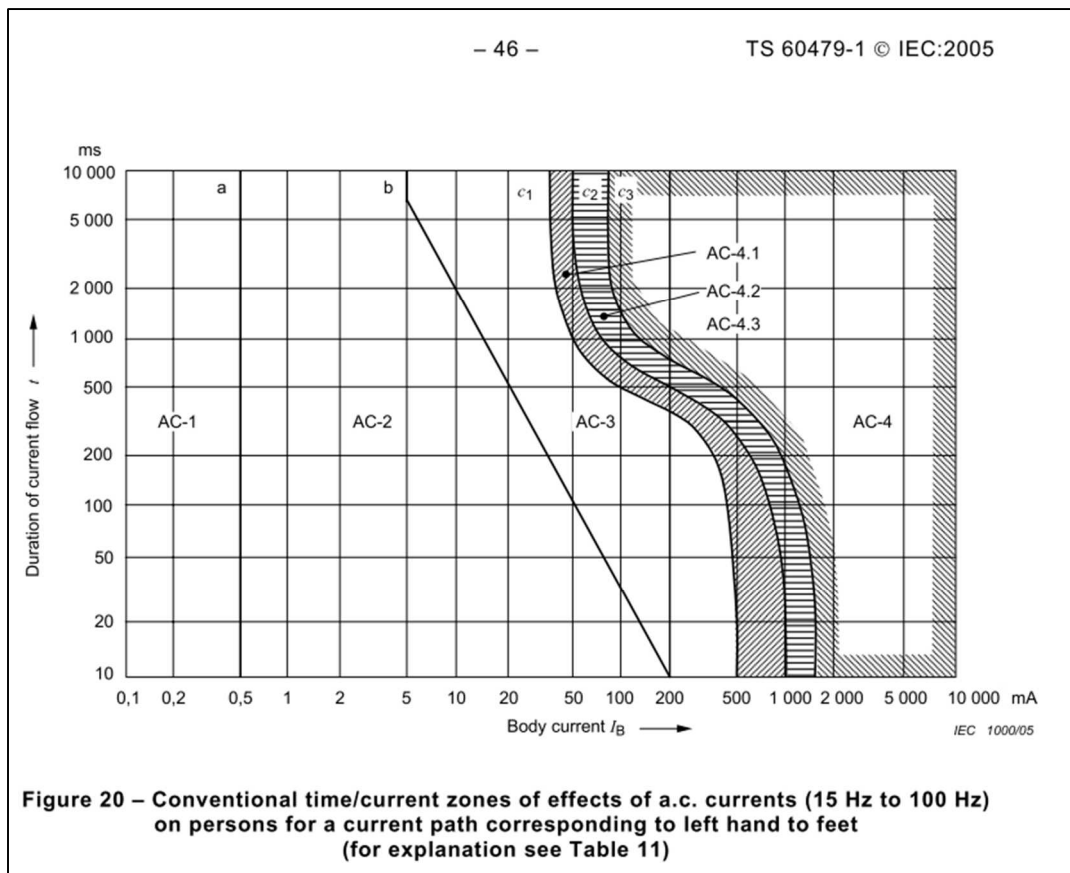
3 Virrantiheys sydämen alueella ja kosketusjännite

Tämän tutkimuksen tapauksessa henkilöturvallisuutta silmällä pitäen nimenomaan kosketusvirran aiheuttama sydänkammiovärinä on todennäköisin terveydellinen vaara. Suuremmilla jännitteillä (ja siten virralla ja teholla) ihmiskehoon aiheutuu muun muassa erilaisia kudosisäilytyksiä [Saa14]. Sydänkammiovärinän aiheuttaa liian suuri virrantiheys sydämen alueella. Myös virran taajuudella on suuri merkitys altistuksen vaarallisuuteen. Virrantiheyden ylittäessä tietyn taajuudesta riippuvan rajan, nousee sydänkammiovärinän riski voimakkaasti. Virrantiheyttä voidaan arvioida kehon läpi menevästä kokonaisvirrasta (Kuva 3) [Iec05]. Toisaalta tämä virta riippuu siis jännitteestä ja virtapiirin impedansseista. Kun ihmiskehon impedanssi tunnetaan (Taulukko 2) ja samoin tunnetaan kehon sisäinen impedanssijako (Kuva 4), ja siis edelleen virranjako, voidaan määrittellä raja-arvot sallituille kosketusjännitteille olettaen tietty sallittu riskitaso. Tässä työssä asiaa lähestytään nimenomaan näiden sallittujen kosketusjännitteiden kautta laskemalla suhdeluku k maadoitusjännitteelle ja siirtyvälle kuormitetulle kosketusjännitteelle.

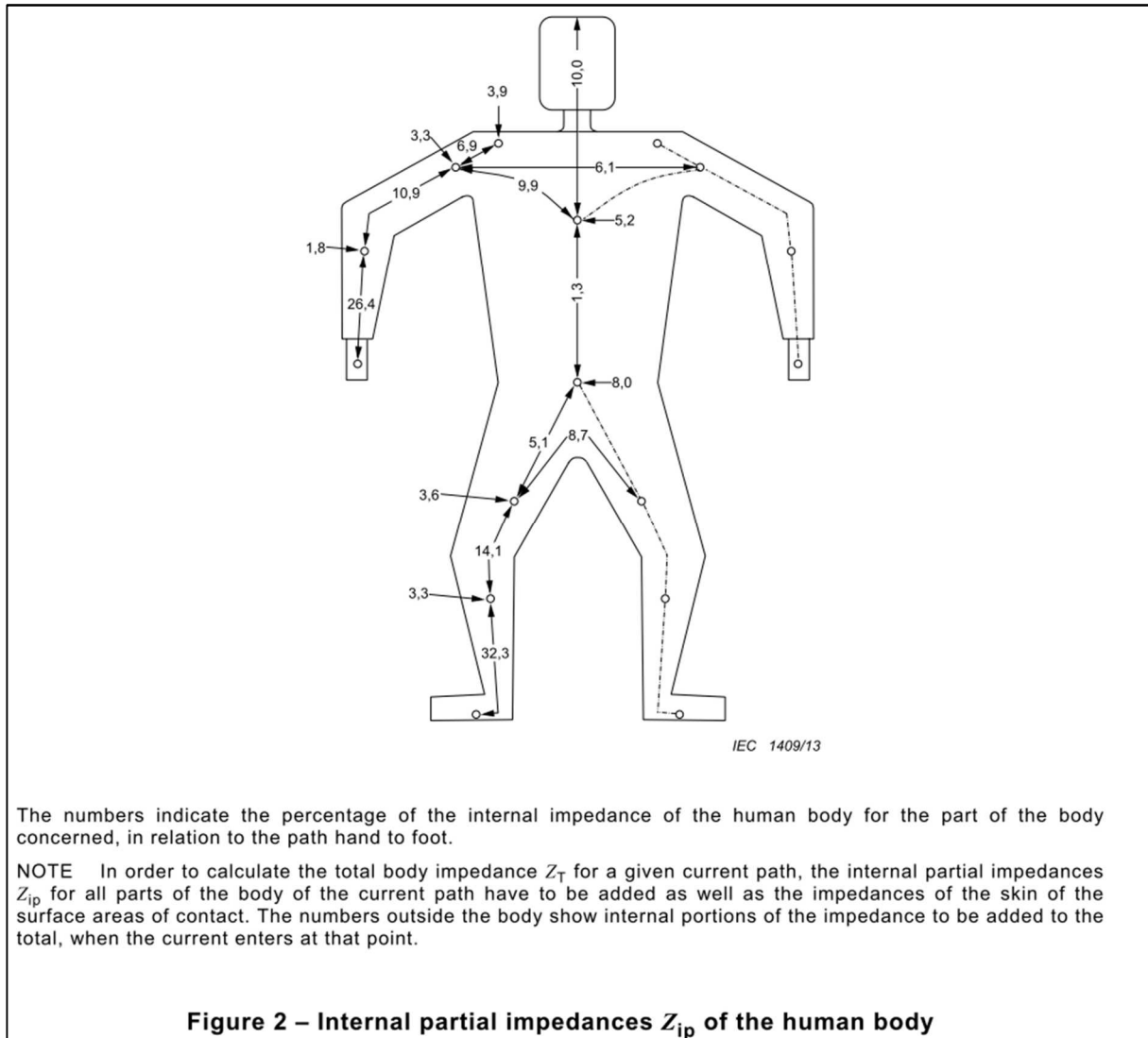
Taulukko 2. Ihmiskehon resistanssi (kädestä käteen) eri jännitteillä (http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_shock)

Jännite	5%	50%	95%
25 V	1750 Ω	3250 Ω	6100 Ω
100 V	1200 Ω	1875 Ω	3200 Ω
220 V	1000 Ω	1350 Ω	2125 Ω
1000 V	700 Ω	1050 Ω	1500 Ω

Kuva 3 esittää kehon läpi sallittua virtaa eri altistuksen kestoajoille.



Kuva 3. IEC 60479-1: Kahdesta kädestä kahteen jalkaan; sydänvirtakerroin $F = 1$; $t = 0.4$ s; $I_B = 200$ mA. Kuva: [Iec05, s. 46]

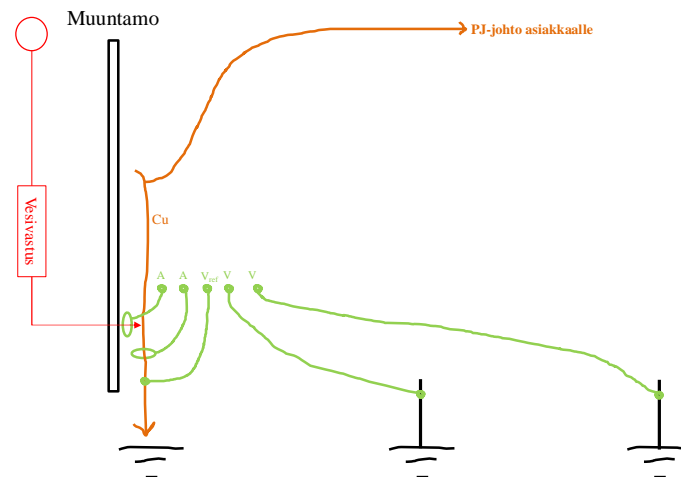


Kuva 4. Ihmiskehon impedanssien jakautuminen eri kehon osiin. Kuva: [Iec05, s. 30]

4 Kosketusjännitemittaukset

4.1 Mittausjärjestely

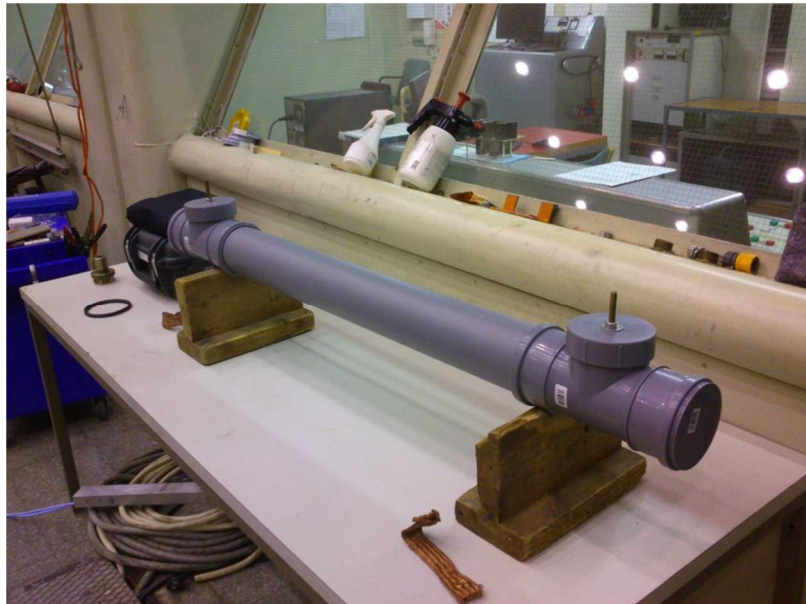
Asiakkaan PJ-verkkoon siirtyviä KJ-maasulun aiheuttamia kosketusjännitteitä mitattiin tekemällä jännitetyönä jakelumuuntamolle todellinen maasulku (Kuva 5 ja Kuva 6). Maasulkuvirtaa rajoitettiin suurehkoilla vastuksella siten, että välttyttiin asiakkaiden kokemilta keskeytyksiltä. Maasulkuvirta syötettiin 20 kV avojohdon yhdestä vaihejohtimesta sopivaan arvoon asetellun vesivastuksen (Kuva 7) läpi muuntamon maadoitukseen. Maasulun kesto kussakin mittauksessa oli noin 5 sekuntia, joka on riittävän pitkä aika jatkuvan tilan ilmiön havainnoinnin kannalta. Vesivastuksen arvo aseteltiin välille 10...20 k Ω , jolloin maasulkuvirta on reilusta puolesta ampeerista reiluun ampeeriin ja syntyvä kosketusjännite on jo hyvin havaittavissa ja erotettavissa normaalista kuormitusvirran nolajohtimeen aiheuttamasta potentiaalinnoususta. Muuntamon maadoitukseen vastuksen läpi menevä kokonaisvirta eli maasulkuvirta mitattiin tallentavalla mittarilla 0.25 sekunnin jaksoina (RMS: min, max ja keskiarvo) ja samaan aikaan asiakkaan päässä havaittava maapotentiaalinen nousu ja sen aiheuttama kosketusjännite mitattiin niin ikään tallentavalla mittarilla niin ikään 0.25 sekunnin jaksoina. Lisäksi muuntamolla mitattiin myös jännitteitä eri kohdissa maastosta, jolla pyrittiin arvioimaan todellista maadoitusjännitettä, eli kohonnutta maapotentiaalia suhteessa kaukaiseen referenssimajaan. Jännitemittaukset tehtiin molemmissa päissä kahdella toisistaan riippumattomalla ja rinnakkaisella mittarilla, jolloin mahdollisiin laiterikkoihin pystyttiin paremmin varautumaan. Sekä asiakkaan päässä, että muuntamolla mittareina olivat identtiset Fluke 435 ja Arduino Uno:n perustuva 6-kanavainen 10-bittinen dataloggeri.



Kuva 5. Maasulkuvirran syöttäminen muuntamon maadoitukseen, sekä virta- ja jännitemittaukset.



Kuva 6. Maasulku jännitetyönä: vesivastus aidattuna edessä oikealla.



Kuva 7. Vesivastus, jonka resistanssiarvo voidaan asettaa noin välillä 0...2 M Ω muuttamalla veden johtavuutta. Vastusarvon havaittu lämpötilariippuvuus oli noin +2.5 prosenttia per lämpötila-aste. Vastuksen napojen kontakti veteen tehtiin noin 100 cm² kuparilevyllä, jotka oli taivutettu L:n muotoon.

Kosketusjännitteitä asiakkaan päässä mitattaessa käytettiin elektrodina 400 cm² kuparilevyä, jonka päälle asetettiin 50 kg paino (Kuva 8). Vastaava järjestely on aikaisemmin esitetty kirjallisuudessa [Tom12] ja tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi käytettiin samanlaista järjestelyä. Levyn ja painon yhdistelmällä mallinnetaan seisovan ihmisen kontaktia maahan. Näiden lisäksi vertailumittaus suoritettiin yhdellä maahan upotetulla piikkielektrodilla (kuparipiikki, upotussyvyys noin 80 cm), joka ei vastaa ihmisen, eikä kotieläinten maakontaktia jännitelähdettä kuormitettaessa, mutta joka referenssinä osaltaan verifioi tuloksia. Muuntamalla maadoitusjännitteen mittaauksissa käytettiin ainoastaan piikkielektrodeja, koska siellä kuormitetun jännitteen käyttäytymistä ei tutkittu. Asiakkaan päässä kosketusjännitteitä mitattiin pihapiiristä sellaisista kohdista, joissa voitaisiin kuvitella työskenneltävän esimerkiksi sirkkelin tai klapi-koneen kanssa. Sisätiloista mitattiin pesuhuoneen lattia, sikäli kun sellainen kohteesta löytyi ja mahdolliset piharakennusten betonilattiat. Muuntamalla maadoitusjännitteen profiilia (ns. maadoitusjännitesuppiloo) pyrittiin mittaamaan kohtalaisen suurilta etäisyyksiltä (Kuva 9).



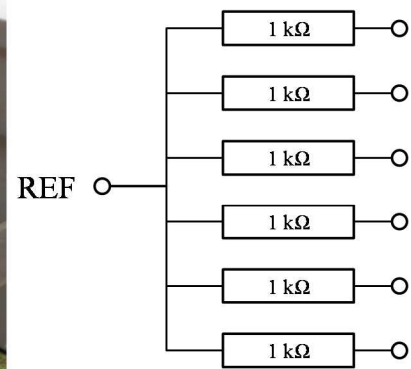
Kuva 8. 400 cm² kuparilevyelektrodi ja 50 kg paino, sekä mittajohto (puhelinparikaapelia, mallia Försvarsmakten)



Kuva 9. Esimerkki muuntamopään maastoon viedystä mittaaselektrodista. Piikkielektrodi (kuvassa ojan pohjalla) pyritään viemään mahdollisimman sivuun kaikista kyseisen muuntopiirin yhdistettyyn maadoitusjärjestelmään liittyvistä yksittäisistä maadoituksista. Tämän mittaaselektrodin etäisyys muuntamon maadoitukseen oli noin 420 metriä.

Syntyvät kosketusjännitteet mitattiin sekä tyhjäkäyvinä, jolloin mittauspiiriä kuormittivat ainoastaan mittarit (1 M Ω ja 4 M Ω sisäänmenot), että myös 1 k Ω vastuksella kuormitettuna (Kuva 10). Vastukset kytkettiin jännitteenmittauskanavien rinnalle. Koska siirtyvää kosketusjännitettä syöttävän asiakkaan syöttöjohdon resistanssi on suuruusluokkaa alle 0.5 Ω ja koska kuormitusvastukset 1 k Ω ovat sarjassa

maakontaktien kanssa (suuruusluokkaa $> 1 \text{ k}\Omega$), voidaan kyseistä referenssipistettä pitää jännitteenjaon kannalta liki jännitelähteenä ja mittauspiirin kuormituksen syöttöjohdolla aiheuttama jännitteenalenema voidaan olettaa merkityksettömäksi. Mittaamalla sekä tyhjäkäyvät että kuormitetut jännitteet, ihmisille vaaraa aiheuttavan virtapiirin kaikki parametrit saatiin määritettyä ja sen käyttäytymistä todellisessa vaaratilanteessa voidaan arvioida. Koska tiedetään, että monilla ympäristöön liittyvillä tekijöillä (esimerkiksi kosteus ja routa ja lumi) on merkittävä vaikutus maadoitusten toimintaan ja toisaalta ihmisen maakontaktiin, mitattiin edellä mainitut tyhjäkäyvä ja kuormitettu kosketusjännite sekä ns. kuivilla elektrodeilla, jotka vastasivat sen hetkistä olosuhdetta että myös kastelluilla elektrodeilla. Kasteleminen tapahtui siten että asiakkaan pään levyelektrodit nostettiin maasta ja niiden kohdalle kaadettiin noin ämpärillinen vettä (Kuva 11). Myös vertailumittauksena toimivan asiakkaan pään piikkielektrodin kohdalle kaadettiin vettä. Kastelemisella mallinnettiin tilannetta, jolloin ihminen pääsee kosketuksiin kosketusjännitteen kanssa vesisateen aikana. Tällöin kontakti maahan on pienivastuksinen, joka osaltaan muuttaa virtapiirin jännitteenjakoa ihmisen kannalta epäedulliseen suuntaan ja näin saatu tulos on konservatiivinen.



Kuva 10. $1 \text{ k}\Omega$ vastukset (edessä vasemmalla) kytkettynä asiakkaan pään mittauskanavien rinnalle kuormitetussa kosketusjännitemittauksessa.



Kuva 11. Levyelektrodin kasteleminen vedellä ennen uusintamittausta.

4.2 Mittausten dokumentointi

Koska kyseinen tutkimus tehtiin standardointityön tausta-aineistoksi, koettiin huolellinen ja tarkka dokumentointi korostuneen tärkeäksi. Mittaukset pyrittiin dokumentoimaan kattavasti, jotta mahdollisten epäilyä herättävien havaintojen kohdalla voitaisiin tarvittaessa palata mittauspaikalle ja selvittää syitä mahdollisiin poikkeamiin. Tällaisia poikkeamia voisivat aiheuttaa esimerkiksi maahan upotetut metalliset rakenteet, kuten viemärit ja maadoitukset, joiden havaitseminen mittauksen yhteydessä on käytännössä vaikeaa. Jokaisesta mitattavasta kohteesta tehtiin mittauspöytäkirja (Kuva 12), johon kirjattiin kohdekohtaiset taustatiedot sekä erityisesti maasulkujen kellonajat ja maaelektrodien mitatut vastusarvot. Jokaisessa mittauskohteessa sekä asiakkaan että muuntamon päästä laadittiin pöytäkirjan liitteeksi asemapiirroksat, joihin merkittiin kaikkien mittauselektrodien sijainnit (Kuva 13). Pöytäkirjan lisäksi jokainen mittauselektrodi valokuvattiin tunnistelapun kanssa (Kuva 14).



Kuva 12. Esimerkki mittauksesta muuntamon päässä. Mittaaja on juuri kirjaamassa mittarien kanavanumeroita mittauspöytäkirjaan. Kuvassa näkyvät hyvin myös kaksi rinnakkaista mittalaitetta.



Kuva 13. Esimerkki mittauspöytäkirjaan liitetystä asiakkaan pään asemapiirroksesta, mittauselektrodit merkitty a1...a4



Kuva 14. Esimerkki muuntamolla sijaitsevasta maahan upotetusta piikkielektrodista. Kaikki mittauselektrodit dokumentoitiin pöytäkirjaan (koordinaatit, mittarikanavat, elektrodityyppi ja lyhyt kuvaus paikasta) ja valokuvaamalla.

Itse mittausdatat kosketusjännitteiden ja maasulkuvirtojen osalta tallentuivat mittareihin (Fluke 435 ja Arduino / SD-kortti), josta ne voitiin myöhemmin ladata tietokoneelle. Mittauselektrodien vastusarvot suhteessa jännitteenmittausreferenssiä vasten (muuntamon päässä maadoituskupari ja asiakkaan päässä PE-kisko) mitattiin Metrigo 2000 mittarilla ja kirjattiin mittauspöytäkirjaan. Vastusarvot mitattiin ennen ja jälkeen kastelun (ns. kuiva ja märkä mittaus).

5 Mittaustulosten käsittely

5.1 Kertoimen k määrittely

Kun maadoitusvastuksen yli maasulun seurauksena syntyy maadoitusjännite U_m , voidaan paikasta riippuen tietyn suuruinen osa tästä havaita kehon resistanssin yli vaikuttavana kosketusjännitteenä U_t . Kosketusjännitteen suuruus riippuu lähinnä muutamasta tekijästä, jotka ovat altistuspaikan etäisyys maadoitukseen, maaperän laatu laajemmalla alueella ja erityisesti maakontaktin luovan maaperän laatu kosketusjännitealtistuspaikan välittömässä läheisyydessä sekä virtapiirissä mukana olevat mahdolliset muut lisäresistanssit. Näitä vaikutuksia kuvataan tässä työssä kertoimilla k_1 ja k_2 . Kertoimien tulo kertoo jokaiselle havaintopisteelle yksilöllisen suhdeluvun k maadoitusjännitteen U_m ja kehon yli havaittavan kosketusjännitteen U_t välillä,

$$k = k_1 \cdot k_2 \quad (2)$$

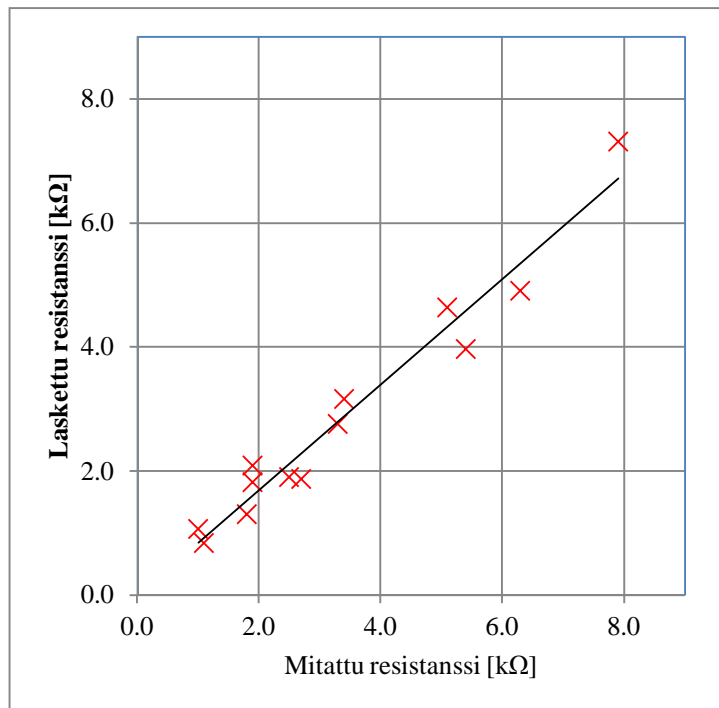
$$k = \frac{U_m}{U_t} \quad (3)$$

- k_1
 - maadoitusjännitteeseen U_m suuruus suhteessa tyhjäkäyvään kosketusjännitteeseen U_{tk} havaintokohdassa
 - $U_m = k_1 \cdot U_{tk}$
 - kertoimen k_1 suuruus riippuu käytännössä (vrt. yhtälö (1))
 - etäisyyksistä maadoitukseen ja potentiaalintasauksiin
 - eri maadoitusten kautta maahan menevästä virrasta
 - maaperän johtavuudesta
- k_2
 - Kerroin k_2 voidaan käsittää jännitteenjaon jakosuhteeksi, jossa virtapiirissä mukana olevat vastukset ovat
 - ihmiskehon oma resistanssi kyseisellä virran kulkutiellä
 - tämän resistanssin yli vaikuttava jännite havaitaan siis kosketusjännitteenä U_t
 - maakontaktin resistanssi suhteessa kaukaiseen maahan (R_{kontakti})
 - Mahdolliset muut lisäresistanssit (jalkineet, käsineet; $R_{\text{lisä}}$)
 - muuttavat jakosuhdetta edullisempaan (turvallisempaan) suuntaan.

Koska tyypillinen maasulkusuojaus ohjaa katkaisijan auki tietyn ajan kuluessa vian alkamisesta, voidaan ihmiskehon jännitteestä riippuva keskimääräinen resistanssi tämän perusteella kiinnittää. Suurin sallittu kosketusjännite 0.4 sekunnin altistusajalle on noin 200 V ja tätä vastaava ihmiskehon keskimääräinen resistanssi on siis 1.3 k Ω (Taulukko 2).

Mittausten tarkoituksena oli selvittää, kuinka suuria virtoja ihmiskehoon voi aiheutua kosketusjännitteistä, jotka syntyvät KJ-verkon maasuluista. Virran suuruutta voidaan arvioida selvittämällä kosketusjännitevirtapiirin käyttäytyminen, kun sitä kuormitetaan ihmiskehon impedanssia vastaavalla kuormalla. Jos kosketusvirtaa syöttävä virtapiiri jaksaa syöttää kehon impedanssia vastaavaa kuormaa sallitun kosketusjännitteen ylittävällä jännitteellä, ylittyy myös kehon läpi menevä sallittu kosketusvirta.

Jokaisen mittauspisteen (elektrodin) kosketusjännite mitattiin siis sekä tyhjäkäyvänä että $1\text{ k}\Omega$ vastuksella kuormitettuna käyttäen maasulkuvirtaa herätteenä. Samoin kaikkien näiden mittauspisteiden vastusarvot suhteessa referenssipistettä vasten mitattiin Metriso 2000 vastusmittarilla. Alla oleva Kuva 15 esittää näiden kahden eri menetelmän avulla saatuja arvoja kosketusvirtaa syöttävän virtapiirin sisäiselle vastukselle. Kuten huomataan, ovat arvot lähes täysin vastaavia ja erot mahtuvat hyvin mittausvirheiden sisään. Kertoimen k_2 määrittämiseksi voidaan jatkossa menetellä siten, että yksinkertaisesti mitataan vastusmittarilla vastusarvo suhteessa referenssipistettä vasten.



Kuva 15. Mitatut ja lasketut maakontaktien resistanssit suhteessa kaukaiseen maahan

Suurimmaksi mittausvirhettä aiheuttavaksi termiksi tunnistettiin nollajohtimessa verkon normaalien kuormien seurauksena kulkeva virta, joka taustalla nostaa maadoituksen potentiaalia. Koska mittauksissa ei tallennettu vaihekulmatietoa, jäi tuloksiin tuntematon virhetermi kuormavirran ja maasulkuvirran aiheuttamien jännitteiden keskinäiseen vaihekulmaeroon liittyen.

Esimerkki: Tarkastellaan erästä mitattua pistettä¹, jossa havaittu tyhjäkäyvä kosketusjännite oli 0.71 p.u. (normeerattuna suhteessa maadoitusjännitteeseen) ja maakontaktin mitattu resistanssi oli $7.9\text{ k}\Omega$ (tyhjäkäyvistä ja kuormitetuista jännitteistä laskettuna $7.3\text{ k}\Omega$). Lasketaan mitoittavaa reunaehto

$$U_m = 4U_{tp}$$

vastaavan maadoitusjännitteen mukaan kyseisessä kohdassa havaittava kosketusjännite. Tässä siis U_{tp} tarkoittaa suurinta kyseiselle viankestoajalle sallittua kosketusjännitettä. Nyt henkilön ($1.3\text{ k}\Omega$) yli tässä nimenomaisessa pisteessä havaittava kosketusjännitealtistus U_t on

$$U_t = \frac{1}{k} U_m = \frac{1}{k_1 \cdot k_2} \cdot U_m = (0.71) \cdot \left(\frac{1.3\text{ k}\Omega}{1.3\text{ k}\Omega + 7.9\text{ k}\Omega} \right) \cdot 4U_{tp} = 0.40 U_{tp}$$

¹ Kuhmo / mittauselektrodi a1

Kastelemisen jälkeen maakontaktin resistanssi tippui arvoon 3.3 k Ω , jolloin

$$U_t = \frac{1}{k} U_m = (0.71) \cdot \left(\frac{1.3\text{k}\Omega}{1.3\text{k}\Omega + 3.3\text{k}\Omega} \right) \cdot 4U_{tp} = 0.80 U_{tp}$$

Jos maadoitukseen siis syötetään maasulkuvirtaa sen verran, että maadoitusjännite kohoaa arvoon $4U_{tp}$, havaitaan tässä nimenomaisessa mittauspisteessä (kontaktiresistanssit edellä esitetyt) ihmiskehon yli toteutuneet kosketusjännitteet U_t , jotka ovat 40 % (kuiva elektrodi) ja 80 % (kasteltu elektrodi) sallituista maksimiarvoista U_{tp} . Mikäli laskennassa otetaan huomioon muita lisäresistansseja (hanskat, jalkineet, jne.), suurentavat ne edelleen jälkimmäistä termiä k_2 ja pienentävät kehon yli havaittua jännitettä. Vastaavasti, jos maasulkuvirtapiirissä on mukana lisäresistansseja (maasulku esim. oksan kautta), voidaan nämä ottaa huomioon ensimmäisessä termissä k_1 (maadoitusjännite ei nouse reunaehto vastavaan arvoon; $U_m < 4 U_{tp}$).

5.1.1 Siirtyvä tyhjäkäyvä jännite

Kosketusjännite siirtyy asiakkaan luokse PJ-johdon PEN-johdinta pitkin ja riippuen etäisyydestä asiakkaan pään maadoituksista kohonneena maapotentiaalina havaitaan tyypillisesti yli puolet maadoitusjännitteestä. Asiakkaan pään maadoitukset ovat luultavasti tyypillisesti huomattavasti heikompia kuin muuntamon maadoitukset (pienempi johtavuus maahan), jolloin niiden ympäristöön synnyttämä potentiaalisuppilo on melko jyrkkä ja havaittava kohonnut tyhjäkäyvä kosketusjännite U_{tk} kasvaa melko suureksi jo lyhyilläkin etäisyyksillä.

5.1.2 Maasulku vikaresistanssin kautta

Maasulku, joka tapahtuu ilman vikaresistanssia tuottaa suurimmat maasulkuvirrat ja edelleen maadoitusjännitteet. Kuitenkin tällaiset vastuksettomat maasulut ovat tietävästi kohtalaisen harvinaisia, joskin mahdollisia esim. kipinävälillä suojatulla muuntamalla. Tulosten konservatiivisuutta silmälläpitäen tulokset on laskettu vastuksettomille maasuluille.

5.1.3 Kontakti maahan

Kuten aikaisemmin on todettu, eräs merkittävimmistä ihmiskehon kanssa kosketusjännitealtistustilanteissa sarjaan kytkeytyvistä impedansseista on kontaktiresistanssi maahan. Mittauksissa pyrittiin selvittämään nimenomaan tämän resistanssin tyypillisiä arvoja erilaisissa olosuhteissa.

5.1.4 Muut lisäresistanssit

Eräissä tutkimuksissa 2000 Ω vastusarvoa työjalkineille on pidetty hyvin konservatiivisena arviona [God99].

6 Mittaustuloksia

Mittausten tulokset on koottu seuraaviin taulukoihin. Taulukko 3 esittää kertoimen k laskennassa tarvittavat mittauspistekohtaiset lähtötiedot, eli siirtyvän tyhjäkäyvän jännitteen suuruudet ja ihmiskehon kanssa sarjaan kytkeytyvän maakontaktin resistanssiarvot. Taulukko 4 puolestaan esittää näistä lasketut jokaiselle mittauspisteelle yksilölliset kertoimet k kuivalle ja kastellulle elektrodille sekä ilman lisäresistanssia ja 2 k Ω lisäresistanssin kanssa. Tämän luvun lopussa on esitetty muutamia havainnollistavia esimerkkejä kertoimen k laskennasta (kappaleet 6.1-6.3).

Taulukko 3. Mitatut mittauspistekohtaiset lähtötiedot kertoimien k laskemiseksi

U_{tk} , [p.u.]	a1	a2	a3	a4	a5	a6
Hyrnsalmi	0.64	0.63	0.63	0.60	N/A	N/A
Sotkamo	0.17	0.09	0.50	0.00	N/A	N/A
Kuhmo	0.71	0.61	0.57	N/A	N/A	N/A
Kestilä	1.00	0.93	0.93	0.91	N/A	N/A
Hannusranta	0.84	0.83	0.65	N/A	N/A	N/A
Puolanka ²	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

R_{kontakti} (kuiva), [k Ω]	a1	a2	a3	a4	a5	a6
Hyrnsalmi	8.7	1.7	N/A	5.1	N/A	N/A
Sotkamo	2.7	520	1.1	1000	N/A	N/A
Kuhmo	7.9	6.3	2.5	N/A	N/A	N/A
Kestilä ³	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Hannusranta	4.6	4.0	887.0	N/A	N/A	N/A
Puolanka	1.5	3.1	1002.0	3.1	2.2	864.0

R_{kontakti} (märkä), [k Ω]	a1	a2	a3	a4	a5	a6
Hyrnsalmi	3.4	1.9	1.9	5.1	N/A	N/A
Sotkamo	1.9	520	1.0	1000	N/A	N/A
Kuhmo	3.3	5.4	1.8	N/A	N/A	N/A
Kestilä	1.4	1.1	1.1	N/A	N/A	N/A
Hannusranta	1.2	2.2	887	N/A	N/A	N/A
Puolanka	1.3	2.5	5.4	2.3	2.1	864.0

² Konservatiivinen arvio: oletus 1.0 p.u. (mittaustiedot puuttuvat)

³ Hyvin märkä olosuhde; kuiva mittausta puuttuu

Taulukko 4. Kertoimet k mittauspistekohtaisesti. *-merkillä merkatut mittaukset piikkielektrodilla, joka ei vastaa suoraan ihmisen kontaktia maahan. Kertoimet, jotka alittavat arvon 4, on merkitty punaisella.

Kerroin k , kuiva, lisäresistanssi 0Ω	a1	a2	a3	a4	a5	a6
Hyrnsalmi	12.0	3.7*	N/V	8.2	N/V	N/V
Sotkamo	18.5	4687.9	3.7*	∞	N/V	N/V
Kuhmo	10.0	9.6	5.1	N/V	N/V	N/V
Kestilä	N/V	N/V	N/V	N/V*	N/V	N/V
Hannusranta	5.4	4.9	1043.9	N/V	N/V	N/V
Puolanka	2.1	3.4	768.8	3.4	2.7*	663.1

Kerroin k , märkä, lisäresistanssi 0Ω	a1	a2	a3	a4	a5	a6
Hyrnsalmi	5.7	3.9*	3.9	8.1	N/V	N/V
Sotkamo	14.8	4687.9	3.5*	∞	N/V	N/V
Kuhmo	5.0	8.4	4.2	N/V	N/V	N/V
Kestilä	2.1	2.0	2.0	N/V*	N/V	N/V
Hannusranta	2.3	3.2	1043.9	N/V	N/V	N/V
Puolanka	2.0	2.9	5.1	2.8	2.6*	663.1

Kerroin k , kuiva, lisäresistanssi $2 \text{ k}\Omega$	a1	a2	a3	a4	a5	a6
Hyrnsalmi	14.4	6.2*	N/V	10.7	N/V	N/V
Sotkamo	27.8	4705.9	6.7*	∞	N/V	N/V
Kuhmo	12.1	12.1	7.8	N/V	N/V	N/V
Kestilä	N/V	N/V	N/V	N/V*	N/V	N/V
Hannusranta	7.2	6.8	1046.3	N/V	N/V	N/V
Puolanka	3.7	4.9	770.3	4.9	4.2*	664.6

Kerroin k , märkä, lisäresistanssi $2 \text{ k}\Omega$	a1	a2	a3	a4	a5	a6
Hyrnsalmi	8.1	6.4*	6.4	10.7	N/V	N/V
Sotkamo	24.1	4705.9	6.6*	∞	N/V	N/V
Kuhmo	7.1	11.0	6.9	N/V	N/V	N/V
Kestilä	3.6	3.6	3.6	N/V*	N/V	N/V
Hannusranta	4.1	5.1	1046.3	N/V	N/V	N/V
Puolanka	3.5	4.4	6.7	4.3	4.1*	664.6

Kuolemanriskiä ajatellen merkitystä on myös sillä, kuinka paljon sallittu U_{tp} -raja-arvo ylitetään. U_{tp} -rajakäyrä on määritetty 0.12 prosentin sydänkammiovärinän todennäköisyyden mukaan ja kosketusjännitteen ylittäessä tämän rajan todennäköisyys nousee suuremmaksi.

6.1 Esimerkki 1: Kestilä a2



Kuva 16. Kestilä / a2 (Lat 64.40822, Lon 26.49325); $R_{\text{kontakti}} = 1.1 \text{ k}\Omega$ (märkä); siirtyvä jännite tyhjäkäyväänä 0.93 p.u.

Taulukko 5. Kerroin k

	Lisäresistanssi 0 Ω	Lisäresistanssi 2 $\text{k}\Omega$
Kuivana	N/A	N/A
Märkänä	2.0	3.6

Esim., ilman lisäresistanssia, märkä elektrodi (kehon resistanssi 1.3 $\text{k}\Omega$):

$$k = \left((0.93) \cdot \left(\frac{1.3 \text{ k}\Omega}{1.3 \text{ k}\Omega + 1.1 \text{ k}\Omega} \right) \right)^{-1} = 2.0$$

ja 2 $\text{k}\Omega$ lisäresistanssin kanssa, märkä elektrodi:

$$k = \left((0.93) \cdot \left(\frac{1.3 \text{ k}\Omega}{1.3 \text{ k}\Omega + 1.1 \text{ k}\Omega + 2.0 \text{ k}\Omega} \right) \right)^{-1} = 3.6$$

6.2 Esimerkki 2: Sotkamo a1



Kuva 17. Sotkamo / a1 (Lat 64.27512057, Lon 28.66285188); $R_{\text{kontakti}} = 2.7 \text{ k}\Omega$ (kuiva) ja $1.9 \text{ k}\Omega$ (märkä); siirtyvä jännite tyhjäkäyvänä 0.1654 p.u.

Taulukko 6. Kerroin k

	Lisäresistanssi 0Ω	Lisäresistanssi $2 \text{ k}\Omega$
Kuivana	18.5	27.8
Märkänä	14.8	24.1

6.3 Esimerkki 3: Hannusranta a1



Kuva 18. Hannusranta / a1 (Lat 64.328005, Lon 27.771747); $R_{\text{kontakti}} = 4.6 \text{ k}\Omega$ (kuiva) ja $1.2 \text{ k}\Omega$ (märkä); siirtyvä jännite tyhjäkäyväänä 0.84 p.u.

Taulukko 7. Kerroin k

	Lisäresistanssi 0Ω	Lisäresistanssi $2 \text{ k}\Omega$
Kuivana	5.4	7.2
Märkänä	2.3	4.1

7 Henkilöriskin arviointi

7.1 Vaaraa aiheuttavat maasulkutilanteet

Tutkimuksessa tunnistettiin kaksi erilaista KJ-verkon vikatyyppeä, jotka voisivat mahdollisesti aiheuttaa kosketusjännitealtistuksen PJ-asiakkaan verkossa siirtyvän kosketusjännitteen aiheuttamana:

- 1) Vastukseton maasulku jakelumuuntamolla
 - Kipinävälit
 - Lumikuorman aiheuttama vaihejohtimen riippuma maadoituksen ”siirron” matkalla
- 2) Vastukseton maasulku jakelumuuntamoaa syöttävässä kaapelissa
 - Routaviat
 - Kaivuuviat

Peruslähtökohta riskin arvioimisessa on, että altistuminen vaaralle vaatii sekä itse maasulkuvian aiheuttaman raja-arvon ylittävän kosketusjännitteen, että samanaikaisen henkilön kytkeytymisen osaksi kosketusjännitevirtapiiriä. Toisin sanoen, jos henkilö on $4U_{ip}$ muuntopiirin alueella ja on pihamaalla ja hyvässä kontaktissa esim. jonkin laitteen maadoitetun metallirungon kanssa ja samaan aikaan kyseisellä muuntamolla tai tätä muuntamoaa syöttävässä kaapelissa sattuu vastukseton maasulku, kokee tämä henkilö kosketusjännitealtistuksen. Altistuksen näin realisoituessa on seurauksien kannalta ratkaisevaa, miten suuren virrantiheyden ja miten pitkäkestoisesti sydämen alueelle ko. pisteessä aiheutunut kosketusjännitevirtapiiri altistuneen henkilön kehossa aikaan saa.

7.2 Altistus: märkätilat

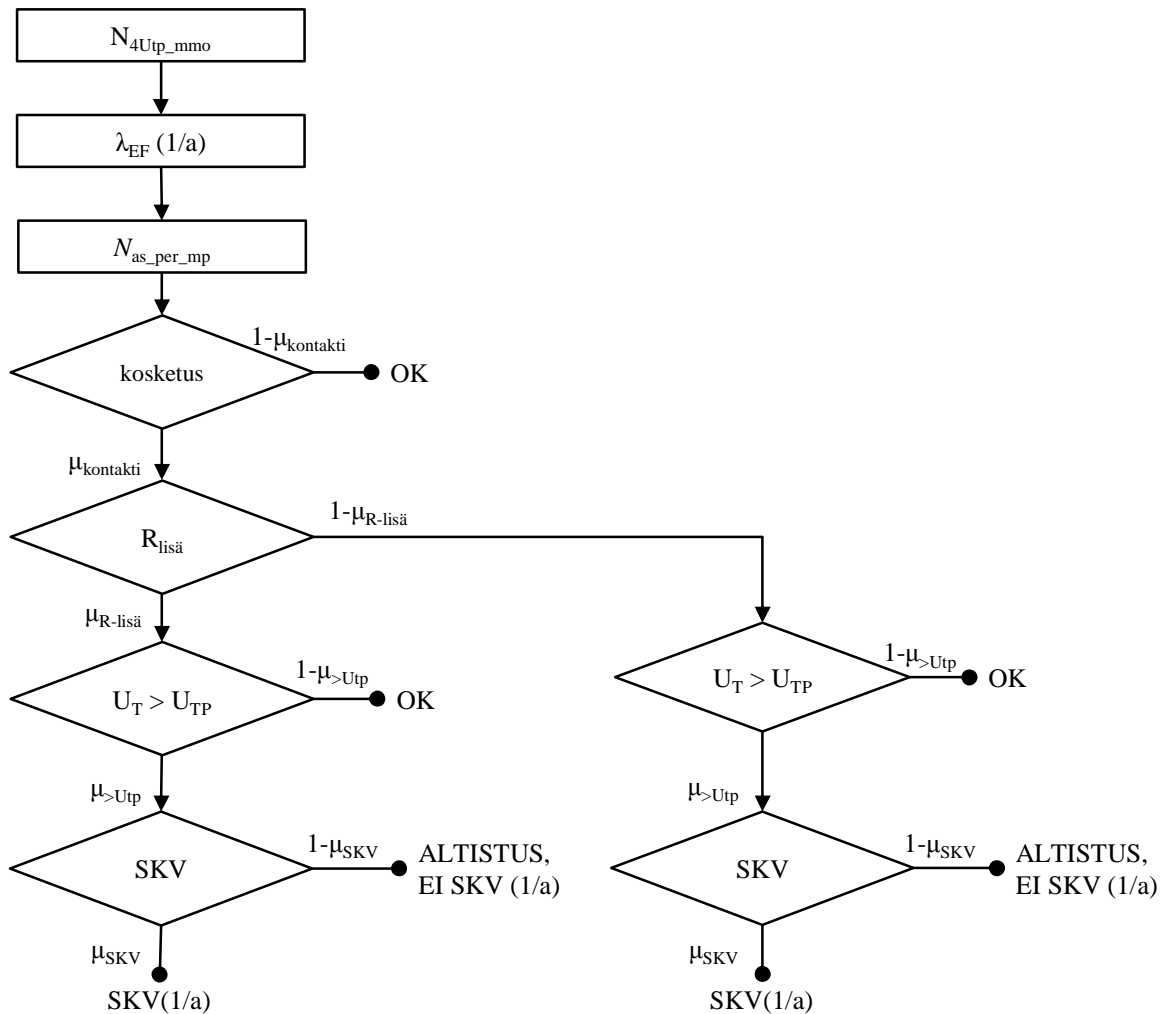
Mittauskohteissa mitattiin 5 erilaista märkä- tai varastotilan lattiaa. Näiden osalta tulokset on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 8). Puolangan mittauskohteen a3-kanavan ulkovaraston betonilattia antoi muista huomattavan paljon pienemmän tuloksen, mutta tämä selittyy sillä, että ko. lattia on suoraan maavaraisesti valettu betonilaatta ja vastaa sikäli olosuhteena pihamaata. Pesuhuoneiden kohdalla ilmeisesti vesieristykset yms. rakenteet selittävät hyvän eristyksen suhteessa PEN-johtimeen. Tämän varsin suppean otannan osalta voidaan todeta näiden kylpyhuoneiden olevan täysin turvallisia maasulkujen aiheuttamia kosketusjännitealtistuksia silmällä pitäen.

Taulukko 8. Märkätilojen ja pesuhuoneiden resistanssit

Kohde	kanava	kommentti	$\min(R_{\text{kontakti}})$ [k Ω]	$\min(k)$ [1]
Puolanka	a3	ulkovaraston betonilattia	5.4	5.1
Puolanka	a6	pesuhuone	864	663.1
Sotkamo	a2	karjakeittiön kaakelilattia	520	4687.9
Sotkamo	a4	kylpyhuone	1000	∞
Hannusranta	a3	kylpyhuone	887	1043.9

7.3 Altistus: pihamaat

Pihamaalla altistuminen kosketusjännitteelle voisi syntyä jonkin suojamaadoitetun metallirunkoisen tai metallikuorisen laitteen koskettamisesta vastuksettoman maasulun aikana. Jos esimerkiksi kyseessä on työkonetta, jota käytetään käsin, on varmasti perusteltua olettaa, että varsin usein tällaisia koneita käytetään ainakin kengät jalassa ja usein myös suojakäsineet kädessä. Nämä lisäävät virtapiiriin resistanssia ja kuolettavan altistuksen todennäköisyyttä arvioitaessa toimivat hyvin tehokkaina suojaavina tekijöinä. Jos lisäksi esimerkiksi käytön kannalta keskeiset hallintalaitteiden kahvat ja ohjaimet yms. on varustettu muovitupilla tai vastaavilla eristävillä otepinnoilla, putoaa todennäköisyys sille, että käyttäjä on paljaassa kontaktissa suoraan metallisiin osiin edelleen murto-osaan. Tämä on sinänsä merkittävä ero esimerkiksi hyvin tavanomaisiin kuolemaan johtaneisiin jatkojohtojen virheellisiin maadoitusten kytkentöihin liittyneisiin tapaturmiin. Tällaisissa jälkimmäisen kaltaisissa tilanteissa samat lisäeristykset kyllä saattavat pitkäänkin suojata tapaturman sattumiselta, mutta kosketusjännitteen näin ollessa kaiken aikaa saatavilla, on hyvin todennäköistä, että tällainen tapaturmaan johtava paljas kontakti ennemmin tai myöhemmin sattuu. Kuva 19 esittää vikatilanteiden aiheuttaman riskin arvioimiseksi käytetyn päättelyketjun.



Kuva 19. Henkilöihin kohdistuvan maasulkuvikojen aiheuttaman kosketusjänniteriskin arvioiminen

$\mu_{>U_{tp}}$	todennäköisyys, että jännite ylittää sallitun rajan (1)
$\mu_{R_{lisa}}$	todennäköisyys, että riittävä lisäresistanssi on mukana (1)
$\mu_{kontakti}$	todennäköisyys, että kontakti maadoitettuihin metallisiin osiin (1)
μ_{SKV}	todennäköisyys, että altistus johtaa sydänkammiövärinään (SKV) (1)
$N_{as_per_mp}$	keskimääräinen henkilölukumäärä muuntopiirissä (1)
$N_{4U_{tp_mmo}}$	$4U_{tp}$ muuntamoiden lukumäärä koko maassa (1)
λ_{EF}	maasulkujen lukumäärä vuodessa muuntamo kohden (1/a)

7.3.1 Pylväsmuuntamoviat

$$\mu_{\text{kontakti}} = 0.05 \cdot 0.0114 \cdot 0.10 = 57e-6$$

- Oletetaan, että 5 % pihamaista löytyy metallirunkoinen laite
- Oletetaan, että vuotuinen käyttöaika on 100h/a ($100/8765 = 0.0114$)
- Todennäköisyys, että otepinnat ovat paljaat 0.10

$$\mu_{\text{isä}} = 0.97$$

- syys-huhtikuussa ~ 1.0
- touko-elokuussa 0.9
- $\frac{8}{12} \cdot 1.0 + \frac{4}{12} \cdot 0.9 = 0.97$

$$\mu_{>U_{tp}} = 0.25$$

- Todennäköisyys, että altistuksen sattuessa kerroin $k = 4$ alitetaan
- paikka, kosteus, vuodenaika, jne. vaikuttavat

$$\mu_{\text{SKV}} = 0.10$$

- Sydänkammiovärinän aiheutumisen todennäköisyys riippuu sallitun rajakäyrän ylityksen suuruudesta
- Pienimmät kertoimet $k = 2$, eli 2-kertainen virta sallittuun kosketusvirtaan verrattuna, eli noin 10 % todennäköisyys

Lasketaan ensin todennäköisyys (μ_1) sille, että tarkasteltava henkilö on satunnaisella hetkellä kontaktissa laitteeseen, se. olosuhteet kaikilta osin ovat vaara-altistuksen edellytysten mukaiset (tässä ei vielä oteta kantaa kosketusjännitteen yhtäaikaaisuuden todennäköisyyteen). Nyt siis tapaukselle, jossa lisäresistansseja ei ole mukana

$$\mu_1 = \mu_{\text{kontakti}} \cdot (1 - \mu_{\text{isä}}) \cdot \mu_{>U_{tp}} \cdot \mu_{\text{SKV}} = 42.75 \cdot 10^{-9}.$$

Jos lisäresistanssit ovat mukana, mittaustulosten perusteella (Taulukko 4) voidaan sanoa, ettei U_{tp} -ylitystä käytännössä esiinny. Yllä oleva luku μ_1 kertoo siis todennäköisyyden sille, että jollain satunnaisella hetkellä joku tietty yksittäinen ("valittu") henkilö on kiinni kosketusvirtapiirissä ja olosuhteet ovat muutenkin sellaiset, että vaaraa voisi aiheutua ja altistus sattuessaan todella edelleen realisoituisi sydänkammiovärinä (SKV).

Edellisen perusteella voidaan laskea todennäköisyys μ_2 sille, että vähintään yksi jonkun tietyn muuntopiirin asiakkaita on vaaralle altistavissa olosuhteissa,

$$\mu_2 = 1 - (1 - \mu_1)^{N_{\text{as_per_mp}}} = 1 - (1 - 42.75 \cdot 10^{-9})^{10} = 0.427 \cdot 10^{-6}.$$

Jotta sitten itse altistus siis voisi tapahtua, on myös vian satuttava samaan aikaan. Jos tunnetaan tämän työn kannalta keskeisten $4U_{tp}$ muuntamoiden lukumäärä ja toisaalta tiedetään se, miten monta vastuksetonta maasulkuvikaa yhteen tällaiseen muuntamoon vuosittain tulee, voidaan arvioida miten monta altistusta vuosittain on odotettavissa koko ko. muuntajapopulaation osalta.

$$N_{4U_{tp_mmo}} = 10e3$$

- koko maassa 100e3 muuntamo [Lak08¹¹]; $4U_{tp}$ -muuntamoiden osuus 10 %

$$\lambda_{EF} = 0.1/a$$

- Muuntamolla sattuvien vastuksettomien maasulkuvikojen lukumäärä vuositasolla
- Esim. Jos tarkastellaan koko keskijänniteverkkoa ja kaikkia pikajälleenkytkentöjä (PJK)
 - 150 tkm, 100e3 mmo & 30 PJK/100km/a
 - 45e3 PJK/a $\rightarrow \sim 0.5$ PJK/a/mmo
 - Valtaosa ei muuntamoilla
 - valtaosa ei nolla-ohmisia

Nyt siis näihin muuntopiirin kokosiin yksiköihin tehdään

$$N_{maaviat} = N_{4U_{tp_mmo}} \cdot \lambda_{EF} = 1000/a$$

toisistaan riippumatonta toistoa. Lopuksi, todennäköisyys, että vähintään yksi näistä toistoista osuu sellaiseen hetkeen, jolloin joku henkilö muuntopiirien vaikutusalueilla on kaikilta osin valmis altistumaan vaaraa aiheuttavalle kosketusjännitteelle, voidaan laskea

$$\mu = 1 - (1 - \mu_2)^{N_{maaviat}} = 0.00043/a.$$

Edelleen, odotusarvo ajalle, joka pitää odottaa, että edes yksi tällainen onnistunut yhteensattuma, joka johtaa sydänkammiovärinänsä tapahtuu, on 2300 vuotta. Vastaavasti voidaan laskea odotusarvo ajalle, jona yksi altistus on odotettavissa ja tämä saa arvon 230 vuotta.

7.3.2 Kaapeliviati

Jos kaapelointi tulevaisuudessa voimakkaasti yleistyy, voitaneen olettaa, että esim. salamaniskujen aiheuttamia maasulkuja ei muuntamoilla enää käytännössä esiinny. Tällöin kuitenkin tilalle tulee uusi vikatyyppe, joka tässä tapauksessa voidaan ajatella aiheuttavan samankaltaisen vaaratilanteen; nimittäin muuntamo syöttävän kaapelin yksivaiheiset maasulkuviati. Tällöinhän voidaan ajatella, että jokainen tällainen vika myös aiheuttaa maan osalta (kosketussuojat) galvaanisesti yhteen kytkettyyn verkkoon leviävän maadoitusjännitteen (vrt. luvun 9 simulointitulokset laajalle maadoitukselle) ja edelleen yhdistettyjen PJ- ja KJ-maadoitusten tapauksessa PJ-verkkoon siirtyvän kosketusjännitteen. Erittäin pitkillä matkoilla myös kosketussuojajohtimien pitkittäisresistansseilla on toki merkitystä ja sikäli vaikutus ei tarkkaan ottaen ole aivan globaali koko yhteen kytketyn kaapeliverkon osalta.

Lähdetään hakemaan tämän riskin ylärajaa siitä olettamasta, että koko maan koko KJ-verkko kaapeloidaan ja puistomuuntamoista 15 % rakennetaan $4U_{tp}$:n mukaan. Ajatellaan, että yksittäisen maasulkuvian vaikutus ulottuu yksittäiseen johtolähtöön ja yksittäisellä johtolähdöllä on keskimäärin 20 muuntamo. Koko maassa KJ-verkkoa on (olettaen sama verkon pituus, kuin nykyisellä avojohtoverkolla, joka oletus sinänsä tarkkaan ottaen on hieman kyseenalainen [Saa13]) 150 tkm ja muuntamoita $100e3$, jolloin keskimääräiseksi johtolähdön pituudeksi saadaan

$$\frac{150 \cdot 10^3 \text{ km}}{100 \cdot 10^3} \cdot 20 \frac{\text{mm}}{\text{johtolähtö}} = 30 \frac{\text{km}}{\text{johtolähtö}} \text{ ja}$$

johtolähtöjen määräksi koko maassa vastaavasti

$$\frac{150 \cdot 10^3 \text{ km}}{30 \frac{\text{km}}{\text{johtolähtö}}} = 5000 \text{ johtolähtöä.}$$

Jos kaapeliverkon vioista puolet oletetaan olevan yksivaiheisia ja vikataajuudeksi oletetaan 0.8 vikaa/100km/a, kokee tällainen 20 muuntamon ryhmä (johtolähtö) siis

$$0.8 \frac{\text{vikaa}}{100 \text{ km} \cdot \text{a}} \cdot 0.30 \frac{100 \text{ km}}{\text{johtolähtö}} \cdot 50\% = 0.12 \frac{\text{vikaa}}{\text{johtolähtö} \cdot \text{a}}$$

Jokainen vika aiheuttaa nyt siis samanaikaisesti maadoitusjännitteen kaikkien johtolähdön muuntamoiden kohdalle (erona pylväsmuuntamoihin, joiden ajatellaan olevan maadoitusten osalta saarekkeita). Lasketaan seuraavaksi koko maan koko $4U_{tp}$ -muuntamopopulaation kokema vikamäärä, jossa yksittäisten tapahtumien ajatellaan yksittäisten mahdollisesti altistuvien henkilöiden kohdalla olevan toisistaan riippumattomia. Tällöin $4U_{tp}$ -muuntamoihin kohdistuvien tapahtumien lukumäärä voidaan arvioida,

$$N_{maaviat} = 5000 \text{ johtolähtöä} \cdot (20 \cdot 15\%) \cdot 0.12 \frac{\text{vikaa}}{\text{johtolähtö} \cdot \text{a}} = 1800 \frac{\text{vikaa}}{\text{a}}$$

Tällöin voidaan, samalla tavalla, kuin pylväsmuuntamoiden tapauksessa, laskea odotusarvot sydänkammiovärinään johtaneille altistuksille

$$\mu = 1 - (1 - \mu_2)^{N_{maaviat}} = 0.000769 \cdot \frac{1}{a} \Rightarrow \frac{1}{\mu} = \underline{1300 a}.$$

Vastaavasti, altistuksia, jotka eivät kuitenkaan johda sydänkammiovärinään on odotettavissa kerran 130 vuodessa.

7.3.3 Maaperä

- Moreenit 53 %
 - Silttimoreeni 15 %
 - Hiekkamoreenia 75 %
 - Soramoreenia 10 %
- Suot 30 %
- Savi 9 %
- Järvet 10 %
- Kalliot 3 %
- Hiekka ja muut lajittuneet 2.5 %

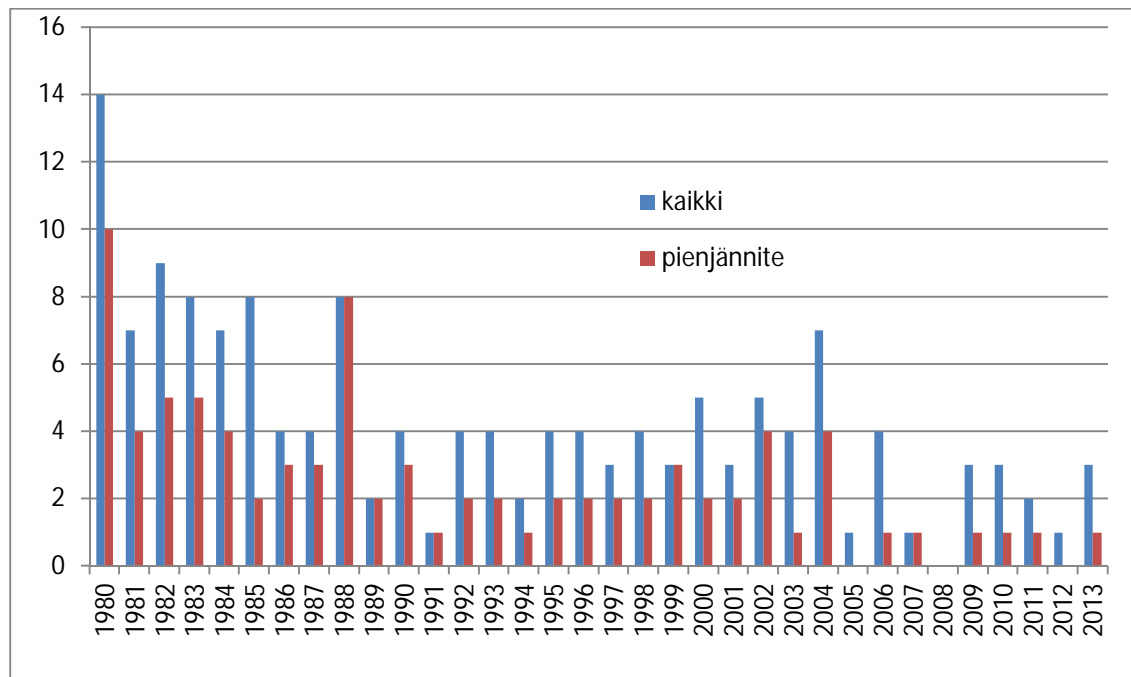
Kosketusjänniteturvallisuuden kannalta ydinkysymys on, että miten usein $4U_{tp}$ muuntamo yhdistyy hyvin johtavaan asiakkaan maahan (pieni ρ jalkojen alla). Yleisesti ottaen, alueilla joissa maan johtavuus on hyvä, saattaa olla, että $4U_{tp}$ -käytäntöön ei tarvitse turvautua niin usein, kuin huonommin johtavan maaperän alueilla. Riskin laskeminen suoraan edellä esitetyillä maaperätyyppien osuuksilla painottamalla saattaa siis antaa riskin laajuudesta hyvin konservatiivisen arvion. Olennaista on se, että miten mosaiikkimaisesti eri maaperätyypit esiintyvät ja toisaalta, onko pihamailla käytössä esim. puutarhan takia johtavampia maalajeja, kuin muuten ympäristössä.

Toisaalta tulee muistaa myös se, mitä aikaisemmin teoreettisen tarkastelun yhteydessä keskusteltiin maakontaktiresistanssin laskemisesta maaperän johtavuuden avulla; hyvin usein maaperää peittää esim. nurmikko, varvikko tms. Näin ollen sen sijaan, että maaperäolosuhteita kosketusjänniteturvallisuuden osalta tarkasteltaisiin vaikkapa maaperäkartoja tutkimalla, olisi todellisia olosuhteita parempi tutkia suoraan esimerkiksi edellä kerrotulla resistanssimittauksella. Kyseinen mittaus olisi sangen nopea toteuttaa hyvinkin suurelle otokselle. Tällöin riskiä arvioitaessa merkitsevä todellinen olosuhde kaikkine vaikuttavine tekijöineen tulisi suoraan selvitettyä.

Yleensä ottaen, ongelmallisia kohteita voisivat olla esimerkiksi järvien rannat mökeillä, mutta toisaalta rantavedessä oleilu keskittyyne Suomen olosuhteissa lämpimän veden aikaan, mikä seikka kaventaa todennäköisyyttä altistumiselle merkittävästi. Samoin muukin avojaloin liikuskelu esimerkiksi savimailla tai märällä turpeella lienee varsin kesäinen ilmiö. Edellä esitetyssä riskin arvioinnissa tällaiset seikat voidaan ottaa huomioon esimerkiksi lisäresistanssien mukana olemisen todennäköisyydessä ($\mu_{iisä}$), jonka voidaan talvikuukausina olettaa olevan käytännössä 1.0 ja kesäkuukausina hieman tämän alle. Käytettyä arvoa 0.97 voitaneen pitää varsin konservatiivisena arviona.

8 Kuolemaan johtaneet pienjännitesähkötapaturmat 1980 - 2013

Vuosina 1980 - 2013 sattui 85 kuolemaan johtanutta sähkötapaturmaa pienjännitteellä (Kuva 20) [Tuk14]. Kaikista näistä löytyy lyhyt kuvaus Liitteestä 1.

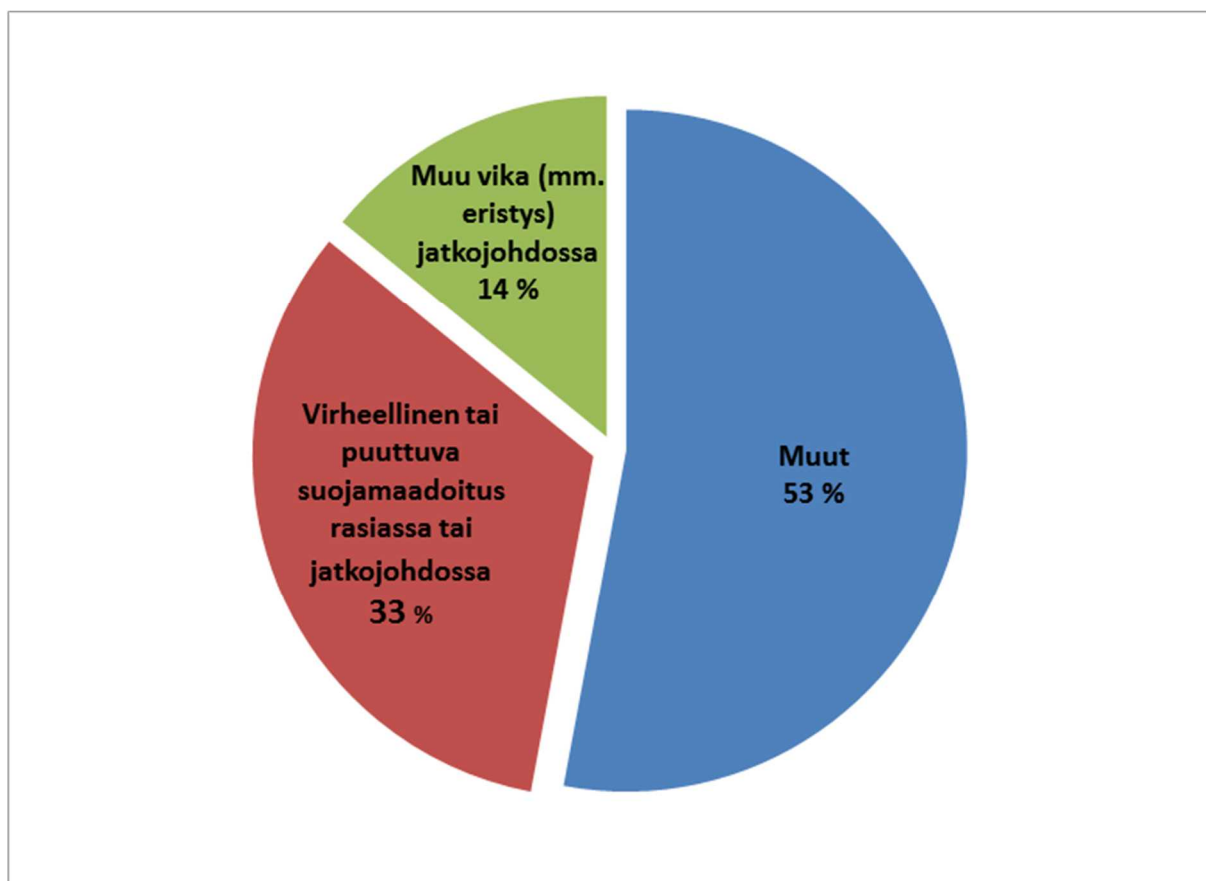


Kuva 20. Kuolemaan johtaneet sähkötapaturmat vuosittain (1980.2013)

Läpikäydyistä tilastoiduista kuolemaan johtaneista pienjännitetapaturmista vuosilta 1980 – 2013 ei löytynyt viitteitä siirtyvien kosketusjännitteiden aiheuttamista kuolemantapauksista.

Sen sijaan aineistosta löytyi runsaasti tapauksia, jossa esimerkiksi jatkojohtojen maadoitus oli virheellisesti kytketty (Kuva 21), jolloin jännite siirtyi suojamaadoitetun laitteen runkoon aiheuttaen kuolemaan johtaneen tapaturman. Nämä liittyvät tapauksiin, joissa vikavirtasuojaa ei ole ollut käytössä ja näin ollen kehon yli vaihejännitteestä aiheutunut jännite on päässyt vaikuttamaan pidemmän aikaa. Sallittu kosketusjännite jatkuvassa tilassa on noin 75 V. Tällöin, kuoleman aiheuttanut tyhjäkäyvä jännite on ollut karkeasti ottaen noin kolminkertainen sallittuun kosketusjännitteeseen verrattuna. Useissa tapauksissa uhri on ollut esim. paljain jaloin tai seissyt vaikkapa rantavedessä. Tällöin siis virtapiirin muut resistanssit eivät ole riittäneet suojaamaan tätä noin kolminkertaista tyhjäkäyvää kosketusjännitettä vastaan. Todellista henkilöriskiä ajatellen olisi tärkeää tietää em. kuolemantapausten ohella, että miten paljon kaiken kaikkiaan sähköiskuja väestöön kohdistuu.

Tämän tutkimuksen kannalta kiinnostavia tapauksia ovat esim. liitteen 1 tapaukset: 9, 11, 13, 19, 20, 27, 29, 31, 34, 38, 40, 44, 50, 54, 69, 70, 73, 81 ja 82. Edellä luetelluissa tapauksissa useimmiten jännitteenä on siis ollut vaihejännite jalkojen alla olevan maan ja kosketeltujen jännitteisten osien välillä. Maadoitusjännite sen sijaan ei saa aikaan jännite-eroa galvaanisesti yhteydessä olevien maadoitettujen osien välille. Näin ollen edellä mainittuja tapauksia ei sellaisenaan suoraan tule käyttää maasulkuvikojen aiheuttaman kosketusjänniteriskin arviointiin eri olosuhteissa. Erittäin tärkeää on myös huomata, että ko. tapauksissa vaarajännite on usein ollut kosketeltavissa huomattavan pitkän ajan.



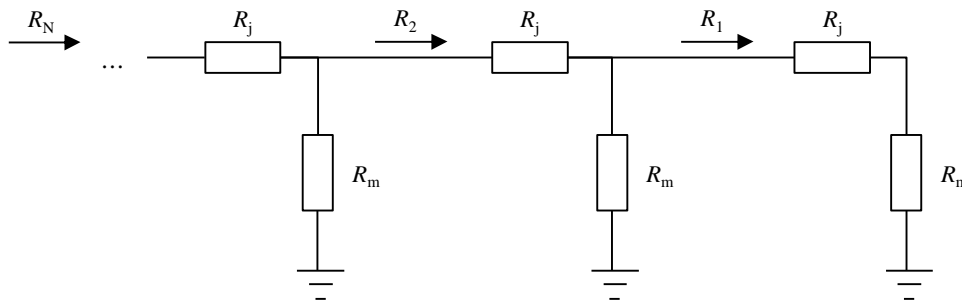
Kuva 21. Kuolemaan johtaneet pienjännitteen aiheuttamat tapaturmat syyn perusteella

9 Laaja maadoitus

9.1 Ketjumaiset maadoitukset

Laajalta maadoitukselta vaaditaan verkkomaista rakennetta, joka liittyyneen koko maadoitusjärjestelmän luotettavuuteen suhteessa yksittäisiä vioittuneita maadoituksia yhdistäviä johtimia vastaan ja myös siihen, että silmukointi pienentää tehokkaasti maadoitusvastusta. Toisaalta, mikäli yhteydet muodostuvat keskijännitekaapeleiden kosketussuojajohtimista, on esiin tuotu näkökohtia, joiden mukaan tällainen katkeama ilmenisi käytännössä aina kaapeli- tai päätevikana. Tällöin voitaisiin myös nauhamaisia maadoitusketjuja mahdollisesti käsitellä yhtenä kokonaisuutena, jossa koko yhteen kytketystä maadoitusjärjestelmästä mitattaisiin vain osa yksittäisistä maadoituksista ja loppujen osalta todettaisiin yhteyden näihin mitattuihin olevan riittävän pieni-vastuksinen.

Tarkastellaan tapausta, jossa erillisten maadoituselektrodien yhdistämiset tehdään esim. Al-25mm² johtimella, jonka resistanssi on 1.2 Ω/km. Jos yhdistävä johdin on siis vain tuo alumiini, eikä kaapelin rinnalla kulje kupariköyttä, maadoittuminen tapahtuu vain rakennettujen maadoitusten kohdalta (muuntamot, erotinasemat, PJ-verkon maadoitukset, jne.). Tällaisen ketjumaisen maadoitusjärjestelmän resistanssi voidaan laskea rekursiivisesti, tarkasteltavasta pisteestä katsoen kauimmaisesta päästä aloittaen. Haarautuvien (säteittäisten) maadoitusverkkojen tapauksessa tai jos vika on keskellä ketjua, voidaan tilannetta käsitellä rinnan kytkeytyvinä osa-ketjuina.



Kuva 22. Ketjumaisen maadoituksen kokonaisimpedanssi

Edellä esitetyn kuvan perusteella laskettuna kokonaisimpedanssi saadaan laskettua,

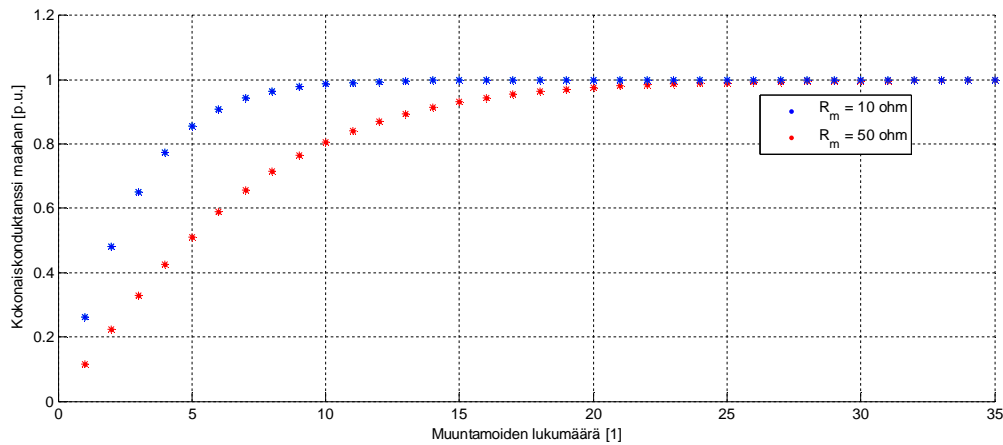
$$R_1 = R_m + R_j$$

$$R_2 = R_j + \frac{R_m R_1}{R_m + R_1}$$

...

$$R_N = R_j + \frac{R_m R_{N-1}}{R_m + R_{N-1}}$$

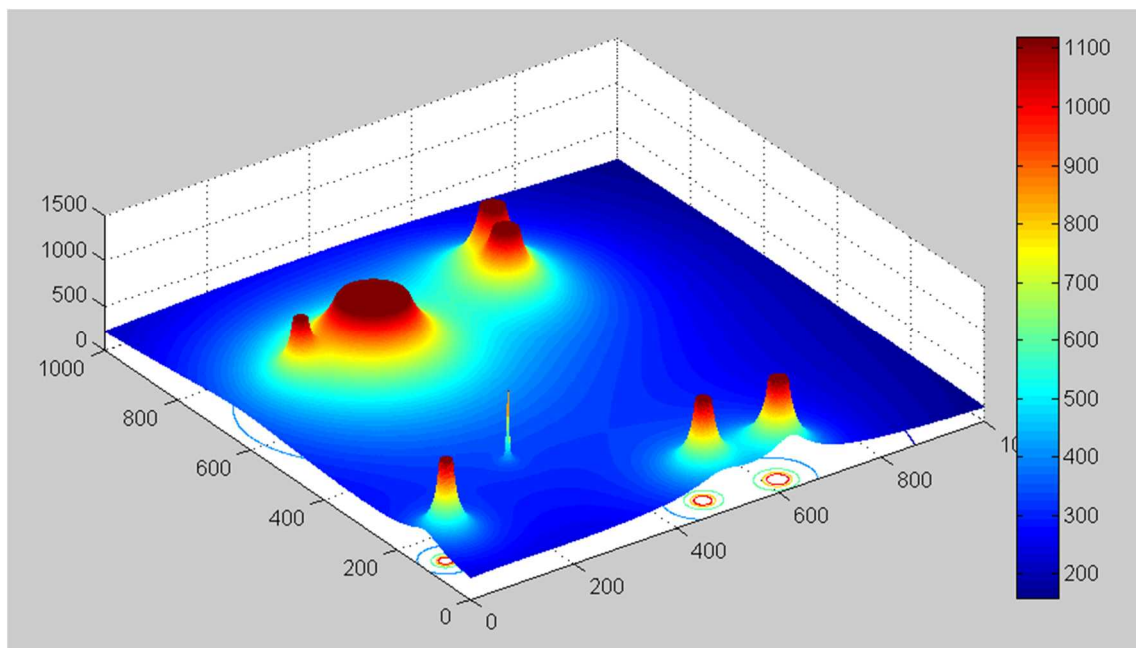
Kuva 23 esittää yhden suoran maadoitusketjun kokonaiskonduktanssia ($1/R$) maahan suhteessa äärettömän pitkän ketjun kokonaiskonduktanssiin ketjuun kuuluvien maadoitusten lukumäärän funktiona tarkasteltuna ketjun päästä. Kuten huomataan, vaikuttaa yksittäisten elektrodien maadoitusresistanssi siihen, kuinka kaukana olevat maadoitukset näkyvät kokonaiskonduktanssissa. Mikäli yksittäiset maadoitukset ovat hyviä (10 Ω), saavutetaan täysi johtavuus maahan jo noin 10 muuntamon ketjulla, jonka jälkeen siis ketjun pidentäminen ei enää paranna kokonaisjohtavuutta maahan. Kymmenen muuntamon ketju tarkoittaa esimerkin tapauksessa 4.5 km matkaa.



Kuva 23. Ketjumaisen maadoitusjärjestelmän kokonaiskonduktanssi maahan suhteessa äärettömän pitkään maadoitusketjuun ketjutettujen muuntamoiden lukumäärän funktiona. Muuntamoiden välinen etäisyys on 0.5 km (0.6 Ω) ja käyrät on laskettu kahdella eri maadoitusresistanssilla yksittäisille maadoituselektrodeille (10 Ω ja 50 Ω).

9.2 Potentiaalın jakautuminen maassa

Kuva 24 esittää maapotentiaalın jakautumista esimerkkitapauksessa, jossa yhteen kytketty maadoitusjärjestelmä koostuu 8 erillisestä maadoituksesta (Taulukko 9). Yksittäisten maadoitusten vaikutukset on laskettu kaavan (1) mukaan ja summattu superpositioperiaatteen mukaan.



Kuva 24. Esimerkki kohonneen maapotentiaalın levittäytymisestä useamman maadoituspisteen tapauksessa

Taulukko 9. Esimerkissä käytetyt yksittäiset maadoituspisteet ja niiden resistanssit

x (m)	y (m)	R (Ω)
761	585	37
638	122	80
626	256	10
35	624	40
686	558	36
124	40	58
48	487	50

250

250

1000

Pinnassa olevalle puolipallolle resistanssi suhteessa kaukaiseen maahan voidaan laskea yhtälöstä [Suu06]

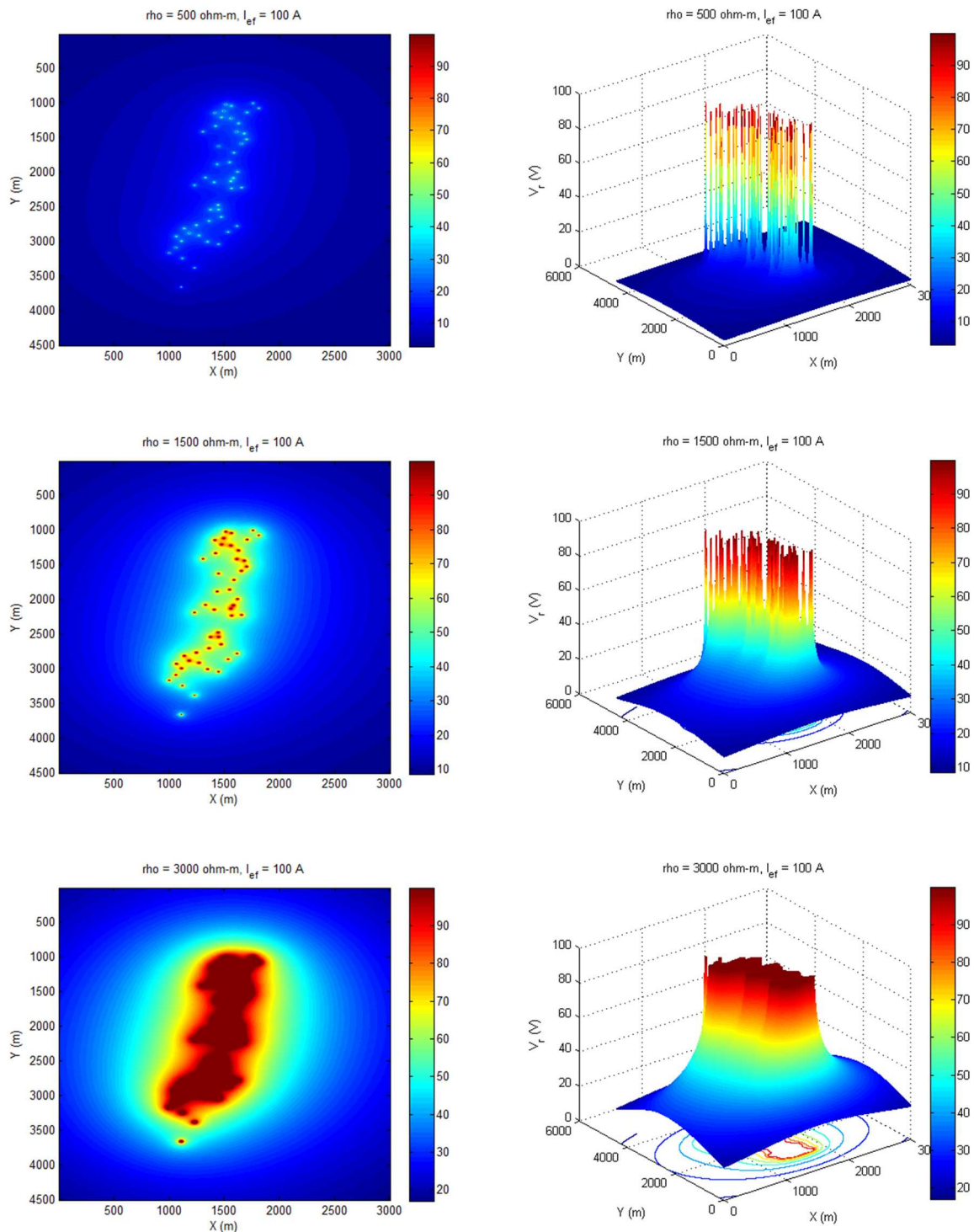
$$R_E = \frac{\rho}{2\pi r}$$

Siis esim. yllä olevan taulukon pienin arvo on 10Ω ja resistiivisyys on $3e3 \Omega\text{m}$, jolloin siis ekvivalenttisen puolipallon säteen tulee olla $D = 2r = 2 \frac{\rho}{2\pi R_E} \approx 100 \text{ m}$. Kuvassa pienintä yksittäistä maadoitusresistanssia (10Ω) vastaa isoin suppilo, jonka katkaisupinnan halkaisija on kuvan perusteella noin 100 m. Jos yleisesti minkä tahansa muotoinen elektrodi mallinnetaan puolipallolla, määräytyy puolipallon säde maadoitusjännitteen mukaan. Toisin sanoen potentiaalisuppilo ”katkaistaan” tuon jännitteen kohdalta.

Seuraavat kappaleet 9.2.1 - 9.2.3 esittävät laskentatuloksia kolmesta eri kohteesta, joista kaksi ensimmäistä ovat luonteeltaan taajamia ja kolmas on enemmän haja-asutusalueen ketjumainen, mutta kaapelin kosketussuojalla yhdistetty maadoitusverkko. Tuloksista voidaan havaita, että maaperän resistiivisyydellä on suuri vaikutus siihen, miten laajalle kohonnut maapotentiaali levittäytyy. Jos maan johtavuus on hyvä, on maahan syötetyn virran aiheuttama häiriö maan potentiaalientässä hyvin paikallinen. Myös muuntamoiden välimatkalla on suuri vaikutus, kuten nähdään verrattaessa kolmatta esimerkiverkkoa kahteen ensimmäiseen; siinä huonosti johtavallakin maaperällä yksittäiset maadoitukset alkavat erottua yhä enemmän saarekkeenomaisesti.

Kuvissa ei ole huomioitu maadoituksia yhdistävän johtimen pitkittäistä resistanssia (vrt. edellinen kappale). Jos tämä vaikutus huomioitaisiin, näyttäisi erityisesti kolmannen esimerkin potentiaalikuva erilaiselta, riippuen maasulkuvirran syöttökohdasta. Tässä viimeisessä esimerkissä maadoitukset ovat levittäytyneet suhteellisen laajalle alueelle ketjumaisesti. Tällöin, jos maasulkuvika sattuu esimerkiksi jonkin haaran päässä, eivät yhteenkytketyn maadoitusjärjestelmän toisen reunan maadoitukset enää käytännössä näy vikapaikkaan. Kahden ensimmäisen esimerkin tapauksessa maadoitusverkot ovat hyvin silmukoituneita, jolloin edellisen kappaleen esittämä laskentatapa ketjulle ei sovellu kokonaisresistanssin laskentaan.

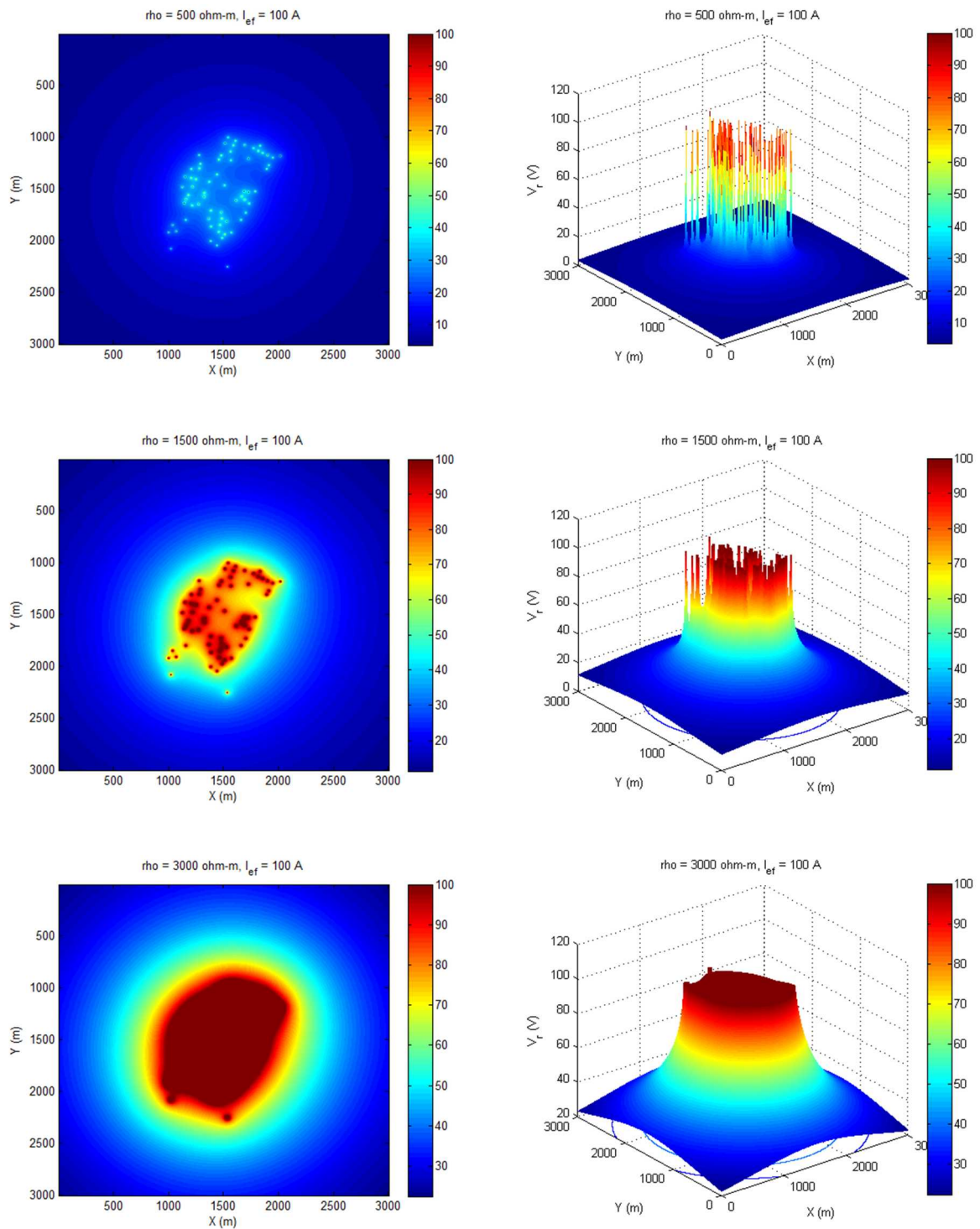
9.2.1 Kyyjärven taajama



Kuva 25. Kyyjärven taajama

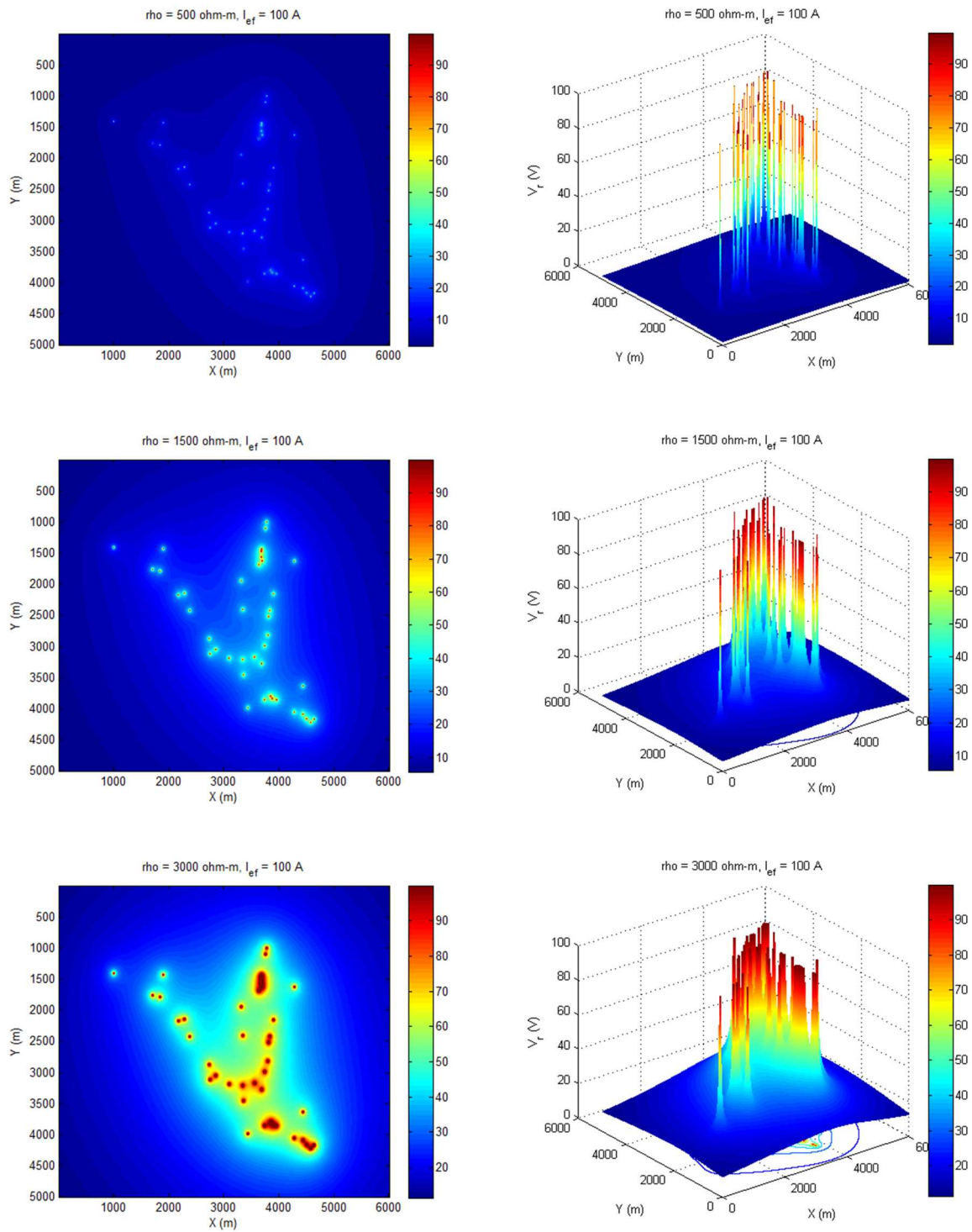
Kuva 25 esittää edellä kerrotulla tavalla laskettua maapotentiaalia esimerkki-taajamalle (Kyyjärvi), jossa kaikki alueen maadoitukset on oletettu yhteen kytketyiksi (KJ-kaapelin kosketussuojien kautta). Kuvat on laskettu eri maaperän resistiivisyyksille (500 Ωm , 1500 Ωm ja 3000 Ωm), kuitenkin olettaen sama kokonaismaadoitusresistanssi (1 Ω) ja maasulkuvirta (100 A) kaikissa tapauksissa.

9.2.2 Haapajärven taajama



Kuva 26. Haapajärven taajama

9.2.3 Konttimäki



Kuva 27. Konttimäki

10 Johtopäätökset

Kosketusjännitettä ajatellen mahdollisesti vaaraa aiheuttaviksi vioiksi tunnistettiin keskijänniteverkon 0-resistanssin maasulkuviat muuntamon maadoitukseen tai muuntamoaa syöttävän kaapelin kosketussuojaan. Jotta henkilö altistuisi vaaralle, tulee tämän olla jalkojen kautta riittävän hyvässä maakontaktissa ja toisaalta käsien kautta kosketuksissa paljaisiin PEN-johtimen kautta maadoitettuihin osiin yhtä aikaa maasulkuvian kanssa.

Niin sanotun tyhjäkäyvän kosketusjännitteen havaittiin siirtyvän suurelta osin pienjänniteverkon puolelle. Sen sijaan kosketusjännitealtistumisen vaaraa arvioitaessa on tärkeää huomioida myös maakontaktin resistanssi, johon vaikuttaa ennen kaikkea maaperän johtavuus kyseisen paikan välittömässä läheisyydessä ja varsinaisen maa-aineksen peittävä kerros (nurmikko, varvikko, karike, sora jne.). Mahdolliset muut lisäresistanssit, kuten jalkineet ja käsineet toimivat niin ikään tehokkaina suojina kosketusjännitealtistusta ajatellen.

Tutkimuksessa mitattujen kylpyhuoneiden osalta voidaan todeta niiden olevan täysin turvallisia maasulkujen aiheuttamia kosketusjännitealtistuksia silmällä pitäen, myös $4U_{tp}$ -muuntamoiden tapauksessa. Tietyissä olosuhteissa pihamaalla $4U_{tp}$:tä noudattaen voivat henkilöt teoriassa altistua standardissa IEC/TS 60479-1 sallitun riskirajan ylittävälle kosketusjännitteille. Kuitenkin arvioitaessa todennäköisyyttä sille, että kaikki edellä esitetyt vaatimukset vaaralliselle altistumiselle täyttyvät, vaikuttaisi siltä, että riski on huomattavan pieni.

Konservatiivinen arvio standardissa määritellyn hyväksyttävän henkilöriskin ylityksistä (sallitun kosketusjännitteen ylitys) koko maassa on avojohtoverkon muuntamoiden osalta yksi tapaus 230 vuotta kohti ja kaapelivikojen osalta yksi tapaus 130 vuotta kohti. Sydänkammiovärinä johtavien altistusten määräksi arvioitiin vastaavasti yksi tapaus 2300 vuotta kohti avojohtoverkoille ja yksi tapaus 1300 vuotta kohti täysin kaapeloidulle keskijänniteverkolle. Kaapelivikojen osalta arvio on konservatiivinen yläraja laskettuna oletuksella, että koko maan koko keskijänniteverkko kaapeloitaisiin.

Tutkimuksessa käytiin läpi myös kuolemaan johtaneet pienjännitesähkötapaturmat vuosilta 1980-2013. Aineistosta ei löytynyt viitteitä siirtyvän kosketusjännitteen aiheuttamista kuolemantapauksista, joka osaltaan verifioi edellä esitettyä arviota siitä, että vaikka riski teoriassa on olemassa, on se kuitenkin hyvin pieni.

Mahdollisia keinoja, joilla vastuksettomia maasulkuja muuntamoilla, ja siten henkilöriskiä, voitaisiin edelleen vähentää, ovat suojakipinävälien käytöstä luopuminen $4U_{tp}$ -muuntamoilla sekä tehokkaan eläinsuojauksen käyttäminen.

Maadoitusjärjestelmän koostuessa ketjumaisesti yhteenkytketyistä maadoituksista, maadoituksia yhdistävien johtimien pitkittäisresistanssien ja maadoitusresistanssien suhde vaikuttaa vikapaikasta tarkasteltavassa kokonaismaadoituskonduktanssissa näkyvien viereisten maadoitusten lukumäärään. Jos esimerkiksi yksittäisten 10Ω maadoitusten sähköinen välimatka on 0.6Ω , ei maadoitusketjun pidentäminen 10 maadoituksesta eteenpäin enää käytännössä pienennä vikapaikasta nähtyä kokonaismaadoitusresistanssia. Yksittäistä maadoituselektrodia tarkasteltaessa maaperän johtavuudella on vaikutusta maadoitusvirran synnyttämän potentiaalisuppilon jyrkkyyteen. Tällöin, laajaa maadoitusta tarkasteltaessa, saattaa olosuhteista riippuen taajamissakin maadoitusten väliin syntyä merkittäviä potentiaalkuoppia. Kaiken kaikkiaan, laajan maadoituksen käsitteeseen liittyvien moninaisten näkökohtien vuoksi, asian huolellisempi lisäselvittäminen saattaisi olla tarpeen.

11 Lähteet

- [Chi99] Lee, C.-H.; Meliopoulos, S., "Comparison of touch and step voltages between IEEE Std 80 and IEC 479-1," Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- , vol.146, no.6, pp.593,601, Nov 1999
- [God99] Godlewski, J. R.; Purdy, G. T.; Blattner, C. J., "Electrical resistance of work shoes," Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE , vol.2, no., pp.523,525 vol.2, 11-16 Apr 1999
- [Iec05] IEC/TS 60479-1, "Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects", Edition 4.0, 2005-07
- [Lak08] Lakervi, E., "Sähkönjakeluteknikka," Otatieto, 2008.
- [Pal73] Palva, S., et.al., "HSS-työryhmän loppuraportti," 1973.
- [Saa13] Saarijärvi, E., "Geographical perspectives on the development of power distribution systems in sparsely populated areas," väitöskirja, Aalto-yliopisto, 2013,
<http://lib.tkk.fi/Diss/2014/isbn9789526055053/isbn9789526055053.pdf>
- [Saa14] Saarelma, O., "Sähkön aiheuttamat vammat," Lääkärikirja Duodecim (22.4.2014, sähköinen),
http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00334
- [Sep11] Seppänen, J., "Ukosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon käyttömahdollisuudet Suomessa" diplomityö, 2011.
- [Sfs05] SFS 6001 + A1
- [Suu06] Suuronen, M.; "Maadoituksen mittaustapojen soveltuvuuden arviointi," tutkintotyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2006.
- [Tom12] Toman, P.; Dvorak, J.; Orsagova, J.; Topolanek, D., "Using of additional earthing of affected phase for 38 limiting of the touch voltage during earth faults in MV large compensated networks," Developments in Power Systems Protection, 2012. DPSP 2012. 11th International Conference on , vol., no., pp.1,5, 23-26 April 2012
- [Tuk14] Tukes, "Kuolemaan johtaneet sähkötapaturmat 1980-2013,"
<http://www.tukes.fi/fi/Rekisterit/sahko-ja-hissit-rekisterit/sahkotapaturmat/>

Liite 1. Kuolemaan johtaneet pienjännitesähkötapaturmat vuosina 1980-2013

	AIKA	Sähköiskun aiheuttaja tai tapahtuman puitteet	SYY	
1	2013-9	LVI-asentaja sai sähköiskun lämminvesivaraajasta	Väärin kytketty pistoliitin teki rungon jännitteiseksi	x
2	2011-8	Itse tehty kosketussuojaamaton valaisin	Syy tuntematon	
3	2010-9	Metallinen jatkojohtokela pihalla	Virheellinen jatkojohdon kytkentä	x
4	2009-10	Sähköisku jatkojohtokelasta		
5	2007-6	Keittiöremontin yhteydessä sähköisku kädestä käteen	Vahinko	
6	2006-8	Autoa korjattaessa	Kompressorin kuori todennäköisesti ännitteinen	x
7	2004-6	Poran käyttö rakennettaessa terassia vesisateessa	Istukan kiristin kiinni haurastuneessa liitäntäjohdossa	
8	2004-7	Asentajalle sähköisku liittimestä irronneesta PEN-johtimesta pylväässä sitä takaisin kytkettäessä.	PEN-johdin tuli jännitteiseksi kesäasunnon kuormitusten kautta	
9	2004-8	Isku painepesurin letkusta mattoja pestessä	Vaihejohdin kosketti maadoitusliuskaa viallisessa jatkojohdossa. Sulake ei toiminut, koska viallisen johdon edellä oli kaksinapainen maadoittamaton jatkojohto.	x
10	2004-9	Leikkuupuimuria korjattaessa pihamaalla	Leikkuuterä vioitti käsivalaisimen johtoa, mikä teki puimurin rungon jännitteiseksi	
11	2003-8	Asuntovaunun vetoaisasta sähköisku	Koko asuntovaunun runko jännitteinen. Syöttävässä pistorasiassa ”nollaus” vaihejohtimeen.	x
12	2002-5	Iäkäs nainen sai sähköiskun liettä korjattaessaan ja kaatui ja loukkasi itsensä	Sairaalaan kaatumisvammojen takia ja kuoli siellä. Syy osittain tuntematon.	
13	2002-6	Sähköisku asennettaessa vesipumppua laiturilla	Pumppu oli kytketty kesämökin maadoittamattomaan pistorasiaan	x
14	2002-7	Maalaustyö alumiinitikkailla ulkona	Kosketus jännitteeseen paljaaseen johtimeen	
15	2002-8	Vaihejännitettä syötettiin maahan ruuvimeisseleillä omatekoisessa myyrien karkotuslaitteessa	Kosketti vahingossa jännitteisiä osia	
16	2001-7	Sähköisku kosketettaessa samanaikaisesti henkilönostimen runkoa ja metallista mattotelinettä	Jännite pääsi henkilönostimen runkoon väärin kytketystä pistorasiasta	x
17	2001-8	Sähköhitsauslaitteesta jännite (80 V, 50 Hz) käsien välille	Juuttunut hitsauspuikko ja hitsauskohteen maadoituksen irtoaminen	
18	2000-6	Maatalouslomittaja sai sähköiskun rikkinäisestä valokatkaisijasta	Kosketeltavia jännitteisiä osia	
19	2000-8	Kolhiintunut sisäkäyttöön tarkoitettu	Jännite ensin vian takia toisiokäämin	

		hitsauslaite oli kostunut sateessa ja eristys heikentynyt	eristeeseen ja vuotovirta aiheutti tapaturman hitsauspuikosta	
20	1999-6	Sähköisku vesipumpusta	Jännitettä tuli vesipumpun runkoon pistokkeen asennosta riippuen. Todennäköisesti viallinen tai väärin kytketty liitäntäjohto.	x
21	1999-7	Ulkorakennuksen päädyn maalaus tikkailla	Luuli pienjänniteajohtoa jännitteettömäksi	
22	1999-8	Sähköisku keittiössä	Tiskipöydän lamppu irroitettu seinästä sähköjohtojen varaan	
23	1998-6	Vesijohto katkesi piikkaustyössä ja vesi peitti jatkojohtojen pistorasiat lattialla	Koskettaminen vedessä seisten vesikiertoiseen kuivauspatteriin	
24	1998-7	Sähköisku asuntovaunun sähkölämmittimestä	Syy tuntematon	
25	1997-5	Sähköasentaja kuori tikkailla johdon päätä, joka olikin jännitteinen	Samanaikainen kosketus johtaviin putkirakenteisiin. Jännitteettömäksi tekeminen ja sen toteaminen tekemättä.	
26	1997-9	Uppopumpun siirto työmaalla määrässä sokkelimontussa	Jatkojohdossa eristysvika	
27	1996-6	Sähkökäyttöisen nurmikon viimeistelijän käyttö paljain jaloin	Viallisessa jatkojohdossa johdin paljaana	
28	1996-7	Lapsi kosketti samanaikaisesti jalkalamppuun ja lämpöpatteriin	Jalkalamppuun kuori eristysvian takia jännitteinen	
29	1995-5	Sähköisku siirrettävästä vesipumpusta kesämökin pihalla	Väärin kytketty pistorasia kesämökin seinällä (virheellinen nollaus)	x
30	1995-12	Sähköisku saunan eteisessä pesukoneen rungosta	Vioittunut liitäntäjohdon pistotulppa.	x
31	1994-6	Televisioantennia suunnattaessa puutarhassa	Antennikaapeli yhdistetty suoraan jännitteeseen TV:n runkoon. Kosketussuojakondensaattori oli poistettu.	
32	1993-7	Sähköisku vesi-imurin metallikuoresta kuntosalia siivottaessa	Imurin kytkentäjohdon vioittuminen yhdisti jännitteen kuoreen. Salissa ei ollut suojamaadoituksia, vaikka lattia oli johtava.	
33	1993-9	Navetassa sähköisku porattavasta metalliputkesta	Liitäntäjohto kiertyi poraistukan ympäri ja rikkoutui, jolloin porattava putki tuli jännitteiseksi. Porakone oli suojaeristetty.	
34	1992-5	Sähköisku viallisesta uppopumpusta	Pumppu oli kytketty suojamaadoittamattomaan pistorasiaan	x
35	1992-5	Sähköisku viallisesta pesukoneesta Ahvenanmaalla	Syy tuntematon	
36	1991-7	Sähköisku vesihanasta tallissa	Lämmivesivaraajan vastus rikki ja yhteydessä runkoon. Suojamaadoitus puuttui pistorasiasta ja lisäksi putkisto maadoittamaton.	x

37	1990-6	Sähköisku kylpyammeessa	Pistorasiaan kytketty hiustenkuivain pudonnut ammeeseen	
38	1990-7	Sähköisku uppopumpusta rakennustyömaalla betonilattiaa hiottaessa	Liitäntäjohdon suojajohdin kovassa käsittelyssä mennyt poikki ja lisäksi vaihejohdin liittimessä kosketti kuoreen	
39	1990-8	Sähköisku kuivauskaapista verkkoon kytkettäessä	Pistolulpassa kytketty virheellisesti suojajohdin (ke-vi) kosketintappiin ja vaihejohdin maadoitusliittimeen	x
40	1989-5	Sähköisku metallipäällysteisestä käsisuihkusta märällä betonilattialla seisten.	Jännite pääsi putkistoon pumpun moottorin liitännän eristysviasta. Suojamaadoitus puuttui.	x
41	1989-7	Sähköasentaja jäi AMKAN kahden vaiheen väliin asunnustyössä	Johtoa ei ollut kytketty jännitteettömäksi	
42	1988-5	Sähköisku viljankuljettimen rungosta	Runko jännitteinen virheellisen kytkennän vuoksi	x
43	1988-7	Sähköisku vanhoja asennuksia purettaessa	Jännitteistä kaapelia katkaistu leikkurilla	
44	1988-7	Sähköisku vesipumpun painekeytkimestä varaajahuoneessa märin jaloin seisten	Painekeytkimen kansi avattu paineron säätoä varten. Osittainen kosketussuojaus puutteellinen.	
45	1988-7	Sähköisku viallisesta vanhasta porakoneesta nurmikolla	Suojamaadoittamaton jatkojohto viilattu suojakosketinpistorasiaan sopivaksi	x
46	1988-7	Kompastui omatekoiseen matojenetsintälaitteeseen	Kaksijohtimisen liitäntäjohdon toinen johdin kytketty maahan	
47	1988-7	Lapsi sai sähköiskun pistorasiakotelon rikkoutuneesta tulppavarokkeesta laiturityömaalla	Kansi lukitsematta. Syötön sulakkeet asennettu kuitenkin takaisin.	
48	1988-7	Sähköisku AIV-tornin puhaltimesta	Jatkojohdon virheellinen kytkentä	x
49	1988-9	Sähköisku kahden johdon eristämättömien kohtien väliltä	Koululaisen omatekoiset sähköasennukset	
50	1987-6	Sähköisku asuntovaunua liitettäessä leirintäalueen sähköverkkoon	Liitäntäjohdon molemmissa päissä suojakosketinpistolulppa (ns. urosliittimet)!	
51	1987-7	Sähköisku vedessä seisten laituria korjatessa	Porakoneen liitäntäjohdossa rikkirepeytynyt paljas kohta	
52	1987-9	Asentaja sai sähköiskun purettua AMKA-johtoa katkaistessaan	Johto oletettiin jännitteettömäksi. Sivuleikkurit eristämättömät.	
53	1986-6	Maalaustyö ulkona puutikkailla	Seinustalla AMKA ja paljas kuparijohdin	
54	1986-7	Sähköisku pesuhuoneessa betonilattialla paljain jaloin seistessä	Kylmävesipumppu ja liittyvä metalliputkisto jännitteinen. Liitäntäjohdossa suojajohdin (ke-vi) kytketty vaiheliittimeen.	x
55	1986-7	Maalaustyö rakennuksen päädyssä metallitikkailla seisten	Päädyssä AMKA ja paljas kuparijohdin	

56	1985-3	Tehtaan jännitteiseen pienjännitekeskukseen kytkettiin syöttöjä	Ilmeisesti pudonnut pultti aiheutti valokaarioikosulun. Asentajien vaatteet syttyivät. Toinen kuoli palovammoihin.	
57	1985-6	Poika leikki asuntovaunun vetoaisan päällä ja sai kuolettavan sähköiskun	Vaunu oli kytketty pistorasiaan, jonka suojakoskettimet jännitteiset jakorasian virheellisen kytkennän vuoksi	x
58	1984-1	Koululainen kokosi valourkujen rakennussarjaa	Tutki kytkentää jännite päällä. Kokemattomuus ja varomattomuus.	
59	1984-5	Sadevesikouruja asennettiin navettaan. Porakonetta syötettiin useilla jatkojohdoilla.	Sähköisku puutteellisesti kosketussuojatusta omatekoisesta jatkojohdosta	
60	1984-5	Sähköasentaja kytki sähkölämmittintä WC:ssä	Lämmittimen kuori tuli jännitteiseksi, koska kytkentäriman merkintätarra virheellinen	x
61	1984-9	Lapsi työnsi kaksi naulaa 0-luokan pistorasiaan	Asuinhuoneen pistorasiat eivät olleet turvapistorasioita	
62	1983-1	Teknillisessä oppilaitoksessa tehtiin sähkömoottorin lämpenemiskoetta	Sähköisku banaanikoskettimien paljaista osista. Jännitettä ei oltu katkaistu ennen kytkentöihin puuttumista.	
63	1983-1	Voimalaitoksen revisiotöissä asentajat irrottivat ohjauskaapelia jakokeskuksessa	Työkohdetta ei oltu erotettu jännitteettömäksi ja jännitteettömyyttä ei oltu todettu	
64	1983-4	Lapsi löysi ja työnsi irrotetun liitäntäjohdon pistorasiaan. Liitäntäjohdon päät olivat paljaat.	Kosketti jännitteisiä johdinpäitä	
65	1983-10	Sähköisku koskettaessa samanaikaisesti pesukoneen runkoa ja vesijohtoa	Pesuhuoneessa olevassa pesukoneen rungossa jännite virheellisen pistotulpan kytkennän takia	x
66	1983-12	Pistorasiaan kytketty hiustenkuivaaja putosi kylpyammeeseen. Kuivaajan kytkin 0-asennossa.	Pistorasiassa oli teksti: "Käyttö kielletty kylvyn ja suihkun aikana"	
67	1982-2	Sähköisku sähkölämmittimestä kosketettaessa samanaikaisesti metalliseen työkalupakkiin, joka kosketti vesijohtoon	Sähkölämmittimen kuoreen oli kytketty vaihejännite ja suojajohdin oli katkaistu. Luvaton asennus.	x
68	1982-6	Asuinrakennuksen maalaustyö metallitikkaila seisten pienjänniteavojohdon läheisyydessä	Horjahti ja tarttui toisella kädellä johtoon. Johtoa ei oltu tehty jännitteettömäksi.	
69	1982-7	Omatekoisen pensasleikkurin kokeilu ulkona	Samanaikainen kosketus suojaamattomiin metalliosiin ja maahan tai maahan yhteydessä oleviin metalliosiin	
70	1982-7	Betonimyllyä ja tärytintä syötettiin kahdella jatkojohdolla	Pistorasiaan kytketyssä jatkojohdossa vaihe- ja nollajohdin kytketty ristiin. Toisessa jatkojohdossa tehty nollaus, joka teki jatkojohdon rungon ja betonimyllyn rungon jännitteiseksi.	x

71	1982-9	Kesäasunnolla käytettiin itse tehtyä jatkojohtoa, jossa pistotulppa (ns. urosliittimet) molemmissa päissä	Sormet osuivat jännitteiseen pistotulppaan	
72	1981-1	Hitsausmuuntajan jatkojohdon kytkentää tutkittiin. Jatkojohdossa pistorasiapäässä oli tehty nollaus	Sähköisku joko jatkojohdon jännitteisestä kuoresta tai avonaisista vaiheliittimistä vaihejohtimeen	x
73	1981-7	Veneen päällä olevan ruokoleikkurin hitsaaminen vedessä seisten	Mahdollisesti sähköisku hitsausmuuntajan tyhjäkäyntijännitteestä	
74	1981-7	Sähköisku vapaa-ajan asunnon pihalle pudonneesta pienjänniteavojohdosta	Teräsjohtojen ruostuminen ja kova tuuli pudottaneet johdon	
75	1981-12	Sähköasentaja tutki sulakkeiden palamisen syytä saneerauskohteessa.	Mahdollisesti sähköisku metalliputkesta betonilattialla seisten: metalliputken sisällä piikkauksesta vioittunut MMJ-johdon vaihejohdin teki putken jännitteiseksi	
76	1980-2	Sähköisku hitsausmuuntajan rungosta	Liitosjohdossa suojajohdin oli kytketty pistokytkimessä vaiheeseen	x
77	1980-6	Asentaja kuori pylväässä jännitteisen AMKA-johtimen vaihejohtinta	Unohti, että piti odottaa ilmoitusta jännitteettömyydestä	
78	1980-6	Vanhan maalauksen puhdistaminen porakoneeseen kytketyllä teräsharjalla	Kosketus pienjännitteiseen avojohdosta olkapäällä ja toinen käsi AMKAn ripustuskoukussa	
79	1980-6	Instrumenttiharjoittelija sovitti kiinnityslistaa ohjaustaulun taakse yksin	Kosketti vahingossa jännitteisiä osia	
80	1980-6	Sähköisku betonin vastaanottosiilon rungosta	Pistokytkimen virheellinen kytkentä teki rungon jännitteiseksi	x
81	1980-8	Lapsi sai sähköiskun betonimyllyn rungosta pihalla	Mylly oli kytketty pistorasiaan, jonka suojakoskettimet jännitteiset virhekytkennän vuoksi	x
82	1980-8	Sähköisku maidonjäähdyttimen rungosta	Jäähdyttimessä eristysvika. Liitäntäjohdossa ei ollut suojamaadoitusjohtinta, vaikka siinä oli suojamaadoituspistotulppa.	x
83	1980-12	Kaapeliarinnan asennus junavaunujen korjaushallissa	Arina osui nosturin jännitteisiin laahausjohtimiin	
84	1980-12	Lapsi työnsi sähkövatkaimen vispilän 0-luokan pistorasiaan.	Kosketti samalla lämpöpatteriin	
85	1980-12	Sähköisku suojamaadoitetusta porakoneesta kosketettaessa samanaikaisesti metallikarsinaa	Omatekoisen jatkojohdon suojakoskettimet jännitteiset	x

x) jatkojohdon tai kiinteän asennuksen virheellinen tai puuttuva suojamaadoitus (nollaus)