



**TEKNIikka JA LIIKENNE**

**Sähkötekniikka**

**Sähkövoimatekniikka**

**INSINÖÖRITYÖ**

**KOSKETUSSUOJAN POIKKIPINNAN VAIKUTUS 60 - 400 kV  
SUURJÄNNITEKAAPELIN KUORMITETTAVUUTEEN**

**Työn tekijä: Mika Suomi  
Työn valvoja: Jarno Varteva  
Työn ohjaaja: Risto Kivisaari**

**Työ hyväksytty: 10.4. 2010**

**Lehtori Jarno Varteva**



## **ALKULAUSE**

Tämä insinöörityö tehtiin Prysmian Cables and Systems Oy:n tiloissa ja työvälineillä Pikkalassa. Haluan kiittää projektissa mukana olleita ja Prysmian Cables and Systems Oy:tä saamastani tuesta.

Kaapelitehtaassa työni ohjaajana toimi diplomi-insinööri Risto Kivisaari. Esitän hänelle parhaimmat kiitokseni hänen arvokkaista ohjeistaan ja työni vuoksi käyttämästään ajasta.

Kiitän työni valvojaa lehtori Jarno Vartevaa Metropolia Ammattikorkeakoulusta.

Helsingissä 10.4.2010

Mika Suomi

## TIIVISTELMÄ

<b>Työn tekijä:</b> Mika Suomi	
<b>Työn nimi:</b> Kosketussuojan poikkipinnan vaikutus 60 - 400 kV suurjännitekaapelin kuormitettavuuteen	
<b>Päivämäärä:</b> 10.4.2010	<b>Sivumäärä:</b> 39 s. + 3 liitettä
<b>Koulutusohjelma:</b> Sähkötekniikka	<b>Suuntautumisvaihtoehto:</b> Sähkövoimatekniikka
<b>Työn valvoja:</b> lehtori Jarno Varteva, Metropolia Ammattikorkeakoulu	
<b>Työn ohjaaja:</b> dipl. ins. Risto Kivisaari, Prysmian Cables and Systems Oy	
<p>Tässä Insinööriyössä on tutkittu suurjännitekaapelin kosketussuojan poikkipinta-alan vaikutusta kaapelin kuormitettavuuteen eri jännitetasoilla maa-asennuksessa kolmio- ja tasoasennuskuvioilla.</p> <p>Työssä on aluksi tarkasteltu suurjännitekaapelin yleistä rakennetta sekä eri rakenneosien ominaisuuksia. Lisäksi on selvitetty maa-asennuksissa ympäristön sekä asennuskuvion ja kosketussuojan kytkentätavan vaikutusta kaapelin kuormitettavuuteen.</p> <p>Työssä on esitetty yhtälöt kaapelin tehohäviöiden laskemiseksi. Näiden avulla voidaan laskea kaapelin jatkuvan tilan kuormitusvirta. Työssä on tarkasteltu mm. johtimissa ja kosketussuojissa syntyvien tehohäviöiden, dielektristen häviöiden sekä kaapelin rakenteen ja ympäristön lämpöresistanssin vaikutusta kuormitettavuuteen. Kuormitusvirran laskentayhtälöt perustuvat standardiin IEC 60287.</p> <p>Työssä on laskettu samanrakenteisten kaapeleiden kuormitettavuudet 60, 110, 220 sekä 400 kV:n jännitetasoilla eri kosketussuojan poikkipinnoilla kosketussuojapiirin ollessa suljettu. Laskemiseen on käytetty Prysmian Oy:n SYSDS-nimistä tietokoneohjelmaa.</p> <p>Tuloksista on laskettu kuormitettavuuden korjauskertoimet kupari- ja alumiinijohtimisille kaapeleille eri kosketussuojien poikkipinnoilla. Laskelmista saatuja tuloksia on analysoitu.</p>	
<b>Avainsanat:</b> suurjännitekaapeli, kosketussuoja, kuormitettavuus, maa-asennus, kolmioasennus, tasoasennus	

## ABSTRACT

<b>Name:</b> Mika Suomi	
<b>Title:</b> Effect of Screen Cross-Section on Ampacity of 60 - 400 kV High-Voltage Cable	
<b>Date:</b> 10 April 2010	<b>Number of pages:</b> 39
<b>Department:</b> Electrical Engineering	<b>Study Programme:</b> Electrical Power Engineering
<b>Instructor:</b> Jarno Varteva, Senior Lecturer, Metropolia University of Applied Sciences	
<b>Supervisor:</b> Risto Kivisaari, M.Sc. in Electrical Engineering, Prysmian Cables and Systems Ltd.	
<p>The purpose of this thesis is to examine how the different cross-sections of metallic screen affect the ampacity of the high-voltage cable at different voltage levels when the cables are buried and laid in trefoil or flat formation.</p> <p>At first the essential structure and theory of the different components of high-voltage cable are introduced. Also, the effect of the cable formation, ambient environment and the bonding methods of the metallic screen to the cable current rating are examined.</p> <p>Calculations of the cable power losses are introduced. These losses are affecting on the ampacity of the cable. Power losses in conductor and screen, dielectric losses and thermal resistances in the cable and the cable ambient are examined. All these calculations are based on IEC 60287.</p> <p>Ampacity calculations are made for 60, 110, 220 and 400 kV voltage levels with different metallic screen cross-sections bonded at both ends. Current ratings are calculated with the Prysmian Ltds computer program, SYSDS.</p> <p>The results of the current ratings are utilized to make correction factors for copper and aluminium conductors with different screen sizes. The calculation results have been analyzed.</p>	
<b>Keywords:</b> High voltage cable, screen, ampacity, load current, buried cable, trefoil formation, flat formation	

## SISÄLLYS

### ALKULAUSE

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

### SISÄLLYS

### SYMBOLIT

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SUURJÄNNITEKAAPELI</b>	<b>1</b>
<b>2.1</b>	<b>Suurjännitekaapelin määritelmä</b>	<b>1</b>
<b>2.2</b>	<b>Suurjännitekaapelin rakenne</b>	<b>2</b>
2.2.1	<i>Johdin</i>	3
2.2.2	<i>Johdinsuoja ja johdinsuojanauha</i>	4
2.2.3	<i>Eristys</i>	4
2.2.4	<i>Hohtosuoja</i>	4
2.2.5	<i>Kosketussuoja</i>	5
2.2.6	<i>Ulkovaippa ja armeeraus</i>	6
<b>3</b>	<b>KAAPELIASENNUKSET</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Maahan asennetut kaapelit</b>	<b>7</b>
<b>3.2</b>	<b>Kosketussuojan kytkentätavat</b>	<b>8</b>
3.2.1	<i>Kosketussuojaan indusoituva jännite</i>	8
3.2.2	<i>Suljettu kosketussuojapiiri</i>	9
3.2.3	<i>Avoim kosketussuojapiiri</i>	9
3.2.4	<i>Kosketussuojien vuorottelu</i>	10
<b>3.3</b>	<b>Kolmio- ja tasoasennus</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>KAAPELIN KUORMITETTAVUUS</b>	<b>12</b>
<b>4.1</b>	<b>Kaapelin kuormitettavuuden laskeminen</b>	<b>12</b>
<b>4.2</b>	<b>Kaapelissa syntyvät tehohäviöt</b>	<b>13</b>
4.2.1	<i>Johdinhäviöt</i>	14
4.2.2	<i>Pintavaikutusilmiö</i>	15
4.2.3	<i>Lähivaikutusilmiö</i>	15
4.2.4	<i>Dielektriset häviöt</i>	16
4.2.5	<i>Kosketussuojan häviöt</i>	17
4.2.6	<i>Kiertävien virtojen häviökerroin</i>	18
4.2.7	<i>Pyörrevirtahäviöiden kerroin</i>	19
<b>4.3</b>	<b>Lämpöresistanssit</b>	<b>20</b>

<b>5</b>	<b>TUTKITTAVAT KAAPELIT JA OLOSUHTEET</b>	<b>22</b>
<b>5.1</b>	<b>Kaapeleiden rakenteet</b>	<b>23</b>
5.1.1	<i>Johtimen lähtötiedot</i>	23
5.1.2	<i>Eristyksen lähtötiedot</i>	23
5.1.3	<i>Nauhoitusten sekä johdin- ja hohtosuojan lähtötiedot</i>	24
5.1.4	<i>Kosketussuojan lähtötiedot</i>	24
5.1.5	<i>Alumiinilaminaatin lähtötiedot</i>	24
5.1.6	<i>Ulkovaipan lähtötiedot</i>	24
<b>5.2</b>	<b>Kolmioasennuksen lähtötiedot</b>	<b>25</b>
<b>5.3</b>	<b>Tasoasennuksen lähtötiedot</b>	<b>25</b>
<b>5.4</b>	<b>Maaperän lähtötiedot</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>KUORMITETTAVUUDEN LASKENTAOHJELMA JA SEN KÄYTTÖ</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>TULOSTEN ARVIOINTI</b>	<b>27</b>
<b>7.1</b>	<b>Asennuskuvion vaikutus kuormitettavuuteen</b>	<b>27</b>
<b>7.2</b>	<b>Kosketussuojan poikkipinnan vaikutus kuormitettavuuteen</b>	<b>29</b>
7.2.1	<i>Kosketussuojan häviökerroin</i>	29
7.2.2	<i>Kuormitettavuudet</i>	30
<b>7.3</b>	<b>Kuormitettavuuden korjauskertoimet</b>	<b>32</b>
7.3.1	<i>Kuormitettavuuden korjauskertoimien käyttäytyminen</i>	32
7.3.2	<i>Kuormitettavuuden korjauskerrointaulukot</i>	33
<b>8</b>	<b>YHTEENVETO</b>	<b>37</b>
	<b>LÄHTEET</b>	<b>38</b>
	<b>LIITTEET</b>	
	<b>LIITE 1 LASKENNASSA KÄYTETTYJEN KAAPELEIDEN RAKENNEMITAT</b>	
	<b>LIITE 2 KAAPELIN KUORMITETTAVUUS TASO- JA KOLMIOASENNUKSESSA</b>	
	<b>LIITE 3 KAAPELIN KUORMITETTAVUUDEN KORJAUSKERTOIMET TASO- JA KOLMIOASENNUKSESSA</b>	

## SYMBOLIT

$U_0 =$	johtimen ja maan potentiaalinen välinen nimellisjännite (V)
$U_m =$	sähköverkon suurin käyttöjännite (V)
$U =$	pääjännite (johtimien välinen jännite) (V)
$E_r =$	sähkökentän voimakkuus tietyssä eristyksen kohdassa (V/mm)
$r =$	etäisyys johtimen keskipisteestä (mm)
$r_u =$	eristyksen ulkopinnan säde (mm)
$r_s =$	eristyksen sisäpinnan säde (mm)
$E =$	kosketussuojaan indusoitunut jännite (V/m)
$\omega =$	kulmataajuus (rad/s) ( $2\pi f$ )
$f =$	vaihtojännitteen taajuus (Hz)
$I =$	johtimessa kulkeva virta (A)
$s =$	johtimien keskipisteiden välinen etäisyys (mm)
$d =$	keskimääräinen kosketussuojan tai metallivaipan halkaisija (mm)
$\Delta\theta =$	johtimen lämpenemä ympäristöön nähden (K)
$W_d =$	dielektriset häviöt (W/m)
$R =$	johtimen vaihtovirtaresistanssi käyttölämpötilassa ( $\Omega/m$ )
$\lambda_1 =$	kosketussuojan häviöiden suhde johdinhäviöihin
$\lambda_2 =$	armeerauksen häviöiden suhde johdinhäviöihin
$T_1 =$	eristyksen lämpöresistanssi (Km/W)
$T_2 =$	metallivaipan ja armeerauksen välinen lämpöresistanssi (Km/W)
$T_3 =$	ulkovaipan lämpöresistanssi (Km/W)
$T_4 =$	kaapelin ulkoinen lämpöresistanssi (Km/W)
$n =$	kuormitettujen johtimien määrä kaapelissa
$P_h =$	johtimen tehohäviöt (W/m)

$y_s =$	pintavaikutusilmiötä kuvaava tekijä (virranahto)
$y_p =$	lähivaikutusilmiötä kuvaava tekijä
$x_s =$	apumuuttuja (yhtälöstä 11)
$x_p =$	apumuuttuja (yhtälöstä 13)
$R' =$	johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa ( $\Omega/m$ )
$R_0 =$	johtimen tasavirtaresistanssi 20 °C lämpötilassa ( $\Omega/m$ )
$\alpha_{20} =$	johdinmateriaalin resistiivisyyden lämpötilakerroin 20 °C lämpötilassa
$\theta =$	johtimen käyttölämpötila (°C)
$k_s =$	pintavaikutusilmiön laskentaan käytettävä kerroin
$k_p =$	lähivaikutusilmiön laskentaan käytettävä kerroin
$d_c =$	johtimen ulkohalkaisija (mm)
$s_1 =$	vaiheiden 1 ja 2 keskipisteiden välinen etäisyys (mm)
$s_2 =$	vaiheiden 1 ja 3 keskipisteiden välinen etäisyys (mm)
$C =$	johtimen kapasitanssi (F/m)
$\tan \delta =$	eristysmateriaalin häviökerroin
$\varepsilon_r =$	eristysmateriaalin suhteellinen permittiivisyys
$D_i =$	eristyksen ulkohalkaisija (mm)
$d_{cs} =$	johdinsuojan ulkohalkaisija (mm)
$\lambda_1' =$	kosketussuojan kiertävien virtojen häviöiden suhde johdinhäviöihin
$\lambda_1'' =$	kosketussuojan pyörrevirtahäviöiden suhde johdinhäviöihin
$R_s =$	kosketussuojan resistanssi käyttölämpötilassa ( $\Omega/m$ )
$X =$	kosketussuojan reaktanssi (kolmioasennuksessa) ( $\Omega/m$ )
$X_1 =$	kosketussuojan reaktanssi (tasoasennuksessa) ( $\Omega/m$ )
$g_s =$	apumuuttuja (yhtälöstä 23)



$\beta_1 =$	apumuuttuja (yhtälöstä 24)
$\rho_s =$	kosketussuojan resistiivisyys ( $\Omega/m$ )
$D_s =$	kosketussuojan ulkohalkaisija (mm)
$t_s =$	kosketussuojan paksuus (mm)
$\lambda_0 =$	apumuuttuja (yhtälöistä 25 ja 28)
$\Delta_1 =$	apumuuttuja (yhtälöistä 26 ja 29)
$m =$	apumuuttuja (yhtälöstä 27)
$M, N, F =$	apumuuttujat (yhtälöistä 30 - 35)
$X_m =$	kosketussuojan ja kahden johtimen välinen keskinäisreaktanssi tasoasennuksessa
$\rho_T =$	eristysmateriaalin lämpöresistiivisyys (Km/W)
$t_1 =$	eristyksen paksuus (mm)
$t_3 =$	ulkovaipan paksuus (mm)
$\rho_{Tu} =$	ulkovaipan lämpöresistiivisyys (Km/W)
$D'_a =$	ulkovaipan alla olevan kerroksen ulkohalkaisija (mm)
$\rho_{Tm} =$	maaperän lämpöresistiivisyys (Km/W)
$u =$	apumuuttuja (yhtälöstä 39)
$L =$	kaapelin keskipisteen etäisyys maanpinnasta (mm)
$D_e =$	kaapelin ulkohalkaisija (mm).

## 1 JOHDANTO

Sähkölaitokset ja verkkoyhtiöt siirtävät tehoa ilmajohtoilla ja kaapeleilla. Maahan asennettavia kaapeleita käytetään reiteillä, joissa ilmajohtojen käyttäminen on hankalaa tai ei muuten ole suositeltavaa, kuten esimerkiksi tiheään asutuilla alueilla.

Voimakaapelin tärkeä ominaisuus on kuormitettavuus, johon vaikuttaa sen rakenneosissa syntyvät tehohäviöt sekä asennusympäristön olosuhteet. Tehohäviöiden laskeminen voi olla monimutkaista, sillä niiden syntyyn vaikuttaa useita eri tekijöitä. Tämän vuoksi laskentaa helpottamaan on laadittu standardoituja menetelmiä. Yksinkertaistettujen yhtälöiden avulla kaapelin kuormitettavuus pystytään laskemaan yleisillä asennusmenetelmillä helpommin ja nopeammin.

Jokainen muutos kaapelirakenteessa tai asennuksessa saattaa muuttaa kuormitettavuutta. Suuremmilla jännitteillä muutokset voivat olla merkittäviä ja kaapelin kuormitettavuus onkin hyvä mitoittaa vastaamaan todellisia olosuhteita.

Suurjännitekaapelin kosketussuojan koko vaikuttaa tietyillä asennustavoilla merkittävästi kaapelin kuormitettavuuteen, mistä haluttiin saada tarkempaa tietoa. Tämä insinööryö sisältää kirjallisuustutkimuksen suurjännitekaapeleista ja niiden kuormitettavuuteen vaikuttavista tekijöistä sekä laskennallisen tarkastelun kosketussuojan poikkipinnan vaikutuksesta kuormitettavuuteen.

## 2 SUURJÄNNITEKAAPELI

### 2.1 Suurjännitekaapelin määritelmä

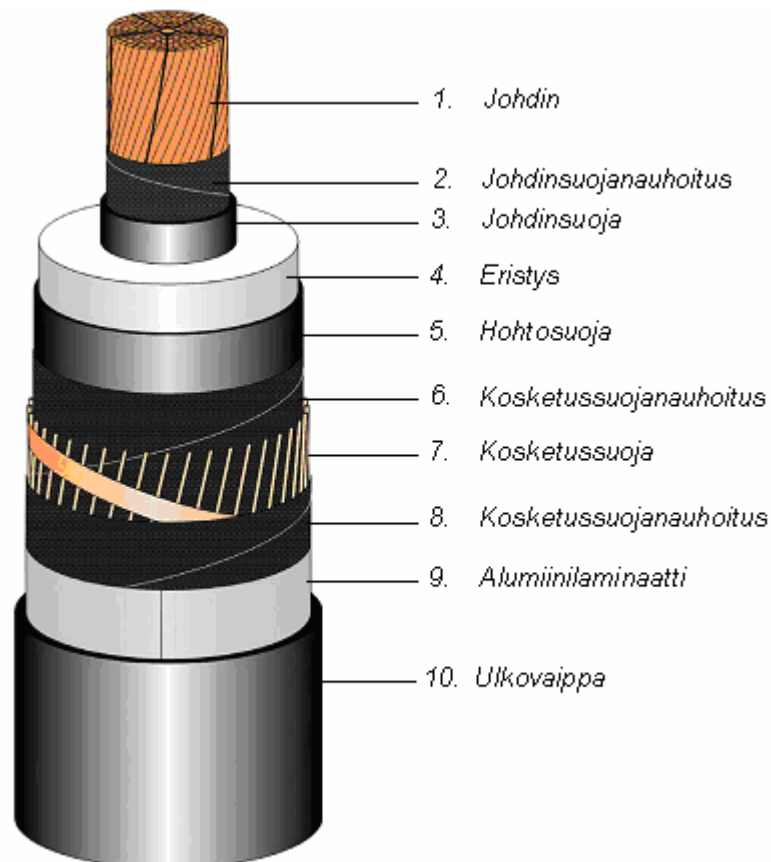
Suurjännitekaapelilla tarkoitetaan yhden tai useamman eristetyn johtimen muodostamaa johdinryhmää suojauksineen. Suurjännitteellä pääjännite on vähintään 45 kV. Kaapelin nimellisjännite merkitään muodossa  $U_0/U/U_m$ , jossa  $U_0$  tarkoittaa johtimen ja maapotentiaalin välistä nimellisjännitettä,  $U$  pääjännitettä eli johtimien välistä jännitettä ja  $U_m$  sähköverkon suurinta käyttöjännitettä. [1, s. 13, 24.]

## 2.2 Suurjännitekaapelin rakenne

Suurjännitekaapelin rakenteeseen ja mitoitukseen vaikuttaa mm. tehonsiirtotarve, käytetty jännitetaso, siirrossa syntyvät tehohäviöt, ympäristö- ja asennusolosuhteet sekä sähköverkon vikavirtojen suuruus. Eri maissa käytössä olevat standardit ja käytännöt määrittelevät myös omat vaatimuksensa kaapelin rakenteelle ja mitoitukselle.

Suurjännitekaapeli koostuu useasta rakenneosasta. Johtimen ja eristyksen lisäksi kaapeli sisältää myös johdin- ja hohtosuojan, kosketussuojan sekä ulkovaipan (kuva 1). [2, s. 4 - 8.]

Suuren tehon siirtäminen vaatii joko suurta virtaa tai suurta jännitettä. Suuri virranvoimakkuus vaatii suurta johdinpoikkipintaa ja suuri jännite puolestaan riittävän paksua ja hyvälaatuista eristystä. Johdinpoikkipinta ei saisi kuitenkaan olla liian suuri, sillä se lisää kaapelin painoa ja ulkohalkaisijaa, jotka puolestaan hankaloittavat kaapelin valmistusta, kuljetusta ja asentamista. [1, s. 24.]



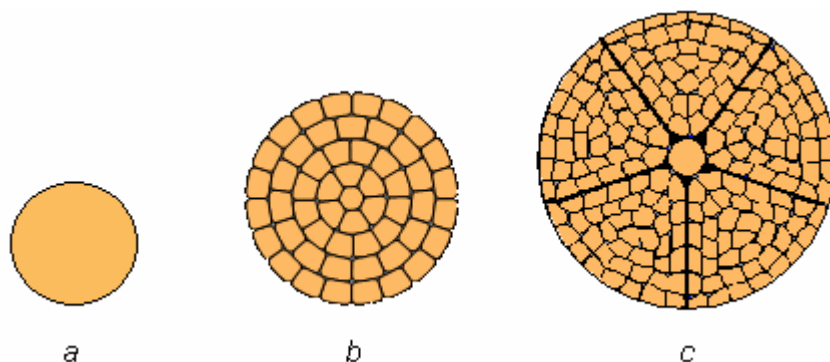
Kuva 1. Tyypillinen suurjännitekaapelin rakenne [lähde 3, s. 6 mukailen]

### 2.2.1 Johdin

Suurjännitekaapeleissa johdinmateriaalina käytetään yleensä kuparia tai alumiinia. Kuparin sähkönjohtavuus on alumiinia parempi, minkä vuoksi sillä saavutetaan pienempi resistanssi ja johtimen koko. Kuparilla on myös parempi korroosionkesto kuin alumiinilla. Kupari on kuitenkin alumiinia painavampaa ja noin 50 % kalliimpaa, minkä vuoksi alumiinin käyttö johdinmateriaalina on yleistynyt. Suurjännitekaapeleilla johtimen koko on tyypillisesti 150 - 2 500 mm<sup>2</sup> kuormitettavuusvaatimusten mukaan. [2, s. 5; 4, s. 10 - 15.]

Johdin voi olla tehty yhdestä tai kerrattu useammasta langasta. Yksilankaista johdinta nimitetään solidijohtimeksi (kuva 2). Pienen solidijohtimen valmistaminen on yksinkertaista, mutta suurilla poikkipinnoilla sen valmistus hankaloituu ja siitä tulee turhan jäykkä asennuksen kannalta. Pieniä (n. 25 - 300 mm<sup>2</sup>) solidijohdinta käytetään mm. vesistökaapeleissa johtimen vesitiiviiden vuoksi.

Tilankäytön parantamiseksi langoista kerratut johtimet voidaan tiivistää valssaamalla. Tästä syystä johtimen koolla ei tarkoiteta sen geometrista, vaan sähköistä poikkipinta-alaa, joka määritetään sallitun resistanssin avulla. Suuret johdinpoikkipinnat voidaan valmistaa sektorin muotoisista lohkoista, jotka ovat toisistaan eristettyjä. Tällä ns. Milliken-tekniikalla vaihtovirrasta aiheutuva virranahto pienenee johtimessa ja virta jakautuu johtimen poikkipinnalle tasaisemmin pienentäen vaihtovirtaresistanssia ja parantaen kaapelin kuormitettavuutta. Milliken-johtimia valmistetaan yleensä 1 000 mm<sup>2</sup> ja sitä suuremmille kuparipoikkipinnoille (kuva 2). [1, s. 24; 2, s. 118 - 119; 5, s. 6.]



Kuva 2. Johdinrakenteet:

- a) Yksilankainen solidijohdin
- b) Useammasta langasta kerrattu ja valssaamalla tiivistetty johdin
- c) Sektorirakenteinen Milliken-johdin. [lähde 2, s. 6 mukailen.]

### 2.2.2 Johdinsuoja ja johdinsuojanauha

Johdinsuoja on puolijohtavasta muovista puristettu kerros johtimen ja eristyksen välissä. Sen tarkoitus on tasoittaa johtimen ulkopinta ja pienentää johtimen aiheuttamia kentänvoimakkuushuippuja eristyksen rajapinnalla. Suurilla johdinpoikkipinnoilla voidaan johdinsuojan alla käyttää puolijohtavaa nauhakerrosta, jonka tarkoituksena on estää johdinsuojamuovin tunkeutuminen johtimen pintalankojen väliin. [1, s. 24; 6, s. 149.]

### 2.2.3 Eristys

Eristyksen tarkoitus on eristää johdin sähköisesti maapotentiaalista ja toisista johtimista. Ilmajohtoasennuksissa johtimen ympärillä oleva ilma toimii eristyksenä, joten ilmajohdon rakenne on yksinkertaisempi kuin kaapeleilla. Suurjännitekaapeleiden eristysmateriaaleina käytetään yleensä ristosilloitettua polyeteeniä (PEX). [1, s. 26; 5, s. 6.]

Eristyksen paksuus määrittyy kaapelin käyttöjänniteen perusteella. Eristysmateriaalin tulisi olla puhdasta ja eristyspintojen mahdollisimman tasaiset, jotta kaapelin käyttöikä olisi riittävän pitkä.

Eristyksen nimellispaksuudet on annettu 6 - 30 kV nimellisjännitteisille kaapeleille standardissa IEC 60502-2, mutta suuremmille jännitteille kansainvälisissä standardeissa ei määritellä eristyspaksuuksia. Yli 30 kV kaapeleille eristyspaksuuden määrittää kansalliset standardit, asiakas tai kaapelivalmistaja. [5, s. 8; 7, s. 29; 8, s. 4; 9.]

Eristysmateriaali vaikuttaa myös kaapelin kuormitettavuuteen. Termisesti ajateltuna hyvällä eristysmateriaalilla tulisi olla hyvä lämmönkestoisuus, matala lämpöresistiivisyys ja pienet dielektriset häviöt. PEX on hyvä eristysmateriaali, sillä se kestää 90 °C jatkuvaa käyttölämpötilaa ja sen lämpöresistiivisyys on vain 3,5 Km/W. [2, s. 7.]

### 2.2.4 Hohtosuoja

Suurjännitekaapeleissa eristyksen päällä on puolijohtavasta muovista puristettu hohtosuoja, jonka tarkoituksena on tasata eristyskerroksen ulkopinta. Hohto- ja johdinsuojalla pidetään johtimessa syntyvä sähkökenttä kahden sylinteripinnan välissä. [6, s. 149.]

Eristyksen sisällä vaikuttava radiaalinen kentänvoimakkuus  $E_r$ , jonka voimakkuus tietyssä eristyksen kohdassa voidaan laskea yhtälön 1 mukaisesti:

$$E_r = \frac{U_0}{r \ln \frac{r_u}{r_s}} \quad (\text{V/mm}) \quad (1)$$

missä

$U_0 =$  johtimen ja maapotentiaalin välinen jännite (V)

$r =$  etäisyys johtimen keskipisteestä (mm)

$r_u =$  eristyksen ulkopinnan säde (mm)

$r_s =$  eristyksen sisäpinnan säde (mm).

Yhtälöstä 1 nähdään, että kentänvoimakkuus on suurimmillaan eristyksen sisäpinnalla. Suurjännitteellä on huomioitava, että kaapelin nimellisjännitteen kasvaessa myös kentänvoimakkuus eristyksessä nousee. Nimellisjännitteen kasvun myötä eristyksen paksuutta tai johtimen poikkipintaa on lisättävä, jotta kentänvoimakkuuden arvot pysyvät kaapelistandardeissa vaadittujen tyyppikokeiden sallimien rajojen sisäpuolella. [6, s. 149, 36; 9;10.]

### 2.2.5 Kosketussuoja

Kaapelin kosketussuojan tehtävänä on maadoittaa käytönaikaiset varaus- ja vikavirrat ja se on turvallisuussyistä maadoitettava vähintään kaapelireitin yhdestä kohdasta. Kosketussuojana on suositeltavaa käyttää epämagneettista ja korroosionkestävää materiaalia. Kosketussuojana voi toimia esimerkiksi kaapelin metallinen vaippa, metalliset langat ja nauhat tai näiden yhdistelmä. [2, s. 7 - 8; 11, s. 46; 12, s. 3.]

Kosketussuojan poikkipinta määräytyy 1-vaiheisen oikosulkuvirran mukaan. Suurjänniteverkossa on usein käyttömaadoitettu tähtipiste, jolloin verkossa syntyvä 1-vaiheinen oikosulkuvirta voi olla lähes 3-vaiheisen oikosulkuvirran suuruinen. Kosketussuoja tuleekin mitoittaa niin, että se vikatilanteessa pysyy maadoittamaan oikosulun hallitusti. Tarvittaessa kaapelin kosketussuojan poikkipintaa voidaan kasvattaa esimerkiksi lisäämällä metallilankojen lukumäärää tai paksuntamalla metallivaippaa. [9; 13, s. 14 - 15, 19 - 21.]

Metallilankoina käytetään yleensä kuparia tai muuta hyvin johtavaa materiaalia. Metallivaippa voidaan valmistaa alumiinista tai lyijystä, joka puristetaan yhtenäiseksi kerrokseksi kaapelin ympärille. Vaihtoehtoisesti yhtenäisenä metallikerroksena voidaan käyttää myös kupari- tai alumiinilaminaattia. Laminaatin pinnalle on kiinnitetty ohut muovikalvo, jonka avulla se saadaan valmistusvaiheessa kiinnittymään tiukasti ulkovaippaan. Näin laminaatti kestää paremmin asennuksen aikaista taivutusta ja vetoa.

Sekä metallivaippa että -laminaatti muodostavat kaapelille vesitiiviin kerroksen. Keski- ja suurjännitekaapelille poikittainen vesitiiviyys on tärkeä ominaisuus, sillä kaapelin eristykseen pääsevä kosteus heikentää eristyksen jännitekestoisuutta. Pelkän muovivaipan läpi vesi etenee diffuusion avulla. [2, s. 7; 5, s. 8; 8, s. 7.]

### 2.2.6 *Ulkovaippa ja armeeraus*

Kaapelin ulkovaippa suojaa kaapelia mekaanisilta rasituksilta asennuksen ja käytön aikana. Ulkovaippa suojaa myös metallilaminaattia tai -vaippaa korroosiolta sekä erottaa sen sähköisesti maapotentiaalista estäen kosketussuojan hallitsemattomat maadoitukset.

Suurjännitekaapelin ulkovaippa valmistetaan useimmiten säänkestävästä polyeteeni- (PE) tai polyvinyylidikloridi-muovista (PVC). PE kestää paremmin mekaanista rasitusta ja korkeampia lämpötiloja. PVC:llä puolestaan on paremmat palonkesto-ominaisuudet, mutta suurempi lämpöresistiivisyys.

Kaapelin mekaanista lujuutta voidaan parantaa armeerauksella, joka on valmistettu mekaanisesti lujasta materiaalista, kuten sinkityistä teräspyörö-langoista. Armeerausta käytetään esim. vesistökaapeleissa. [1, s. 21 - 23; 8, s. 7; 11, s. 37.]

## 3 **KAAPELIASENNUKSET**

Kaapelin asennustavan valintaan vaikuttaa esimerkiksi kuormitettavuusvaatimus, asennusympäristö, käytettävissä oleva asennustila ja kosketussuojan kytkentätapa. Kaapeleita voidaan asentaa esimerkiksi maahan, rakennuksiin tai vesistöihin [2, s. 9 - 13]. Tässä työssä keskitytään maahan asennettuihin yksijohdinkaapeleihin.

### 3.1 Maahan asennetut kaapelit

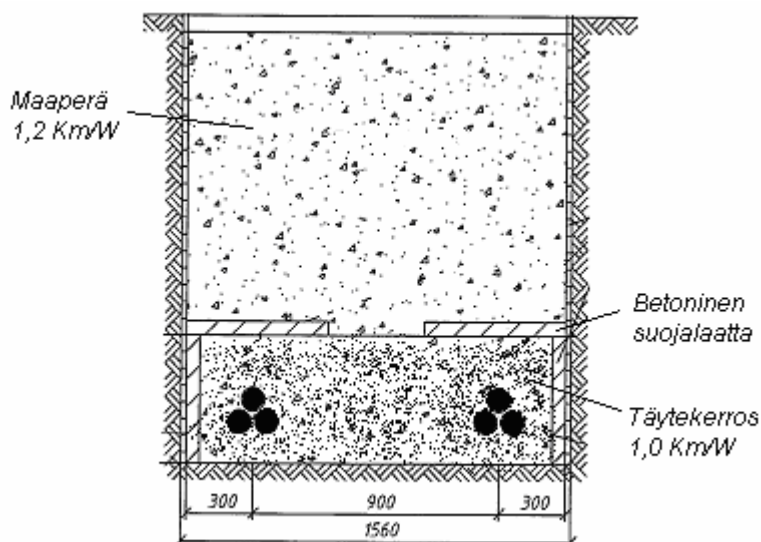
Maa-asennuksissa maaperän lämpötila ja lämpöresistiivisyys sekä asennussyvyys vaikuttavat kaapeleiden kuormitettavuuteen. Kaapelireitit voivat olla useita kilometrejä pitkiä, jolloin asennusolosuhteet reitillä voivat vaihdella huomattavasti. Reitillä voi esimerkiksi olla toisia kaapeleita tai lämminvesiputkia, jotka lämmittävät kaapelia ja saattavat aiheuttaa sen ylikuormittumisen. Kaapelin kuormitettavuus on aina mitoitettava asennusreitinvaihtimman kohdan mukaan.

Maaperän kuivuminen voi hankaloittaa kaapeliasennuksen täsmällistä mitoittamista, sillä kuivan maaperän lämpöresistiivisyys on suurempi kuin kostean. Kaapeli voi lämpenemisellään aiheuttaa ympäröivän maaperän kuivumista. Lämpöresistiivisyyden kasvaessa kaapelin lämmön siirtyminen ympäristöön heikkenee ja kaapeli voi ylikuormittua. [1, s. 58 - 59.]

PEX-eristeiset kaapelit kestävät jatkuvaa 90 °C käyttölämpötilaa. Maa-asennuksissa kaapelin kuormitettavuus lasketaan kuitenkin usein kaapelin rakenteellista lämpötilankestoa pienemmällä johdinlämpötilalla. Tällä tavalla voidaan ottaa huomioon kaapelia ympäröivän maan mahdollinen kuivuminen. [5, s. 10.]

Kun tavoitellaan parasta mahdollista kuormitettavuutta, voidaan kaapelit ympäröidä erityisellä termisesti stabiililla ja hyvin lämpöä johtavalla täytemateriaalilla (*backfill*) (kuva 3). Täytemateriaalilla voi olla jopa puolet pienempi lämpöresistiivisyys kuin maaperällä, eikä sen lämpöresistiivisyys kasva kuivanakaan oleellisesti. Tämantyypisissä tapauksissa voidaan kaapelia kuormittaa sen rakenteellisen lämmönkeston mukaisesti. [2, s. 10; 9.]





Kuva 3. Kaksi kolmioon asennettua kaapeliyhteyttä, kaapeleiden ympärille on laitettu pienen lämpöresistiivisyyden omaava täytekerros. Kaapeleiden mekaaniseksi suojaksi on asennettu betoniset laatat. [lähdettä 14 mukaillen.]

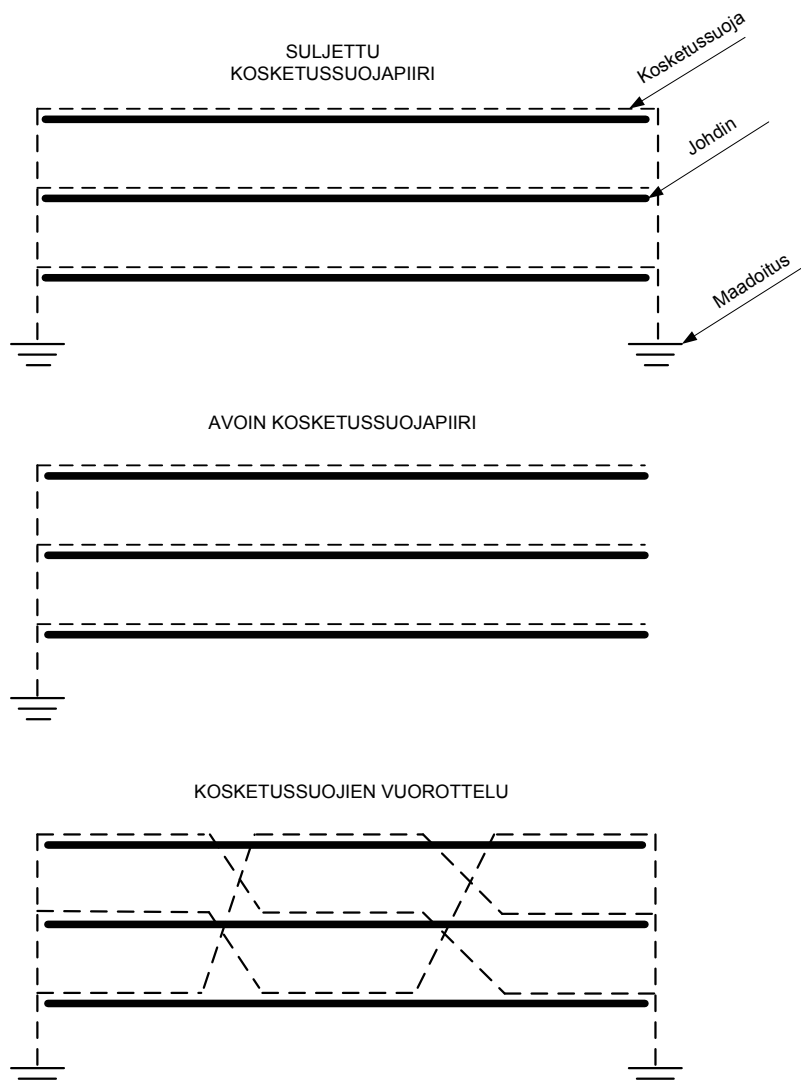
### 3.2 Kosketussuojan kytkentätavat

Yksijohdinkaapeleilla kosketussuojan kytkentätapa vaikuttaa oleellisesti kuormitettavuuteen. Kosketussuojan maadoittaminen toteutetaan yleensä jollakin seuraavista menetelmistä:

- suljettu kosketussuojapiiri
- avoin kosketussuojapiiri
- kosketussuojien vuorottelu. (Kuva 4.)

#### 3.2.1 Kosketussuojaan indusoituva jännite

Johtimessa kulkeva virta aiheuttaa ympäristöön magneettikentän, jonka voimakkuus määräytyy virran suuruuden ja johtimien välisten etäisyyksien perusteella. Tämä magneettikenttä indusoi kosketussuojiin jännitteen. Kyseinen jännite on verrannollinen kuormitusvirtaan ja sen taajuuteen sekä johdin- ja kosketussuojapiirien välisiin keskinäisinduktansseihin. [15, s. 93, 108.]



Kuva 4. Esimerkkejä kosketussuojan kytKentätavoista [lähdettä 14 mukailien]

### 3.2.2 Suljettu kosketussuojapiiri

Suljetulla kosketussuojapiirikytKennällä (*both end bonding* tai *solid bonding*) kaapeleiden kosketussuojat on kytketty yhteen ja yleensä myös maadoitettu kaapelien molemmista päistä. Piirin ollessa suljettu induktiojännitteet kuitenkin synnyttävät kosketussuojiin kiertävän virran, joka aiheuttaa tehohäviöitä. Nämä tehohäviöt lämmittävät kaapelia ja pienentävät sen kuormitettavuutta. Kosketussuojassa tapahtuvia häviöitä voidaan pienentää asentamalla kaapelit kolmiomuodostelmaan (kuva 5).

### 3.2.3 Avoin kosketussuojapiiri

Avoin kosketussuojapiirikytKennällä (*single point bonding*) kosketussuojat on kytketty yhteen ja maadoitettu vain yhdestä kohdasta. Tässä tapauksessa

kaapelin kosketussuojissa ei kulje virtaa, joten tehohäviöt pienenevät ja kuormitettavuus kasvaa.

Avoin kosketussuojapiirikenttä ei sovellu pitkille kaapelipituuksille, sillä kosketussuojaan indusoituva jännite kasvaa kaapelin pituuden ja johtimessa kulkevan virran mukaan. Pitkillä kaapeliyhteyksillä indusoitunut jännite voi olla niin suuri, että se saattaa aiheuttaa läpilyönnin kaapelin ulkovaipassa. Usein avointa kosketussuojapiirikenttää voidaan käyttää alle 600 m kaapelipituuksilla ilman, että indusoituneet jännitteet nousevat oikosulunkaan aikana kohtuuttoman suuriksi. [1, s. 61; 2, s. 12 - 13; 16, s. 7.]

Kaapelin kosketussuojaan indusoituva jännite avoimella kosketussuojapiirikentällä voidaan laskea kolmio- ja tasoasennuksessa yhtälöillä 2 ja 3:

*Kolmioasennus:*

$$E = j\omega I 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (2)$$

*Tasoasennus:*

$$E = j\omega I 2 \cdot 10^{-7} \left( -\frac{1}{2} \ln \frac{s}{d} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{4s}{d} \right) \quad (3)$$

missä

$E =$  kosketussuojaan indusoitunut jännite (V/m)

$\omega = 2\pi f$  kulmataajuus (rad/s)

$f =$  vaihtojännitteen taajuus (Hz)

$I =$  johtimessa kulkeva virta (A)

$s =$  johtimien keskipisteiden välinen etäisyys (mm)

$d =$  keskimääräinen kosketussuojan tai metallivaipan halkaisija (mm). [17, s. 5.]

### 3.2.4 Kosketussuojien vuorottelu

Kosketussuojien vuorottelukytkenällä (*cross bonding*) kaapeleiden kosketussuojat on kytketty kolmella osuudella keskenään ristiin niin, että eri vaiheiden kosketussuojissa ei pääse syntymään merkittäviä induktiojännitteitä, sillä ne kompensoituvat keskenään kytkentäpisteissä. Täydellinen induktiojännitteiden kompensoituminen saavutetaan vain, jos kytkentäpisteiden

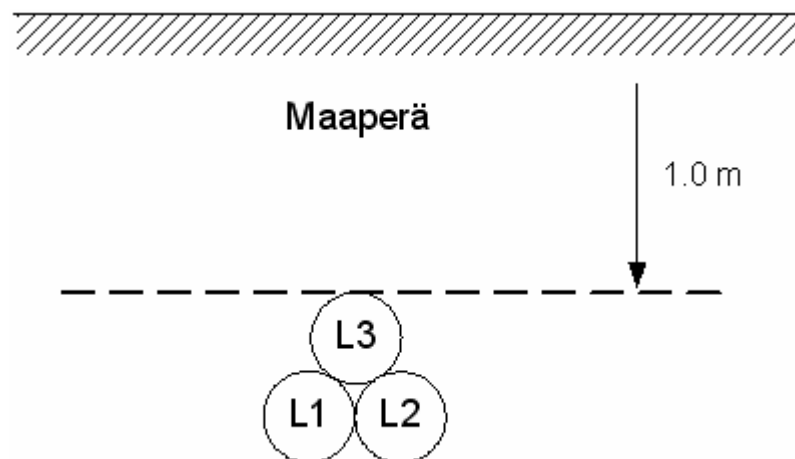
väliset etäisyydet ovat samat. Tällöin kosketussuojissa ei myöskään kulje virtaa, mikä vastaa kuormitettavuudeltaan avoimen kosketussuojapiirikentän tilannetta.

Vuorottelukytkentää käytetään yleensä pitkillä kaapelipituuksilla ja suurilla kuormitusvirroilla, sillä se mahdollistaa suurien tehojen siirron pienemmillä tehohäviöillä. Kytkentätavan kääntöpuolena on sen kallis toteuttaminen. [2, s. 12 - 13; 16, s. 7.]

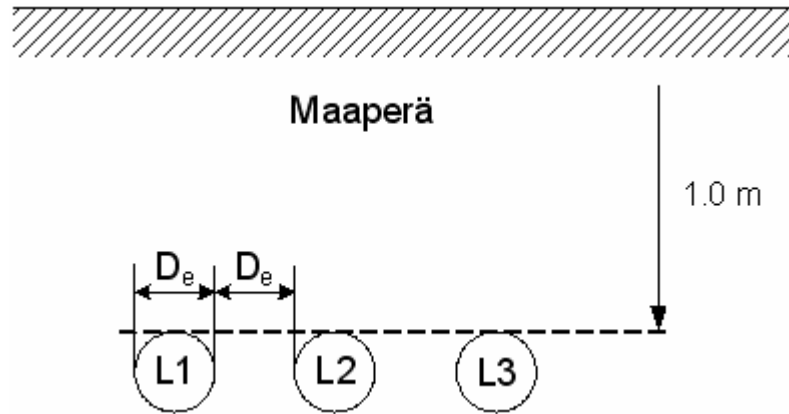
### 3.3 Kolmio- ja tasoasennus

Suurjännitekaapelit asennetaan maahan yleensä kolmio- tai tasomuodostelmaan noin metrin syvyyteen maanpinnasta (kuva 5 ja 6). Vaiheiden välistä etäisyyttä kasvattamalla voidaan pienentää kaapeleiden lämpövaikutusta toisiinsa, mutta useimmiten on kuitenkin taloudellisempaa asentaa ne lähellä tai jopa kiinni toisiinsa. [2, s. 10.]

Symmetrisessä kolmioasennuksessa vaiheiden magneettikentät kompensoituvat keskenään paremmin kuin tasoasennuksessa. Näin kosketussuojii indusoituu myös pienempi jännite ja kiertävä virta, joka on yhtä suuri jokaisessa kosketussuojassa. Suljetulla kosketussuojapiirillä kolmioasennus onkin kuormitettavuuden kannalta usein tasoasennusta parempi vaihtoehto. [1, s. 87 -89; 3, s. 8 - 14; 11, s. 322.]



Kuva 5. Maahan asennetut kaapelit kolmioasennuksessa [lähde 14 mukaillen]



Kuva 6. Maahan asennetut kaapelit tasoasennuksessa [lähde: 14 mukailen]

#### 4 KAAPELIN KUORMITETTAVUUS

Kaapelin johtimessa ja kosketussuojassa kulkeva virta aiheuttaa tehohäviöitä, jotka lämmittävät kaapelia. Mitä suuremmalla virralla kaapelia kuormitetaan, sitä enemmän syntyy tehohäviöitä ja lämpöä. Kaapeli saavuttaa jatkuvaa kuormitusvirtaa vastaavan käyttölämpötilan, kun kaapelista ympäristöön poistuva lämpöteho on yhtä suuri kuin siinä häviöiden vaikutuksesta syntyvä lämpöteho. Jatkuva käyttölämpötila ei kuitenkaan saa ylittää kaapelin rakenteellista lämmönkestoa, joka määräytyy yleensä eristyksen lämpökestoisuuden mukaan. [1, s. 55; 2, s. 3 - 4, 13 - 15.]

##### 4.1 Kaapelin kuormitettavuuden laskeminen

Kaapelin kuormitettavuuden laskenta on määritetty standardissa IEC 60287. Standardissa on esitetty eri kaapelirakenteille ja asennustavoille yhtälöt, joiden avulla voidaan laskea kaapelissa syntyvät tehohäviöt. Nämä tehohäviöt yhdessä ympäristöolosuhteiden kanssa määräävät kaapelin jatkuvan tilan kuormitusvirran halutulla johtimen lämpötilalla. [18; 19.]

Johtimen lämpenemä maahan asennetulle kaapelille voidaan laskea yhtälöllä 4:

$$\Delta\theta = \left( I^2 R + \frac{1}{2} W_d \right) T_1 + \left[ I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d \right] \cdot n T_2 + \left[ I^2 R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d \right] \cdot n (T_3 + T_4) \quad (4)$$

missä

$\Delta\theta =$	johtimen lämpenemä ympäristöön nähden (K)
$I =$	johtimessa kulkeva virta (A)
$R =$	johtimen vaihtovirtaresistanssi käyttölämpötilassa ( $\Omega/m$ )
$W_d =$	dielektriset häviöt (W/m)
$\lambda_1 =$	kosketussuojan häviöiden suhde johdinhäviöihin
$\lambda_2 =$	armeerauksen häviöiden suhde johdinhäviöihin
$T_1 =$	eristyksen lämpöresistanssi (Km/W)
$T_2 =$	metallivaipan ja armeerauksen välinen lämpöresistanssi (Km/W)
$T_3 =$	ulkovaipan lämpöresistanssi (Km/W)
$T_4 =$	kaapelin ulkoinen lämpöresistanssi (Km/W)
$n =$	kuormitettujen johtimien määrä kaapelissa.

Kun kaapelissa ei ole armeerausta,  $\lambda_2 = 0$  ja  $T_2 = 0$ , jolloin yhtälö 4 voidaan sieventää yhtälön 5 mukaiseksi:

$$\Delta\theta = \left( I^2 R + \frac{1}{2} W_d \right) T_1 + \left[ I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d \right] \cdot n (T_3 + T_4) \quad (\text{K}) \quad (5)$$

Kaapelin kuormitettavuus voidaan laskea yhtälöstä 6:

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d \left[ \frac{1}{2} T_1 + n (T_3 + T_4) \right]}{R T_1 + n R (1 + \lambda_1) (T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (\text{A}) \quad (6)$$

[lähde 18, s. 10, 11 mukaillen.]

#### 4.2 Kaapelissa syntyvät tehohäviöt

Kaapelissa syntyviä tehohäviöitä on kahdenlaisia: virrasta aiheutuvat häviöt sekä jännitteestä aiheutuvat häviöt. Ensin mainittu syntyy virran kulkiessa kaapelin metallisissa osissa ja jälkimmäinen on peräisin dielektrisestä vaikutuksesta ja varausvirrasta. [2, s. 13 - 15.]

#### 4.2.1 Johdinhäviöt

Johtimessa syntyvät lämpöhäviöt riippuvat virran suuruudesta ja johtimen resistanssista. Johtimen tehohäviöt voidaan laskea yhtälöllä 7:

$$P_h = I^2 \cdot R \quad (\text{W/m}) \quad (7)$$

Johtimen vaihtovirtaresistanssi on suurempi kuin tasavirtaresistanssi, mikä aiheutuu pintavaikutusilmiöstä (*skin effect*) ja lähivaikutusilmiöstä (*proximity effect*). [2, s. 15, 115.]

Johtimen vaihtovirtaresistanssi suurimmassa käyttölämpötilassa voidaan laskea yhtälöllä 8:

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (\Omega/\text{m}) \quad (8)$$

missä

$R'$  = johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa ( $\Omega/\text{m}$ )

$y_s$  = pintavaikutusilmiötä (virranahtoa) kuvaava tekijä

$y_p$  = lähivaikutusilmiötä kuvaava tekijä. [18, s. 27.]

Johtimen tasavirtaresistanssi käyttölämpötilassa voidaan laskea yhtälöllä 9:

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (\Omega/\text{m}) \quad (9)$$

missä

$R_0$  = johtimen tasavirtaresistanssi 20 °C lämpötilassa ( $\Omega/\text{m}$ )

$\alpha_{20}$  = johdinmateriaalin resistiivisyyden lämpötilakerroin 20 °C lämpötilassa (taulukko 1)

$\theta$  = johtimen käyttölämpötila (°C). [18, s. 13, 14.]

Taulukko 1. Metallien resistiivisyydet ja resistiivisyyden lämpötilakertoimet [lähde 18, s. 30 mukailen]

Metallin ominaisuus	Johdin ja kosketussuoja		Metallivaippa ja armeeraus	
	Kupari	Alumiini	Lyijy	Alumiini
Resistiivisyys 20 °C $\Omega \cdot m$	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	$2,8264 \cdot 10^{-8}$	$21,4 \cdot 10^{-8}$	$2,84 \cdot 10^{-8}$
Resistiivisyyden lämpötilakertoimet 20 °C	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$

#### 4.2.2 Pintavaikutusilmiö

Pintavaikutuksella kuvataan ilmiötä, jossa vaihtovirta pyrkii kulkemaan johtimen pintaosissa. Tätä ilmiötä kutsutaan myös virranahdoksi. Tämä epätasainen virran jakautuminen johtimen poikkipinnalle kasvattaa vaihtovirtaresistanssia. Mitä suurempi on taajuus ja mitä pienempi on johtimen tasavirtaresistanssi  $R'$ , sitä suurempi on pintavaikutusilmiö. Milliken-johtimilla pintavaikutusilmiö on pienempi kuin kerratulla tai solidijohtimella, koska johdin on jaettu pienempiin osajohtimiin (taulukko 2).

Pintavaikutusta kuvaava tekijä  $y_s$  saadaan yhtälöstä 10, muuttuja  $x_s$  yhtälöstä 11 ja kerroin  $k_s$  taulukosta 2:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (10)$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_s \quad (11)$$

[2, s. 118 - 119; 9; 18, s. 14.]

Taulukko 2. Kertoimet  $k_s$  ja  $k_p$  eri johdintyypeille [lähde 18, s. 31 mukailen]

Kerroinarvo	Johdintyyppi			
	Alumiini		Kupari	
	Kerrattu	Milliken (5 sek.)	Kerrattu	Milliken (5 sek.)
ks	1,0	0,190	1,0	0,435
kp	1,0	0,370	1,0	0,370

#### 4.2.3 Lähivaikutusilmiö

Lähivaikutuksella tarkoitetaan ilmiötä, jossa virtaa kuljettavan johtimen virrantiheyden jakautuma muuttuu lähellä olevan toisen virrallisen johtimen aiheuttaman magneettikentän vuoksi. Kaapelien väliset etäisyydet vaikuttavat



oleellisesti lähivaikutusilmiöön, esim. tasoasennuksessa lähivaikutusilmiö on pienempi kuin kolmioasennuksessa. Milliken-johtimella lähivaikutusilmiö on pienempi kuin kerratuilla johtimilla (taulukko 2).

Lähivaikutusta kuvaava kerroin  $y_p$  kolmelle yksijohtimisille kaapelille saadaan yhtälöstä 12, muuttuja  $x_p$  yhtälöstä 13 ja kerroin  $k_p$  taulukosta 2:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \left[ 0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right] \quad (12)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} k_p \quad (13)$$

missä

$d_c$  = johtimen halkaisija (mm)

$s$  = johtimien keskipisteiden välinen etäisyys (mm).

Tasoasennuksessa, jossa kaapeleiden väliset keskinäiset etäisyydet ovat erilaiset, johtimien välinen etäisyys lasketaan yhtälöllä 14:

$$s = \sqrt{s_1 \cdot s_2} \quad (14)$$

missä

$s_1$  = vaiheiden 1 ja 2 keskipisteiden välinen etäisyys (mm)

$s_2$  = vaiheiden 1 ja 3 keskipisteiden välinen etäisyys (mm).

[2, s. 123; 18, s. 15, 31.]

#### 4.2.4 Dielektriset häviöt

Vaihtojännitekentässä olevassa eristeessä syntyy dielektrisiä tehohäviöitä, joihin vaikuttavat kaapelin eristysmateriaali, poikkipinta ja käyttöjännite. Dielektriset häviöt syntyvät vaihtosähkökentän suunnanmuutoksista, jotka aiheuttavat molekyyliätkä eristeessä. [2, s. 109; 6, s. 50.]

Dielektriset tehohäviöt voidaan laskea yhtälöllä 15:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (\text{W/m}) \quad (15)$$

missä

$C =$  kaapelin kapasitanssi (F/m)

$\tan \delta =$  eristysmateriaalin häviökerroin.

Tavallisella PEX-eristeellä  $\tan \delta$  -arvo on 0,001.

Pyöreän johtimen kapasitanssi voidaan laskea yhtälöllä 16:

$$C = \frac{\varepsilon_r}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_{cs}}\right)} 10^{-9} \quad (\text{F/m}) \quad (16)$$

missä

$\varepsilon_r =$  eristysmateriaalin suhteellinen permittiivisyys

$D_i =$  eristyksen ulkohalkaisija (mm)

$d_{cs} =$  johdinsuojan ulkohalkaisija (mm).

[18, s. 16, 32.]

#### 4.2.5 Kosketussuojan häviöt

Johtimessa kulkeva virta indusoi kosketussuojiiin kiertäviä virtoja (*circulating current*) ja pyörrevirtoja (*eddy current*), jotka aiheuttavat tehohäviöitä. Kiertävien virtojen häviöt ovat pyörrevirtahäviöitä suuremmat, mutta niitä ei esiinny, jos kosketussuojapiirin kytkentä on avoin tai toteutettu kosketussuojien vuorottelulla. Suljetulla kosketussuojapiirillä pyörrevirtahäviöitä ei oteta laskennassa huomioon, ellei kaapelissa ole sektorirakenteista Milliken-johdinta. [2, s. 140, 179 - 180.]

Häviökerroin ( $\lambda_1$ ) on kosketussuojan häviöiden suhde johtimen häviöihin.

Häviökerroin kosketussuojalle saadaan yhtälöstä 17:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'' \quad (17)$$

missä

$\lambda_1' =$  kosketussuojan kiertävien virtojen häviöiden suhde johdinhäviöihin

$\lambda_1'' =$  kosketussuojan pyörrevirtahäviöiden suhde johdinhäviöihin.

#### 4.2.6 Kiertävien virtojen häviökerroin

Kosketussuojassa kiertävien virtojen häviökerroin kolmelle yksijohdinkaapelille kolmioasennuksessa voidaan laskea yhtälöllä 18:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2} \quad (18)$$

missä

$R_s =$  kosketussuojan resistanssi käyttölämpötilassa ( $\Omega/m$ )

$X =$  kosketussuojan reaktanssi ( $\Omega/m$ ).

Kolmioasennuksessa kosketussuojan reaktanssi voidaan laskea yhtälöllä 19:

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) (\Omega/m) \quad (19)$$

missä

$d =$  keskimääräinen kosketussuojan halkaisija.

[18, s. 16 - 18.]

Kosketussuojassa kiertävien virtojen häviökerroin kolmelle yksijohdinkaapelille tasoasennuksessa voidaan laskea yhtälöllä 20:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2} \quad (20)$$

Tasoasennuksessa kosketussuojan reaktanssi voidaan laskea yhtälöllä 21:

$$X_1 = 2\omega 10^{-7} \ln\left[2 \cdot \sqrt[3]{2} \cdot \left(\frac{s}{d}\right)\right] (\Omega/m) \quad (21)$$

#### 4.2.7 Pyörrevirtahäviöiden kerroin

Pyörrevirtahäviöt Milliken-johtimisille kaapeleille saadaan kertomalla kosketussuojan pyörrevirtahäviöiden suhde johdinhäviöihin  $\lambda_1''$  (yhtälö 22) kertoimella F (yhtälö 29). Apumuuttujat yhtälöihin saadaan yhtälöistä 23 - 28.

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[ g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1) + \frac{(\beta_1 \cdot t_s)^4}{12 \cdot 10^{12}} \right] \quad (22)$$

missä

$$g_s = 1 + \left( \frac{t_s}{D_s} \right)^{1,74} \cdot (\beta_1 \cdot D_s \cdot 10^{-3} - 1,6) \quad (23)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4\pi\omega}{10^7 \cdot \rho_s}} \quad (24)$$

$\rho_s =$  kosketussuojan resistiivisyys ( $\Omega/m$ ) (taulukosta 1)

$D_s =$  kosketussuojan ulkohalkaisija (mm)

$t_s =$  kosketussuojan paksuus (mm).

Kolmioon asennetuille kaapeleille  $\lambda_0$  ja  $\Delta_1$  saadaan yhtälöillä 25 ja 26 sekä apumuuttuja  $m$  yhtälöstä 27:

$$\lambda_0 = 3 \cdot \left( \frac{m^2}{1 + m^2} \right) \cdot \left( \frac{d}{2s} \right)^2 \quad (25)$$

$$\Delta_1 = (1,14m^{2,45} + 0,33) \cdot \left( \frac{d}{2s} \right)^{(0,92+1,66)} \quad (26)$$

$$m = \frac{\omega}{R_s} \cdot 10^{-7} \quad (m \leq 0,1) \quad (27)$$

Tasoon asennetuille kaapeleille keskimmäisen kaapelin apumuuttujat  $\lambda_0$  ja  $\Delta_1$  saadaan yhtälöillä 28 ja 29:

$$\lambda_0 = 6 \cdot \left( \frac{m^2}{1 + m^2} \right) \cdot \left( \frac{d}{2s} \right)^2 \quad (28)$$

$$\Delta_1 = 0,86m^{3,08} \cdot \left(\frac{d}{2s}\right)^{(1,4m+0,7)} \quad (29)$$

Kerroin  $F$  saadaan yhtälöllä 30:

$$F = \frac{4M^2N^2 + (M + N)^2}{4(M^2 + 1)(N^2 + 1)} \quad (30)$$

missä

kolmioon asennetuille kaapeleille apumuuttajat  $N$  ja  $M$  saadaan yhtälöstä 31 ja reaktanssi  $X$  yhtälöstä 32:

$$M = N = \frac{R_s}{X} \quad (31)$$

$$X = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) (\Omega/m). \quad (32)$$

tasoon asennetuille kaapeleille apumuuttajat  $N$  ja  $M$  saadaan yhtälöistä 32 ja 33 sekä kosketussuojan ja kahden johtimen välinen keskinäisreaktanssi  $X_m$  yhtälöstä 35:

$$M = \frac{R_s}{X + X_m} \quad (33)$$

$$N = \frac{R_s}{X - \frac{X_m}{3}} \quad (34)$$

$$X_m = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln 2 \quad (35)$$

[lähdettä 18, s. 18 - 22 mukailien.]

### 4.3 Lämpöresistanssit

Kaapelin nauhoitukset, eristys, ulkovaippa ja ympäristön lämpöresistanssit vaikuttavat kuormitettavuuteen. Johtimessa häviötehon vaikutuksesta syntyvä lämpö on siirrettävä kaapelin rakennekerrosten läpi ympäristöön. Kaapelimateriaalien lisäksi myös ympäristöllä tulisi olla pieni lämpöresistiivisyys, jotta lämmönluovutus kaapelin pinnalta ympäristöön olisi mahdollisimman tehokasta. [1, s. 58; 2, s. 197 - 198.]

Yksijohtimisen kaapelin eristyksen lämpöresistanssi saadaan yhtälöstä 36:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[ 1 + \frac{2t_1}{d_c} \right] \quad (36)$$

missä

$\rho_T$  = eristysmateriaalin lämpöresistiivisyys (Km/W)

$t_1$  = eristyksen paksuus johtimen ja kosketussuojan välissä (mm).

Matemaattisesti puolijohtavat kerrokset lasketaan osaksi eristystä.

Jos johtimen ja kosketussuojan välissä on muita eri lämpöresistiivisyyden omaavia kerroksia (esim. nauhoitukset), niiden lämpöresistanssit lasketaan erikseen. Kyseisessä tapauksessa  $t_1$  on kerroksen paksuus ja  $d_c$  on sen alla olevan kerroksen halkaisija. Tällöin  $T_1$  arvo on erillisten kerrosten lämpöresistanssien summa.

Ulkovaipan lämpöresistanssi saadaan yhtälöstä 37:

$$T_3 = \frac{\rho_{Tu}}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{2 \cdot t_3}{D'_a} \right) \quad (37)$$

missä

$\rho_{Tu}$  = ulkovaipan lämpöresistiivisyys (Km/W)

$t_3$  = ulkovaipan paksuus (mm)

$D'_a$  = ulkovaipan alla olevan kerroksen ulkohalkaisija (mm)

Kolmioasennuksessa  $T_3$ :n arvo tulee kertoa 1,6:lla.

Jos kosketussuojan päällä on muita eri lämpöresistiivisyyden omaavia kerroksia (esim. nauhoitukset), niiden lämpöresistanssit lasketaan erikseen ja lisätään  $T_3$  arvoon.

Kaapelin ulkoinen lämpöresistanssi kolmioasennetulle yksijohdinkaapelille saadaan laskettua yhtälöstä 38 ja apumuuttuja  $u$  yhtälöstä 39:

$$T_4 = \frac{1,5}{\pi} \rho_{Tm} [\ln(2u) - 0,630] \quad (38)$$

missä

$\rho_{Tm}$  = maaperän lämpöresistiivisyys (Km/W)

$$u = \frac{2L}{D_e} \quad (39)$$

$L$  = kaapelin keskipisteen etäisyys maanpinnasta (mm)

$D_e$  = kaapelin ulkohalkaisija (mm).

Kaapelin ulkoinen lämpöresistanssi tasoasennuksessa saadaan laskettua yhtälöstä 40:

$$T_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_{Tm} \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \ln \left[ 1 + \left( \frac{2L}{s_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (40)$$

missä

$s_1$  = kahden vierekkäisen kaapelin keskipisteiden välinen etäisyys (mm).

Yhtälö 40 pätee kun:

- kolme kaapelia on tasossa (vaakatasossa)
- kaapelit ovat erillään toisistaan
- kaapelien väliset etäisyydet ovat samat
- kaapeleilla on lähes samat häviötehot.

Yhtälöstä saadaan laskettua keskimmäisen kaapelin kuormitettavuus, joka lämpenee eniten. [lähdeä 19, s. 19, 27, 35, 39 mukaillen.]

## 5 TUTKITTAVAT KAAPELIT JA OLOSUHTEET

Tässä työssä on tutkittu maahan asennettujen 60 - 400 kV suurjännitekaapeleiden kuormitettavuuksia taso- ja kolmioasennuksissa. Kaapeleiden kosketussuojat on kytketty yhteen ja maadoitettu kaapelien molemmissa päissä (suljettu kosketussuojapiiri).

## 5.1 Kaapeleiden rakenteet

Tutkitut kaapelit edustavat Prysmian Cables Oy:n yleisimpiä perusrakenteita (ks. kaapeleiden rakenne, kuva 1 ja rakennemitat, liite 1).

### 5.1.1 Johtimen lähtötiedot

Tutkittujen alumiini- ja kuparijohtimien poikkipinnat vaihtelevat 150 - 2 500 mm<sup>2</sup> jännitetaso mukaan. Johtimien tasavirtaresistanssit on esitetty taulukossa 3. Pienet johtimet ovat kerrattuja ja suuret Milliken-johtimia (liite 1). Milliken-johtimilla on otettu huomioon kosketussuojan pyörrevirtahäviöt.

Taulukko 3. Alumiini- ja kuparijohtimien tasavirtaresistanssit 20 °C lämpötilassa [lähde 20, s. 19 mukailleen]

Johdin mm <sup>2</sup>	Tasavirtaresistanssi 20 °C Ω/km	
	Al	Cu
150	0,206	0,124
300	0,100	0,0601
500	0,0605	0,0366
800	0,0367	0,0221
1 200	0,0247	0,0151
1 600	0,0186	0,0113
2 000	0,0149	0,0090
2 500	0,0127	0,0072

### 5.1.2 Eristyksen lähtötiedot

Kaapeleissa on PEX-eristys, jonka terminen resistiivisyys on 3,5 Km/W ja suhteellinen permittiivisyys 2,5. Eristyksen paksuus vaihtelee jännitetaso ja johtimen poikkipinnan mukaan (taulukko 4).

Taulukko 4. Tutkittujen kaapeleiden eristyspaksuudet eri jännitetasoilla ja johdinpoikkipinnoilla

Johdin mm <sup>2</sup>	Eristyspaksuudet (mm) eri jännitetasoilla (U)			
	60 kV	110 kV	220 kV	400 kV
150	12			
300	12	15		
500	12	15	23	
800	12	15	22	35
1 200	12	15	22	32
1 600	12	15	22	29
2 000	12	15	22	29
2 500	12	15	22	29



### 5.1.3 Nauhoitusten sekä johdin- ja hohtosuojan lähtötiedot

Johdinsuojanauhoituksen paksuudelle on laskelmissa käytetty arvoa 0,5 mm. Johdinsuojanauhoitusta ei ole käytetty kaapeleilla, joilla johtimen poikkipinta on alle 800 mm<sup>2</sup>. Kosketussuojanauhoitukset sijaitsevat kosketussuojalankojen molemmin puolin ja kerroksen paksuus on 0,5 mm. Puolijohdettavien johdinsuoja- ja kosketussuojanauhoitusten lämpöresistiivisyys on 6 Km/W.

Johdin- ja hohtosuojan paksuus on 60 - 110 kV:lla 1,2 mm ja 220 - 400 kV:lla 1,5 mm. Milliken-johtimilla johdinsuojan paksuus on 2 mm jännitetasosta riippumatta.

### 5.1.4 Kosketussuojan lähtötiedot

Kosketussuojana on kerros kuparilankoja, joiden halkaisija on 2 mm. Kosketussuojan resistanssit eri poikkipinnoille perustuvat johdinstandardiin IEC 60228 (taulukko 5).

*Taulukko 5. Kosketussuojan (Cu-langat) tasavirtaresistanssit 20 °C lämpötilassa [lähde: IEC 60228, s. 19 mukailen]*

Kosketussuoja (Cu) mm <sup>2</sup>	Tasavirtaresistanssi 20 °C, Ω/km
35	0,524
50	0,387
95	0,193
150	0,124
240	0,0754
300	0,0601
400	0,0470

### 5.1.5 Alumiinilaminaatin lähtötiedot

Alumiinilaminaatin metalliosan paksuus on 0,2 mm. Alumiinilaminaatin vaikutus kuormitettavuusarvoihin on tutkituissa kaapelirakenteissa vähäinen, mutta se on kuitenkin otettu huomioon laskelmissa.

### 5.1.6 Ulkovaipan lähtötiedot

Ulkovaipan paksuus vaihtelee 3,5 - 6 mm jänniteluokan mukaan. Materiaalina on PE, jonka lämpöresistiivisyys on 3,5 Km/W.

## 5.2 Kolmioasennuksen lähtötiedot

Kolmioasennuksessa kaapelit ovat nipussa kiinni toisissaan. Asennussyvyys maanpinnasta on 1 metri kolmion ylimmän kaapelin ulkopintaan. (Kuva 5.)

## 5.3 Tasoasennuksen lähtötiedot

Tasoasennuksessa kaapeleiden välinen vapaa etäisyys on sama kuin kaapelin ulkohalkaisija. Asennus syvyys maanpinnasta on 1 metri kaapelin ulkopintaan. (Kuva 6.)

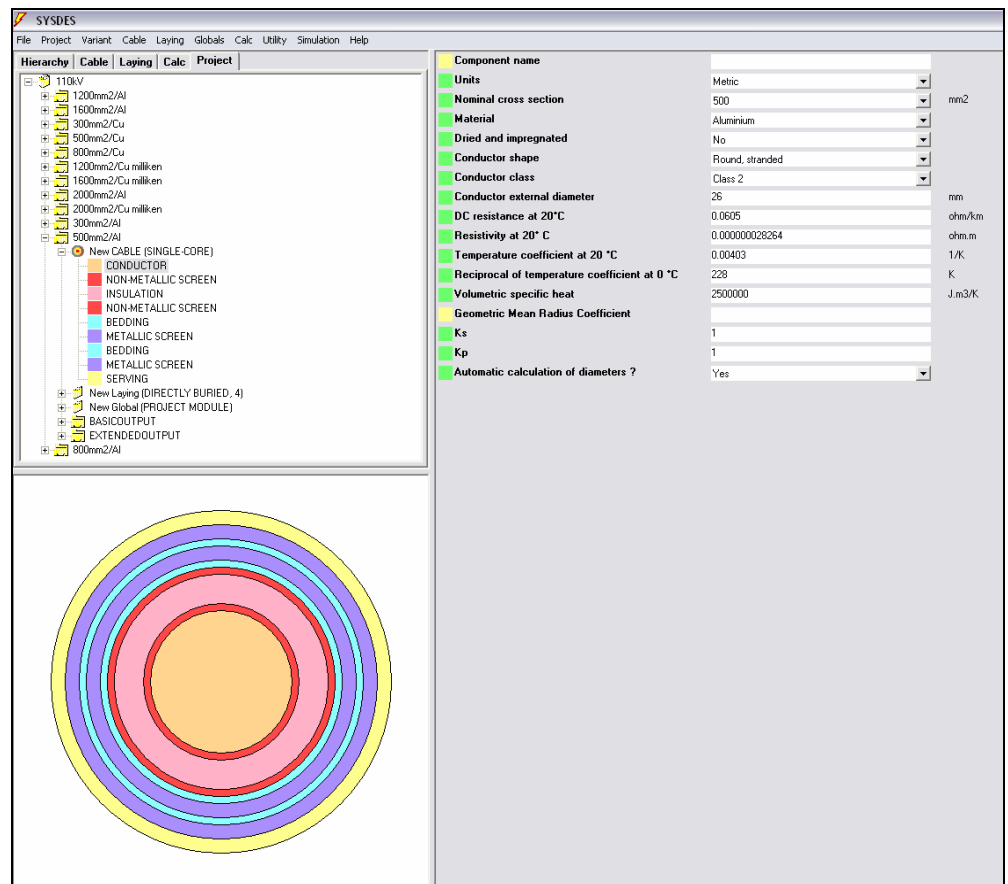
## 5.4 Maaperän lähtötiedot

Maaperän lämpötila on 15 °C ja lämpöresistiivisyys on 1,0 Km/W. Nämä olosuhteet vastaavat Etelä-Suomessa heinä- ja elokuussa 0,7 m syvyydessä maaperässä vallitsevia arvoja. Suurimpana sallittuna johdinlämpötilana on käytetty arvoa 65 °C, joka on Prysmian Cables Oy:n maa-asennuksissa suosittu ohjearvo. [1, s. 58; 5, s.10.]

## 6 KUORMITETTAVUUDEN LASKENTAOHJELMA JA SEN KÄYTTÖ

Kuormitettavuuden laskemiseen on käytetty Prysmian Cables Oy:n omaa SYSDS-ohjelmaa, jonka laskenta perustuu standardiin IEC 60287. Laskentaohjelma käyttää hyväkseen mm. luvussa 4 esitettyjä yhtälöitä. [21, s. 1 - 3.]

Ensimmäiseksi laskentaohjelmalla luodaan haluttu kaapelirakenne ja annetaan tiedot kaapelikerrosten rakenteellisista mitoista, materiaaleista ja muista ominaisuuksista. Esimerkiksi johdintietoihin syötetään johtimen halkaisija, poikkipinta, johdinmateriaali ja johtimen rakenne (kuva 7).



Kuva 7. SYSDES-laskentaohjelma, johdintietojen syöttöruutu

Seuraavaksi ohjelmassa määritellään asennustapa, ympäristön lämpötila, asennuskuvio, asennussyvyys ja kaapeleiden väliset etäisyydet toisistaan. Tämän jälkeen määritellään kaapelin nimellisjännite ja vaihtovirran taajuus sekä valitaan kosketussuojan kytkentätapa. Syötettyjen tietojen perusteella laskentaohjelma laskee kaapelille jatkuvan tilan kuormitusvirran halutulla johtimen lämpötilalla (kuva 8).

Ohjelma antaa kaapelin kuormitusvirran lisäksi mm. seuraavia tietoja:

- johdinhäviöt (W/m)
- kosketussuojan häviöt (W/m)
- kaapeliyhteyden kokonaishäviöt (W/m)
- kaapelin ulkovaipan lämpötilan (°C)
- kosketussuojaan indusoituneen jännitteen (V/m).

Essential Results	
Nominal Current	635 A
<b>Temperatures</b>	
Screen/sheath temperature	58.8
Armour temperature	58.8
Cable surface temperature	56.4
<b>Screens and Armour Losses</b>	
Sheath Loss Factor	1.777
SLF caused by circulating currents	1.777
SLF caused by eddy currents	0.
SLF lagging phase cable	1.777
SLF center cable	1.2013
SLF leading phase cable	1.2153
Armor Loss Factor	0.
ALF caused by circulating currents	0.
ALF caused by eddy currents	0.
<b>Thermal Resistances (K.m/W)</b>	
T4 numerator	1.3091
T4 denominator	1.1148
T4 single element	0.462
T4 mutual heating	0.6528
T4'	0.
T4''	0.
T4'''	0.
T'x	0.
T'xy	0.
DeltaT'x	0.
DeltaT'xy	0.
T'Lu	0.

Kuva 8. SYSDES- laskentaohjelma, yksinkertaistettu tulosuutu

## 7 TULOSTEN ARVIOINTI

Laskentaohjelmalla laskettiin kuormitusvirrat 60, 110, 220 ja 400 kV:n kaapeleille kolmio- ja tasoasennuksissa, kun kosketussuojan poikkipinta vaihteli 35 - 400 mm<sup>2</sup>. (Liite 2.)

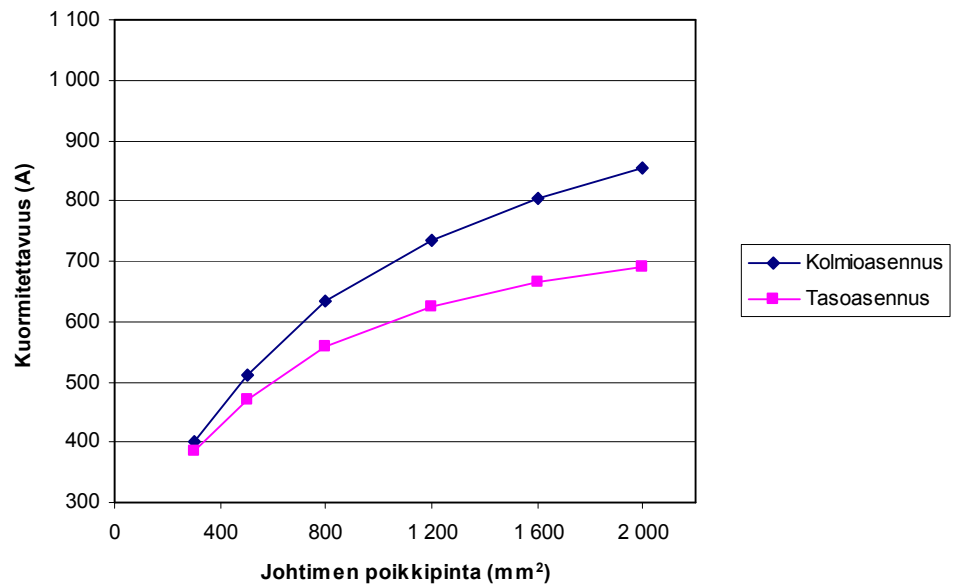
### 7.1 Asennuskuvion vaikutus kuormitettavuuteen

Asennuskuviolla on suuri vaikutus kaapelin kuormitettavuuteen. Kolmioasennuksella saavutetaan tasoasennusta parempi kuormitettavuus lähes kaikilla tutkituilla kaapeleilla. Mitä suurempia johdinpoikkipinnat ovat, sitä suurempia ovat kuormitettavuuserot asennuskuvioiden välillä. Tasoasennuksessa saavutetaan kolmioasennusta parempi kuormitettavuus ainoastaan pienimmällä alumiinijohtimella (150 mm<sup>2</sup>).

Pienillä johdinpoikkipinnoilla taso- ja kolmioasennuksen väliset kuormitettavuuserot ovat vähäiset. Pienen johtimen resistanssi on suuri, mikä aiheuttaa johtimessa suhteessa suuremmat tehohäviöt kuin kosketussuojassa. Pienillä johtimilla kaapeleiden keskinäinen lämpövaikutus korostuu, jolloin väljempi tasoasennus voi olla kuormitettavuuden kannalta parempi vaihtoehto.

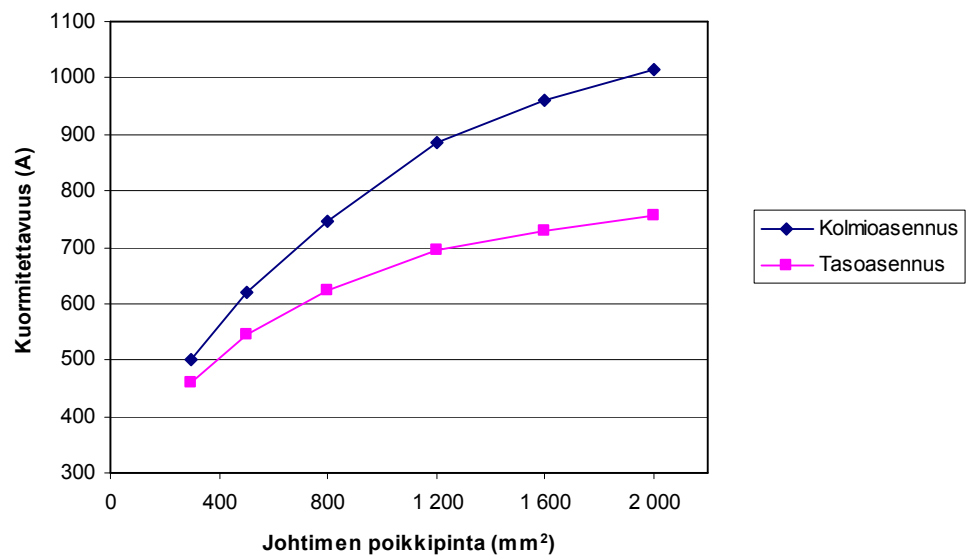
Suurilla johtimilla ja varsinkin kuparijohtimilla johdinresistanssi on pieni, joten kosketussuojan tehohäviöt ovat suuremmat suhteessa johdinhäviöihin. Kosketussuojassa syntyviä häviöitä voidaan vähentää kolmioasennuksella, jonka avulla saavutetaan parempi kuormitettavuus. (Kuvat 9 ja 10, liite 2.)

### 110 kV Al-johtimisen kaapelin kuormitettavuus



Kuva 9. 110 kV alumiinijohtimisen kaapelin kuormitettavuus, kosketussuojan poikkipinta 95 mm<sup>2</sup> ja johdinlämpötila 65 °C

### 110 kV Cu-johtimisen kaapelin kuormitettavuus



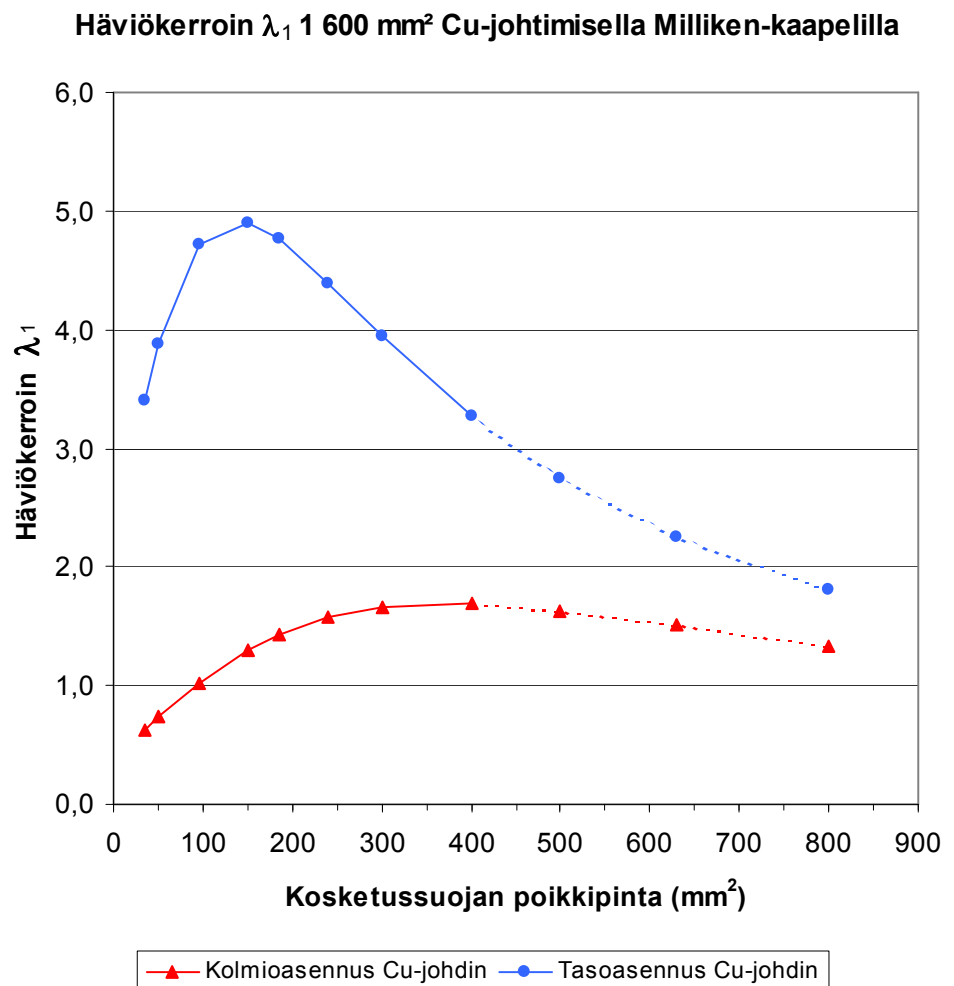
Kuva 10. 110 kV kuparijohtimisen kaapelin kuormitettavuus, kosketussuojan poikkipinta 95 mm<sup>2</sup> ja johdinlämpötila 65 °C

## 7.2 Kosketussuojan poikkipinnan vaikutus kuormitettavuuteen

### 7.2.1 Kosketussuojan häviökerroin

Kuvassa 11 on esitetty häviökertoimen käyttäytyminen, kun kosketussuojan koko ja resistanssi muuttuvat. Kuvasta voidaan huomata, että häviökerroin pienenee kosketussuojan resistanssin lähestyessä hyvin pieniä tai hyvin suuria arvoja. Häviökerroin saa tasoasennuksessa huippuarvonsa kosketussuojan ollessa 150 mm<sup>2</sup>. Kolmioasennuksessa häviökerroin on suurimmillaan 400 mm<sup>2</sup> kosketussuojan poikkipinnalla.

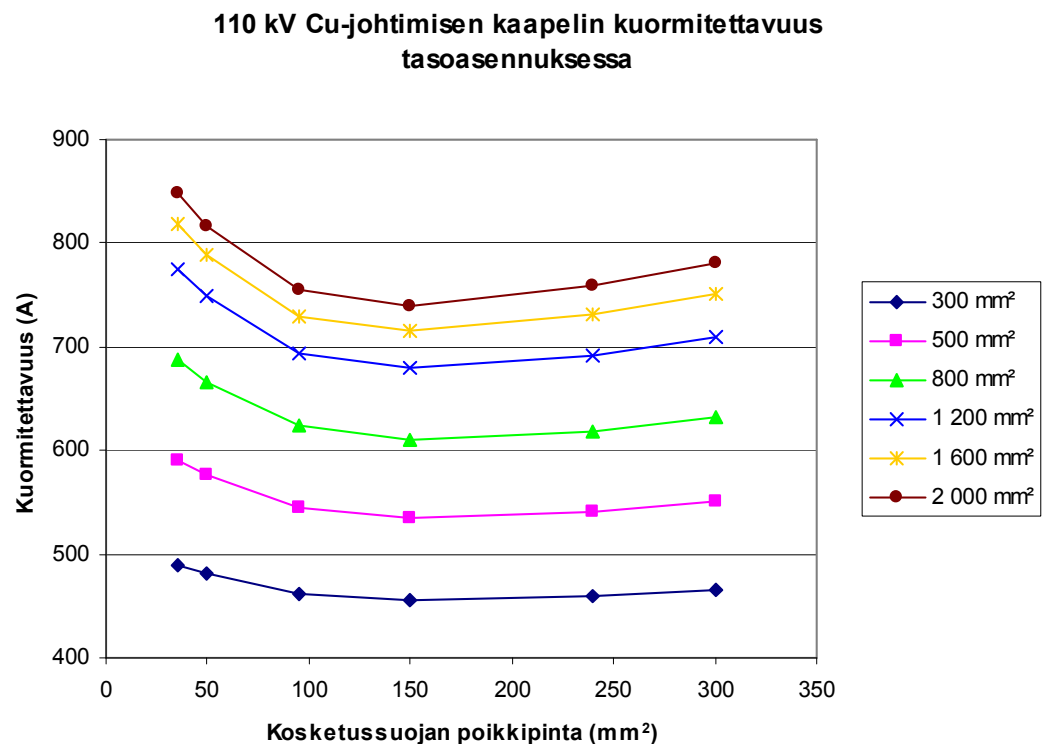
Häviökertoimen käyttäytymisen perusteella voidaan sanoa, että kosketussuojan poikkipinta vaikuttaa kaapelin kuormitettavuuteen. Tasoasennuksessa häviökerroin on huomattavasti suurempi kuin kolmioasennuksessa.



Kuva 11. Häviökertoimen  $\lambda_1$  käyttäytyminen eri kosketussuojan poikkipinnoilla 110 kV:lla 1 600 mm<sup>2</sup> kuparijohtimisella Milliken-kaapelilla

### 7.2.2 Kuormitettavuudet

Tasoasennuksessa kuormitettavuus on pienimmillään kosketussuojan ollessa 150 mm<sup>2</sup> (kuva 12). Kosketussuojan pienimmillä ja suurimmilla poikkipinnoilla tasoasennuksen kuormitusarvot kasvavat, koska kosketussuojan häviökerroin pienenee.

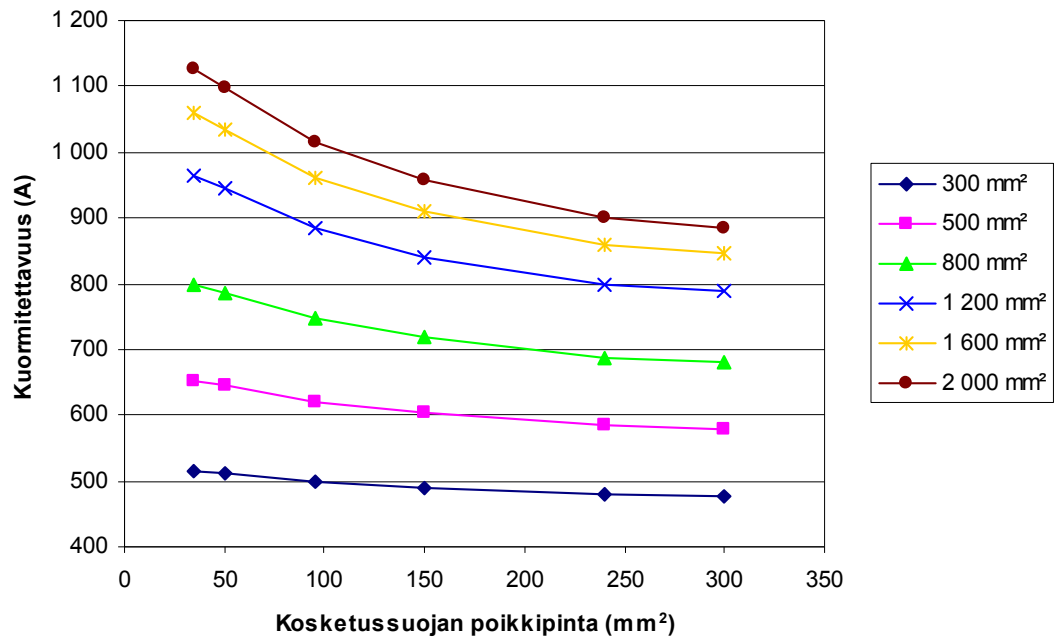


Kuva 12. 110 kV kaapelin kuormitettavuus tasoasennuksessa eri johdinpoikkipinnoilla ja kosketussuojan poikkipinnoilla, johdinlämpötila 65 °C

Kolmioasennuksessa kuormitettavuus pienenee kosketussuojan poikkipinnan kasvaessa 35 - 300 mm<sup>2</sup> (kuva 13). Häviökertoimen käyttäytymisestä voidaan kuitenkin päätellä, että kasvattamalla kosketussuojan poikkipintaa riittävästi myös kolmioasennuksella kuormitettavuus alkaa saada suurempia arvoja.

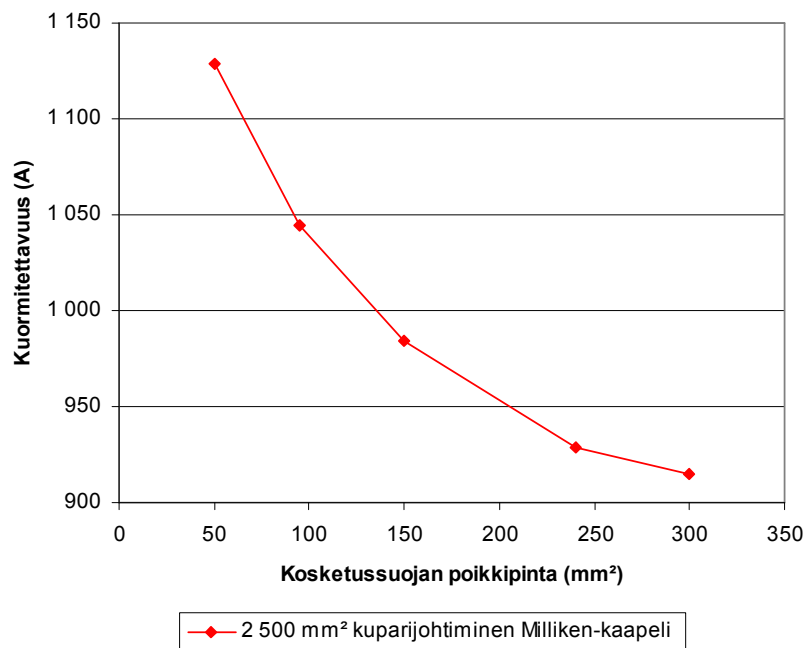
Suurin kuormitettavuus, 1 129 A saavutetaan kolmioasennuksessa 220 kV:n 2 500 mm<sup>2</sup> kuparijohtimisella Milliken-kaapelilla, kun kosketussuoja on 50 mm<sup>2</sup>. Kun kyseisen kaapelin kosketussuojaa kasvatetaan arvoon 300 mm<sup>2</sup>, kuormitettavuudeksi saadaan 914 A, joten pelkkä kosketussuojan poikkipinnan muutos pienentää kuormitettavuutta 215 A (n. 19 %) (kuva 14). (Liite 2.)

### 110 kV Cu-johtimisen kaapelin kuormitettavuus kolmioasennuksessa



Kuva 13. 110 kV kaapelin kuormitettavuus kolmioasennuksessa eri johdinpoikkipinnoilla ja kosketussuojan poikkipinnoilla, johdinlämpötila 65 °C

### 220 kV Cu-johtimisen kaapelin kuormitettavuus kolmioasennuksessa



Kuva 14. 220 kV, 2 500 mm<sup>2</sup> kuparijohtimisen Milliken-kaapelin kuormitettavuus kolmioasennuksessa eri kosketussuojan poikkipinnoilla, johdinlämpötila 65 °C

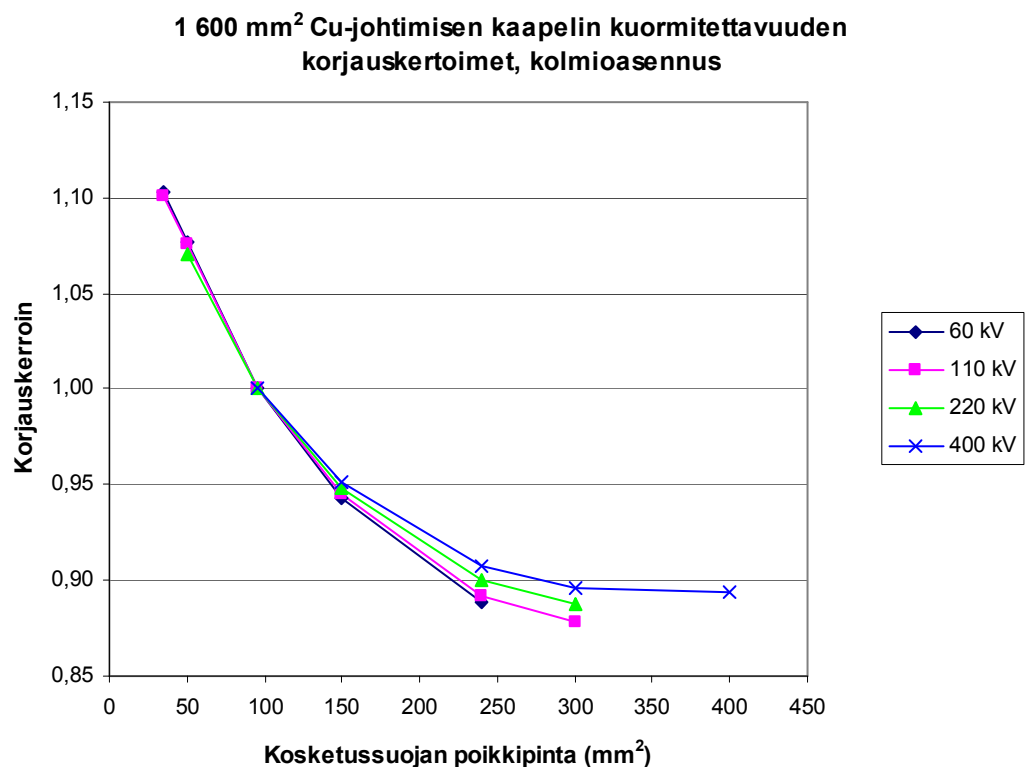


### 7.3 Kuormitettavuuden korjauskertoimet

Tuloksista tehtiin kuormitettavuusien vertailu eri kosketussuojan poikkipinnoilla. Vertailukohteeksi valittiin 95 mm<sup>2</sup> kosketussuojan poikkipinnalla saatu kuormitusvirran arvo. Kuormitettavuuden korjauskertoimet muille kosketussuojien poikkipinnoille saatiin jakamalla niiden kuormitusvirta-arvot vertailuarvon kanssa.

#### 7.3.1 Kuormitettavuuden korjauskertoimien käyttäytyminen

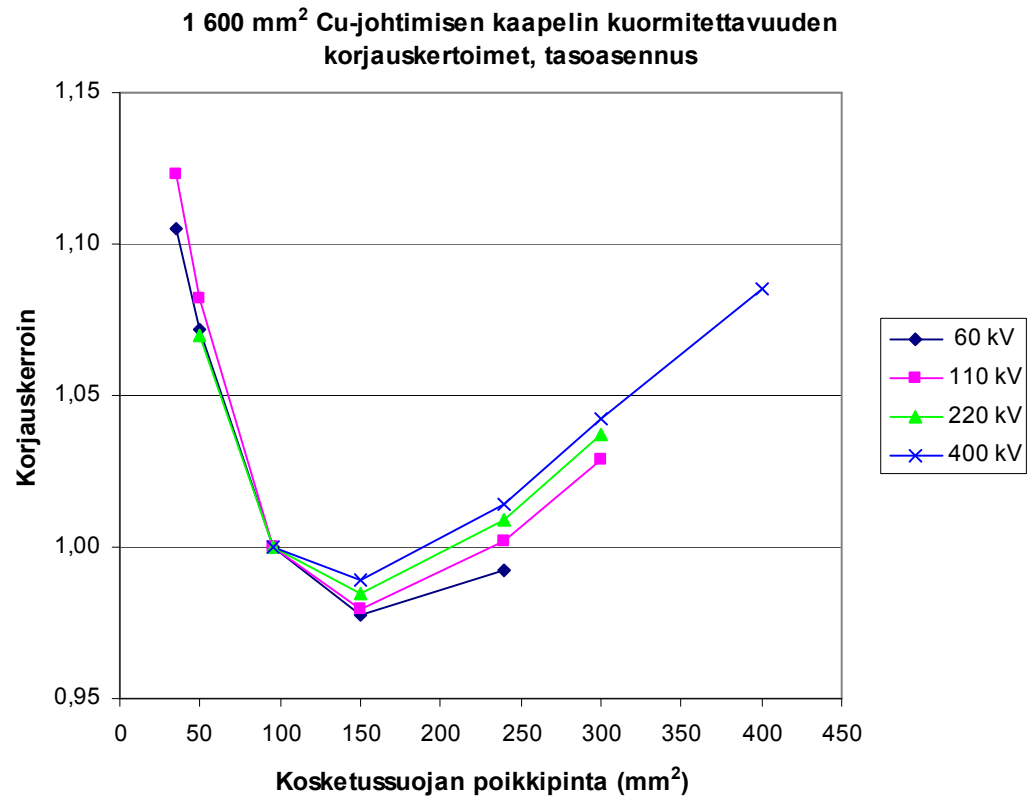
Kolmioasennuksessa kuormitettavuuden korjauskertoimet pienenevät kosketussuojan poikkipinnan kasvaessa (kuva 15). Suurimmilla johtimilla korjauskertoimet ovat jopa yli 10 % vertailuarvoa pienemmät.



Kuva 15. Kolmioasennetun 1 600 mm<sup>2</sup> kuparijohtimisen kaapelin kuormitettavuuden korjauskertoimet eri kosketussuojan poikkipinnoilla ja jännitetasoilla, johdinlämpötila 65 °C

Tasoaesennuksessa suurimmat kosketussuojan poikkipinnat puolestaan kasvattavat korjauskerrointa jopa 10 %. (Liite 3). Jos kaapelien rakenne pysyy samantyyppisenä, jännitetasolla ei ole kovin suurta vaikutusta kuormitettavuuden korjauskertoimiin (kuvat 15 ja 16). Pienet erot korjauskertoimissa eri

jännitetasojen välillä aiheutuvat erilaisista eristyspaksuuksista, jotka muuttavat kosketussuojan reaktanssia  $X$ .



Kuva 16. Tasoasennetun 1 600 mm<sup>2</sup> kuparijohtimisen kaapelin kuormitettavuuden korjauskertoimet eri kosketussuojan poikkipinnoilla ja jännitetasoilla, johdinlämpötila 65 °C

### 7.3.2 Kuormitettavuuden korjauskerrointaulukot

Molemmille johdnmateriaaleille on laadittu tutkituilla jännitetasoilla kuormitettavuuden korjauskerrointaulukot taso- ja kolmioasennuksessa (liite 3). Eri jännitetasojen korjauskertoimissa ei kuitenkaan todettu olevan suuria eroja, joten ne yhdistettiin yhdeksi kerrointaulukoksi. Näin saatiin neljä eri kerrointaulukkoa:

- Al- johtimisille kaapeleille tasoasennuksessa (taulukko 6)
- Cu- johtimisille kaapeleille tasoasennuksessa (taulukko 7)
- Al- johtimisille kaapeleille kolmioasennuksessa (taulukko 8)
- Cu- johtimisille kaapeleille kolmioasennuksessa (taulukko 9).

Korjauskerrointaulukoiden yhdistäminen on toteutettu niin, että taulukkoon on valittu aina pienin kerroin-arvo. Kertoimien eroista aiheutuva suurin virhe taulukoissa 6, 7, 8 ja 9 on - 2,15 %.

Taulukoiden 6, 7, 8, 9, 10 ja 11 korjauskertoimet on annettu sadasosien tarkkuudella, joten mahdolliset pyöristysvirheet kertoimissa ovat suurimmillaan  $\pm 0,005$  eli  $\pm 0,5$  prosenttiyksikköä. Kertoimien tarkat arvot on esitetty liitteessä 2.

*Taulukko 6. 60 - 400 kV tasoasennettujen Al-johdinkaapeliin kuormitettavuuden korjauskertoimet kosketussuojien erilaisilla poikkipinnoilla*

Kuormitettavuuden korjauskerroin tasoasennuksessa, Al-johdin							
Al-johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400
150	1,03	1,02	1,00	0,99	1,00		
300	1,04	1,03	1,00	0,99	1,00	1,01	
500	1,06	1,03	1,00	0,98	0,99	1,01	
800	1,08	1,05	1,00	0,98	0,99	1,01	1,05
1 200	1,09	1,05	1,00	0,98	0,99	1,02	1,06
1 600	1,10	1,06	1,00	0,98	0,99	1,02	1,07
2 000	1,10	1,06	1,00	0,98	1,00	1,02	1,08
2 500		1,06	1,00	0,99	1,01	1,04	1,09

*Taulukko 7. 60 - 400 kV tasoasennettujen Cu-johdinkaapeliin kuormitettavuuden korjauskertoimet kosketussuojien erilaisilla poikkipinnoilla*

Kuormitettavuuden korjauskerroin tasoasennuksessa, Cu-johdin							
Cu-johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400
150	1,04	1,03	1,00	0,99	1,00		
300	1,06	1,04	1,00	0,98	0,99	1,01	
500	1,08	1,05	1,00	0,98	0,99	1,01	
800	1,08	1,06	1,00	0,98	0,99	1,01	1,06
1 200	1,10	1,07	1,00	0,98	0,99	1,02	1,08
1 600	1,11	1,07	1,00	0,98	0,99	1,03	1,09
2 000	1,12	1,07	1,00	0,98	1,01	1,04	1,09
2 500		1,07	1,00	0,99	1,02	1,05	1,10

Taulukko 8. 60 - 400 kV kolmioasennettujen Al-johdinkaapelien kuormitettavuuden korjauskertoimet kosketussuojien erilaisilla poikkipinnoilla

Kuormitettavuuden korjauskerroin kolmioasennuksessa, Al-johdin							
Al-johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400
150	1,01	1,01	1,00	0,99	0,99		
300	1,02	1,02	1,00	0,99	0,97	0,97	
500	1,03	1,03	1,00	0,98	0,96	0,95	
800	1,05	1,04	1,00	0,97	0,94	0,93	0,95
1 200	1,06	1,05	1,00	0,96	0,93	0,92	0,93
1 600	1,07	1,05	1,00	0,96	0,92	0,91	0,92
2 000	1,08	1,06	1,00	0,96	0,91	0,90	0,91
2 500		1,07	1,00	0,95	0,91	0,89	0,90

Taulukko 9. 60 - 400 kV kolmioasennettujen Cu-johdinkaapelien kuormitettavuuden korjauskertoimet kosketussuojien erilaisilla poikkipinnoilla

Kuormitettavuuden korjauskerroin kolmioasennuksessa, Cu-johdin							
Cu-johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400
150	1,02	1,01	1,00	0,99	0,98		
300	1,03	1,03	1,00	0,98	0,96	0,95	
500	1,05	1,03	1,00	0,97	0,94	0,93	
800	1,07	1,05	1,00	0,96	0,92	0,91	0,93
1 200	1,09	1,06	1,00	0,95	0,90	0,89	0,91
1 600	1,10	1,07	1,00	0,94	0,89	0,88	0,89
2 000	1,11	1,08	1,00	0,94	0,89	0,87	0,89
2 500		1,08	1,00	0,94	0,89	0,87	0,88

Alumiini- ja kuparijohdinkaapeleiden kuormitettavuuden korjauskertoimet ovat yhteneväiset molemmilla asennustavoilla, kun alumiinijohtimilla otetaan tarkasteltavaksi kuparijohtimia suuremmat johdinpoikkipinnat. Seuraavilla alumiinijohtimien ja kuparijohtimien poikkipinnoilla kerroinarvot ovat lähes samat:

- Al 150 mm<sup>2</sup> ja Cu 150 mm<sup>2</sup>
- Al 500 mm<sup>2</sup> ja Cu 300 mm<sup>2</sup>
- Al 800 mm<sup>2</sup> ja Cu 500 mm<sup>2</sup>
- Al 1 600 mm<sup>2</sup> ja Cu 800 mm<sup>2</sup>
- Al 2 000 mm<sup>2</sup> ja Cu 1 200 mm<sup>2</sup>
- Al 2 500 mm<sup>2</sup> ja Cu 1 600 mm<sup>2</sup>.

Edellä mainittujen yhteneväisyyksien perusteella taso- ja kolmioasennukselle on tehty omat yhdistetyt taulukot, jotka sisältävät korjauskertoimet molemmille johdinmateriaaleille. Kertoimet on valittu taulukoihin pienimmän arvon mukaan. Alumiini- ja kuparijohtimisilla kaapeleilla kuormituskertoimien eroista aiheutuva suurin virhe taulukoissa 10 ja 11 on - 1,43 %. (Taulukot 10 ja 11.)

Taulukoita voidaan käyttää alustavaan kuormitettavuuden arviointiin, kun kosketussuojan poikkipintaa muutetaan. Kaapelin todellinen kuormitettavuus on laskettava tapauskohtaisesti.

*Taulukko 10. 60 - 400 kV tasoasennettujen Al- ja Cu-johdinkaapeli kuormitettavuuden korjauskertoimet kosketussuojien erilaisilla poikkipinnoilla*

Kuormitettavuuden korjauskerroin tasoasennuksessa, Al- ja Cu-johdin								
Johdin (mm <sup>2</sup> )		Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
Al	Cu	35	50	95	150	240	300	400
150	150	1,03	1,02	1,00	0,99	1,00		
300		1,04	1,03	1,00	0,99	1,00	1,01	
500	300	1,06	1,03	1,00	0,98	0,99	1,01	
800	500	1,08	1,05	1,00	0,98	0,99	1,01	1,05
1 200		1,09	1,05	1,00	0,98	0,99	1,02	1,06
1 600	800	1,08	1,06	1,00	0,98	0,99	1,01	1,06
2 000	1 200	1,10	1,06	1,00	0,98	0,99	1,02	1,08
2 500	1 600	1,11	1,06	1,00	0,98	0,99	1,03	1,09
	2 000	1,12	1,07	1,00	0,98	1,01	1,04	1,09
	2 500		1,07	1,00	0,99	1,02	1,05	1,10

*Taulukko 11. 60 - 400 kV kolmioasennettujen Al- ja Cu-johdinkaapeli kuormitettavuuden korjauskertoimet kosketussuojien erilaisilla poikkipinnoilla*

Kuormitettavuuden korjauskerroin kolmioasennuksessa, Al- ja Cu-johdin								
Johdin (mm <sup>2</sup> )		Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
Al	Cu	35	50	95	150	240	300	400
150	150	1,01	1,01	1,00	0,99	0,98		
300		1,02	1,02	1,00	0,99	0,97	0,97	
500	300	1,03	1,02	1,00	0,98	0,96	0,95	
800	500	1,05	1,03	1,00	0,97	0,94	0,93	0,95
1 200		1,06	1,04	1,00	0,96	0,93	0,92	0,93
1 600	800	1,07	1,05	1,00	0,96	0,92	0,91	0,92
2 000	1 200	1,08	1,06	1,00	0,95	0,90	0,89	0,91
2 500	1 600	1,10	1,07	1,00	0,94	0,89	0,88	0,89
	2 000	1,11	1,08	1,00	0,94	0,89	0,87	0,89
	2 500		1,08	1,00	0,94	0,89	0,87	0,88

## 8 YHTEENVETO

Insinööriyössä on tutkittu 60 - 400 kV:n kaapeleiden kuormitettavuuksia. Työssä on käsitelty myös kaapelin rakenteen, asennusympäristön, asennuskuvion ja kosketussuojan kytkentätapojen vaikutusta kaapelin kuormitettavuuteen.

Lisäksi työssä on esitelty standardin IEC 60287 laskentaan perustuvat yhtälöt, joilla voidaan laskea kaapelin kuormitettavuus. Tutkittavien kaapeleiden rakenne ja asennustavat on esitelty ja niille on laskettu kuormitettavuudet SYSDES-laskentaohjelmalla.

Kaapeleiden kuormitettavuudet käyttäytyivät eri tavoin taso- ja kolmioasennuksissa kosketussuojan poikkipinnan muuttuessa. Molemmilla asennustavoilla kosketussuojan poikkipinnalla todettiin olevan merkittävä vaikutus kaapelin kuormitettavuuteen. Kuormitettavuuden kannalta kolmioasennuksen todettiin olevan tasoasennusta parempi vaihtoehto.

Kuormitettavuuden korjauskertoimien suurimmat ja pienimmät arvot saatiin kuparijohtimisilla kaapeleilla, joilla olivat suurimmat kosketussuojan häviöt suhteessa johdinhäviöihin. Eri jännitetasoilla ei ollut merkittävää vaikutusta korjauskertoimiin.

Tuloksista laadittiin kuormitettavuuden korjauskerrointaulukot kolmio- ja tasoasennuksessa. Näitä taulukoita voidaan käyttää kuormitettavuuden arviointiin tapauksissa, joissa kaapelin rakenne, asennustapa ja asennusolosuhteet pysyvät samana, mutta kosketussuojan poikkipintaa muutetaan.

## LÄHTEET

- [1] Alatalo Pentti, *Voimakaapelit ja asennusjohdot*. Oy Nokia Ab Kaapelitehdas. Espoo: Oy Kodaprint Ab. 1975.
- [2] Anders George J. *Rating of electric power cables*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc: New York. 1997.
- [3] *High Voltage Cables* -esite. Oy Prysmian Cables and Systems Ab: 11/2006.
- [4] *High Voltage References* -esite. Oy Prysmian Cables and Systems Ab: 10/2007.
- [5] *Energiakaapelit 2009* -esite. Oy Prysmian Cables and Systems Ab: 1/2009.
- [6] Aro Martti ym. *Suurjännitetekniikka*. Tekijät ja Otatieto Oy: Gummerus Kirjapaino Oy Jyväskylä, 1996.
- [7] International standard, *Cables for rated voltages from 6 kV ( $U_m = 7,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV)*. 60502-2, IEC: 2005-03, second edition.
- [8] Aarela K, Torikka M, Kouti T, *Voimakaapelit-luento*. Oy Nokia Ab Kaapelitehdas: joulukuu 1992.
- [9] Dipl. ins. Risto Kivisaaren haastattelu talvella 2010. Oy Prysmian Cables and Systems Ab.
- [10] International Standard, *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV up to 500 kV*. IEC: 62067. 2006, edition 1.1.
- [11] Heinhold Lothar, *Power Cables and their Application Part 1*. Siemens, Aktiengesellschaft 1987.
- [12] Suomen standardisoimisliitto, *PEX-eristeiset 64/110 kV voimakaapelit. Rakenne ja koestus*. SFS 5702. 1991-08.
- [13] Paavola Martti, Halme Heikki, *Sähkölaitosten suojarieleet*. Porvoo: WSOY. 1979, neljäs painos.

- [14] Oy Prysmian Cables and Systems Ab. Kuormitettavuuslaskelmissa käytettyjä kuvia.
- [15] Voipio Erkki, *Sähkö- ja magneettikentät*. Teknillisen korkeakoulun ylioppilaskunta. Otaniemi: 1970.
- [16] ABB rev3.pdf, *XLPE Underground Cable Systems users's guide*: Elanders, Västerås. 2008-8.
- [17] Pirelli Cables, *Bonding and earthing*. Energy Cables Design Manual: E\E\903\4, 24 March 1994.
- [18] International Standard, *Electric Cables - Calculation of the current rating*. IEC: 60287-1-1: 2006-12, edition 2.0.
- [19] International Standard, *Electric Cables - Calculation of the current rating*. IEC: 60287-2-1: 2006-5, edition 1.2.
- [20] International Standard, *Conductors of insulated cables*. IEC: 60228-2-1: 2004-11.
- [21] *SYSDES manual*: released on April 30th 2006.



## LASKENNASSA KÄYTETTYJEN KAAPELEIDEN RAKENNETIT

36/60 (72.5) kV												
Johtimen rakenne	Pyöreä kerrattu alumiinijohdin											
Johdinpoikkipinta	150 mm <sup>2</sup>		300 mm <sup>2</sup>		500 mm <sup>2</sup>		800 mm <sup>2</sup>		1 200 mm <sup>2</sup>		1 600 mm <sup>2</sup>	
Mitat (mm)	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija
Johdin		14,1		20,3		26,0		33,4		40,8		47,2
Johdinsuojanauhoitus	0,0	14,1	0,0	20,3	0,0	26,0	0,5	34,4	0,5	41,8	0,5	48,2
Johdinsuoja	1,2	16,5	1,2	22,7	1,2	28,4	1,2	36,8	1,2	44,2	1,2	50,6
Eristys	12,0	40,5	12,0	46,7	12,0	52,4	12,0	60,8	12,0	68,2	12,0	74,6
Hohtosuoja	1,2	42,9	1,2	49,1	1,2	54,8	1,2	63,2	1,2	70,6	1,2	77,0
Kosketussuojanauhoitus	0,5	43,9	0,5	50,1	0,5	55,8	0,5	64,2	0,5	71,6	0,5	78,0
Kosketussuoja	2,0	47,9	2,0	54,1	2,0	59,8	2,0	68,2	2,0	75,6	2,0	82,0
Kosketussuojanauhoitus	0,5	48,9	0,5	55,1	0,5	60,8	0,5	69,2	0,5	76,6	0,5	83,0
Alumiinilaminaatti	0,2	49,3	0,2	55,5	0,2	61,2	0,2	69,6	0,2	77,0	0,2	83,4
Ulkovaippa	3,5	56,3	3,5	62,5	3,5	68,2	3,5	76,6	3,5	84,0	3,5	90,4

36/60 (72.5) kV												
Johtimen rakenne	Pyöreä kerrattu kuparijohdin						Milliken-kuparijohdin					
Johdinpoikkipinta	150 mm <sup>2</sup>		300 mm <sup>2</sup>		500 mm <sup>2</sup>		800 mm <sup>2</sup>		1 200 mm <sup>2</sup>		1 600 mm <sup>2</sup>	
Mitat (mm)	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija
Johdin		14,1		20,3		26,0		33,4		42,0		48,8
Johdinsuojanauhoitus	0,0	14,1	0,0	20,3	0,0	26,0	0,5	34,4	0,5	43,0	0,5	49,8
Johdinsuoja	1,2	16,5	1,2	22,7	1,2	28,4	1,2	36,8	2,0	47,0	2,0	53,8
Eristys	12,0	40,5	12,0	46,7	12,0	52,4	12,0	60,8	12,0	71,0	12,0	77,8
Hohtosuoja	1,2	42,9	1,2	49,1	1,2	54,8	1,2	63,2	1,2	73,4	1,2	80,2
Kosketussuojanauhoitus	0,5	43,9	0,5	50,1	0,5	55,8	0,5	64,2	0,5	74,4	0,5	81,2
Kosketussuoja	2,0	47,9	2,0	54,1	2,0	59,8	2,0	68,2	2,0	78,4	2,0	85,2
Kosketussuojanauhoitus	0,5	48,9	0,5	55,1	0,5	60,8	0,5	69,2	0,5	79,4	0,5	86,2
Alumiinilaminaatti	0,2	49,3	0,2	55,5	0,2	61,2	0,2	69,6	0,2	79,8	0,2	86,6
Ulkovaippa	3,5	56,3	3,5	62,5	3,5	68,2	3,5	76,6	3,5	86,8	3,5	93,6

64/110 (123) kV												
Johtimen rakenne	Pyöreä kerrattu alumiinijohdin											
Johdinpoikkipinta	300 mm <sup>2</sup>		500 mm <sup>2</sup>		800 mm <sup>2</sup>		1 200 mm <sup>2</sup>		1 600 mm <sup>2</sup>		2 000 mm <sup>2</sup>	
Mitat (mm)	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija
Johdin		20,3		26,0		33,4		40,8		47,2		53,0
Johdinsuojanauhoitus	0,0	20,3	0,0	26,0	0,5	34,4	0,5	41,8	0,5	48,2	0,5	54,0
Johdinsuoja	1,2	22,7	1,2	28,4	1,2	36,8	1,2	44,2	1,2	50,6	1,2	56,4
Eristys	15,0	52,7	15,0	58,4	15,0	66,8	15,0	74,2	15,0	80,6	15,0	86,4
Hohtosuoja	1,2	55,1	1,2	60,8	1,2	69,2	1,2	76,6	1,2	83,0	1,2	88,8
Kosketussuojanauhoitus	0,5	56,1	0,5	61,8	0,5	70,2	0,5	77,6	0,5	84,0	0,5	89,8
Kosketussuoja	2,0	60,1	2,0	65,8	2,0	74,2	2,0	81,6	2,0	88,0	2,0	93,8
Kosketussuojanauhoitus	0,5	61,1	0,5	66,8	0,5	75,2	0,5	82,6	0,5	89,0	0,5	94,8
Alumiinilaminaatti	0,2	61,5	0,2	67,2	0,2	75,6	0,2	83,0	0,2	89,4	0,2	95,2
Ulkovaippa	4,0	69,5	4,0	75,2	4,0	83,6	4,0	91,0	4,0	97,4	4,0	103,2

64/110 (123) kV												
Johtimen rakenne	Pyöreä kerrattu kuparijohdin						Milliken-kuparijohdin					
Johdinpoikkipinta	300 mm <sup>2</sup>		500 mm <sup>2</sup>		800 mm <sup>2</sup>		1 200 mm <sup>2</sup>		1 600 mm <sup>2</sup>		2 000 mm <sup>2</sup>	
Mitat (mm)	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija
Johdin		20,3		26,0		33,4		42,0		48,8		55,0
Johdinsuojanauhoitus	0,0	20,3	0,0	26,0	0,5	34,4	0,5	43,0	0,5	49,8	0,5	56,0
Johdinsuoja	1,2	22,7	1,2	28,4	1,2	36,8	2,0	47,0	2,0	53,8	2,0	60,0
Eristys	15,0	52,7	15,0	58,4	15,0	66,8	15,0	77,0	15,0	83,8	15,0	90,0
Hohtosuoja	1,2	55,1	1,2	60,8	1,2	69,2	1,2	79,4	1,2	86,2	1,2	92,4
Kosketussuojanauhoitus	0,5	56,1	0,5	61,8	0,5	70,2	0,5	80,4	0,5	87,2	0,5	93,4
Kosketussuoja	2,0	60,1	2,0	65,8	2,0	74,2	2,0	84,4	2,0	91,2	2,0	97,4
Kosketussuojanauhoitus	0,5	61,1	0,5	66,8	0,5	75,2	0,5	85,4	0,5	92,2	0,5	98,4
Alumiinilaminaatti	0,2	61,5	0,2	67,2	0,2	75,6	0,2	85,8	0,2	92,6	0,2	98,8
Ulkovaippa	4,0	69,5	4,0	75,2	4,0	83,6	4,0	93,8	4,0	100,6	4,0	106,8

127/220 (245) kV												
Johtimen rakenne	Pyöreä kerrattu alumiinjohdin										Milliken-alumiinjohdin	
Johdinpoikkipinta	500 mm <sup>2</sup>		800 mm <sup>2</sup>		1 200 mm <sup>2</sup>		1 600 mm <sup>2</sup>		2 000 mm <sup>2</sup>		2 500 mm <sup>2</sup>	
Mitat (mm)	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija
Johdin		26,0		33,4		40,8		47,2		53,0		61,8
Johdinsuojanauhoitus	0,0	26,0	0,5	34,4	0,5	41,8	0,5	48,2	0,5	54,0	0,5	62,8
Johdinsuoja	1,5	29,0	1,5	37,4	1,5	44,8	1,5	51,2	1,5	57,0	2,0	66,8
Eristys	23,0	75,0	22,0	81,4	22,0	88,8	22,0	95,2	22,0	101,0	22,0	110,8
Hohtosuoja	1,5	78,0	1,5	84,4	1,5	91,8	1,5	98,2	1,5	104,0	1,5	113,8
Kosketussuojanauhoitus	0,5	79,0	0,5	85,4	0,5	92,8	0,5	99,2	0,5	105,0	0,5	114,8
Kosketussuoja	2,0	83,0	2,0	89,4	2,0	96,8	2,0	103,2	2,0	109,0	2,0	118,8
Kosketussuojanauhoitus	0,5	84,0	0,5	90,4	0,5	97,8	0,5	104,2	0,5	110,0	0,5	119,8
Alumiinilaminaatti	0,2	84,4	0,2	90,8	0,2	98,2	0,2	104,6	0,2	110,4	0,2	120,2
Ulkovaippa	5,0	94,4	5,0	100,8	5,0	108,2	5,0	114,6	5,0	120,4	5,0	130,2
Johtimen rakenne	Pyöreä kerrattu kuparijohdin					Milliken-kuparijohdin						
Johdinpoikkipinta	500 mm <sup>2</sup>		800 mm <sup>2</sup>		1 200 mm <sup>2</sup>		1 600 mm <sup>2</sup>		2 000 mm <sup>2</sup>		2 500 mm <sup>2</sup>	
Mitat (mm)	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija
Johdin		26,0		33,4		42,0		48,8		55,0		61,8
Johdinsuojanauhoitus	0,0	26,0	0,5	34,4	0,5	43,0	0,5	49,8	0,5	56,0	0,5	62,8
Johdinsuoja	1,5	29,0	1,5	37,4	2,0	47,0	2,0	53,8	2,0	60,0	2,0	66,8
Eristys	23,0	75,0	22,0	81,4	22,0	91,0	22,0	97,8	22,0	104,0	22,0	110,8
Hohtosuoja	1,5	78,0	1,5	84,4	1,5	94,0	1,5	100,8	1,5	107,0	1,5	113,8
Kosketussuojanauhoitus	0,5	79,0	0,5	85,4	0,5	95,0	0,5	101,8	0,5	108,0	0,5	114,8
Kosketussuoja	2,0	83,0	2,0	89,4	2,0	99,0	2,0	105,8	2,0	112,0	2,0	118,8
Kosketussuojanauhoitus	0,5	84,0	0,5	90,4	0,5	100,0	0,5	106,8	0,5	113,0	0,5	119,8
Alumiinilaminaatti	0,2	84,4	0,2	90,8	0,2	100,4	0,2	107,2	0,2	113,4	0,2	120,2
Ulkovaippa	5,0	94,4	5,0	100,8	5,0	110,4	5,0	117,2	5,0	123,4	5,0	130,2

220/400 (420) kV												
Johtimen rakenne	Pyöreä kerrattu alumiinjohdin										Milliken-alumiinjohdin	
Johdinpoikkipinta	800 mm <sup>2</sup>		1 200 mm <sup>2</sup>		1 600 mm <sup>2</sup>		2 000 mm <sup>2</sup>		2 500 mm <sup>2</sup>			
Mitat (mm)	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija		
Johdin		33,4		40,8		47,2		55,0		61,8		
Johdinsuojanauhoitus	0,5	34,4	0,5	41,8	0,5	48,2	0,5	56,0	0,5	62,8		
Johdinsuoja	1,5	37,4	1,5	44,8	1,5	51,2	2,0	60,0	2,0	66,8		
Eristys	35,0	107,4	32,0	108,8	29,0	109,2	29,0	118,0	29,0	124,8		
Hohtosuoja	1,5	110,4	1,5	111,8	1,5	112,2	1,5	121,0	1,5	127,8		
Kosketussuojanauhoitus	0,5	111,4	0,5	112,8	0,5	113,2	0,5	122,0	0,5	128,8		
Kosketussuoja	2,0	115,4	2,0	116,8	2,0	117,2	2,0	126,0	2,0	132,8		
Kosketussuojanauhoitus	0,5	116,4	0,5	117,8	0,5	118,2	0,5	127,0	0,5	133,8		
Alumiinilaminaatti	0,2	116,8	0,2	118,2	0,2	118,6	0,2	127,4	0,2	134,2		
Ulkovaippa	6,0	128,8	6,0	130,2	6,0	130,6	6,0	139,4	6,0	146,2		
Johtimen rakenne	Pyöreä kerrattu kuparijohdin					Milliken-kuparijohdin						
Johdinpoikkipinta	800 mm <sup>2</sup>		1 200 mm <sup>2</sup>		1 600 mm <sup>2</sup>		2 000 mm <sup>2</sup>		2 500 mm <sup>2</sup>			
Mitat (mm)	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija	Paksuus	Halkaisija		
Johdin		33,4		42,0		48,8		55,0		61,8		
Johdinsuojanauhoitus	0,5	34,4	0,5	43,0	0,5	49,8	0,5	56,0	0,5	62,8		
Johdinsuoja	1,5	37,4	2,0	47,0	2,0	53,8	2,0	60,0	2,0	66,8		
Eristys	35,0	107,4	32,0	111,0	29,0	111,8	29,0	118,0	29,0	124,8		
Hohtosuoja	1,5	110,4	1,5	114,0	1,5	114,8	1,5	121,0	1,5	127,8		
Kosketussuojanauhoitus	0,5	111,4	0,5	115,0	0,5	115,8	0,5	122,0	0,5	128,8		
Kosketussuoja	2,0	115,4	2,0	119,0	2,0	119,8	2,0	126,0	2,0	132,8		
Kosketussuojanauhoitus	0,5	116,4	0,5	120,0	0,5	120,8	0,5	127,0	0,5	133,8		
Alumiinilaminaatti	0,2	116,8	0,2	120,4	0,2	121,2	0,2	127,4	0,2	134,2		
Ulkovaippa	6,0	128,8	6,0	132,4	6,0	133,2	6,0	139,4	6,0	146,2		

**KAAPELIN KUORMITETTAVUUS TASO- JA KOLMIOASENNUKSESSA**

*Tasoasennus:*

60 kV Al-johdinkaapeli tasoasennus, kuormitettavuus (A)								60 kV Cu-johdinkaapeli tasoasennus, kuormitettavuus (A)							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
150	282,9	280,9	276,1	274,5	275,5			150	355,1	351,2	342,1	339,0	340,8		
300	403,0	397,8	385,7	381,5	383,9			300	492,2	482,8	461,5	454,4	458,3		
500	502,5	493,2	472,0	464,9	468,9			500	594,0	578,8	545,4	534,4	540,2		
800	606,6	591,9	559,5	548,9	555,0			800	690,8	669,3	623,3	608,6	616,7		
1 200	684,5	665,1	623,4	610,0	618,1			1 200	780,9	752,5	693,5	677,3	689,3		
1 600	734,1	711,8	664,3	649,6	659,2			1 600	825,4	793,5	729,6	712,5	729,2		

110 kV Al-johdinkaapeli tasoasennus, kuormitettavuus (A)								110 kV Cu-johdinkaapeli tasoasennus, kuormitettavuus (A)							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
300	400,8	396,0	384,7	381,0	383,6	387,2		300	489,6	480,9	461,1	454,7	458,9	465,1	
500	499,6	490,9	471,3	464,9	469,2	475,5		500	590,8	576,5	545,4	535,4	541,8	551,4	
800	603,0	589,2	559,0	549,4	556,0	565,8		800	686,8	666,6	623,6	610,2	619,1	632,5	
1 200	680,3	662,1	623,0	611,0	619,7	632,6		1 200	775,6	748,8	693,6	679,2	691,9	709,6	
1 600	729,5	708,5	664,1	650,7	661,1	676,1		1 600	819,4	789,5	729,7	714,5	730,9	751,0	
2 000	763,4	740,6	691,8	679,1	690,8	707,4		2 000	848,0	816,7	754,8	739,7	759,0	780,9	

220 kV Al-johdinkaapeli tasoasennus, kuormitettavuus (A)								220 kV Cu-johdinkaapeli tasoasennus, kuormitettavuus (A)							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
500		485,4	469,5	464,9	469,7	475,7		500		571,2	545,7	538,2	545,5	554,9	
800		582,2	556,9	549,6	557,2	566,8		800		659,8	623,4	613,0	623,3	636,7	
1 200		654,3	621,4	612,0	622,2	635,0		1 200		739,8	693,1	682,3	696,2	714,1	
1 600		700,1	662,5	652,1	664,1	679,2		1 600		779,7	728,9	717,8	735,6	756,0	
2 000		731,6	690,5	680,5	694,0	710,8		2 000		806,4	753,7	742,8	763,6	785,9	
2 500		785,6	740,1	731,2	749,5	770,0		2 500		828,6	775,4	765,0	788,7	812,6	

400 kV Al-johdinkaapeli tasoasennus, kuormitettavuus (A)								400 kV Cu-johdinkaapeli tasoasennus, kuormitettavuus (A)							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
800			551,4	547,0	555,4	564,5	577,6	800			620,5	614,0	625,7	638,7	657,7
1 200			612,0	605,7	616,9	629,4	647,6	1 200			685,5	677,5	693,2	710,9	737,3
1 600			646,7	639,0	652,0	666,9	688,8	1 600			713,8	706,0	723,7	743,9	774,5
2 000			699,1	691,2	707,9	726,5	754,2	2 000			737,2	730,1	750,3	772,4	805,9
2 500			721,8	715,2	733,7	753,9	784,2	2 500			757,3	750,8	773,7	797,4	833,5

Kolmioasennus:

60 kV Al-johdinkaapeli kolmioasennus, kuormitettavuus (A)								60 kV Cu-johdinkaapeli kolmioasennus, kuormitettavuus (A)							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
150	279,7	279,0	276,7	274,7	272,6			150	358,0	356,5	351,7	347,6	343,4		
300	410,8	408,8	402,2	396,5	390,6			300	519,2	515,2	502,1	491,2	480,0		
500	530,2	526,3	513,1	502,2	490,8			500	654,9	647,5	623,5	604,2	584,6		
800	669,3	662,0	638,3	619,1	599,4			800	800,5	788,2	749,2	718,7	688,4		
1 200	784,5	773,6	738,7	711,1	683,1			1 200	971,7	951,9	890,9	845,4	801,4		
1 600	863,6	849,8	806,3	772,4	738,3			1 600	1 068,0	1 043,1	968,1	913,1	860,8		

110 kV Al-johdinkaapeli kolmioasennus, kuormitettavuus (A)								110 kV Cu-johdinkaapeli kolmioasennus, kuormitettavuus (A)							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
300	408,3	406,4	400,0	394,6	389,0	387,5		300	516,1	512,3	499,7	489,3	478,7	475,9	
500	526,9	523,1	510,4	500,0	489,1	486,1		500	651,3	644,2	621,0	602,4	583,7	578,6	
800	665,4	658,3	635,3	616,8	597,9	588,7		800	796,9	784,9	746,9	717,3	688,1	680,0	
1 200	780,6	770,0	735,9	709,1	682,1	674,5		1 200	963,3	944,1	885,2	841,3	799,1	787,8	
1 600	860,1	846,6	803,9	770,8	737,8	728,5		1 600	1 058,6	1 034,5	961,8	908,7	858,4	844,8	
2 000	918,6	902,8	853,4	815,5	778,0	767,4		2 000	1 126,4	1 098,6	1 015,8	956,2	900,2	885,2	

220 kV Al-johdinkaapeli kolmioasennus, kuormitettavuus (A)								220 kV Cu-johdinkaapeli kolmioasennus, kuormitettavuus (A)							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
500		515,1	503,8	494,6	485,1	482,6		500		635,3	614,6	598,0	581,5	577,1	
800		648,0	627,0	610,2	593,2	588,7		800		774,5	739,5	712,3	685,7	678,6	
1 200		758,9	727,3	702,6	678,1	671,5		1 200		924,6	870,7	830,6	792,6	782,8	
1 600		835,3	795,4	764,6	734,3	726,0		1 600		1 012,5	945,7	897,0	851,4	839,7	
2 000		891,3	844,7	809,3	774,7	765,2		2 000		1 074,8	998,5	943,6	892,7	879,6	
2 500		1 011,4	949,2	903,7	860,2	849,0		2 500		1 128,5	1 044,1	964,0	928,7	914,5	

400 kV Al-johdinkaapeli kolmioasennus, kuormitettavuus (A)								400 kV Cu-johdinkaapeli kolmioasennus, kuormitettavuus (A)							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
800			611,1	596,9	582,8	579,1	578,3	800			723,6	700,3	677,7	671,8	670,5
1 200			706,3	684,5	663,1	657,6	656,3	1 200			842,2	807,3	774,6	766,6	765,4
1 600			767,1	739,1	711,9	704,8	703,0	1 600			907,8	864,1	823,7	813,7	812,0
2 000			863,5	826,6	792,2	783,7	782,3	2 000			956,7	907,3	862,2	851,1	849,2
2 500			906,6	865,6	827,5	818,1	816,6	2 500			998,3	944,2	895,2	883,2	881,1

## KAAPELIN KUORMITETTAVUUDEN KORJAUSKERTOIMET TASO- JA KOLMIOASENNUKSESSA

Tasoasennus:

60 kV Al-johdinkaapeli tasoasennus, korjauskertoimet							60 kV Cu-johdinkaapeli tasoasennus, korjauskertoimet							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300		400	35	50	95	150	240	300
150	1,025	1,017	1,000	0,994	0,998		150	1,038	1,027	1,000	0,991	0,996		
300	1,045	1,031	1,000	0,989	0,995		300	1,067	1,046	1,000	0,985	0,993		
500	1,065	1,045	1,000	0,985	0,993		500	1,089	1,061	1,000	0,980	0,990		
800	1,084	1,058	1,000	0,981	0,992		800	1,084	1,058	1,000	0,981	0,992		
1 200	1,098	1,067	1,000	0,979	0,991		1 200	1,098	1,067	1,000	0,979	0,991		
1 600	1,105	1,072	1,000	0,978	0,992		1 600	1,105	1,072	1,000	0,978	0,992		

110 kV Al-johdinkaapeli tasoasennus, korjauskertoimet							110 kV Cu-johdinkaapeli tasoasennus, korjauskertoimet							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300		400	35	50	95	150	240	300
300	1,042	1,029	1,000	0,990	0,997	1,006	300	1,062	1,043	1,000	0,986	0,995	1,009	
500	1,060	1,042	1,000	0,986	0,996	1,009	500	1,083	1,057	1,000	0,982	0,993	1,011	
800	1,079	1,054	1,000	0,983	0,995	1,012	800	1,101	1,069	1,000	0,979	0,993	1,014	
1 200	1,092	1,063	1,000	0,981	0,995	1,015	1 200	1,118	1,080	1,000	0,979	0,998	1,023	
1 600	1,098	1,067	1,000	0,980	0,995	1,018	1 600	1,123	1,082	1,000	0,979	1,002	1,029	
2 000	1,103	1,071	1,000	0,982	0,999	1,023	2 000	1,123	1,082	1,000	0,980	1,006	1,035	

220 kV Al-johdinkaapeli tasoasennus, korjauskertoimet							220 kV Cu-johdinkaapeli tasoasennus, korjauskertoimet							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300		400	35	50	95	150	240	300
500		1,034	1,000	0,990	1,000	1,013	500		1,047	1,000	0,986	1,000	1,017	
800		1,045	1,000	0,987	1,001	1,018	800		1,058	1,000	0,983	1,000	1,021	
1 200		1,053	1,000	0,985	1,001	1,022	1 200		1,067	1,000	0,984	1,004	1,030	
1 600		1,057	1,000	0,984	1,002	1,025	1 600		1,070	1,000	0,985	1,009	1,037	
2 000		1,060	1,000	0,986	1,005	1,029	2 000		1,070	1,000	0,986	1,013	1,043	
2 500		1,061	1,000	0,988	1,013	1,040	2 500		1,069	1,000	0,987	1,017	1,048	

400 kV Al-johdinkaapeli tasoasennus, korjauskertoimet							400 kV Cu-johdinkaapeli tasoasennus, korjauskertoimet								
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							
	35	50	95	150	240	300		400	35	50	95	150	240	300	400
800			1,000	0,992	1,007	1,024	1,048	800			1,000	0,990	1,008	1,029	1,060
1 200			1,000	0,990	1,008	1,028	1,058	1 200			1,000	0,988	1,011	1,037	1,076
1 600			1,000	0,988	1,008	1,031	1,065	1 600			1,000	0,989	1,014	1,042	1,085
2 000			1,000	0,989	1,013	1,039	1,079	2 000			1,000	0,990	1,018	1,048	1,093
2 500			1,000	0,991	1,016	1,044	1,086	2 500			1,000	0,991	1,022	1,053	1,101

**Kolmioasennus:**

60 kV Al-johdinkaapeli kolmioasennus, korjauskertoimet								60 kV Cu-johdinkaapeli kolmioasennus, korjauskertoimet							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
150	1,011	1,008	1,000	0,993	0,985			150	1,018	1,014	1,000	0,988	0,976		
300	1,016	1,021	1,000	0,986	0,971			300	1,034	1,026	1,000	0,978	0,956		
500	1,033	1,026	1,000	0,979	0,957			500	1,050	1,038	1,000	0,969	0,938		
800	1,049	1,037	1,000	0,970	0,939			800	1,068	1,052	1,000	0,959	0,919		
1 200	1,062	1,047	1,000	0,963	0,925			1 200	1,091	1,068	1,000	0,949	0,900		
1 600	1,070	1,050	1,000	0,958	0,920			1 600	1,103	1,077	1,000	0,943	0,889		

110 kV Al-johdinkaapeli kolmioasennus, korjauskertoimet								110 kV Cu-johdinkaapeli kolmioasennus, korjauskertoimet							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
300	1,021	1,016	1,000	0,987	0,973	0,969		300	1,033	1,025	1,000	0,979	0,958	0,952	
500	1,032	1,025	1,000	0,980	0,958	0,952		500	1,049	1,037	1,000	0,970	0,940	0,932	
800	1,047	1,036	1,000	0,971	0,941	0,884		800	1,067	1,051	1,000	0,960	0,921	0,910	
1 200	1,061	1,046	1,000	0,964	0,927	0,917		1 200	1,088	1,067	1,000	0,950	0,903	0,890	
1 600	1,070	1,053	1,000	0,959	0,918	0,906		1 600	1,101	1,076	1,000	0,945	0,892	0,878	
2 000	1,076	1,058	1,000	0,956	0,912	0,899		2 000	1,109	1,082	1,000	0,941	0,886	0,871	

220 kV Al-johdinkaapeli kolmioasennus, korjauskertoimet								220 kV Cu-johdinkaapeli kolmioasennus, korjauskertoimet							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
500		1,022	1,000	0,982	0,963	0,958		500		1,034	1,000	0,973	0,946	0,939	
800		1,033	1,000	0,973	0,946	0,939		800		1,047	1,000	0,963	0,927	0,918	
1 200		1,043	1,000	0,966	0,932	0,923		1 200		1,057	1,000	0,954	0,915	0,904	
1 600		1,050	1,000	0,961	0,923	0,913		1 600		1,071	1,000	0,949	0,900	0,888	
2 000		1,055	1,000	0,958	0,917	0,906		2 000		1,076	1,000	0,945	0,894	0,881	
2 500		1,066	1,000	0,952	0,906	0,894		2 500		1,081	1,000	0,942	0,889	0,876	

400 kV Al-johdinkaapeli kolmioasennus, korjauskertoimet								400 kV Cu-johdinkaapeli kolmioasennus, korjauskertoimet							
Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )							Johdin (mm <sup>2</sup> )	Kosketussuojan poikkipinta (mm <sup>2</sup> )						
	35	50	95	150	240	300	400		35	50	95	150	240	300	400
800			1,000	0,977	0,954	0,948	0,946	800			1,000	0,968	0,937	0,928	0,927
1 200			1,000	0,969	0,939	0,931	0,929	1 200			1,000	0,959	0,920	0,910	0,909
1 600			1,000	0,963	0,928	0,919	0,916	1 600			1,000	0,952	0,907	0,896	0,894
2 000			1,000	0,957	0,917	0,908	0,906	2 000			1,000	0,948	0,901	0,890	0,888
2 500			1,000	0,955	0,913	0,902	0,901	2 500			1,000	0,946	0,897	0,885	0,883