



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Venla Martimo

# **Maakaapelin ja ilmajohdon vertailu sähköteknisestä näkökulmasta**

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen  
akateeminen yksikkö  
Kandidaatin tutkielma  
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2026

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Venla Martimo		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Maakaapelin ja ilmajohton vertailu sähköteknisestä näkökulmasta		
<b>Tutkinto:</b>	Tekniikan kandidaatti		
<b>Koulutusohjelma:</b>	Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma		
<b>Opintosuunta:</b>	Sähkö- ja energiatekniikka		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Kimmo Kauhaniemi		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2026	<b>Sivumäärä:</b>	<b>28</b>

---

**TIIVISTELMÄ:**

Suomen sähkömarkkinalaki vaatii Suomen sähköjakeluyrityksiä rakentamaan alati varmempia ja tehokkaampia sähköverkkoja. Tämä tarkoittaa, että vanha verkko tulee myös saneerata ja varmistaa sen luotettavuus. Euroopassa syntyneet levottomuudetkin ovat nostaneet huolta tärkeän sähköverkon ylläpidosta ja toimivuudesta nyky-yhteiskunnan tarpeissa. Sen lisäksi energiatuotannon ja sähköjakelun laadun varmistus ja ylläpito ovat olleet avainasemassa energijakelun varmentamisessa, jossa juuri jakeluverkkojen voimajohtojen sähköinen suorituskyky näkyy. Maakaapelointi on yleistynyt huomattavasti kaupunkien laitamilta, missä ilmajohtoja vaihdetaan jatkuvasti maakaapeleiksi. Muutos on nostanut ilmoille kysymyksen haja-asutusalueen sähköjakelusta, jossa on yleisesti käytetty ilmajohtoja varsinkin 20 kilovoltin keskijänniteverkossa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella sähköteknisestä näkökulmasta kolmea Suomessa yleisesti käytettyä 20 kilovoltin keskijännitejohtoa, jotka olivat maakaapeli AHXAMK-W, avojohto ACSR ja PAS-johto SAX-W. Tutkimuksessa laskettiin näiden kolmen johtomallien tasa- ja vaihtovirtaresistanssi, kuormitettavuus ja terminen oikosulkukestoisuus, kapasitanssi kilometriä kohden ja maasulkuvirta sekä induktanssi kilometriä kohden. Arvot haettiin ensisijaisesti suomalaisen kaapelivalmistajan Prysmian Group kaapeliesitteestä, mutta puuttuvat arvot laskettiin yksinkertaistetuilla kaavoilla.

Tutkimuksen perusteella PAS-johto oli verrattuista johtotyypeistä paras, sillä se ilmaantui valituista johdoista parhaimmaksi väliinputoajana. Maakaapelin tasa- ja vaihtovirtaresistanssi olivat huomattavasti pienimmät, mutta sen kapasitanssi laskettiin huomattavan suureksi verrattuna molempiin valittuihin ilmajohtoihin. Avojohton induktanssi laskettiin suurimmaksi valituista johdinlajeista, sillä sen vaihejohtimien pitkä etäisyys toisistaan oikosulkujen varalta lisää induktanssin suuruutta. PAS-johdon muovisuoja mahdollistaa kapeamman asennuksen orsilla, mikä vähentää induktanssia ja maakapasitanssin vaikutusta korkeusasennuksen ansiosta. Tutkimusta pystyisi laajentamaan pien- ja suurjänniteverkkoihin, joissa käytetään erilaisia johtotyyppejä, laajentamalla aiheutta huomioiden mekaaniset arvot tai vertailemalla johtotyyppien asennuskustannuksia. Varsinkin ilmajohtojen kapasitanssi- ja induktanssikaavat yksinkertaistettiin tässä tutkimuksessa olettamalla vaihejohtimet täysin symmetrisiksi vaihteluväleillä, sekä jättämällä huomiotta ukkosenjohtimen ja maan johtavuuden vaikutukset. Tutkielma antaa hyvän idean erilaisten sähkötekniisten arvojen vaikutuksen verkon rakenteen suunnittelussa sekä johtolajien vahvuuksista ja heikkouksista eri tilanteissa.

---

**AVAINSANAT:** Sähköverkko, maakaapeli, ilmajohto, avojohto, tasavirtaresistanssi, vaihtovirtaresistanssi, kuormitettavuus, oikosulkukestoisuus, kapasitanssi, maasulkuvirta, induktanssi

## Sisällys

1	Johdanto	6
2	Keskijännitejohdot	7
2.1	Maakaapeli	7
2.2	Avojohto	8
2.3	PAS-johto	8
2.4	Johtolajien vertailu	9
3	Sähkötekkinen vertailu	10
3.1	Tasa- ja vaihtovirtaresistanssit	10
3.2	Kuormitettavuus ja terminen oikosulkukestoisuus	12
3.3	Kapasitanssi ja maasulkuvirta	14
3.4	Induktanssi	19
4	Tulokset	23
5	Yhteenveto	25
	Lähteet	27

## Kuvat

<b>Kuva 1.</b>	AHXAMK-W kaapelin rakenne (NKT).	7
<b>Kuva 2.</b>	ACSR kaapelin rakenne (Rexel, s. 1).	8
<b>Kuva 3.</b>	SAX-W kaapelin rakenne (Rexel).	9
<b>Kuva 4.</b>	Vaihtovirtajohtojen kapasitanssin muodostuminen	15
<b>Kuva 5.</b>	Erotetussa verkossa syntyvä maasulkuvirta (ABB, 2000a, s. 5).	16
<b>Kuva 6.</b>	Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku (Nikander & Mäkinen, 2017, s. 6).	16
<b>Kuva 7.</b>	Vaihtovirtajohdon induktanssin muodostuminen (Mäkinen, s. 69).	19
<b>Kuva 8.</b>	Vaihtovirtajohdon vuorottelu (Mäkinen, s. 70).	20

## Taulukot

<b>Taulukko 1.</b>	AHXAMK-W rakenteen selitteet (NKT).	8
<b>Taulukko 2.</b>	AHXAMK-W, ACSR ja SAX-W johtojen halkaisijat	10
<b>Taulukko 3.</b>	Johtomallien tasa- ja vaihtovirtaresistanssiarvot	11
<b>Taulukko 4.</b>	johtomallien kuormitettavuus ja terminen oikosulkukestoisuus	13
<b>Taulukko 5.</b>	Johtomallien käyttökapasitanssi ja maasulkuvirta	18
<b>Taulukko 6.</b>	Johtomallien ekvivalenttisarvot ja induktanssiarvot	22

## Kreikkalaiset symbolit

$\Delta U_d$	Johtimen päiden välinen jännite-ero
$\epsilon_0$	Tyhjiön permittiivisyys ( $8,854\ 187\ 8182 \cdot 10^{-12}$ F/m)
$\mu_0$	Tyhjiön permeabiliteetti ( $1,256\ 637\ 062\ 12 \cdot 10^{-6}$ N/A <sup>2</sup> )
$\omega$	Kulmataajuus, $2\pi \cdot 50$ Hz

## Roomalaiset symbolit

$a$	Kahden johtimen välinen etäisyys
$c_0$	Maakapasitanssi

$h_{eq}$	Johtojen keskiarviollinen etäisyys maasta
$I_d$	Johtimen virta
$r$	Johtimen säde
$R_d$	Johtimen päiden välisen vastuksen resistanssi
$U$	Verkon jännite (20 kV)

## Lyhenteet

ACSR	Teräsvahvistettu alumiinijohdin
AHXAMK-W	Alumiinijohtiminen vesitiivis keskijännitemaakaapeli
MDPE	Keskitiheä polyeteeni
PAS-johto	Muovipäällystetty avojohto
PEX, XLPE	Ristisilloitettu polyeteeni
SAX-W	Muovipäällystetty alumiiniseosjohdin
Wiski-kaapeli	AHXAMK-W kaapeli

## 1 Johdanto

Vuonna 2013 uudistuneen sähkömarkkinalain mukaan Suomen sähköjakelu tulee varmistaa entisestään alati kasvavan sähkötarpeen myötä (Sähkömarkkinalaki, 2013, luku 19). Tämä tarkoittaa, että uuden verkon rakentamisen lisäksi myös vanha verkko tulee saneerata ja saada luotettavammaksi. Tästä johtuen monet Suomen verkonhaltijat ovat varsinkin haja-asutusalueella muuttaneet pienjännitteistä ilmajohtoverkkoaan maakaapeliverkoksi lisätäkseen säävarmuutta sekä estääkseen mahdollisia eläimistä tai esineistä syntyneitä vahinkotapauksia. Vuonna 2021 vähän yli puolet haja-asutuksen jakeluverkosta koostui ilmajohtoista (STUK). Maaseudulla verkkoa ei voida rakentaa ja silmukoida samalla tavalla kuten kaupungeissa, joten verkon uusiminen kokonaan on nähty tehokkaimmaksi ratkaisuksi sähkömarkkinalain noudattamiseksi.

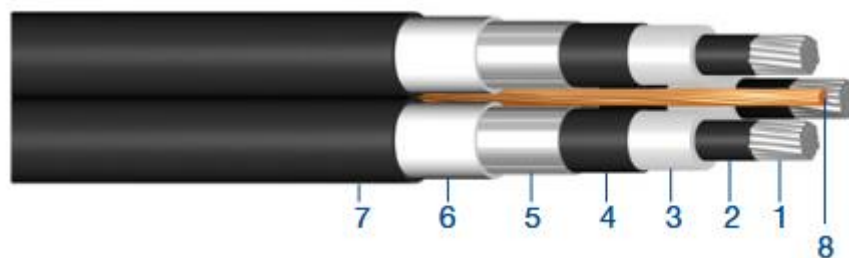
Tässä tutkielmassa on tarkoitus tutkia ja vertailla Suomessa käytettävien keskijännitteisten 20 kV alumiinisten maakaapeleiden ja ilmajohtojen sähkötekniisiä yhtäläisyyksiä sekä eroavaisuuksia. Tutkielman alussa käydään läpi Suomessa yleisesti käytettyjen maakaapelin, avojohdon ja suojatun ilmajohtojen rakenteet, jonka jälkeen valitaan jokaisesta johtolajista kolme erikokoista johdinkokoa vertailukohteiksi. Seuraavaksi tutkielman luvussa kolme siirrytään sähkötekniisiin arvoihin, ja käydään läpi pintapuolisesti niihin vaikuttavat tekijät. Puuttuvien tietojen selvittämisessä pyritään hyödyntämään suomalaisen kaapeliyrityksen Prysmian Group antamia teknisiä arvoja, jotka lasketaan yksinkertaistetuilla kaavoilla, kun oletetaan johtojen asennustavan olevan standardi ja ilman asennettuja lisäasennuksia, kuten ukkosenjohdatinta. Tutkielman lopuksi tarkastellaan saatuja arvoja ja luodaan johtopäätökset tuloksista, sekä käydään läpi tutkielman rajoituksia ja mahdollisia syventäviä jatkotutkielman aiheita.

## 2 Keskijännitejohdot

Tässä luvussa käymme läpi yleisesti Suomessa käytetyn maakaapelin AHXAMK-W, avojohdon ACSR sekä PAS-johdon yleistä rakennetta ja materiaaleja. Käymme läpi mistä ne koostuvat, niiden eristeet sekä lyhyesti niiden asennus. Lopuksi vertailemme niiden rakenteellisia yhtäläisyyksiä ja eroavaisuuksia muun muassa materiaaleissa ja eristeissä.

### 2.1 Maakaapeli

Tunnetuin ja yleisesti käytetyin keskijännitteinen maakaapeli Suomessa on AHXAMK-W, jota kansankielellä kutsutaan Wiski-kaapeliksi nimessä olevan W-merkinnän mukaan, joka tarkoittaa *Watertight*, vesitiivis (Prysmian Group, 2022). Wiski-kaapeli koostuu kolmesta saman rakenteen omaavasta vaihejohdosta, jotka kiertyvät toistensa ympärille jättäen keskelle pienen tilan keskusköydelle. Kuvassa 1 on avattu Wiski-kaapelin rakenne sekä sen keskellä kulkeva keskusköysi näkyviin numeroimalla kerrokset 1-8, jotka tarkennetaan taulukossa 1. Kohdat 1-7 kulkeutuvat Wiski-kaapelin sisimmästä kohdasta ulkokerrokseen, ja kohta 8 on aikaisemmin mainittu keskusköysi. Wiski-kaapeli asennetaan maakaapelin tavoin maan alle, yleensä 0,7 metrin syvyyteen.



**Kuva 1.** AHXAMK-W kaapelin rakenne (NKT).

**Taulukko 1.** AHXAMK-W rakenteen selitteet (NKT).

Kohta	Selite
1	Tiivis alumiiniköysi, jossa vedestä paisuvalla pulverilla saavutettu pitkittäinen vesitiiviys.
2	Puolijohtava muovinen johdinsuoja.
3	Kuivavulganoitu XLPE.
4	Liimattu puolijohtava muovinen johdinsuoja.
5	Vedestä paisuva puolijohdenauha.
6	Alumiini-muovilaminaatti, asennettu limittäin ja toimii eriste- ja kosteussuojana.
7	Ulkokerroksena säänkestävä MDPE muovi, jossa kaapelimerkinnot.
8	Kuparijohdin, kaapelin keskusköysi.

## 2.2 Avojohto

Suomessa 20 kV ilmajohtoina käytetään yleensä joko paljasta metallista avojohtoa tai PAS-johtoa. Pylväälle asennetaan jokaiselle vaiheelle oma johtonsa, ja nämä johdot asennetaan puupylväiden orsiin eristeiden avulla (Turvatekniikan keskus, s. 8). Kuvassa 2 näkyy yleisimmin käytetty avojohto ACSR, mikä tarkoittaa teräsvahvistettua alumiinijohdinta. Johdon rakenne koostuu yhdestä tai monisäikeisestä sinkitystä teräsytimeistä, jota alumiinilangat kiertävät joko yhden tai useamman kerroksen. (Prysmian Group, 2024, s. 134)

**Kuva 2.** ACSR kaapelin rakenne (Rexel, s. 1).

## 2.3 PAS-johto

PAS-johdossa tärkein ominaisuus on sen muovivaippa, joka suojaa johtoa. Kuvassa 3 näkyy Suomessa yleisesti käytetty suojattu ilmajohtomalli, SAX-W johto. Sen rakenne

koostuu vesitiiviistä alumiiniseoksesta, jota suojaa säänkestävä PEX-muovikerros. Muovivaippa auttaa johtoa myös suojautumaan mahdollisilta oikosuilta sekä vierasesineiltä, jotka saattavat osua johtoon maastossa. PAS-kaapeli asennetaan samalla tavalla kuin avojohto orsille, mutta sen vaihejohtimien välinen etäisyys on pienempi. (Prysmian Group, 2024, s. 126)



**Kuva 3.** SAX-W kaapelin rakenne (Rexel).

## 2.4 Johtolajien vertailu

Johtolajien suurin ja ilmiselvin yhtäläisyys on niiden rakenteen idea. Johtojen keskellä kulkee johtavaa ainesta, jota kiertää yksi tai useampi kerros puolijohdetta tai eristettä. PAS-johto on kuitenkin ainoa, jonka johdin koostuu alumiiniseoksesta eikä vain puhtaasta alumiinista. Verrattuna avo- ja PAS-johtoihin, Wiski-kaapelilla on paljon enemmän suojakerroksia varsinkin vettä vastaan, kuten johtimen vesipulveri. Ainoastaan avojohdolla ei ole yhtään eristävää kerrosta toisin kuin Wiski-kaapelilla ja PAS-johdolla, jotka koostuvat erilaisista seos- ja muovikerroksista. Wiski-kaapelissa on ilmajohdoista eroten valmiiksi mukana kolme vaihejohdinta, jotka kulkevat kiertyen kupariköytensä ympärille. Ilmajohdoissa jokainen vaihde tulee asentaa erikseen, ja niiden välinen etäisyys perustuu valittuun johtotyyppiin ja jännitteeseen.

### 3 Sähkötekniinen vertailu

Seuraavaksi tarkastelemme johtolajien sähkötekniisiä arvoja, kuten tasa- ja vaihtovirtaresistansseja, kapasitanssia ja maasulkuvirtoja, induktanssia, kuormitettavuutta sekä termistä oikosulkukestoisuutta. Johtojen halkaisijalla on kriittinen merkitys näihin arvoihin, joten vertailemme tässä työssä kolmen erisuuruisen halkaisijan omaavaa johdinta. Taulukossa 2 on listattu valitut johdinmallit kappaleen 2 esitetyistä johdoista. Valittujen johtojen keskiarvioellinen halkaisija pienemmillä on 8,27 mm, keskikokoisilla 10,37 mm ja suurimmilla 12,27 mm.

**Taulukko 2.** AHXAMK-W, ACSR ja SAX-W johtojen halkaisijat.

	AHXAMK-W			ACSR			SAX-W		
<b>Johto- malli</b>	3x50Al	3x95Al	3x120Al	34/6 Sparrow	54/9 Raven	85/14 Pigeon	SAX-W 50	SAX-W 70	SAX-W 95
<b>Johdin- halkaisija [mm]</b>	8,0	11,3	12,7	8,04	10,1	12,8	8,0	9,7	11,3

#### 3.1 Tasa- ja vaihtovirtaresistanssit

Suomessa siirto- ja jakeluverkossa käytetään yleisimmin vaihtosähköä, mutta tehpuolijohdekomponenttien käytön lisääntyminen sekä kansainvälinen sähkönsiirto ovat vaatineet myös tasasähkön integrointia verkostoon. Kahden vaihtosähköverkoston liittäminenkin toisiinsa ei välttämättä onnistu vaihtosähköyhteydellä, jos niillä on eri taajuudensäätö tai niiden välinen kokoero on huomattava. Tällöin niiden välille on kannattavampaa liittää tasasähköyhdysjohto, joka ei altistu verkkojen alati muuttuville kuormille yhtä pahasti kuin vaihtosähköjohto. Tällaisia yhdysjohtoja ovat esimerkiksi Viron ja Suomen välinen Estlink sekä Tanskan ja Norjan välinen Skagerrak (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 297–302).

Vaihtosähköverkon tehonsiirtoon vaikuttavat johtojen terminen kuormitettavuus, jota käydään läpi enemmän luvussa 3.3, sekä käyttövarmuus. Tasasähkössä siihen vaikuttavat laitteiden terminen kapasiteetti sekä eristysmitoitus, toisin sanoen verkkoon valittu jännite. Myös käyttövarmuus on tasasähköyhteydelle merkitsevä, sillä N-1 -periaatteen mukaan on huomioitava muun verkon käyttäytyminen, jos sen yhteys irtoaa muista (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 297–298). Tasasähkön tehonsäätö perustuu johtojen päiden välille syntyvään jännite-eroon, joka aiheuttaa Ohmin lain mukaan johtimen virran

$$I_d = \frac{\Delta U_d}{R_d} \quad (1)$$

missä

$\Delta U_d$  = Johtimen päiden välinen jännite-ero (V)

$R_d$  = Johtimen päiden välisen vastuksen resistanssi ( $\Omega$ ).

Taulukkoon 3 on merkattu Prysmianin antamat valittujen johdinmallien tasa- ja vaihtovirtaresistanssit valituille johtotyypeille. Wiski-kaapeleiden 75 °C lämpötilan arvojen selvittämiseksi hyödynnettiin kaapelivalmistajan antamien arvojen välistä lineaarista mallia.

**Taulukko 3.** Johtomallien tasa- ja vaihtovirtaresistanssiarvot.

Johtimen lämpötila	Johtimen halkaisija [mm]	Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi [ $\Omega$ /km]	Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi [ $\Omega$ /km]		
			65 °C	75 °C (80 °C)	90 °C
	-	20 °C			
3x50Al	8,0	0,641	0,760	0,784	0,820
34/6 Sparrow	8,04	0,848	-	1,140	-
SAX-W 50	8,0	0,720	-	(0,890)	-
3x95Al	11,3	0,320	0,380	0,392	0,410
54/9 Raven	10,1	0,536	-	0,736	-
SAX-W 70	9,7	0,493	-	(0,610)	-
3x120Al	12,7	0,253	0,300	0,312	0,330
85/14 Pigeon	12,8	0,337	-	0,480	-
SAX-W 95	11,3	0,363	-	(0,450)	-

Huomataan, kuinka kaikkien johtojen tilanteessa tasavirtaresistanssi on aina pienempi verrattuna vaihtovirtaresistanssiin. Tämä johtuu vaihtosähkön synnyttämistä sähkömagneettisista ilmiöistä pitkillä matkoilla. Siirtoetäisyyttä voisi kasvattaa lisäämällä rinnakkaisia johtoja, väliasemia tai sarjakompensoimalla, mutta verkon kustannukset nousisivat huomattavasti verrattuna suuntaaja-asemiin. Tasasähköjohdot eivät myöskään kuluta eivätkä tuota loistehoa (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 301).

ACSR-johdon tasa- ja vaihtovirtaresistanssit ovat korkeimmat kaikissa halkaisijoissa, vaikkakin sen suuruusero vähenee halkaisijan kasvaessa, kunnes SAX-W 95 menee sen yli. ACSR-johdon ydin koostuu pääosin teräksestä, jonka resistiivisyys on  $0,8 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$  ja sen ympäröivän alumiinin resistiivisyys on  $0,265 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ . Tällöin osa sähköä johtavan osan poikkipinta-alasta on alumiinia heikommin johtavaa terästä, mikä lisää sen resistanssia. Alumiinin määrän kasvaessa sen halkaisija kasvaa, jolloin niiden suhde tasaantuu ja johtavuuden eroavaisuus muihin johtoihin pienenee. Resisttiivisyyden ansiosta Wiski-kaapelin resistanssit ovat juuri pienimmät, sillä sen johtava ydin on pääasiassa alumiininen, kun taas SAX-W johdin on tehty alumiini-magnesium-pii -seoksesta.

### **3.2 Kuormitettavuus ja terminen oikosulkukestoisuus**

Johtojen kuormitettavuudella tarkoitetaan siihen jatkuvasti syötettyä maksimisähkövirtaa, jonka johto kestää lämpenemättä liikaa. Tähän arvoon vaikuttavat suuresti kaapelin vaihejohtimien poikkipinta-ala, johtimen ja eristeen materiaali sekä olosuhteet johtimien ympärillä. Oikosulkuvirta on hetkellinen, erittäin korkea vikatilanteessa syntyvä virta, joka syntyy kahden tai useamman jännitepisteen osuessa toisiinsa. Termisellä oikosulkukestoisuudella viitataan tähän maksimaaliseen oikosulkuvirtaan, joka on sallittu johtimessa yhden sekunnin aikana alkaen johdon maksimikäyttölämpötilasta (ABB, 2000b, s. 4). Taulukossa 4 on kirjattuna kaapelitekijän antamat arvot johtolajien kuormitettavuudelle ja terminen oikosulkukestoisuudelle.

Koska Wiski-kaapeleille ei ole annettu kuormitettavuusarvoja 80 °C lämpötilalle, hyödynnetään lineaarista mallia annettujen arvojen välillä niiden selvittämiseksi.

**Taulukko 4.** Johtomallien kuormitettavuus ja terminen oikosulkukestoisuus.

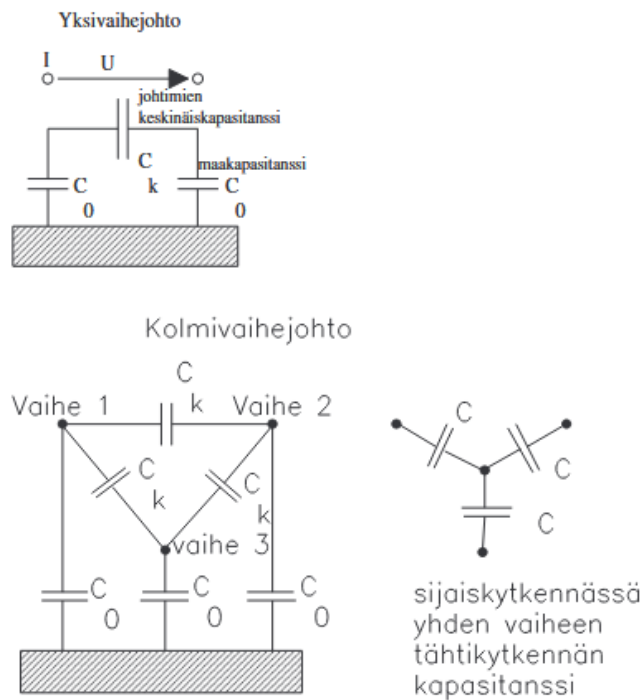
	Johtimen halkaisija [mm]	Kuormitettavuus [A]				Terminen oikosulkukestoisuus [kA]
		ilmassa			Maassa	
Sijainti	-					-
lämpötila	-	65 °C	80 °C	90 °C	65 °C	-
<b>3x50AI</b>	8,0	160	181	195	155	4,7
<b>34/6 Sparrow</b>	8,04	-	210	-	-	3,7
<b>SAX-W 50</b>	8,0	-	245	-	-	4,3
<b>3x95AI</b>	11,3	230	260	280	235	8,9
<b>54/9 Raven</b>	10,1	-	280	-	-	5,8
<b>SAX-W 70</b>	9,7	-	310	-	-	6,4
<b>3x120AI</b>	12,7	265	301	325	265	11,3
<b>85/14 Pigeon</b>	12,8	-	360	-	-	9,2
<b>SAX-W 95</b>	11,3	-	370	-	-	8,6

Taulukosta nähdään, että kaikkien johdinlajien kuormitettavuus kasvaa, mitä suurempi pinta-ala johtimella on. Suurempi pinta-ala vähentää johdon resistiivisyyttä, jonka seurauksena sen lämpötila ei pääse nousemaan yhtä helposti. Wiski-kaapelin kohdalla asennuspaikan valinta vaikuttaa minimaalisesti 65 °C lämpötilassa. Pienimmässä halkaisijassa johdon kuormitettavuus on 5 ampeeria vähemmän maa-asennuksessa kuin ilma-asennuksessa, kun taas keskikokoisessa halkaisijassa se on 5 ampeeria enemmän. Tämä johtuu todennäköisesti johtimen ympäristöstä, missä pienemmällä halkaisijalla maaperä ei johda lämpöä tarpeeksi, ja näin ei poista johdossa syntyvää lämpöä yhtä tehokkaasti kuin ilmassa. Suuremmalla halkaisijalla johdon pinta-ala kasvaa, ja näin lämmönsiirto jakaantuu isommalle alueelle, mitä ilma ei pysty yhtä tehokkaasti jäähdyttämään. Suurimman halkaisijan valitulle Wiski-kaapelille ilma- ja maa-asennuksen kuormitettavuuden erot ovat taasen olemattomat. 80 °C lämpötilassa huomataan, kuinka Wiski-kaapelin kuormitettavuus verrattuna ilmajohtoihin on pienin kaikissa kolmessa halkaisijassa. Ilmajohdoissa PAS-johdolla on parempi kuormitettavuus kuin avojohdolla, mutta niiden eroavaisuus vähenee pinta-alan kasvaessa.

Termisessä oikosulkukestoisuudessa Wiski-kaapeli suoriutuu parhaiten, koska sen eriste kestää parhaiten lämpöä. Sen lämpötilakestävyys viiden sekunnin vikatilanteessa kaapelivalmistajan mukaan on 250 °C, kun taas PAS-johdolle ja avojohdolle on merkattu 200 °C. Avojohton terminen oikosulkukestoisuus on kuitenkin selvästi pienempi pienellä ja keskikokoisella halkaisijalla, eli se ei kestä niin suurta virtamäärää maksimilämpötilassaan kuin maakaapeli ja PAS-johto. Suurimmalla halkaisijalla avojohdon kestävyys ylittää PAS-johdon arvon, vaikka sen kuormitettavuus pysyy PAS-johtoa pienempänä.

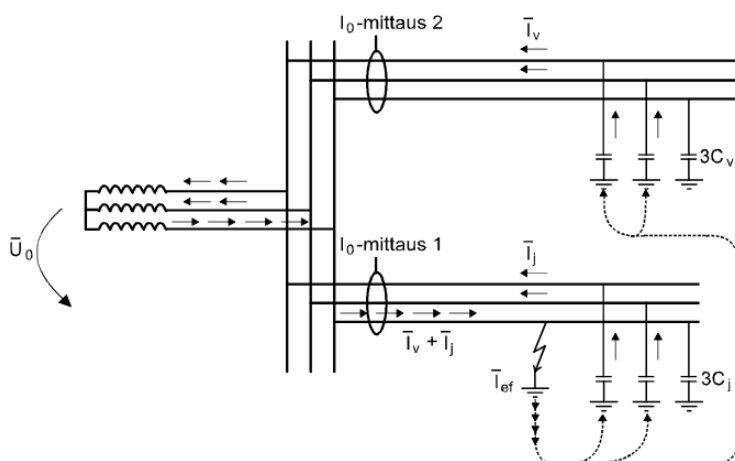
### **3.3 Kapasitanssi ja maasulkuvirta**

Johtojen kapasitiivisuus kuvaa niiden varausvirtaa, joka on 90 astetta päävirtaa edellä, ja se on suoraan vaikutuksessa piirissä oleviin kapasitiivisiin komponentteihin. Kolmivaihejohtimet muodostavat välillensä keskinäiskapasitanssin  $C_k$  sekä maan välille maakapasitanssin  $C_0$ . Näitä molempia kuvataan yhtenäisesti käyttökapasitansseiksi C kuvan 4 mukaisesti.



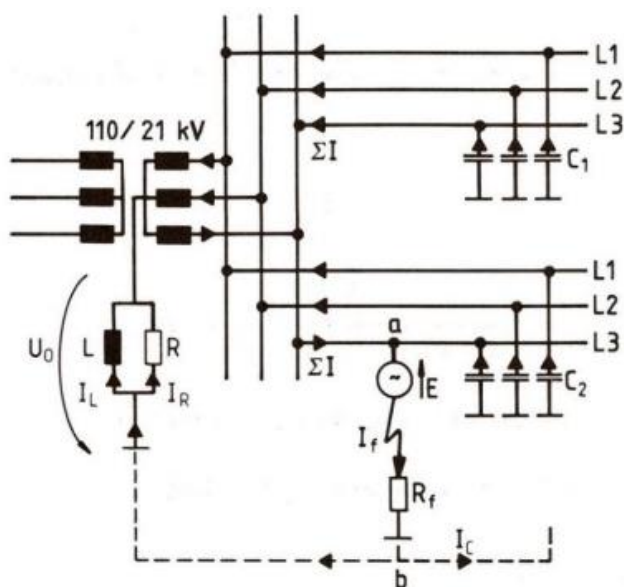
**Kuva 4.** Vaihtovirtajohtojen kapasitanssin muodostuminen (Mäkinen, s. 71).

Suomessa 20 kV:n verkko on yleensä maasta erotettu. Toimivassa ja ehjässä verkossa vaihejännitteet ovat symmetrisiä maahan nähden, ja näin ollen myös niiden maakapasitansseihin kytköksissä olevat varausvirrat ovat symmetrisiä. Jos jokin vaihe pääsee kosketuksiin maan kanssa, muodostuu maasulku. Maasulun seurauksena vaihejännitteet ja varausvirrat joutuvat epäsymmetriaan, purkautuen maan kautta ja synnyttäen maasulkuvirran kuvan 5 mukaisesti. Maasulkuvirta voi aiheuttaa vaaratilanteita ihmisille ja eläimille, sekä häiritä varsinkin herkkiä tietoliikenteen sähkölaitteita. Sen suuruuteen vaikuttavat johtojen kokonaispituus, vikapaikan maan resistanssi sekä maakapasitanssi (ABB, 2000a, s. 1).



**Kuva 5.** Erotetussa verkossa syntyvä maasulkuvirta (ABB, 2000a, s. 5).

Jotta kapasitiivinen maasulkuvirta saataisiin melkein kokonaan pienennettyä vahinkojen sattuessa, joihinkin verkkoihin on asennettu sammutusjärjestelmä. Sammutetussa verkossa kuvan 6 mukaan maasulkuvirran pysäyttämisen perustuu sammutuskuristimiin, jotka kompensoivat maasulkuvirran kapasitiivisuuden ja näin sammuttavat sen.



**Kuva 6.** Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku (Nikander & Mäkinen, 2017, s. 6).

Systeemin ongelmana varsinkin keskijänniteverkolla on sen asennus, sillä ne perustuvat tähtikytkentään, kun taas 20 kV verkon syöttömuuntajat kytketään yleensä kolmioon (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 340). Tästä johtuen ne vaativat erillisen tähtikytketyn muuntajan, mikä kasvattaa kuluja.

Kapasitanssilaskuissa huomioidaan yleensä maa, sillä ne perustuvat sähkökentän jakaumaan (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 116). Tällöin ilmajohtojen kapasitanssilaskuissa on otettava huomioon maan johtavuus peilikuvamenetelmällä, missä kuvitellaan maan alla kulkevan samansuuntaisia johtoja vastakkaisella varauksella potentiaalikerroilla. 20 kV verkossa ilmajohtojen välinen etäisyys on kuitenkin huomattavasti pienempi verrattuna maan väliseen etäisyyteen, joten laskiessa käyttökapasitanssia voimme jättää maan vaikutuksen ja näin ollen peilikuvamenettelyn huomioimatta (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 123). Tällöin saamme muodostettua käyttökapasitanssin kaavan

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h_{eq}}{r}\right)} \quad (2)$$

missä

$\epsilon_0$  = Tyhjiön permittiivisyys ( $8,854\ 187\ 8182 \cdot 10^{-12}$  F/m)

$h_{eq}$  = Johtojen keskiarviollinen etäisyys maasta (m)

$r$  = johtimien säde (m).

Elovaara ja Haarla ovat avanneet kaavan syvällisemmin Sähköverkot I -kirjassa (2011a, s.117-123), jossa he johtavat kaavan johtimien potentiaalikerroimien ja varausten matriiseista. Kaavassa on myös hyödynnetty Gaussin lakia sylinterimäisessä kappaleessa, jota johtimet muistuttavat rakenteeltaan. Luonnollisesta logaritmistä nähdään, että kapasitanssi tulee kasvamaan johtimen säteen kasvaessa. Jos maasulku tapahtuu vikaresistanssittomana, eli suorana, voidaan maasulkuvirta laskea verkon jännitteen ja kulmataajuuden avulla hyödyntämällä kapasitiivisen kolmivaihevirran kaavaa

$$I_e = \sqrt{3}\omega C_o U \quad (3)$$

missä

$\omega$  = Kulmataajuus (rad/s)

$c_0$  = Maakapasitanssi (F)

$U$  = Verkon jännite (V).

Koska ilmajohtojen peilikuvien vaikutus on jätetty huomiotta, niiden käyttökapasitanssi muodostuu pääosin maakapasitanssista, jolloin  $c_0 \approx c$ . Lasketaan arvot olettaen, että ilmajohtot ovat 10 metrin korkeudella maasta ja kirjataan ne taulukkoon 5.

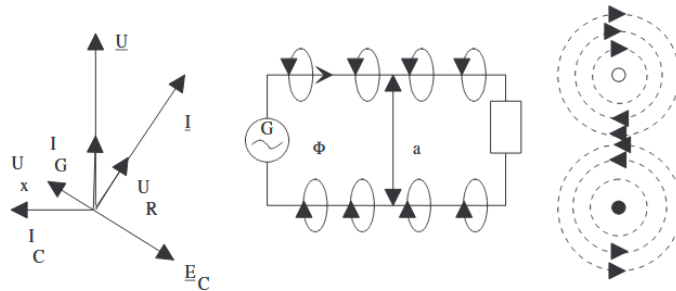
**Taulukko 5.** johtomallien käyttökapasitanssi ja maasulkuvirta.

	Johtimen halkaisija [mm]	Käyttökapasitanssi [ $\mu$ F/km]	Maasulkuvirta [A/km]
<b>3x50Al</b>	8,0	0,170	1,8
<b>34/6 Sparrow</b>	8,04	0,006 536	0,0711
<b>SAX-W 50</b>	8,0	0,006 532	0,0712
<b>3x95Al</b>	11,3	0,210	2,3
<b>54/9 Raven</b>	10,1	0,006 716	0,0731
<b>SAX-W 70</b>	9,7	0,006 683	0,0727
<b>3x120Al</b>	12,7	0,230	2,5
<b>85/14 Pigeon</b>	12,8	0,006 913	0,0752
<b>SAX-W 95</b>	11,3	0,006 808	0,0741

Huomataan, että Wiski-kaapelin käyttökapasitanssin ja maasulkuvirran arvot ovat huomattavasti korkeampia verrattuna ilmajohtoihin, noin 25-35 kertaisia. Tämä johtuu mahdollisesti maakaapelin vaihejohtimien lyhyestä etäisyydestä toisiinsa, jolloin johdot pääsevät vaikuttamaan toisiinsa voimakkaammin. Koska käyttökapasitanssin kaava perustuu permittiivisyyteen, eli sähkökentän vaikutukseen väliaineessa, on myös johtojen ympäröivä materiaali merkittävä. Ilmajohtoja ympäröi luonnollisesti ilma, jonka permittiivisyys on noin 1, kun taas Wiski-kaapelilla on useampi kerros eristeitä sekä itse maa-aines. Wiski-kaapelin etäisyys maasta on myös erittäin pieni verrattuna ilmajohtoihin, jolloin sen maakapasitanssi ja näin ollen maasulkuvirta on myös suurempi.

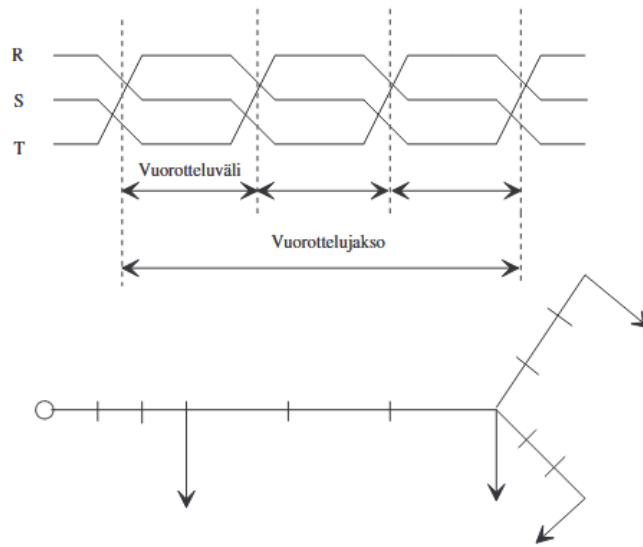
### 3.4 Induktanssi

Johdon induktanssi syntyy siinä kulkevasta sähkövirrasta, joka kulkee 90 astetta päävirtaa jäljessä ja muodostaa ympärilleen magneettivuon kuvan 7 mukaan. Induktiivinen jännitehäviö on verrannollinen kolmivaihejohtimien väliseen etäisyyteen, minkä seurauksena on tärkeää sijoittaa vaiheet tasaisen välimatkan päähän toisistaan varsinkin suurempien jännitteiden alueilla.



**Kuva 7.** Vaihtovirtajohdon induktanssin muodostuminen (Mäkinen, s. 69).

Voimansiirtojohdoissa tasaisen välimatkan pitäminen useampien kilometrien ajan on käytännössä vaikeaa, joten epäsymmetrisyyttä poistetaan vuorottelemalla vaiheiden paikkoja säännöllisesti kuvan 8 mukaisesti. Vuorotteluvälit sijoitetaan yleensä 5-10 km välein, ja vuorottelujakso sisältää yhden täyden kierroksen. Tällä vuorottelutekniikalla sekä induktiivisuudesta että kapasitiivisuudesta syntyvät ongelmat vähenevät merkittävästi. (Mäkinen, s. 69)



**Kuva 8.** Vaihtovirtajohdon vuorottelu (Mäkinen, s. 70).

Johtojen induktanssi perustuu melkein samoihin tekijöihin kuten kapasitanssilla, eli vaihejohtimien väliseen etäisyyteen ja symmetrisyyteen. Maan osuus induktanssilaskuissa ei ole niin merkittävä kuin kapasitanssissa, mutta niissä tulee huomioida johtojen sisäisen magneettivuon vaikutus. Tämä tehdään kertomalla johdinten säde Neperin luvulla kaavalla

$$R_{ekv} = r \cdot e^{-\frac{1}{4}} \quad (4)$$

missä

$R_{ekv}$  = Ekvivalenttinen säde (mm).

Keskijännitteisissä pylväissä johtimet asennetaan yleensä tasoon, jossa niiden väliset etäisyydet ovat samat. Tästä johtuen kaikkien kolmen vaihejohtimien ekvivalenttinen etäisyys voidaan kirjoittaa muodossa

$$a_{eq} = (a \cdot a \cdot 2a)^{\frac{1}{3}} = a\sqrt[3]{2} \quad (5)$$

missä

$a$  = kahden johtimen välinen etäisyys (m).

ACSR-johdon pylväsasennuksissa vaihejohtimien etäisyytenä käytetään noin 1,3 metrin väliä (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 266). SAX-W johtojen välinen etäisyys voi olla 0,5 metriä, sillä sitä suojaava muovikuori mahdollistaa kapeamman asennuksen (Monni, 2005, s. 131). Johtojen välisellä etäisyydellä ja niiden ekvivalenttisäteillä saamme muodostettua yksittäisen vaihejohtimen induktanssin kaavaksi

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{a\sqrt[3]{2}}{R_{ekv}}\right) \quad (6)$$

missä

$\mu_0$  = tyhjiön permeabiliteetti ( $1,256\ 637\ 062\ 12 \cdot 10^{-6}$  N/A<sup>2</sup>).

Kaava on johdettu Biot'n ja Savartin johtimen magneettivuon tiheyden kaavasta sekä johtojen korkeuden ja välisen etäisyyksien suhteista matriisilaskennassa. Elovaara ja Haarla avaavat kaavan muodostumista syvemmin Sähköverkot I -kirjassa (2011a, s.107-109). Luonnollisen logaritmin seurauksena voidaan päätellä induktanssin pientyvän, kun ekvivalenttinen säde kasvaa. Merkataan kaapelivalmistajan antamat Wiski-kaapelin arvot ja lasketaan ilmajohtojen induktanssit taulukkoon 6.

**Taulukko 6.** Johtomallien ekvivalenttisäteet ja induktanssiarvot.

	Johtimen halkaisija [mm]	Ekvivalenttisäde [mm]	Induktanssi vaihetta kohden [mH/km]
<b>3x50Al</b>	8,0	-	0,460
<b>34/6 Sparrow</b>	8,04	3,131	1,252
<b>SAX-W 50</b>	8,0	3,115	1,062
<b>3x95Al</b>	11,3	-	0,400
<b>54/9 Raven</b>	10,1	3,933	1,206
<b>SAX-W 70</b>	9,7	3,777	1,023
<b>3x120Al</b>	12,7	-	0,390
<b>85/14 Pigeon</b>	12,8	4,984	1,159
<b>SAX-W 95</b>	11,3	4,400	0,993

Taulukosta nähdään, kuinka Wiski-kaapelin induktanssi on huomattavasti pienempi ilmajohtoihin verrattuna. Tämä johtuu johtojen välisestä lyhyestä etäisyydestä sekä ympäröivä maa estää sähkö- ja magneettikenttien läpäisyä. Ilmajohtojen arvoihin vaikuttavat vaihejohtojensa välinen etäisyys sekä ympäristö, sillä ne ovat alttiita jatkuville säätilamuutoksille ja sateelle. Avo- ja PAS-johdon laskuissa on käytetty johdoille ominaisia etäisyyksiä, jotta nähdään niiden eroavaisuudet omilla asennustavoillaan. Huomataan, kuinka avojohdolla on tällöin noin 0,2 mH/km enemmän induktanssia koostaan riippumatta. Sijoittamalla Raven-vaihejohtojen etäisyydeksi 0,5 metriä, saamme sen induktanssiksi 1,015 mH/km, joka menee hitusen PAS-johdon arvon alle. Jos sijoitamme SAX-W 70 vaihejohtojen etäisyydeksi 1,3 metriä, saamme sen arvoksi 1,214 mH/km, joka on melkein sama, kuin Raven-johtomallilla kyseisellä välimatkalla. Tästä näemme, että avo- ja PAS-johdon induktanssiarvot ovat melkein samat, jos ne asennetaan samalle välimatkalle. Päällystetty PAS-johto voidaan kuitenkin muovisuojauksensa ansiosta asentaa kapeammaksi, antaen näin käytännössä etulyöntiaseman induktanssiarvoissa verrattuna avojohdolle.

## 4 Tulokset

Tässä luvussa kiteytetään edellisessä luvussa kaapelivalmistajalta kerätyt ja tutkielmassa lasketut tulokset. Kerrataan lyhyesti mahdolliset tekijät sekä vertaillaan valittujen johtomallien arvoja.

Tasa- ja vaihtovirtaresistanssin luvussa todettiin, että kyseiset arvot ovat Wiski-kaapelilla pienimmät ja avojohdolla suurimmat varsinkin pienimmillä halkaisijoilla johtuen niiden materiaalien resistiivisyydestä. Maakaapelilla on muihin johtoihin verrattuna pienin kuormitettavuus, mutta suurin terminen oikosulkukestoisuus. Ilmajohdoilla kuormitettavuus on selvästi korkeampi, sillä ympäristö pääsee jäähdyttämään niitä paremmin toisin kuin suojattu PAS-johto ja maanalainen maakaapeli. Avojohtoon terminen oikosulkukestoisuus on kuitenkin pienimmällä ja keskimmaisella halkaisijalla pienempi kuin PAS-johdolla, ja suurimmalla halkaisijalla avojohto ylittää PAS-johdon kestoisuuden. Käyttökapasitanssia laskiessa ilmajohtojen arvot olivat jopa 25-35 osa maakaapelin arvoista, sillä ilmajohdoilla se koostui yksinkertaistetun kaavan avulla vain maakapasitanssista. Maakaapelin vaiheiden etäisyydet ovat huomattavasti pienemmät, sekä kaapelin muovieristeen permittiivisyys on moninkertainen ilmaan verrattuna. Maasulkuvirran ollessa suoraan verrannollinen maakapasitanssiin, on sekin huomattavan suuri maakaapelilla ilmajohtoihin nähden. Induktanssilaskuissa avojohdon arvot laskettiin suurimmiksi ja maakaapelille pienimmiksi johtomalleista. Avojohtoon vaiheet asennetaan kauemmaksi toisistaan verrattuna muihin vertailtuihin johtoihin, mikä kasvattaa induktanssia. PAS-johdon muovivaipan ansiosta sen vaiheiden etäisyys on pienempi, mikä vähentää niiden induktanssia.

Yleisesti maakaapeleiden resistiivisyys on pienempi kuin ilmajohdoilla, mikä tarkoittaa parempaa sähkönsiirtoa. Se ei kuitenkaan kestä jatkuvaa kuormitusta yhtä paljon kuin ilmajohdot, mutta kestää maksimilämpötilan oikosulkuja parhaiten. Kaapelin kapasitanssi kilometriä kohden on huomattavasti korkeampi kuin ilmajohdoilla, mikä lisää tarvetta asentaa varsinkin pitkille maakaapeliverkoille maasulkuvirtaa kompensoivia osia varsinkin sähkönjakeluasemilla. Koska sen kapasitanssi ja näin ollen

maasulkuvirtakin on korkeampi, tulee sen suuruutta pienentää asentamalla kuristimia. Ilmajohtojen suurin heikkous on niiden induktanssi kilometriin nähden, mikä näkyy avojohdossa, jonka vaiheiden väliset etäisyydet on oltava pitempiä. Tutkielman tulosten mukaan valittu PAS-johto suoriutui keskiarvioillisesti parhaiten, sillä verrattuna maakaapeliin ja avojohtoon, se sijoittui pääosin näiden kahden ääripään välille. Kuormitettavuudessa PAS-johdon arvot ovat korkeimmat toisiin johtolajeihin nähden. Maakaapelin asennuksessa on huomioitava sen erittäin korkea kapasitanssi verkon suunnittelussa, mikä lisää kustannuksia kompensointiin huomattavasti. Avojohton asennus on yksinkertaisempi, mutta vaiheiden välinen pitkä etäisyys vaatii pinta-alaltaan isompaa asennusta. Avojohto on haavoittuneempi myös linjalla tapahtuviin vikoihin, kuten ylikasvanut kasvillisuus ja kaatuneet puut, eikä sillä ole hyvää oikosulkukestoisuutta, jos johto pääsee lämpenemään maksimilämpötilaan. Jos maakaapelissa ilmenee vika, kuten halkeama tai kosteusvaurio, sen etsiminen voi viedä paljon resursseja ja aikaa. PAS-johdon suojaava muovivaippa mahdollistaa sen, ettei se vaurioidu tai ota osua niin helposti, mikä nostaa sen käyttö- ja korjausvarmuutta.

## 5 Yhteenveto

Tämän tutkielman tavoitteena oli selvittää ja tarkastella Suomessa yleisesti käytettyjen maakaapelin ja ilmajohtojen sähkötekniisiä arvoja, sillä monet sähköjakeluverkot ovat sähkömarkkinalain noudattamiseksi vaihtaneet ilmajohtoverkkoa maakaapeliverkoksi. Johtojen tekniisiä ja mekaanisia arvoja, kuten kuormitettavuudet ja johtimien säteet kerättiin ensisijaisesti suomalaisen kaapelivalmistajan Prysmian Group kaapeliesitteistä. Puuttuvien arvojen laskemiseen käytettiin standardin mukaisia keskiarviollisia tietoja, kuten asennuskorkeuksia sekä yksinkertaisia kaavoja.

Aluksi tutkielmassa tarkasteltiin maakaapelin AHXAMK-W, avojohdon ACSR ja PAS-johdon SAX-W rakenteita ja materiaaleja sekä pintapuolisesti asennuksia yksitellen, jonka jälkeen niitä verrattiin toisiinsa. Todettiin, että johtojen yleinen rakenne on jokaisella johdolla samankaltainen, mutta suurimmat eroavaisuudet muodostuvat niiden materiaaleista ja kerroksista. Maakaapelilla oli huomattavasti enemmän suojakerroksia muihin johtomalleihin verrattuna, kun taas avojohdolla oli vain yksi alumiinisäikeistä koostuva kerros johtimen lisäksi.

Seuraavaksi tarkasteltiin johtojen sähkötekniisiä arvoja, sekä niihin vaikuttavat tekijät. Vertailuja varten valitsimme kolmen eri halkaisijan omaavaa johdinmallia, joiden keskiarviolliset halkaisijat olivat 8,27 mm, 10,37 mm ja 12,27 mm. Todettiin, että vaihto- ja tasasähkövirtojen välillä maakaapelin resistanssit ovat pienimmät kummassakin tapauksessa verrattuna ilmajohtoihin, mutta sen kuormitettavuus on pienin samalla, kun PAS-johdolla se on korkein. Terminen oikosulkukestoisuus on kuitenkin maakaapelilla suurin ja avojohdolla pienin. Maakaapelin kapasitanssi kilometriin nähden on selvästi suurempi verrattuna ilmajohtoihin, minkä takia myös sen maasulkuvirta on suurempi. Induktanssi kilometriin nähden on huomattavasti pienempi maakaapelilla kuin kummallakaan ilmajohdolla, ja avojohdolla se on suurin. Näin ollen PAS-johto sijoittuu näiden ääripäiden välillä, pois lukien kuormitettavuudessa, joka sillä on korkein.

Tutkielma oli erittäin mielenkiintoinen, sillä verkon saneeraus ja kaapelointi ovat olleet jo pitkään puheenaiheena varsinkin haja-asutusalueella. Sähköverkko on erittäin kriittinen osa nyky-yhteiskuntaa, ja huoli sen käyttövarmuudesta ovat vain kasvattaneet keskustelua. Tietoja etsiessä sain hyvää oppia siitä, mitä kaikkea verkon suunnittelussa johtojen kannalta pitää ottaa huomioon ja miten ne vaikuttavat verkon lopulliseen suunnitelmaan. Löysin helposti tutkielmaan sopivat johtolajit, mutten saanut niin isoja halkaisijaeroja kuten olisin alun perin halunnut. ACSR-johdon suuremmat halkaisijat vaihtuvat ACCSR-johdoiksi, minkä päätin jättää lopuksi tutkielman ulkopuolelle. Valitsemaltani kaapelivalmistajalta ei myöskään löytynyt kaikilta johdinmalleilta samoja teknisiä arvoja, joten niiden korvaamiseksi oli löydettävä sopivia kaavoja. Eniten aikaa tutkielmassa menikin juuri kaavojen etsimiseen sekä niiden ymmärtämiseen.

Tämä tutkielma rajoittui haja-asutusalueella yleisimmin käytettyyn 20 kV verkkoon, mutta aihetta voisi jatkaa tutkimalla muun muassa pienjännitteisiä 400 V tai suurjännitteisiä 110 kV verkkoja, joissa käytetään myös maakaapeleita. Kyseiset verkot käyttävät hyvin paljon eroavia johtotyyppisiä kuten esimerkiksi nippu- ja kierrejohtimia, mikä lisäisi mielenkiintoista vertailtavaa. Tämän tutkielman laskut suoritettiin yksinkertaistetuilla kaavoilla, eikä esimerkiksi kapasitanssilaskuissa huomioitu maan johtavuutta, mikä vähensi muuttujia. Induktanssin ja kapasitanssin kaavoille oli myös annettu versiot, joissa huomioitiin tässä tutkielmassa ulos rajatun ukkosenjohtimen vaikutus sekä vaiheiden vuorottelemattomuus. Koska eri johtolajit vaativat lisäasennuksia verkkoon, niiden väliset kustannuserotkin voivat olla vertailemisen arvoisia. Tutkielma antoi hyvän pohjan syventyä ja laajentaa aihetta enemmän, sekä selkeytti johtolajien käytännöllisiä eroavaisuuksia ja tarpeita paremmin.

## Lähteet

- ABB. (2000a). Luku 8: Maasulkusuojaus. Teoksessa ABB:n TTT-käsikirja. ABB Oy. [https://heikkilaakso.com/opetus/abb/080\\_0007.pdf](https://heikkilaakso.com/opetus/abb/080_0007.pdf)
- ABB. (2000b). Luku 19: Sähköjohtojen mitoittaminen. Teoksessa ABB:n TTT-käsikirja. ABB Oy. [https://heikkilaakso.com/opetus/abb/191\\_0007.pdf](https://heikkilaakso.com/opetus/abb/191_0007.pdf)
- NKT. (2022). Keskijännitekaapeli keskusköydellä. Noudettu 9. joulukuuta 2025, osoitteesta [https://nkt.widen.net/content/awfa8tk1id/pdf/AHXAMK-W\\_24kV-FI-JUL2022\\_1.pdf?u=gj0n1y](https://nkt.widen.net/content/awfa8tk1id/pdf/AHXAMK-W_24kV-FI-JUL2022_1.pdf?u=gj0n1y)
- Elovaara, J., & Haarla, L. (2011a). Sähköverkot I. Otatieto.
- Elovaara, J., & Haarla, L. (2011b). Sähköverkot II. Otatieto.
- Monni, M. (2005). Sähköverkkoasennukset. Laine Direct Oy.
- Mäkinen, O. (ei pvm.). Noudettu 19. joulukuuta 2025, osoitteesta [https://portal.vamk.fi/pluginfile.php/1137763/mod\\_resource/content/3/Olavi%20M%C3%A4kinen%20-%20S%C3%A4hk%C3%B6verkot.pdf](https://portal.vamk.fi/pluginfile.php/1137763/mod_resource/content/3/Olavi%20M%C3%A4kinen%20-%20S%C3%A4hk%C3%B6verkot.pdf)
- Nikander, A., & Mäkinen, A. (2017). Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset – suojaushaasteet, yliaallot, vaarajännitteet. Tampereen teknillinen yliopisto. [https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Laajan\\_kaapeloidun\\_keskijanniteverkon\\_maasulkuilmioiden\\_vaikutukset\\_TTY\\_2017.pdf](https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Laajan_kaapeloidun_keskijanniteverkon_maasulkuilmioiden_vaikutukset_TTY_2017.pdf).
- Prysmian Group. (2022). *Aito Pikkalan Wiski® kestää ja kehittyy* [Tuote-esitelmä]. Prysmian Group. <https://fi.prysmian.com/node/201>  
<https://fi.prysmian.com/node/201>
- Prysmian Group. (2024). Energia-, teollisuus- ja talonrakennuskaapelit Noudettu 10. joulukuuta 2025, osoitteesta <https://fi.prysmian.com/sites/fi.prysmian.com/files/2024-03/Prysmian-Energia-teollisuus-ja-talonrakennuskaapelit%202024.pdf>
- Rexel. (ei pvm.). ACSR-PIGEON-85/14 [Tuotesivu]. <https://www.rexel.fi/fin/Tuoteryhmat/Kaapelointi/02-Tiedonsiirtokaapelit/Ter%C3%A4salumiinijohdin---ACSR-PIGEON-85-14/p/9538412>. Noudettu 12. joulukuuta 2025, osoitteesta <https://www.rexel.fi/fin/Tuoteryhmat/Kaapelointi/02-Tiedonsiirtokaapelit/Ter%C3%A4salumiinijohdin---ACSR-PIGEON-85-14/p/9538412>
- Rexel. (ei pvm.). SAX-W 120 20kV. Noudettu 12. joulukuuta 2025, osoitteesta <https://www.rexel.fi/fin/Tuoteryhmat/Kaapelointi/01->

Avojohtot/P%C3%A4%C3%A4lystetty-avojohdin---SAX-W-120-20kV-K2000/p/0122262

STUK. (ei pvm.). Sähköverkot synnyttävät sähkö- ja magneettikenttiä [Artikkeli].  
Säteilyturvakeskus. <https://stuk.fi/sahkoverkot-ja-voimajohdot>.

Sähkömarkkinalaki 588/2013 (2013).  
[https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2013/588#OT1\\_OT2\\_OT1](https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/saaduskokoelma/2013/588#OT1_OT2_OT1)

Turvatekniikan keskus. (ei pvm.). Varo ilmajohtoja. Noudettu 12. joulukuuta 2025,  
osoitteesta <https://www.herrforsnat.fi/assets/files/Varo-ilmajohtoja.pdf>