

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO

TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# KESKIJÄNNITEILMAJOHTOVERKON PUUPYLVÄIDEN KÄYTÖNRAJALAS- KENTA

TEKIJÄT Juuso O Tahvanainen  
Marko J Tuokko

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijät Juuso Tahvanainen, Marko Tuokko			
Työn nimi Keskijänniteilmajohtoverkon puupylväiden käytönrajalaskenta			
Päiväys	6.7.2023	Sivumäärä/Liitteet	44/3
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Adato Energia Oy			
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli päivittää kaksi Energiateollisuus ry:n verkostosuosituksia. Työn tilaajana toimi Adato Energia Oy, joka on Energiateollisuus ry:n tytäryhtiö ja verkostosuosituksien kustantaja. Suositukset kohdentuivat keskijänniteilmajohtoihin sekä puupylväisiin kohdistuvan rakenteellisten kuormitusten käytönrajalaskentaan. Työssä kartoitettiin ilmajohtoverkon puupylväiden suunnittelua, kuormitusten laskentaa, lainsäädäntöä ja standardeja.</p> <p>Työ alkoi selvityksellä, jossa vertailtiin suosituksien julkaisun aikaan voimassa olleita määräyksiä nykyisiin standardeihin. Lähdemateriaalina käytettiin ilmajohtostandardeja, Adaton muita verkostosuosituksia sekä aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Selvityksen aikana ilmenneiden tekijöiden myötä toisen verkostosuosituksen laskentatapa todettiin kumotuksi, jolloin työtä jatkettiin yhden suosituksen päivittämisellä. Selvityksen jälkeen seurasi laskentaosuus, jonka tukena hyödynnettiin ilmajohtojen suunnitteluun tarkoitettuja laskentaohjelmia ja työkaluja.</p> <p>Johtopäätöksistä voidaan todeta työksi annetun suosituksen päivityksen olevan laajempi kokonaisuus, joka on riippuvainen usean eri Adaton verkostosuosituksen sisällöstä. Tutkimustyön tuloksena saatiin laskentakaavat ja lukuarvot keskijänniteilmajohtoverkon käytönrajojenlaskentaan. Opinnäytetyön lisäksi luotiin myös työn tilaajalle tarkoitettu verkostosuosituksen päivityssuunnitelma, jossa ilmenee päivityksen edellytykset sekä verkostosuosituksien väliset rinnakkaisriippuvuudet.</p>			
Avainsanat Keskijännite, ilmajohtoverkko, puupylväät, käytönrajat			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author(s) Juuso Tahvanainen, Marko Tuokko	
Title of Thesis Calculating the operating limit of wooden poles in medium voltage overhead line	
Date 6 July 2023	Pages/Appendices 44/3
Client Organisation /Partners Adato Energia Oy	
<p><b>Abstract</b></p> <p>This thesis focused on updating two network planning instructions which are owned by Energiateollisuus ry. The thesis was commissioned by Adato Energia Oy, which is a subsidiary of Energiateollisuus ry and the publisher of the instructions. These instructions include guidelines for solving the operating limit of wooden poles in medium voltage overhead line.</p> <p>The project began with a review phase in which the old calculating methods were compared to the present ones. During the research it was found that the calculation method used in one network planning instruction was outdated. As a result, the work continued by updating only the other network planning instruction. The second phase included finding out the optimal calculating method for solving the operating limit of wooden poles.</p> <p>As a result, it can be concluded that the update depends on several different network planning instructions. The result of the thesis was a list of formulas and calculation instructions for determining the operating limit of wooden poles in medium voltage overhead line. For Adato Energia Oy there is a separate file, which includes a plan for updating network planning instruction.</p>	
<p><b>Keywords</b></p> <p>Medium voltage, overhead line network, wooden poles, operating limit</p>	

## ESIPUHE

Haluamme kiittää Adato Energia Oy:n Maria Seitajärveä sekä Energiateollisuuden Tuukka Heikkilää mielenkiintoisesta ja haastavasta opinnäytetyöstä. Kiitämme myös yhteistyötä tehneitä yrityksiä Savon Voima Verkkoa ja Voimatelia, jotka antoivat oman näkemyksensä päivitettävien verkostosuosituksien sisällöstä. Kiitämme myös Voimatelin Joni Torvista, joka tutustutti meidät Profilan käyttöön. Eriyisen kiitoksen ansaitsevat opinnäytetyön ohjaajat Janne Karppanen ja Juhani Rouvali.

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	8
2	ADATO OY .....	9
3	KESKIJÄNNITEILMAJOHTOVERKKO .....	10
3.1	Ilmajohtoverkon mekaaniset suunnitteluperusteet.....	14
3.2	Vahvavirtailmajohtomääräykset (VIM) .....	16
3.3	Laskentatyökalut.....	16
3.3.1	Profila .....	17
3.3.2	FMOK- ohjelmisto .....	18
4	PUUPYLVÄS .....	20
4.1	Pylväsluokat .....	20
4.2	Pylvästyypit .....	20
4.3	Pylvään pystytys .....	21
5	PYLVÄÄSEEN KOHDISTUVA KUORMA .....	22
5.1	Johdinkuorman mitoituksen lähtötiedot .....	22
5.2	Vaikuttavat voimat VIM:n mukaan .....	23
5.3	Vaikuttavat voimat standardin mukaan .....	25
5.4	Muut huomioitavat kuormat.....	30
5.5	Riippuma.....	31
6	PYLVÄÄN RAKENTEELLINEN KESTÄVYYS .....	32
6.1	Lähtötiedot.....	32
6.2	Kestävyys VIM:n mukaan .....	32
6.3	Kestävyys nykyisen standardin mukaan .....	34
6.4	Harukset .....	35
6.5	Orsirakenteet.....	37
7	VERKOSTOSUOSITUKSEN PÄIVITYS .....	38
8	POHDINTA.....	41
9	YHTEENVETO.....	42
	LÄHTEET .....	43
	LIITE 1: KANNATUSPYLVÄÄN MITOITUS .....	45

## KUALUETTELO

KUVA 1. Jakeluverkon prosessi (Voimatel, 2022) .....	11
KUVA 2. Sähköverkon puupylväät ja jännitteet (Tukes, 2023) .....	11
KUVA 3. Kolmen eri vyöhykkeen rajat (Fingrid, 2023) .....	12
KUVA 4. Sähkön siirto Suomessa (Fingrid, 2023) .....	13
KUVA 5. Pylväs- ja puistomuuntajat 20 kV / 400 V (Elenia, 2023).....	14
KUVA 6. Suunnitteluperusteet (SESKO ry, 2012) .....	15
KUVA 7. Yhdestä pisteestä harustettujen kulmapylväiden käytönrajakäyrästä (Adato Energia Oy, 1996) .....	17
KUVA 8. Profila-ohjelmisto (Pajala & Kärenlampi, 2022).....	18
KUVA 9. Pylvästyypit (Tahvanainen, 2023).....	21
KUVA 10. Tuulijänne ja painojänne (Sähkötarkastuskeskus, 1993, s. 17) .....	24
KUVA 11. Yhdistettyjen tuuli ja jääkuormien laskentakaavio (SESKO ry, 2012) .....	28

## LYHENTEET JA TERMIT

VIM	Vahvavirtailmajohtomääräykset
SFS	Suomen Standardoimisliitto
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
NNA	National Normative Aspects
kV	Kilovoltti (jännitteen yksikkö)
N	Newton (voiman yksikkö)
Pa	Pascal (paineen yksikkö)

## 1 JOHDANTO

Keskijännitteistä ilmajohtoverkkoa on rakennettu vuosikymmenien ajan ja sitä uusitaan vaiheittain verkkoyhtiöiden toimittaman sähkönlaatuvaatimuksien parantamiseksi sekä pienempien huolto- ja kunnossapitokustannuksien vuoksi teiden läheisyyteen. Koska ilmajohtojen mitoitus koskevat määräykset ovat jakautuneet useisiin standardeihin, on oikeiden laskentamenetelmien löytäminen usein haasteellista. Tilanteen helpottamiseksi on koottu useita erilaisia käsikirjoja, laskentatyökaluja ja yleisiä suosituksia.

Verkostosuositukset laaditaan helpottamaan standardien ymmärtämistä ja antamaan perus- ja lisätietoa jakeluverkon haltijoille, jakeluverkkoa rakentaville yrityksille sekä heidän alihankkijoilleen. Kaikille osapuolille suositusten päivittäminen ja tietojen pysyminen ajankohtaisina ja käyttökelpoisena lähteenä on siis hyvin tärkeää.

Tässä työssä kehitetään vuonna 1995 julkaistua verkostosuositusta, joka käsittelee 20 kV ilmajohtoverkon puupylväiden käytönrajoja. Työhön kuului alkuvaiheessa kaksi verkostosuositusta: RJ 3:95 ”20 kV johtojen pylväsrakenteet 1, Piirroset. Varmennettujen johtojen käytönrajat” sekä RJ 4:95 ”20 kV avojohtojen käytönrajat 2. Tavallisten johtojen käytönrajat”. Työn alussa toteutettiin selvitysvaihe, jossa havaittiin, että uusien standardien mukaisesti laskenta tehdään vain varmennetuilla johtimilla. Tämän vuoksi tavallisten johtojen käytönrajoja koskeva verkostosuositus RJ 4:95 poistettiin päivitystyöstä ja keskityttiin RJ 3:95:een. Nykyinen työ sisältää RJ 3:95 päivittämissuunnitelman sekä pylväiden käytönrajataulukoita varten tarvittavat kaavat.

Opinnäytetyö on tehty parityönä, jonka tekijät ovat Juuso Tahvanainen ja Marko Tuokko. Tuokon aihealueeseen kuuluivat verkostosuosituksen päivitykseen liittyvät kohdat sekä työn taustoittaminen, joita käsitellään luvuissa 2, 3 ja 7. Tahvanaisen osioissa käydään läpi ilmajohtoverkon suunnittelua sekä siihen liittyviä mekaanisia kuormia ja laskentakaavoja. Näitä käsitellään luvuissa 3.1, 4–6 sekä liitteessä 1.

Työn aluksi toteutettiin selvitystyö, sillä molemmat suositukset oli laadittu vuonna 1995 ja näin ollen tekstin oletettiin olevan vähintään osittain vanhentunutta. Suurin muutos, joka on vaikuttanut ilmajohtojen laskentaan, on kansalliset määräykset korvannut CENELEC-standardi. Työssä käytiin läpi verkostosuosituksen aikaisia laskentamenetelmiä ja niitä verrattiin nykyisiin standardeihin. Vertailun jälkeen arvioitiin päivittämisen tarvetta ja listattiin edellytykset verkostosuosituksen päivittämiselle.

Työn loppuun sisältyy laskentaesimerkki, jossa käsitellään puupylvään käytönrajoja. Lisäksi on käyty läpi mekaanisia tekijöitä, jotka on otettava huomioon keskijänniteverkon laskemisessa. Laskennan tukena hyödynnetään ilmajohtojen suunnitteluun tarkoitettuja laskentaohjelmia ja työkaluja.

## 2 ADATO OY

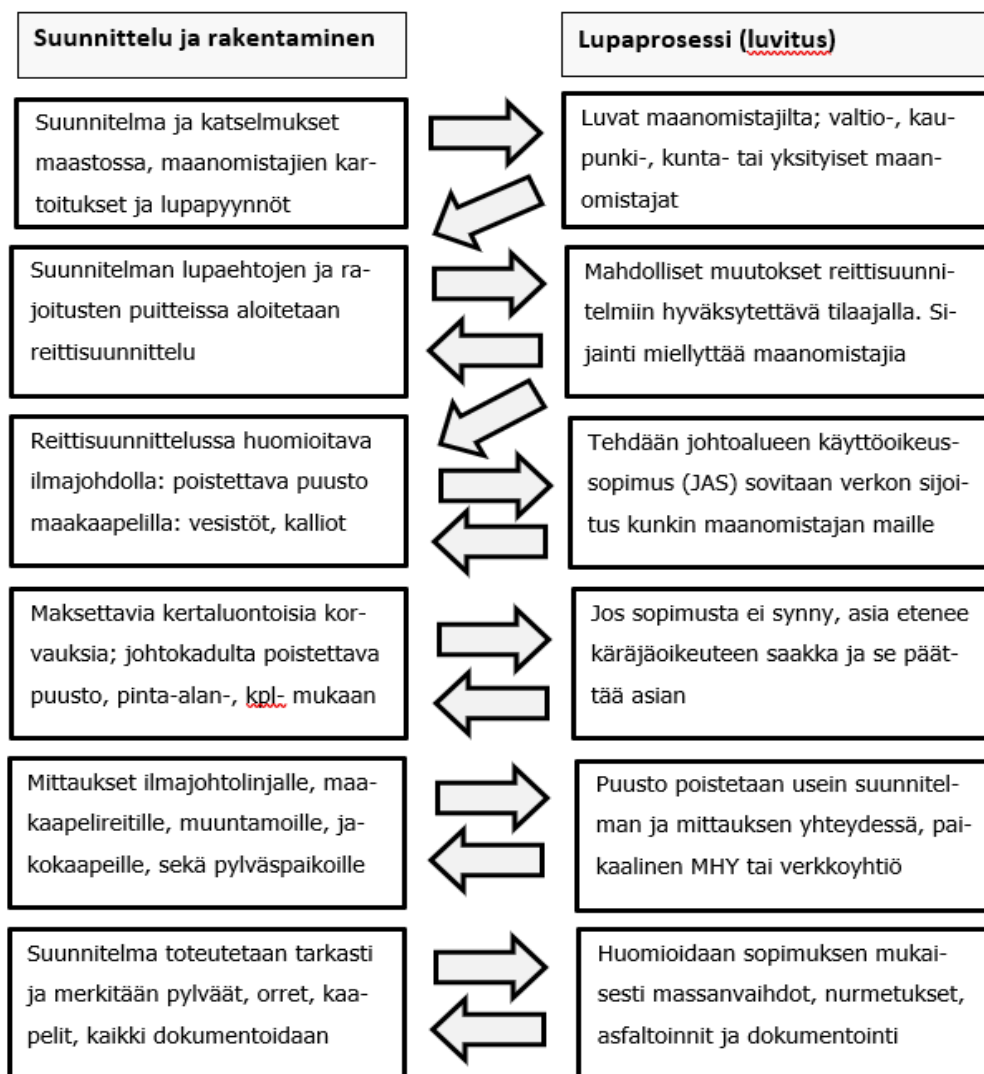
Adato Oy on vuonna 1989 perustettu suomalainen energia-alan palveluyritys ja sen omistaa Energiategiteollisuus ry. Suomalaisia energiayhtiötä palveleva yritys tuottaa koulutuksia, sekä tieto- ja viestintäpalveluita. Yrityksen toiminnan tarkoituksena on auttaa kaikkia asiakkaitaan ymmärtämään paremmin monipuolista ja nopeasti muuttuvaa energia-alaa. Asiakkaita ovat yksittäiset kuluttajat ja suuret yritykset, kuten sähköntuotannon energiayhtiöt, suuri-, keski- ja pienjännitteistä verkkoa rakentavat yhtiöt, kaukolämpöyhtiöt, verkkoyhtiöiden aluekohtaiset tai valtakunnalliset sähkönmyyjät, viranomaiset sekä eri energia-alan järjestöt.

Adato Oy:n tarjoamat koulutukset sisältävät laajan energia-alan tuntemuksen ansiosta yrityskohtaisia koulutuksia, tapahtumia eri paikkakunnilla, webinaarit ja ajankohtaisseminaareja, sekä etänä toteutettavia verkkokoulutuksia. Jokainen asiakas pääsee valitsemaan parhaan toimintamallin tarvittaville koulutukselle tai räätälöimään sen koskemaan osaa yrityksen henkilökunnasta. Viestintäpalvelut koskevat energia-alan asiakasviestintää, joissa asiakkuudet on jaettu heidän toimialansa mukaisesti ja materiaali on suunnattu suoraan toimialaa harjoittavalle asiakasryhmälle, kuten verkkopalveluiden tai kaukolämmön asiakkaisiin. Tietopalvelussa aina avoinna olevat verkkopohjaiset palvelut sisältävät ohjeita ja tietoa eri energia-alan asiantuntijoiden käyttöön. (Adato Energia Oy, 2017)

### 3 KESKIJÄNNITEILMAJOHTOVERKKO

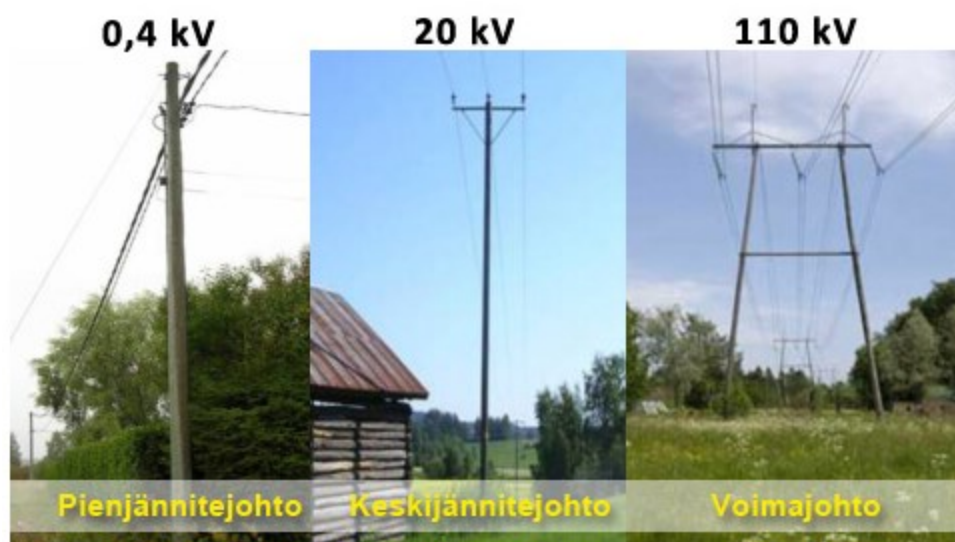
Ilmajohtoverkkoa on rakennettu Suomessa 1900-luvulta lähtien. Ensimmäiset ilmajohdot rakennettiin vesivoimaloiden yhteyteen. Pylväiden rakennusmateriaalina käytettiin puupylvästä ja käytetään edelleen, koska se on todettu vuosikymmenien aikana halvimmaksi ja kestävämmäksi materiaaliksi Suomen olosuhteisiin. Ilmajohtoverkkoa käytetään yleisesti ja sitä on rakennettu paljon, mutta kaupungeissa, taajamissa- ja asutusalueilla suositaan nykypäivänä enemmän maakaapelointia toimitusvarmuusvaatimuksien täyttämiseksi. Ukkonen, myrskyt ja lumikuormat aiheuttavat ilmajohtoverkon komponenteille vahinkoa, koska ne ovat alttiina luonnonvoimille. Maakaapeloinnilla pyritään rakentamaan säävarmaa verkkoa, sekä parantamaan sähköntoimintavarmuutta.

Ennen uusien ja saneerattavien keskijännitejakeluverkkojen toteuttamista tehdään tarkka kartoitus verkon kehittämistarpeita niin syrjäseudulla kuin kaupungeissa. Sähköverkon suunnitteluvaihe voi kestää pitkään ja pitää sisällään jopa vuosien etukäteissuunnittelua. Fyysinen rakentaminen on vain osa laajempaa kokonaisuutta, mutta ennen sen aloittamista ja sen aikana tehdään paljon muutakin, mm. selvitetään lupiin liittyviä asioita. Suunnitteluun liittyy aina vaativa maastosuunnittelu ja sen luvitusprosessi verkkoyhtiöiden toimesta. Siihen liittyy eri viranomais- ja maanomistajien suostumuksia, huomioitavaa vesistöjen-, muinaismuisto-, metsä- ja luonnonsuojelua, sekä eläinten suojelua, tarvittaessa myös erilaisia maksettavia korvauksia. Suunnittelu ja rakentaminen ovat vuorovaikutuksessa luvitusprosessin kanssa alusta loppuun saakka (kuva 1).



KUVA 1. Jakeluverkon prosessi (Voimatel, 2022)

Kuvassa 2 nähdään puupylväillä toteutettua ilmajohtoverkkoa. Voima- ja keskijännitejohtoa voidaan nähdä asutuskeskusten reunoilla. Kuvista voidaan havaita niiden alueellista sijaintia ja erityisesti ilmajohtojen korkeuseroa. (Tukes, 2023)



KUVA 2. Sähköverkon puupylväät ja jännitteet (Tukes, 2023)

Kantaverkon sähköasemia on Suomessa noin 120 kpl ja voimajohtoja yhteensä 14 400 km. Voimajohtoihin luetaan nimellisjännitteellä 400-, 220-, ja 110 kV:n toimivat ilmajohtot. Alueverkot sisältävät 110 kV siirtoverkkoja, mutta eivät kuulu kantaverkkoon ja ne kattavat vain pienen määrän sähkönsiirtoverkosta. Alueverkkoyhtiöitä on kuitenkin Suomessa noin 12 kpl ja niiden voimajohtojen yhteenlaskettu pituus on 7500 km. (Energiavirasto, 2022)

Keskijänniteverkko on usein paikallisten sähköyhtiöiden jakeluverkon omistuksessa ja niitä lasketaan olevan noin 80 kpl. Näiden keskijännitejohtojen yhteenlaskettu kokonaispituus on noin 140 000 km. Yleisin keskijännitejohtojen nimellisjännite kaupungeissa on 10 kV - 20 kV. Pienemmät jännitteet ovat eri tehtaiden-, teollisuuden- ja tuotantolaitoksien sähköntuotantoa. Tarvittaessa näiden jännitteitä nostetaan ylöspäin omaan käyttöön tai ennen sen jakeluverkkoon toimittamista. (Energiavirasto, 2022)

Verkkoyhtiöt rakentavat uutta keskijänniteverkkoa ja saneeraavat vanhaa erityisesti kasvukeskuksissa. Katsottaessa laajemmin jakeluverkkoa, voimme todeta 20 kV ilmajohtoverkon olevan rakennettu sähkönjakelun paikalliseen voimansiirtoon. Kotitalouksissa käytettävä pienjännite on 400 V ja pienjänniteverkon kokonaispituus on noin 220 000 km. (STUK, 2020)

Siirtoaluerajat, voimaantulo /  
Transmission areas, implementation plan:  
22.5.2023 - kopioi

-  Etelä / South
-  Keskialue / Central area
-  Pohjoinen / North
-  Muu

Fingrid verkkoaineisto / Fingrid  
Transmission grid

-  Fingrid 110 kV
-  Fingrid 400 kV
-  Fingrid 220 kV
-  Asiakkaiden johdot / Customers lines



KUVA 3. Kolmen eri vyöhykkeen rajat (Fingrid, 2023)

Kuvassa 3 nähdään Suomen kartta jaettuna kolmeen eri vyöhykkeeseen alkaen 22.05.2023. Fingridin hallinnoivan kantaverkon suurjännitejohdot ovat 400-, 220- ja 110 kV. Kuvassa on kantaverkon suurjännitejohtojen jännitteitä eri väreillä, sekä niiden määrää eri vyöhykkeillä. Samankaltaista aluejakoa käytetään ilmajohtoverkkojen puupylväiden kaapeleiden aiheuttamien, mekaanisen kuormituksen laskemisessa. Suomenpituudessa maassa erilaiset sääolosuhteiden vaihtelut vaikuttavat mitoituslaskentaan eri kuormitustapauksina. Kuormituksen laskennassa korostuvat pakkanen, tuuli- ja jääkuorma. (Fingrid, 2023)



KUVA 4. Sähkön siirto Suomessa (Fingrid, 2023)

Sähkön siirron toimintamalli Suomessa kuvassa 4 (Fingrid, 2023). Kuvan keskellä sähköasema 110 kV / 20 kV ja päämuuntajalta lähtevä keskijänniteverkko, ilmajohtimella ja maakaapelilla toteutettuna. Suomessa erityyppisiä jakelumuuntamoita on noin 130 000 kpl, joista pylväsmuuntamoita on suurin osa, koska haja-asutusalueita ja maaseutua on paljon. Kiinteistömuuntamoita on noin 9000 kpl. Keskijänniteverkkoa pyritään yhdistämään 10 kV - 20 kV pylväs-, puisto- ja kiinteistömuuttajilla toisiinsa, eräänlaisiksi ympyröiksi. Tällaisen rengasverkon tarkoituksena olisi turvata sähkötoimitus kuluttajille vian sattuessa sekä suunniteltujen katkoksien yhteydessä.



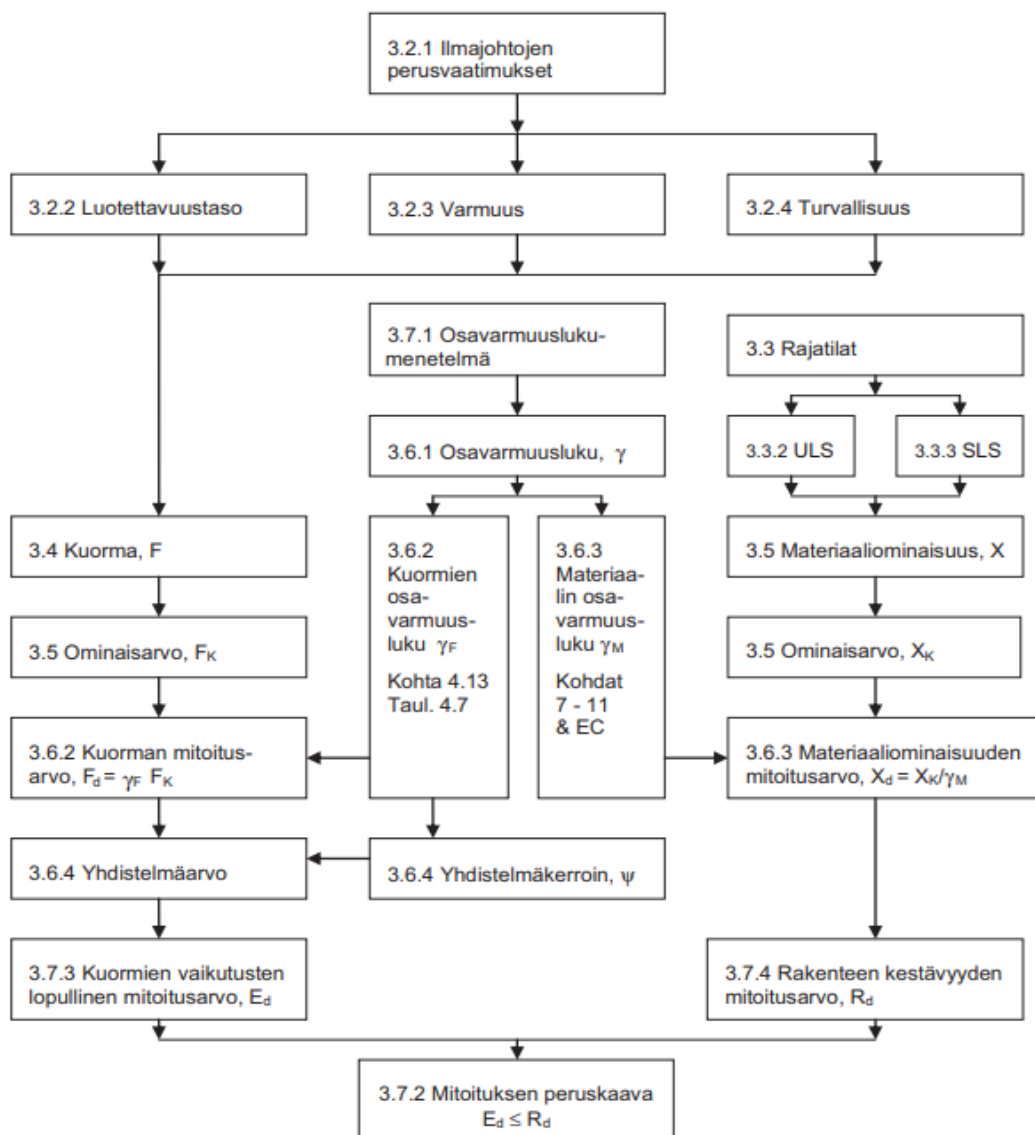
KUVA 5. Pylväs- ja puistomuuntamot 20 kV / 400 V (Elenia, 2023)

Maaseudulla ja yleisesti haja-asutusalueilla on paljon pylväsmuuntamoita. Taajamissa, lähiasutusalueilla ja kaupungeissa käytetään enemmän puistomuuntamoita. Kaikkia sähkölinjojen loppupään ja syrjäseudulla asuvien kotitalouksien ongelmatilanteita ei toistaiseksi varmistettu edellä mainitulla 20 kV rengasverkolla. Verkkoyhtiöt korjaavat jakeluverkojaan viranomaisvaatimusten mukaisemmaksi sekä sähkönlaadun parantamiseksi. Puisto- ja pylväsmuuntamoiden rakenne nähdään kuvassa 5. (Elenia, 2023)

### 3.1 Ilmajohdon mekaaniset suunnitteluperusteet

Eurooppalaiset standardit SFS-EN 50341-1:2014 ja 50341-3-7:2015 on vahvistettu suomalaisiksi kansallisiksi standardeiksi, minkä vuoksi tässä opinnäytetyössä niitä käytetään suunnittelun pohjana. Tässä osiossa käsitellään vain 20 kV ilmajohdon varten tarkoitettuja mekaanisia suunnitteluperusteita.

Kuvasta 6 nähdään suunnitteluperusteita kuvaava kaavio. Kaaviossa käydään läpi vaiheittain, mitkä tekijät on otettava huomioon ilmajohdon suunnittelun aikana. Mitoituksen peruskaavana on, että pylvään rakenteellisen kestävyuden mitoitusarvon  $R_d$  tulisi olla suurempi kuin kuormituksen lopullisen mitoitusarvo  $E_d$ . Tätä kaavaa voidaan soveltaa kaikille ilmajohdon rakenteiden osille, mutta tässä opinnäytetyössä keskitytään pääosin vain puupylvään rakenteelliseen kestävyyteen.



KUVA 6. Suunnitteluperusteet (SESKO ry, 2012)

Pysyvät kuormat ( $G$ ) kattavat pylvään oman painon, johon kuuluvat perustukset, varusteet ja kiinteät laitteet. Myös johtimen omapaino ja referenssilämpötilassa vallitsevien johdinvoimien vaikutukset lasketaan pysyviksi kuormiksi.

Tuuli-, jää- ja muut hyötykuormat lasketaan muuttuviksi kuormituksiksi ( $Q$ ). Kun muuttuviin kuormiin liittyy useiden kuormien yhdistelmiä, otetaan mukaan yhdistelmäkerroin  $\psi$ . Myös johtimen lämpötilamuutoksen vaikutukset lasketaan muuttuviksi kuormituksiksi, mikä tulisi ottaa huomioon käyttämällä osavarmuuslukua johtimen omassa painossa. Satunnaiset kuormitukset ( $A$ ) kattaa mm. johtimen katkeamisesta johtuvat kuormat sekä lumivyöryt.

Edellä mainituista kolmesta kuormitustekijästä saadaan yhteen laskettuna kuorma  $F$ . Kuormaa edustaa ominaisarvo  $F_K$ , jota käytetään rajatilatarkastelussa. Mitoitussarvo  $F_d$  saadaan ominaisarvon  $F_K$  ja osavarmuusluvun  $\gamma_F$  tulosta.

Ilmajohdolta, sekä sen kaikilta osilta ja komponenteilta, vaaditaan tiettyä luotettavuustasoa, jotka standardi määrittää kolmeen eri tasoon. Koska ilmajohdon luotettavuutta on hankala määrittää, voidaan vertailutasona käyttää luotettavuustasoa 1. Laskennan kannalta tämä tarkoittaa, että kuorman mitoitusarvon osavarmuuslukuna  $\gamma_F$  voidaan käyttää arvoa 1.

Materiaaliominaisuuden mitoitusarvo määritetään pitkälti samalla tavalla kuin kuorman mitoitusarvo. Materiaalin osavarmuusluku  $\gamma_M$  määräytyy tarkasteltavan verkon osan mukaan.

### 3.2 Vahvavirtailmajohdomääräykset (VIM)

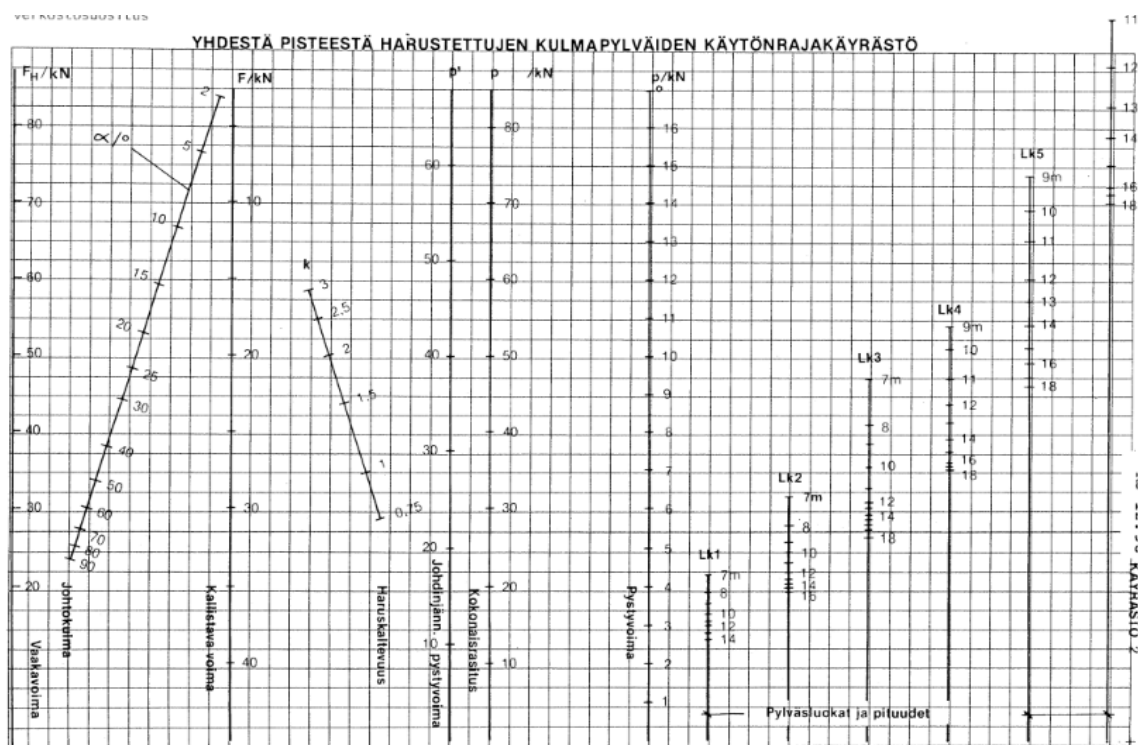
Ilmajohdoverkoston suunnitteluun, kartoitukseen ja sen tekemiseen tarvitaan kokonaisvaltaista näkemystä verkoston suunnittelusta sen toteutukseen. Vanhimmat käytössä olevat puupylväiden ilmajohdot ovat yli 60 vuoden ikäisiä. Puupylväät onkin todettu erittäin kestäviksi rakennusmateriaaliksi ja kustannustehokkaaksi Suomen olosuhteisiin. Vaikka ilmajohdoverkkoa oli tehty Suomessa vuosikymmeniä, ensimmäinen painos vahvavirtajohtojen soveltamismääräyksiä ja ohjeita koskeva kirja ilmestyi vuonna 1975. Julkaisun taustalla oli tuolloin kauppa- ja teollisuusministeriön päätös vuonna 1974 sähköturvallisuusmääräyksistä (205/74).

Lyhennettynä kirjan nimenä käytettiin sanaa VIM, eli vahvavirtailmajohdomääräykset. Sähkötarkastuskeskus teki muutoksia toiseen painokseen vuonna 1989 ja kolmanteen painokseen vuonna 1993. Muutetut painokset sisälsivät ilmajohdostandardeista tulleita muutoksia teiden yli menevien ilmajohdosten korkeudesta sekä kokemuseräisiä uudistuksia edellisten määräyksiä soveltamisesta. Viimeisin julkaisu astui voimaan 1.1.1994 ja oli voimassa ehdollisena vuoteen 31.12.1998. Useamman voimassa olevan standardin kumoutuminen oli huomioitu etupainotteisesti kirjan voimassaoloajassa. (Sähkötarkastuskeskus, 1993)

### 3.3 Laskentatyökalut

Verkostosuositusten puupylväiden johtimien aiheuttamien rakenteiden kuormituksen laskimiseen laskentatyökaluina käytetään verkkoyhtiöissä eri valmistajien ohjelmistoja ja yksi tunnetuimmista on Profila. Se on kehitetty ilmajohdoverkkojen suunnitteluun ja sen pääpaino on tuottaa laskentaa samanaikaisesti usealle puupylväälle. Myöhemmin käsiteltävä Excel-pohjainen FMOK-ohjelmisto laskee yksittäisen puupylvään mitoituksia. Kuormituksen laskennassa huomioidaan noin 70 eri muuttujaa ja jokainen pylväs lasketaan yksitellen.

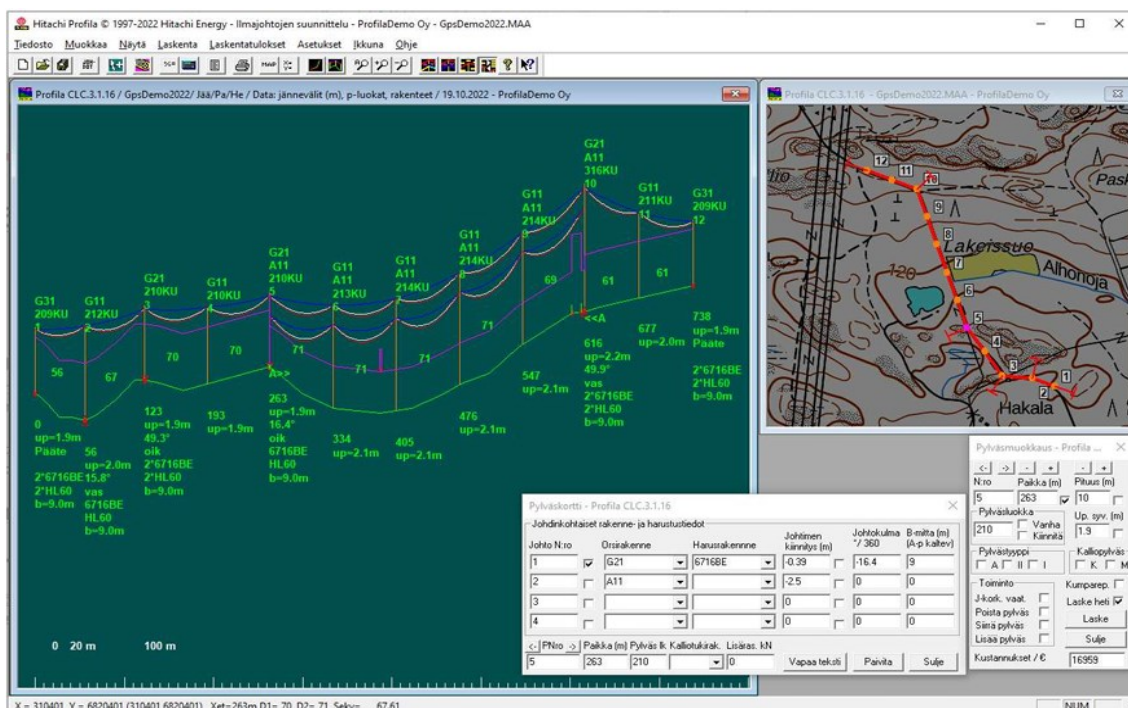
Verkostosuositus RJ 11 käsittelee käsin laskettavaa puupylväiden kuormitusta. Suosituksen vertailutaulukko on kiinteillä pystyasteikolla piirretty käytönrajakäyrästä. Piirrettäessä lisää suoria viivoja eri lukuarvojen mukaisesti saadaan eri tuloksia. Näiden perusteella tulkitaan pylväsluokkaa ja sen mukaista puupylvään pituutta. Kuvassa 7 nähdään harustettujen kulmapylväiden käytönrajakäyrästä, jolla voidaan määrittää yhdestä pisteestä harustettujen kulmapylväiden käytönrajoja. Laskentamalli on Adato Oy:n lähihistoriasta ja poistettu käytöstä vanhentuneena. Käsin laskeminen oli ennen laskentaohjelmien kehittymistä ainut vaihtoehto vuosikymmenien ajan.



KUVA 7. Yhdestä pisteestä harustettujen kulmapylväiden käytönraajakäyrästä (Adato Energia Oy, 1996)

### 3.3.1 Profila

Ilmajohtojen suunnitteluohjelmistoista Profila on yksi tunnetuimmista. Nykyiseltä nimeltään Hitachi Profila mahdollistaa keski- ja pienjännite ilmajohtojakeluverkkujen suunnittelun 0,4–20 kV jännitteelle ja siitä on myös suomenkielinen versio. Suomalainen yritys Versoft Oy perustettiin Tampereelle vuonna 1985. Yritys kehitti Profilan 90-luvun alkupuolella ja myytiin vuonna 1997, ABB Transmitt Oy:lle vuonna 2011 sen nimi muuttui ABB Profila CENELEC:ksi ja vuonna 2019 ABB Power Grids Finland Oy:ksi. ABB:n liki 20 % osakeomistukset siirtyivät vuonna 2022 nykyiselle omistajalle, joka on Hitachi Profila. (Pajala & Kärenlampi, 2022)



KUVA 8. Profila-ohjelmisto (Pajala & Kärenlampi, 2022)

Profila käyttää kuormitusten laskentaan CENELEC-standardin mukaisia voimarasituksia. Johtimista pylväisiin ja niiden rakenteisiin kohdistuvien voimien, sekä sään aiheuttamia muuttujia. Ensin haetaan suunnitellun johtoreitin korkeusprofiili, siihen lisätään pylväspaikat ja suunnitellut kaapelityypit (kuva 8). Nähdään puna-keltainenviiva, eli johtoreitin sijainti harmaassa karttaphjassa. Toisessa vihreässä kuvassa nähdään johtoreitin sivuprofiili. Profilan laskemasta tuloksesta saadaan maaston korkeuseron muutokset, pylväiden- ja kaapeleiden matkat, johtokulmat, sekä kaapeleiden riippumat. Käyttäen tarkasti pylväiden sijoitusalueen GPS-sijaintitietoa hyväksi, saadaan ohjelmiston laskentaan tarvittavat tiedot.

Ohjelma laskee orsisarjan ja sen vaihtoehtoja. Valinnan jälkeen saadaan mahdolliset harustukset ja pylvään tukirakenteet. Ohjelma laskee automaattisesti ja tarkastaa myös saadut laskelmatulokset, jos jokin arvo on lähellä minimiarvoa, se hälyttää tarkastamaan kuormituskohdan, orsarakenteen tai harustuksen. Muutoksia voi tulla eteen myös pylväiden asennusvaiheessa maahan, koska GPS-kartta ei näe tarkasti mitä maa-ainesta upotussyvyudessa on vastassa. Pylväiden sijoitusta voidaan joutua muuttamaan esimerkiksi peruskallion tai liian pehmeän maa-aineen vuoksi.

### 3.3.2 FMOK- ohjelmisto

Adato Energia Oy toteutti vuonna 2011 verkostosuositusten rinnalle 20 kV keskijännitejohtoille Excel-pohjaisen laskentaohjelmiston, jolla lasketaan johtimista pylväsrakenteille kohdistuvaa kuormaa. Ohjelman kaavat, parametrit ja toimintamalli perustuvat CENELEC-standardissa olevien voimajohtojen eurooppalaisiin standardeihin, jotka olivat voimassa ohjelmistoa tehdessä.

EN 50341-1 on perusstandardi (yli 45 kV jännitteiset johdot), jossa on määritelty laskentamenetelmät, kaavat ja suunnittelufilosofia. EN 50423-1 on täydentävä standardi (alle 45 kV jännitteiset johdot), jossa keskijännitejohdoille määritellään poikkeamat ja täydennykset. Näiden lisäksi laskennassa huomioidaan Suomea koskeva kansallinen standardi: EN 50341-3-7 liite, National Normative Aspects for Finland, eli NNA/FI. Molemmista standardeista on sen jälkeen tehty uudet painokset.

Ohjelmiston nimi on FMOK ja se sisältää kaksi erillistä Excel työkirjaa. FM-CLC:llä lasketaan pylvääseen kohdistuvia mekaanisia kuormia ja OK-CLC:llä valitaan kuormituksen mukaisesti sopiva pylväsluokka. FMOK-ohjelmisto laadittiin auttamaan puupylväiden hankalasti laskettavien kuormitusten ja puupylväiden valintaan, sekä niiden laskemisessa on huomioitava noin 70 muuttujaa. Ohjelmisto soveltuu paremmin yksittäisen pylvään määrittämiseen, kuin kokonaisen verkon laskemiseen.

FM-CLC-työkirjalla määritetään johtimista aiheutuvien voimien laskentamenetelmät ja ohjelmiston päivitetyllä versiolla saadaan laskettua myös johtimien riippumat, asennusköysivoimat ja lisäksi voidaan tehdä lyhennetyt käyttöiän laskelmia. Johdinvalikoima on työkirjalla suppea, tämän vuoksi käyttäjä voi tarvittaessa lisätä johtimia ja luoda käyttämiensä johtimien kirjaston. Tiedot voidaan siirtää kopioimalla johtimien lasketut kuormitustulokset toiselle Excel -työkirjalle, eli OK-CLC-pylväsmitoitustaulukoiden käyttöön.

OK-CLC-työkirjalla määritellään laskentatuloksilla pylväsluokka, joka sisältää pylvään pituuden ja lujuuden, myös harusten, T- ja A-pylväiden mitoitus erillisiin kuormitustilanteisiin CENELEC-standardin mukaisesti. FMOK-ohjelmisto on vain Adaton asiakkaiden käyttöön, eikä sen toimintaa esitellä syvemmin tässä opinnäytetyössä. (Adato Energia Oy, 2014)

## 4 PUUPYLVÄS

### 4.1 Pylväsluokat

Ilmajohtoverkon rakentamisessa käytetään pylväiden materiaalina yleisesti puuta 110 kV nimellisjännitteellä ja sitä pienemmillä jännitteillä. Pylväiden ja sen tukirakenteiden tarkoitus on toimia alustana ilmajohtoverkolle sekä varmistaa johtimille riittävä etäisyys maasta ja muista ympäröivistä rakenteista. Pylväsmateriaalina käytetään pääosin painekyllästettyä mäntyä standardin SFS 2662 mukaisesti. (HeadPower Oy, 2019)

Keskijännitteelle tarkoitettujen puupylväiden latvahalkaisijan tulee olla standardin vaatimusten mukaan vähintään 150 mm. Pylväät on jaettu eri luokkiin latvan halkaisijan mukaan. Yleisesti käytössä ovat luokat 2–5. Taulukossa 1 nähdään puupylväs-standardin määrittelemät pylväiden vähimmäishalkaisijat. (SESKO ry, 2004)

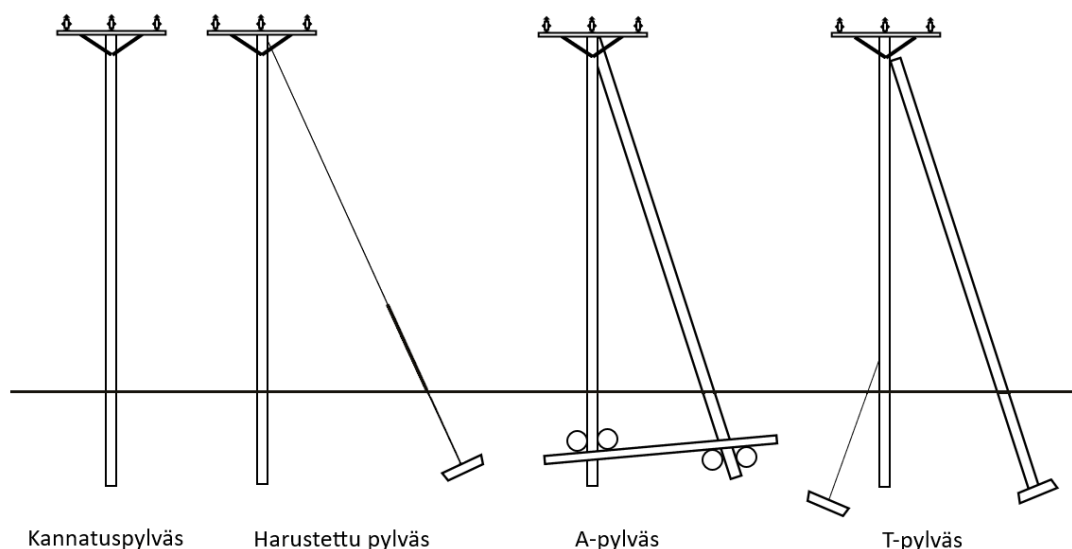
TAULUKKO 1. Pylvään mitat pylväsluokittain (SESKO ry, 2004)

Pylvään pituus <i>l</i> m	Luokka 1 $d_{\min} = 130 \text{ mm}$	Luokka 2 $d_{\min} = 150 \text{ mm}$	Luokka 3 $d_{\min} = 170 \text{ mm}$	Luokka 4 $d_{\min} = 190 \text{ mm}$	Luokka 5 $d_{\min} = 210 \text{ mm}$
	$D_{\min}$ mm	$D_{\min}$ mm	$D_{\min}$ mm	$D_{\min}$ mm	$D_{\min}$ mm
7	<b>160</b>	<b>170</b>	185		
8	<b>170</b>	<b>180</b>	195		
9	180	<b>195</b>	<b>210</b>	225	240
10	190	<b>205</b>	<b>220</b>	240	255
11	200	<b>215</b>	<b>230</b>	<b>250</b>	270
12	210	<b>225</b>	<b>240</b>	<b>260</b>	280
13	220	235	<b>255</b>	270	290
14	225	250	<b>265</b>	280	300
15		260	280	290	310
16		270	290	300	320
17			300	315	330
18			310	325	345

Tyvihalkaisija  $D$  mitataan 1,5 m päästä tyvestä. Pylvään tunnuksena käytetään kolminumeroista lukua, joka määräytyy pylvään luokan ja pituuden mukaan. Esimerkiksi tunnuksella 315 tarkoitetaan luokkaan 3 kuuluvaa 15 m pituista pylvästä. (SESKO ry, 2004)

### 4.2 Pylvästyypit

Tavallisimpia pylväsrakenteita ovat kannatuspylväs, harustettu pylväs, A-pylväs sekä T-pylväs. Eri pylvästyypien rakenne on havainnollistettu kuvassa 9.



KUVA 9. Pylvästyypit (Tahvanainen, 2023)

Suorilla johto-osuuksilla voidaan käyttää kannatuspylväitä, mutta johtokulmien aiheuttamien voimien takia joudutaan käyttämään muita pylväsrakenteita. Harustetuilla rakenteilla pylvään tukena käytetään yhtä tai useampaa harusköyttä, joka ankkuroidaan maan alle haruslaamalla. Jos harusta ei saada asennettua tarpeeksi kauas, esimerkiksi maastossa olevien esteiden takia, käytetään A- tai T-pylvästä. A- ja T-pylväällä tukemiseen käytetään tukipuuta.

A-pylväessä tukipuu kiinnitetään pulteilla pystypuuhun pylvään latvasta. Maan alla molempiin pystypuihin kiinnittyy poikkipuu, joka tukee rakennetta ja estää sen painumisen. T-pylväessä latvaliitos tukipuuun tehdään saranan avulla. T-pylvään maanalaiseen osaan käytetään pehmeässä maaperässä lisätukena kuvassa 9 näkyvää laattasilmusta ja haruslaattaa. Vaihtoehtoisena menetelmänä voidaan käyttää pystypuun tyveen asennettavaa yhtä tai useampaa poikkipuuta.

### 4.3 Pylvään pystytys

Pylväät pyritään upottamaan maahan ja estämään tarvittaessa niiden vajoaminen, kaatuminen tai katkeaminen. Jokaiselle maaperälle on myös omat pylvään upotussyvyudet, vaikka hankalampia pystytyspaikkoja pyritään välttämään. Perussääntö pylvään upotussyvyudeksi on standardin ohjeistuksen mukaan vähintään  $1/7$  pylvään pituudesta, mutta kuitenkin minimissään 1,5 m. Headpower ohjeistaa pylväskohtaisen syvyyden määritykseen käytettäväksi kaavaa:

$$\text{Kaivuussyvyys} = 1,4 \text{ m} + \frac{L}{20} \quad (1)$$

jossa L vastaa pylvään pituutta. Tilanteet, joissa asennussyvyys jää suunniteltua matalammaksi mm. kallion vuoksi, on latvasta lyhennettävä vastaavan mittainen pätkä, jotta pylväs vastaa suunniteltua pituutta. Lisäksi pylvään tukemiseksi on tehtävä kallioperustus. Pehmeässä maassa kaivuussyvyyttä on taas kasvatettava n. 0,5 m (HeadPower Oy, 2020)

## 5 PYLVÄÄSEEN KOHDISTUVA KUORMA

Pylväiden kuormana pidetään kaikkea muuta kuin itse pylvästä. Se sisältää pylvääseen kiinnitettyjen osirakenteiden- ja johtimien painon, tuulen aiheuttaman johtimen värähtelyn, sekä jääkuorman. Näiden lisäksi huomioidaan ilmastolliset muutokset, joiden vuoksi lämpötilaero voi olla merkittävä tekijä johtimien mitoituksessa. Pylvään pituudessa huomioidaan maa-aines ja sen mukaisesti upotussyvyys.

### 5.1 Johdinkuorman mitoituksen lähtötiedot

Standardin SFS-EN 50341-1 määrittelyn mukaan johdin tulisi mitoittaa niin, että se kestää ilmastollisten kuormien aiheuttamat vetojännitykset määritellyssä luotettavuustasossa. Laskelmissa huomioidaan otettavat tekijät ovat jääkuorman aiheuttama murtuminen, tuulikuorman aiheuttama värähtelyliike ja ettei sähköisiä vähimmäisetäisyyksiä aliteta riippumien takia.

Jääkuormat aiheuttavat johtimelle pystyvoimia ja lisäävät johdinjännitystä. Johtimien jääkuormat on koottu jaoteltuina eri jäätymislukkiin SFS-EN 50341-2-7 standardin taulukossa 4.5/FI.1. Perustapauksissa jääkuormana käytetään 10 N/m, jolloin suhteellinen keskikorkeus käytettävän kiristysvälin jännteillä on 0...50 m. Perustuulennopeutena käytetään kaikilla Suomen alueilla yleisesti 21 m/s. (SESKO ry, 2015, s. 7)

Johtimen paino ja muut tarvittavat parametrit tarkastetaan valmistajan sivuilta. Johtimen aiheuttama kuorma jänteen pituudelta voidaan laskea kaavalla

$$G_L = g_0 * L \quad (2)$$

jossa  $g_0$  on johtimelle ilmoitettu kokonaispaino pituusyksikköä kohti ja  $L$  on johtimen jänne.

Johdinvalmistajilta tarvitaan johtimen perustiedot, joihin kuuluu:

- Poikkileikkauksen pinta-ala (mm<sup>2</sup>)
- Halkaisija (mm)
- Paino (N/m)
- Kimmoisuusmoduulit alussa ja lopussa
- Lämpöpiteneimiskerroin
- Murtolujuus

Lisäksi tulee tuntee johtimen nollasääjännitys, eli johdinjännitys perustilassa. Nollasääjännitys kuvaa johtimen jännitystä 0°C lämpötilassa, kun virumisesta johtuva jännityksen pieneneminen on päättynyt. Al/Fe -johdoille ja AMKA:lle käytetään arvoa 45 N/mm<sup>2</sup>. Johdinjännitys kasvaa nollasääjännitystä suuremmaksi eri kuormitustilanteissa, mikä johtuu mitoituslämpötilan muutoksesta sekä kuormien vaikutuksesta.

Johdinvoima voidaan määrittellä johdinjännityksen ja johtimen poikkipinta-alan avulla kaavalla:

$$Johdinvoima = Johdinjännitys * A_{johdin} \quad (3)$$

## 5.2 Vaikuttavat voimat VIM:n mukaan

Tässä luvussa käsitellään käytöstä poistuneita johdinvoimien laskentamenetelmiä. Niillä menetelmillä laskeminen antaa pylvään kestävyyskannalta ylimitoitettuja tuloksia nykyisiin standardeihin verrattuna.

VIM:n aikaan johto rakennettiin joko tavallisena tai varmennettuna. Tavallisen johdon mitoituksessa käytettiin pienempää jääkuorman mitoitusarvoa, mikä mahdollisti pidemmät jännevälit. Lisäksi johtimen katkeamisesta aiheutuvia kuormia ei otettu huomioon tavallisella johtimella. Varmennettua johtoa käytettiin muun muassa liikenneväyliä ylittävissä johto-osuuksissa. Ilmajohtostandardi ei käytä käsitettä varmennettu tai tavallinen johto, vaan kaikki johdot mitoitetaan samojen periaatteiden mukaan.

Johdin aiheuttaa kiinnityskohtaansa kolme erilaista kuormaa:

- vaakasuoran, johtimen suuntaisen kuorman, jonka suuruus vastaa johtimen vaakasuoraa köysivoimaa
- vaakasuoran, tuulen suuntaisen kuorman, jonka suuruus vastaa tuulijänteen pituista johtimen tuulikuormaa
- pystysuoran kuorman, joka sisältää johtimen painojännettä vastaavan oman kuorman ja jääkuorman.

Johtimen jääkuorma  $g_j$  varmennetun johtimen menetelmällä lasketaan kaavalla

$$g_j = 10 + \frac{d}{mm} \quad (4)$$

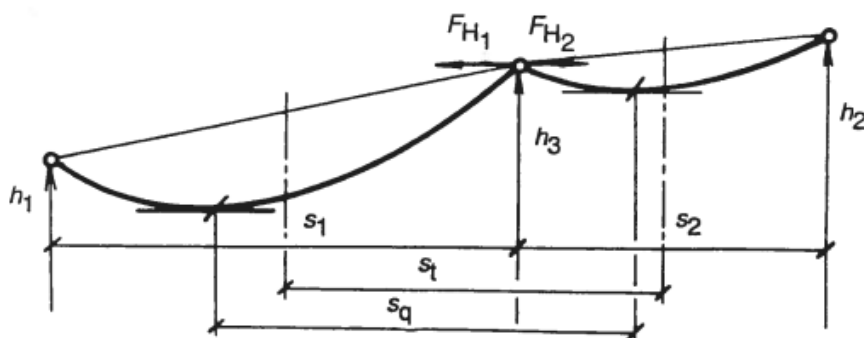
jossa  $d$  vastaa johtimen halkaisijaa millimetreinä. Jääkuorman pienin arvo on 17,5 N/mm. Jos johtimen halkaisija on yli 20 mm, käytetään jääkuormalle arvoa 25 N/m.

Tuulikuormaa mitoittaessa johtimen lämpötila on  $-20^\circ\text{C}$  ja siihen vaikuttava kohtisuora tuulenpaine  $p_t$  on  $250 \text{ N/m}^2$ . Laskettaessa johtimen tuulikuormaa VIM käyttää tuulenpaineelle merkintää  $g_t$ , jolloin yksikkönä on N/m. Tuulikuorman kaava on:

$$q_t = \sqrt{g_0^2 + g_t^2} \quad (5)$$

jossa  $g_0$  on johtimen aiheuttama kuorma.

Kuvassa 10 nähdään havainnollistettu esimerkki tuulijänteen ja painojänteen mitoituksesta.



KUVA 10. Tuulijänne ja painojänne (Sähkötarkastuskeskus, 1993, s. 17)

Tuulijännteellä  $s_t$  tarkoitetaan väliä, joka mitataan viereisten jänneiden keskipisteistä kaavalla:

$$s_t = \frac{1}{2}(s_1 + s_2) \quad (6)$$

jossa  $s_1$  ja  $s_2$  vastaavat viereisten jänneiden pituuksia.

Painojänne  $s_q$  saadaan pylvään viereisten jänneiden alinten kohtien välisen etäisyyksien summasta.

Painojänteen suuruus saadaan selville kaavalla:

$$s_q = \frac{1}{2}s + y \frac{F_H}{q} \quad (7)$$

jossa  $y$  on viereisten pylväiden korkeuseron ja niiden välisen jänteen osamäärä,  $F_H$  johtimen köysi-voiman vaakasuora komponentti ja  $q$  johtimen kuormitus.

Pystyvoima kolmelle johtimelle lasketaan kaavalla

$$F_p = s_q * g_j * 3 \quad (8)$$

Vaakavoima kolmelle johtimelle lasketaan kaavalla:

$$F_v = s_t * p_t \quad (9)$$

### 5.3 Vaikuttavat voimat standardin mukaan

Tässä osiossa käsitellään pylvääseen vaikuttavia voimia SFS-EN 50341- standardeissa esiintyvien kaavojen määrittämällä tavalla. Voimat lasketaan luvussa 3.1 olevien periaatteiden mukaisesti. Johtimien kuormia laskiessa muuttuvina tekijöinä on tuulikuormasta aiheutuvat vaakakuormat sekä jääkuormasta aiheutuvat pystykuormat.

Tuulikuormat vaihtelevat maastoluokan mukaan. Maastoluokat on jaettu maaston muodon ja rosoisuuden mukaisesti. Taulukossa 2 on kuvattu tiivistetty versio maastoluokista, joka löytyy kokonaisuudessaan SFS 601 käsikirjan taulukosta 4.1/FI.1. Taulukosta saadaan eri maastoluokille määritellyt arvot karheuden pituudelle  $z_0$  ja maastokertoimelle  $k_r$ .

TAULUKKO 2. Tiivistetty taulukko Suomen maastoluokista (SESKO ry, 2015, s. 198)

Maastoluokka	Kuvaus	$z_0$	$k_r$
II	Perusmaasto	0,05	0,189
II+	Sisämaan vaihteleva maasto	0,095	0,195
III	Rakennuksia, kyliä, taajamia, pysyviä metsiä. Myös tyypillinen suomalainen kumpuileva metsämaasto	0,3	0,214

### Johtimien tuulikuormat

Pylvääseen kohdistuva tuulikuorma, joka aiheutuu kahden vierekkäisen jänteen kunkin osajohtimen vaikutuksesta, lasketaan seuraavilla kaavoilla:

orren suunnassa:

$$Q_{Wc_v} = q_p(h)G_c C_c d \left[ \pm \frac{L_1}{2} \cos^2 \left( \phi + \frac{\theta_1}{2} \right) \cos^2 \left( \frac{\theta_1}{2} \right) + \frac{L_2}{2} \cos^2 \left( \phi - \frac{\theta_2}{2} \right) \cos^2 \left( \frac{\theta_2}{2} \right) \right] \quad (10)$$

ja ortta vastaan kohtisuorassa suunnassa:

$$Q_{Wc_u} = q_p(h)G_c C_c d \left[ \pm \frac{L_1}{2} \cos^2 \left( \phi + \frac{\theta_1}{2} \right) \sin^2 \left( \frac{\theta_1}{2} \right) - \frac{L_2}{2} \cos^2 \left( \phi - \frac{\theta_2}{2} \right) \sin^2 \left( \frac{\theta_2}{2} \right) \right] \quad (11)$$

$q_p(h)$	puuskatuulenpaine
$h$	johtimelle käytettävä vertailukorkeus
$G_c$	johtimen rakenteellinen kerroin
$C_c$	johtimen vastuskerroin (vaihe- ja ukkosjohtimelle 1, riippukierrekaapelille (AMKA) 1,2)
$d$	johtimen halkaisija
$L_1, L_2$	kahden vierekkäisen jänteen pituudet
$\phi$	tuulensuunnan ja orren pituusakselin välinen kulma
$\theta_1, \theta_2$	johdon suuntakulman muutos

Kaavassa esiintyy useita erikseen laskettavia arvoja, joista useimmat pysyvät kuitenkin vakiona tai muuttuvat maastoluokan mukaan.

Johdon suuntakulmalla  $\theta_1$  tarkoitetaan tulevan johdon kulmaa ja  $\theta_2$  lähtevän johdon kulmaa. Suoran linjan pylväillä johdon suuntakulma on 0, jolloin kaava tiivistyy muotoon:

$$Q_{wc_v} = q_p(h) G_c C_c d \cos^2 \varnothing \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (12)$$

Suoralla johtolinjalla ei synny voimia ortta vastaan kohtisuorassa linjassa, jolloin

$$Q_{wc_u} = 0 \quad (13)$$

Tuulen suuntana  $\varnothing$  tulee tarkastella mitoituksen kannalta pahimpia tuulen suuntia. Yleisimmin 0,  $\pm 20$  ja  $\pm 45$  asteen suuntaiset tuulet ovat riittäviä. Tarvittaessa on myös tuulen muut suunnat tarkastettava, jos näiden oletetaan merkittävästi vaikuttavan pylvään mitoitukseen. Jos johdon yleistä suuntaa ei voida määrittää, on kaikissa kuormitustapauksissa käytettävä tuulen kohtisuoraa suuntaa.

Puuskatuulenpaine  $q_p(h)$  lasketaan kaavalla:

$$q_p(h) = [1 + 7I_v(h)]q_h(h) \quad (14)$$

jossa  $I_v(h)$  on turbulenssin tiheys ja  $q_h(h)$  keskituulenpaine.

Turbulenssin tiheys  $I_v(h)$  lasketaan kaavalla:

$$I_v(h) = \frac{1}{c_0 \ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \quad (15)$$

jossa  $c_0$  on maaston muotokerroin,  $z_0$  karheuden pituus ja  $h$  tarkasteltavan komponentin vertailukorkeus maan pinnasta mitattuna. Kun maaston keskimääräinen kaltevuus on pieni, voidaan maaston muotokertoimella käyttää arvoa  $c_0 = 1$ . Maastoluokassa II karheuden pituus vastaa arvoa  $z_0 = 0,05$ . Vertailukorkeutena  $h$  voidaan pienimmillään käyttää arvoa 10 m.

Keskituulenpaine  $q_h(h)$  lasketaan kaavalla:

$$q_h(h) = \frac{\rho * V_h^2(h)}{2} \quad (16)$$

jossa  $V_h(h)$  on keskituulennopeus ja  $\rho$  on ilman tiheys. Standardi käyttää ilman tiheydelle arvoa  $1,292 \text{ kg/m}^3$  peruslämpötilassa  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kun määrävänä kuormaparametrinä on tuuli, käytetään  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilaa, jolloin ilman tiheyden arvo on  $1,394 \text{ kg/m}^3$ .

Keskituulennopeudelle  $V_h(h)$  on oma kaava, mutta maastoluokassa II se vastaa likipitään perustuu-  
len  $V_{b,0}$  arvoa 21 m/s.

$$V_h(h) = V_{b,0} c_{dir} c_0 k_r \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \quad (17)$$

Standardi määrittää kohdassa 4.3.2, että 20 kV keskijänniteverkkoa laskiessa on sallittua käyttää  
10 m korkeudelle maan pinnasta laskettua keskituulennopeuden vakioarvoa, jolloin

maastoluokassa II:  $V_h(h) = 21 \text{ m/s.}$

maastoluokassa II+:  $V_h(h) = 19,1 \text{ m/s.}$

maastoluokassa III:  $V_h(h) = 15,8 \text{ m/s.}$

Johtimen rakenteellinen kerroin  $G_c$  lasketaan kaavalla:

$$G_c = \frac{1 + 2k_p I_v(h) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(h)} \quad (18)$$

$k_p$  huippukerroin (suositeltava arvo 3)

$I_v(h)$  turbulenssin tiheys

$R^2$  resonanssivastekerroin (voidaan jättää huomiotta, eli  $R^2 = 0$ )

$B^2$  taustakerroin  $\left(\frac{1}{1 + \frac{3}{2} \frac{L_m}{L(h)}}\right)$

Taustakerroin  $B^2$  ottaa huomioon jänteen tuulenpaineesta puuttuvan korrelaation vaikutuksen.  $L_m$   
vastaa kahden vierekkäisen jänteen keskipituutta ja  $L(h)$  turbulenssin pituuskaalaa, joka voidaan  
laskea kaavalla:

$$L(h) = 300 \left(\frac{h}{200}\right)^{0,67+0,05 \ln(z_0)} \quad (19)$$

## Johtimien jääkuorma

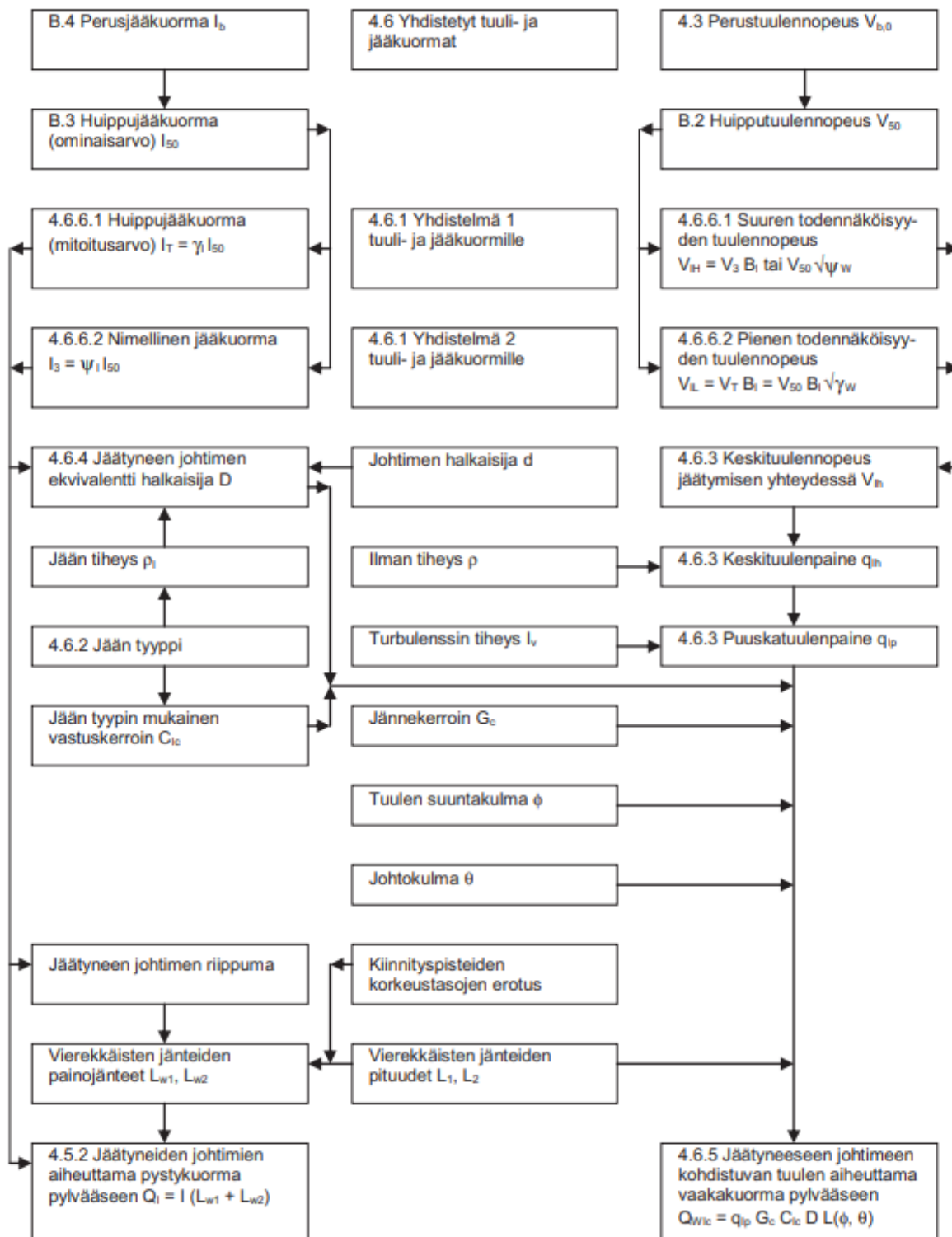
Pystykuorma, joka aiheutuu kahden vierekkäisen jänteen kunkin osajohtimen jääkuormista, laske-  
taan kaavalla:

$$Q_l = I (L_{w1} + L_{w2}) \quad (20)$$

jossa  $I$  on jääkuorma johtimen pituusyksikköä kohti (N/m) ja  $L_{w1}/L_{w2}$  kuvaa viereisten jänneiden pai-  
nojännettä. Painojänneiden suuruus määräytyy jäätyneen johtimen riippumasta sekä kiinnityspistei-  
den väliin jäävistä vaaka- ja pystyettäisyyksistä. Jos pylväiden välillä ei ole korkeusvaihtelua, paino-  
jänne vastaa johtimen jänteen pituutta. Ominaisjääkuormana voidaan käyttää Suomen oloissa arvoa  
10 N/m, sillä maaston suhteellinen korkeus ei yleensä vaihtelee yli 50 m.

## Yhdistetyt tuuli- ja jääkuormat

Standardi määrittää, että 20 kV johdinten laskennassa on otettava huomioon kaikki tuuli- ja jääkuormia koskevat yhdistelmätilanteet. Kuvassa 11 esitetään yhdistettyjen tuuli- ja jääkuormien laskenta-kaavio, josta nähdään, miten jäätynyt johto tulisi ottaa huomioon tuulivoimien laskentakaavoissa.



KUVA 11. Yhdistettyjen tuuli ja jääkuormien laskentakaavio (SESKO ry, 2012)

Jäätyneiden johtimien tuulikuormien vaikutus lasketaan pieniä muutoksia lukuun ottamatta samalla tavalla, kuin normaalit johtimien tuulikuormat. Kun jään vaikutus otetaan mukaan, kaavat muuttuvat seuraaviin muotoihin:

orren suunnassa:

$$Q_{WIC_V} = q_{Ip}(h)G_c C_{Ic} D \left[ \pm \frac{L_1}{2} \cos^2 \left( \varnothing + \frac{\theta_1}{2} \right) \cos^2 \left( \frac{\theta_1}{2} \right) + \frac{L_2}{2} \cos^2 \left( \varnothing - \frac{\theta_2}{2} \right) \cos^2 \left( \frac{\theta_2}{2} \right) \right] \quad (21)$$

ja ortta vastaan kohtisuorassa suunnassa:

$$Q_{WIC_U} = q_{Ip}(h)G_c C_{Ic} D \left[ \pm \frac{L_1}{2} \cos^2 \left( \varnothing + \frac{\theta_1}{2} \right) \sin^2 \left( \frac{\theta_1}{2} \right) - \frac{L_2}{2} \cos^2 \left( \varnothing - \frac{\theta_2}{2} \right) \sin^2 \left( \frac{\theta_2}{2} \right) \right] \quad (22)$$

$q_{Ip}(h)$	puuskatuulenpaine jäätyneen yhteydessä
$C_{Ic}$	jään peittämän johtimen vastuskerroin (1,15)
$D$	jäätyneen johtimen ekvivalenttinen halkaisija

Puuskatuulenpaine  $q_{Ip}(h)$  samalla kaavalla kuin aikaisemmin, kun käytetään luotettavuustasoa 1. Vaikuttavana tekijänä toimisi tuulikuorman huipputuulennopeus  $V_{50}$ , mikä määräytyy luotettavuustason mukaan. Laskennassa käytetään luotettavuustasoa 1, jolloin huipputuulennopeuden arvo vastaa perustuulennopeutta  $V_{b,0}$ .

Jäätyneen johdon ekvivalenttista jääkuormaa  $D$  laskiessa oletetaan, että jääkerros vastaa sylinteriä, jolloin sen kaava on:

$$D = \sqrt{d^2 + \frac{4 I}{9,81 \pi \rho_I}} \quad (23)$$

jossa  $\rho_I$  on jään tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ). Laskennassa voidaan käyttää jään tiheydelle arvoa  $500 \text{ kg/m}^3$ .

## Yhdistelmäkertoimet

Yhtä aikaa tuulta ja jäätä sisältävissä kuormitustapauksissa pylväisiin kohdistuvat voimat määritellään yhdistelmäkertoimien  $\Psi$  avulla. Yhdistelmäkertoimet on jaettu kahteen luokkaan; päällystämättömiin ja päällystettyihin johtimiin. Päällystämättömien johtimien arvot koskevat johtoja, jotka kuuluvat sekä luotettavuusluokkaan 1 että jäätymisluokkaan 1. (SESKO ry, 2015)

Päällystämättömillä johtimilla yhdistelmäkertoimena käytetään:

$$\text{tuulelle: } (J+T) = 0,25; (T+J) = 0,45$$

$$\text{jäälle: } (J+T) = 1,0; (T+J) = 0,25$$

Päällystetyillä johtimilla

$$\text{tuulelle: } (J+T) = 0,4; (T+J) = 0,7$$

$$\text{jäälle: } (J+T) = 1,0; (T+J) = 0,35$$

Päällystettyjen johtimen arvoja käytetään mm. laskettaessa AMKA:n vaikuttavia voimia.

Johdinkuormia laskiessa yhdistelmäkertoimet otetaan mukaan lisäkertoimena. Esimerkiksi johtimen jääkuormaa  $I$  laskiessa päällystämättömän johtimen jääkuorma pienenee neljäsosaan, kun mitoitusena on T+J. Koska yleensä J+T yhdistelmä aiheuttaa suurempaa kuormitusta, vain tuulen yhdistelmäkertoimen 0,25 tai 0,4 on merkitsevä. Yhdistelmäkertoimen lisätään huipputuulennopeuteen seuraavasti:

$$V_{50} * \sqrt{\Psi_W} \quad (24)$$

#### 5.4 Muut huomioitavat kuormat

Lopulliseen pystyvoimaan pitää jääkuorman ja johtimen oman painon lisäksi ottaa huomioon johdinvoiman vaikutukset, joka saadaan ratkaistua johdinjännityksen ja johtimen pinta-alan avulla. SFS 50341-1 standardi ei määritä erillistä kaavaa johdinjännityksen laskemiseen. Siinä kuitenkin kerrotaan, että mitoituksessa olevien jänteiden johdinjännitystä laskiessa voidaan käyttää lineaarista menetelmää, joka perustuu johtimen kimmokertoimen alku- ja loppuarvoihin. Nollasäässä tämä vastaa aiemmin mainittua nollasääjännityksen arvoa 45 N/m<sup>2</sup>. Lisäksi tulisi huomioida jään ja tuulen vaikutus. Jääkuormana tulisi käyttää kiristysväliillä sijaitsevan ylimmän jänteen mukaista jääkuorman arvoa. Jännepituuksien vaihtelu tulisi myös huomioida, sillä se voi aiheuttaa pitkittäisvoimia pidemmän jännevälin pylvälle. (SESKO ry, 2015, s. 212)

Muita huomioitavia kuormia syntyy pylvään ja sen osien tuulikuormituksen vaikutuksesta. Pylvään jääkuormaa ei lasketa, sillä pylvääseen ei oleteta muodostuvan jäätä. Pylvään oma tuulikuorma pylvään painopisteestä lasketaan kaavalla:

$$Q_{W_{pol}} = q_p(h) G_{pol} C_{pol} A_{pol} \quad (25)$$

$G_{pol}$  pylvään rakenteellinen kerroin. Yleensä käytetään arvoa 1

$C_{pol}$  pylvään vastuskerroin. Puupylväällä käytetään arvoa 0,9.

$A_{pol}$  pylvään projektiotala ( $L * 0,87 * \frac{d+D}{2}$ )

Projektiotalaa laskiessa käytetään pylvään maanpäällistä pituutta.

Kaavaa 25 sovelletaan myös muiden pylvään osien tuulikuorman laskemisessa. Esimerkiksi eristimen tuulikuorma lasketaan kaavalla:

$$Q_{W_{ins}} = q_p(h) G_{ins} C_{ins} A_{ins} \quad (26)$$

jossa  $G_{ins}$  on eristimen rakenteellinen kerroin,  $C_{ins}$  eristimen vastuskerroin ja  $A_{ins}$  eristimen pinta-ala. Eristimen tuulikuorman vaikutus lopputulokseen on varsin vähäinen, joten se voidaan jättää huomioimatta pylvään mitoituksessa, ellei sitä erikseen vaadita.

## 5.5 Riippuma

Pylväspituuden valinnassa on huomioitava johtimen suurin riippuma, joka on yleensä suurimmillaan helteen, pakkasen tai jääkuorman vaikutuksesta. Riippumaa laskiessa otettava huomioon johtimen kokonaiskuorma, tuulijänne, heilahduksen vaikutus sekä johdinvoima (johtimen poikkipinta-alan ja johdinjännityksen tulo). Helleriippumaa laskiessa kokonaiskuorma, tuulijänne ja johdinvoima helteellä. Standardi määrittelee vähimmäisetäisyydet alapuolisista ja sivuttaissuunnassa olevista kohteista standardin SFS-EN 50341-1 osiossa 5.9.

Koska riippuma ei vaikuta mekaaniseen kestävyYTEEN vaan pylvään pituuden valintaan, jätetään sen tarkempi käsittely pois tästä opinnäytetyöstä.

## 6 PYLVÄÄN RAKENTEELLINEN KESTÄVYYS

Tässä osiossa käsitellään laskennallisia tekijäitä, jotka liittyvät kannatuspylvään ja harustetun pylvään rakenteellisen kestävyuden laskemiseen. Lisäksi käydään läpi orsirakenteiden vaikutus yleisellä tasolla. Osiossa ei käydä läpi A- ja T-pylvään kestävyuden laskentaa, sillä SFS-EN 50341 standardi ei anna ohjeita niihin liittyen.

### 6.1 Lähtötiedot

Mitoituksen lähtökohtana on, että rakenteen kestävyuden mitoitusarvo tulisi olla suurempi kuin kuormien vaikutuksen lopullinen mitoitusarvo. Kuormien vaikutus saadaan käyttämällä määräävää kuormitustapausta, joka saadaan laskemalla johdinvoimat. Usein laskennan jälkeen huomataan, että eri kuormitustapausten aiheuttamat kuormitukset ovat lähellä toisiaan, minkä vuoksi määräävää kuormitustapausta kaikille tilanteille ei voida antaa. Standardissa EN SFS 50341-1 sanotaan, että kaikki kuormitustapaukset on laskettava suurimman kuormituksen selvittämiseksi. Yleisesti kannatuspylväälle määräävä kuormitus on tuuli tai J+T, harustetulla pylväällä J+T tai Pohjois-Suomessa pakkanen.

Pylvään kestävyuden määrittäminen on hiukan muuttunut vuosikymmenten aikana. Osiossa 6.2 käsitellään VIM:n aikaisia laskukaavoja ja osiossa 6.3 nykyisin voimassa olevia kaavoja. EN SFS 50341-1 standardi määrittää puupylvään sisäisten voimien ja momenttien laskennassa käytettävän yleisiä rakenteiden mekaniikan ja lujuusopin menetelmiä. Tässä opinnäytetyössä laskentamenetelmänä käytetään niin sanottua  $\omega$ -menetelmää. Muista menetelmistä voi lukea standardin osiosta 7.5.5.2.

Koska  $\omega$ -menetelmä ei ole muuttunut VIM:n viimeisimmän painoksen jälkeen, voidaan kaavaa edelleen soveltaa pylvään ja sen osien mitoituslaskentaan. Pieniä eroja kaavan sisältämistä arvoista kuitenkin löytyy, minkä vuoksi mekaaninen kestävyys on jaettu kahteen osioon.

Kannatuspylvään kestävyydestä ja siihen kohdistuvista kuormista löytyy laskentaesimerkki liitteessä 1.

### 6.2 Kestävyys VIM:n mukaan

Vahvavirtailmajohantomääräyksien mukaan puupylvään rakenteellinen kestävyys on todettava joko sallittujen jännitysten menetelmällä tai kriittisen kuormituksen menetelmällä. Sallitut kuormat voidaan laskea jakamalla kriittisen kuormituksen arvot varmuuskertoimella. VIM:n mukainen puupylvään sallittu kuormitus on  $30 \text{ N/mm}^2$  ja kriittinen kuormitus on  $31,5 \text{ N/mm}^2$ . Varmuuskertoimena  $n$  käytetään arvoa 1,4, kun kriteereinä on asennus-, pakkas-, tuuli- tai jääkuormitus. Kun kriteereinä on pylvään oma paino tai johtimen katkeamisesta aiheutuva kuormitus, käytetään arvoa 1,05. (Sähkötkastuskeskus, 1993)

Seuraavat kaavat koskevat kannatuspylvään laskemista sallittujen jännitysten menetelmällä. Harustetun pylvään kaavoja käsitellään osiossa 6.4.

Sallitun kuormituksen arvon on oltava suurempaa kuin yhdistetty puristuksesta ja taivutuksesta aiheutuva voima. Puristusvoima saadaan laskettua jakamalla pylvään painosta aiheutuva voima ja nurjahduskertoimen tulo pylvään tyven pinta-alalla.

Pystyvoima  $P$  koostuu pylvään omasta painon ja putoamiskiihtyvyyden tulosta, johon on lisätty muut pylvästä kuormittavat pystyvoimat. Sallittujen jännitysten menetelmässä saa kuormitukseen kuuluvan omapainon kertoa kertoimella 0,75. Nurjahduskerroin  $\omega$  selvitetään lambdan avulla.

Pylvään hoikkuutta kuvaava lambda  $\lambda$  lasketaan kaavalla

$$\lambda = \frac{2 * h}{\frac{1}{4} * \left(\frac{1}{3} * (d + 2D)\right)} = \frac{24 * h}{d + D^2} \quad (27)$$

jossa  $h$  tarkoittaa pylvään maanpäällistä pituutta,  $d$  on pylvään latvahalkaisija ja  $D$  pylvään halkaisija 1,5 m etäisyydellä tyvestä. Pituus  $h$  kerrotaan luvulla 2, sillä kannatuspylväällä nurjahduspituus vastaa kaksi kertaa pylvään maanpäällistä pituutta. Pylvään halkaisijat saadaan taulukosta 1.

Nurjahduskerroin  $\omega$  ratkaistaan kaavalla

$$\omega = \frac{\lambda^2}{2400} \quad (28)$$

Jos lasketaan kriittistä kuormitusta, jakajana käytetään arvoa 3000.

Pylvään tyven pinta-ala  $A$  saadaan laskettua kaavalla

$$A = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{1}{3} * (d + 2D)\right)^2 \quad (29)$$

Pylvääseen kohdistuva taivutusjännitys saadaan jakamalla taivutusmomentti taivutusvastuksella.

Johtimista aiheutuva taivutusmomentti tuulelle  $M$  lasketaan kaavalla

$$M = (l - 1,5 \text{ m}) * F \quad (30)$$

jossa  $l$  on pylvään pituus ja  $F$  pylvääseen vaikuttava vaakavoima.

Pylvään taivutusvastus  $W$  lasketaan kaavalla

$$W = 0,1 * D^3 \quad (31)$$

Yhdistetty puristus ja taivutus voidaan johtaa edellisten kaavojen avulla muotoon:

$$\sigma_{sall} \geq \frac{\omega P}{A} + \frac{M}{W} \quad (32)$$

Jos laskettu arvo on pienempi kuin sallittu arvo 30,0 N/mm<sup>2</sup>, voidaan valitun pylvään kestävyys todeta riittäväksi.

## 6.3 Kestävyys nykyisen standardin mukaan

Standardi määrittää suomalaiselle männystä valmistetulle puupylväälle ominaislujuudeksi  $X_k$  arvon 41,8 MPa. Kun mukaan otetaan materiaalin osavarmuusluku  $\gamma_M = 1,4$  tavallisille kuormitustilanteille, saadaan kannatuspylväälle laskettua mitoitusarvoksi:

$$\frac{X_k}{\gamma_M} = \frac{41,8}{1,4} = 29,86 \approx 29,9 \text{ N/mm}^2 \quad (33)$$

Kulma-, kiristys- ja päätepylväillä on pylvään osien osavarmuusluku  $\gamma_M$  on kerrottavalla lisäkertoimella 1,1, kun käytössä on nimellisjänniteään yli 45 kV johtoja. Perustuksien tulisi olla 10 % kestävämpi kuin pylväs, joka voidaan laskea erikseen tai vaihtoehtoisesti sijoittaa osavarmuuslukuun kertoimella 1,1. (SESKO ry, 2015, s. 189)

Mitoitusarvo ei vielä tällaisenaan riitä, vaan mukaan on otettava pylväskohtaiset heikentävät tekijät, eli taivutusjännitys ja puristusjännitys. Laskenta suoritetaan samalla tavalla kuin osiossa 6.2, mutta taivutusmomentin kaavassa on muutos pylväspituuden määrittämisessä. Taivutusmomentin kaava muuttuu muotoon

$$M = F_V * 0,84 * l \quad (34)$$

jossa  $F_V$  vastaa yhteen laskettuja vaakavoimia. Kerroin 0,84 vastaa pylvään maanpäällistä pituutta, kun pylvään upotussyvyys on  $1/7 + 10 \%$ .

Näillä tiedoilla voidaan määrittää pylväskohtainen raja-arvo, jota voidaan verrata johtimista aiheutuviin voimiin. Standardi käyttää rakenteellisen kestävyden  $R_d$  määrittämiseen materiaalin mitoitusarvoa  $X_d$ , joka vastaa kaavan 33 tulosta.

Kun sekä rakenteellinen kestävyys  $R_d$  että johtimista aiheutuvat kuormat on selvitetty, voidaan laskea yksittäisen pylvään kestävyys kaavalla (SESKO ry, 2015, s. 192):

$$R_d \geq E_d \rightarrow X_d \geq F_d = \Sigma \gamma_G G_K, \gamma_{Q1} Q_{1K}, \Sigma_{n>1} \Psi_{Qn} Q_{nK} \quad (35)$$

Kaava on kuitenkin hankalasti luettava ja sen vuoksi tämän opinnäytetyön laskennassa käytetään VIM:n antamasta kaavasta muokattua versiota. Perusteluna tälle on se, että standardi ohjeistaa käyttämään mekaanisten kuormien laskussa standardin EN 1991-1-6 kirjattuja laskentaperiaatteita. Koska VIM käyttää samoja periaatteita, voidaan VIM:n kaava todeta edelleen käyttökelpoiseksi laskentamenetelmäksi. Muokattu kaava on muotoa:

$$F_d = \frac{F_V * l * 0,84}{W} + \frac{\omega F_P}{A} \quad (36)$$

jossa  $F_V$  vastaa yhteen laskettuja vaakavoimia ja  $F_P$  yhteen laskettuja pystyvoimia. Tässä kaavassa on hyödynnetty kaavaa 32 ja sovellettu FMOK-laskentatyökalun kaavoja. Kaavassa otetaan huomioon pysyvät kuormat sekä tuuli ja jääkuormista aiheutuvat muuttuvat kuormat.

Vaakavoimien summa  $F_V$  lasketaan kaavalla:

$$F_V = (Q_{Wc_V} + Q_{Wc_U}) * 3 + Q_{W_{pot}} \quad (37)$$

jossa on yhteenlaskettuna kunkin johtimen yhteenlaskettu vaikutus sekä pylvään tuulikuorma.

Pystyvoimien summa  $F_P$  lasketaan kaavalla:

$$F_P = G_L * 3 + G_{orsi} + Q_I * 3 + G_{pot} \quad (38)$$

jossa on yhteenlaskettuna pylvään korkeuseroista johtuva pystyvoiman vaikutus, orren kuorma, johtimen kuorma sekä pylvään kuorma.

#### 6.4 Harukset

Johtokulmat aiheuttavat pylvälle kallistavaa voimaa, joka voi aiheuttaa pylvään kaatumisen tai katkeamisen. Harustaminen on yksi keino tasoittaa johtokulmien aiheuttamaa, pylvästä kallistavaa voimaa muuttamalla se pylvästä puristavaksi ja harusta vetäväksi voimaksi. Harukset sijoitetaan pylvästä kallistavaa suuntaa vasten, jolloin voimat tasoittavat toisensa.

Harus koostuu teräsköydestä ja sen kiinnittämiseen tarkoitetuista tarvikkeista. Yleisin keskijänniteverkon harustamisessa käytetty harusköysi on tyypiltään St 25, minkä vuoksi sitä käytetään esimerkiksi tämän opinnäytetyön harusköytenä.

Haruskaltevuus kertoo, miten kauaksi harus ankkuroidaan pylvästä. Haruskaltevuus saadaan laskettua jakamalla haruskiinnikkeen asennuskorkeus harusankkurin etäisyydellä pylvään juuresta mitattuna. Mitä suurempaa haruskaltevuutta käytetään, sitä enemmän haruksia tarvitaan tukemaan pylvästä, jotta voimat vastaavat toisiaan. Vaakavoima  $F_v$  muutetaan haruskaltevuuden avulla puristavaksi voimaksi kaavalla:

$$F_v * k * \frac{l}{l-a} \quad (39)$$

jossa  $a$  kuvaa haruksen kiinnityspisteen etäisyyttä latvasta.

Pylvään puristavan voiman kaava muuttuu silloin muotoon:

$$\frac{\omega \left( F_p + F_v * k * \frac{l}{l-a} \right)}{A} \quad (40)$$

Taivutusmomentti kohdistuu pylvään latvaan ja sen suuruus lasketaan osittain likimääräisesti kaavalla:

$$M \approx 0,6 * a * F_v \quad (41)$$

Harustetun pylvään taivutusvastus  $W$  lasketaan kaavalla:

$$W = 0,1 * \frac{(d_1 + D)^3}{2} \quad (42)$$

jossa  $d_1$  on pylvään halkaisija haruksen kiinnityskohdassa.

Näillä lisäyksillä harustetun pylvään kestävyden kaava olisi muotoa:

$$\omega \left( F_p + \frac{l}{l-a} * k * F_v \right) + \frac{0,6 * a * F_V}{W} \quad (43)$$

Harustetun pylvään lujuus tulisi lisäksi tarkistaa haruksen kiinnityskohdan alapuolelta. Esimerkiksi jos haruksen kiinnityspiste on 1 m latvan alapuolella, on pylvään 1 m osuuden kestävyys laskettava. Tämän suuruus saadaan kaavalla:

$$\frac{F_p}{A_1} + \frac{F_v a}{W_1} \quad (44)$$

jossa  $a$  kuvaa haruksen kiinnityspisteen etäisyyttä latvasta,  $W_1$  taivutusvastusta haruksen kiinnityskohdasta ja  $A_1$  pylvään halkaisijaa haruksen kiinnityskohdasta. Harustetun pylvään kaavat on otettu VIM:n sivuilta 40–41, eikä sen tarkkuutta nykystandardiin verrattuna voitu tarkastaa, sillä SFS EN 50341 -standardi ei määritä kaavaa harusten käytölle.

Pylvään hoikkuutta kuvaava lambdaa ( $\lambda$ ) laskiessa nurjahduspituus vastaa harustetun pylvään maanpäällistä pituutta, jolloin kaava 27 muuttuu muotoon

$$\lambda = \frac{h}{\frac{1}{4} * \left( \frac{1}{3} * (d + 2D) \right)} = \frac{12 * h}{d + D2} \quad (45)$$

Lambda -laskun tuloksen muuttuminen pienemmäksi kaavaan 20 verrattuna muuttaa myös nurjahduskertoimen  $\omega$  -arvoa, mikä tulee huomioida mitoituslaskennassa.

Harusten määrä saadaan jakamalla harusvoima  $F_s$  harusvalmistajan antamalla sallitulla kuormituksella. Rasituslaskennassa käytetään St 25 haruksille kuormitusarvoa 17,5 kN. (Adato Energia Oy, 2014)

Harusvoima  $F_s$  lasketaan kaavalla:

$$F_s = F_v * \sqrt{1 + k^2} \quad (46)$$

tai jos harus on etäisyydellä  $a$  kuormasta  $F_{v1}$ , käytetään kaavaa:

$$F_s = \left( \frac{L}{L-a} * F_{v1} + (F - F_{v1}) \right) * \sqrt{1 + k^2} \quad (47)$$

jossa  $L$  on pylvään pituus,  $a$  harusten latvaetäisyys,  $F_v$  pylvääseen vaikuttavat vaakavoimat,  $F_{v1}$  ylimmän johtimen aiheuttama vaakavoima ja  $k$  haruskaltevuus. Tämä kaava vaikuttaa tilanteissa, jossa on mukana eri korkeudelle asennettuja kaapeleita, esimerkiksi AMKA-kaapeli.

Haruksen sallittu kuormitus voidaan myös laskea jakamalla valmistajan ilmoittama murtolujuus osavarmuusluvulla  $y_M$ . Standardi on määrittänyt kaikkien ilmajohdon varusteiden kestävyydelle osavarmuusluvun  $y_M = 1,6$ , jota tulisi soveltaa murtokuorman vähimmäisarvon määrittämiseen.

Prysmian Group antaa datalehdessään Fe 25 harusköydelle murtolujuudeksi arvon 33,1 kN. Standardi määrittää haruksen kestävyudeksi osavarmuusluvun  $y_{M2}$  murtolujuuteen nähden seuraavasti:

$$\text{Haruksille ja niiden kiinnikkeille} \quad y_{M2} = 1,40$$

$$\text{Haruseristimille} \quad y_{M2} = 2,00$$

Näillä tiedoilla laskettuna voidaan määrittää tarkempi kuormitusarvo St 25 harukselle:

$$\frac{33,1 \text{ kN}}{1,6 * 1,4} = 14,8 \text{ kN} \quad (48)$$

(Prysmian Group, 2013) (SESKO ry, 2015, ss. 237, 251).

## 6.5 Orsirakenteet

Tässä opinnäytetyössä ei vertailla eri orsirakenteiden vaikutusta laskentatuloksiin. Orsien vaikutus käydään läpi vain yleisellä tasolla.

Orsirakenteella tarkoitetaan pylvään latvaan asennettavaa osaa, johon ilmajohdot kiinnitetään. Orsien tarkoitus on ylläpitää riittävä välimatka vaiheiden välillä, olipa kyseessä sitten suora johto-osuus tai 90° kulma. Orsien mitoituksessa on otettava huomioon orsille sallitut voimat kiinnityspisteissä, jotka saadaan orsivalmistajien antamista tiedoista.

Suoralla johto-osuudella orren mitoitukseseen vaikuttaa vain pystykuorma, sillä vaakavoimat kumoavat toisensa. Pystykuormissa otetaan huomioon johtimen oman painon lisäksi jääkuorman vaikutus. (Adato Energia Oy, 1991).

Kulmaorsilla vaakavoimat lasketaan kaavalla:

$$F = F_v \cdot 2 \cdot \sin \frac{a}{2} \quad (49)$$

jossa  $a$  kuvaa johtokulman suuruutta ja  $F_v$  vaakavoiman suuruutta.

Vaihevälin riittävyden laskeminen on työlästä, sillä ratkaisu perustuu kokeilemalla tapahtuvaan iterointiin. Sen vuoksi käytetään yleensä valmiiksi laskettuja tuloksia. (Adato Energia Oy, 1987)

Orsirakenteiden vaikutus voidaan ottaa mukaan pylväslaskentaan, sillä rajatapauksissa sillä voi olla vaikutusta pylväsluokan valintaan. Orsirakenteiden paino saadaan valmistajien sivuilta ja sen vaikutus voidaan lisätä pylväskuormien pystyvoimaan kertomalla orren paino  $m_{orssi}$  putoamiskiihtyvyydellä:

$$G_{orssi} = m_{orssi} * 9,81 \frac{m}{s^2} \quad (50)$$

Eri orsirakenteiden vaikutus voidaan ottaa mukaan myös korkeuden muutoksena, sillä eri orsirakenteet siirtävät pylvääseen kohdistuvaa voimaa latvaan verrattuna.

## 7 VERKOSTOSUOSITUKSEN PÄIVITYS

Verkostosuositusten päivitys aloitettiin kartoittamalla käytönrajataulukoiden määrittämisessä tarvittava taustamateriaali. Selvitystyössä havaittiin verkostosuositusten riippuvan muista verkostosuosituksista. RJ 3:95 sisältää tietoa seuraavista verkostosuosituksista:

- RJ 2:96 Riippujohtojen pylväsrakenteet
- RJ 11:14 Rakenteet, pylväiden käytönrajat
- RJ 14:14 Harusten käytönrajat
- RJ 18:15 Rakenteet, pylväiden perustaminen ja harusten määrittäminen
- RJ 20:14 Pylväspituuden määrittäminen
- RJ 31:15 Harusten kosketusjännitys











Verkostosuositusten rinnalla käytettiin FMOK-laskentaohjelmaa, joka sisältää CENELEC-standardin määrittämät kaavat ja ohjeet. FMOK-laskentaohjelmaa ei ole päivitetty viimeisien standardien painosten mukaiseksi, mutta siinä esiintyviä laskentamenetelmiä pystyttiin silti hyödyntämään opinnäytetyön aikana. Tutkimustyö oikean lähdemateriaalin löytämiseksi laajeni kaikkiin vuoden 1995 ilma-johtoverkoston materiaalia sisältävän kirjallisuuden tarkastamiseksi.

Tutkittaessa myös valmiiden sähköverkkoa käsittelevien opinnäytetöiden lähdemateriaalia ja löytyi viittaustietoa VIM:stä, eli sähkö tarkastuskeskuksen julkaisun vuodelta 1993 vahvaimavirtajohtomääräykset kirjasta. Lähdetietona käytettiin myös Markku Monnin kirjoittaman ilmajohtoverkostotyöt kirjan viidennettä painosta vuodelta 2010. Vertaamalla uusia voimassa olevia standardeja ja kirjojen vanhoja kumottuja laskentakaavoja saatiin vertailupohjaa ja laskettua käytönrajataulukoiden tuloksia. (Monni, 2010)

Käsin laskeminen on hidasta, minkä vuoksi ajantasainen FMOK:n kaltainen laskentaohjelma voisi ratkaista ongelman. Ennen suosituksen RJ 3:95 käytönrajataulukoiden laskemista tulisi päivittää FMOK-laskentaohjelma, jonka avulla taulukoiden uudet lukuarvot voitaisiin todeta ja tarkastaa. RJ 3:95 suosituksen tekstiä tarkastetaan ja sen sisältämiä osioita merkitään poistettavaksi tai muokattavaksi.

Tilaaaja vertaa ja päivittää muita suosituksia tarvittaessa ja tässä tutkimustyössä niiden lähempi tarkastelu rajataan pois. Päivitystyön aikana läpikäytyä verkostosuosituksen tutkimuksia, sekä niiden tuloksien ratkaisuja esitettynä taulukossa 3. Taulukosta voi seurata työn etenemistä vaiheittain lopputulokseen.

TAULUKKO 3. Päivitystyö verkostosuosituksille RJ 3:95 ja RJ 4:95

<b>Päivitystyö verkostosuosituksille RJ 3:95 ja RJ 4:95</b>		
<b>Selvitystyö</b>		<b>Tulkinta tuloksista</b>
RJ 4:95 verkostosuosituksen taulukoiden tuloksia kartoitettiin tavallisille johtimille		RJ 4:95 verkostosuositus poistettiin, sillä käsitettä tavalliset johdot ei käytetä enää laskennassa.
RJ 3:95 verkostosuositus on valtaosin käytönrajataulukoita ja lukuarvojen laskeminen hidasta.		Otettiin avuksi FMOK Excel -laskentaohjelma. Tulokset poikkesivat taulukoissa olevista lukuarvoista
Haettiin vuoden 1995 aikaisia laskentamalleja ja viittauksia eri lakeihin		Useat lakiviittaukset eivät olleet enää voimassa ja poistuneet niiden päivityksien myötä käytöstä
Kartoitettiin muita verkostosuosituksia ja huomattiin RJ 3:95 olevan kooste monen muun suosituksen osalta		Rinnakkaisriippuvuus muihin suosituksiin kyseenalaisti yksin RJ 3:95 päivityksen, näistä suurin osa päivitetty uudelleen
Vuosi 1995: VIM-kirja (lyhenne) Vahvavirtailmajohdomääräykset 1993 ja Ilmajohdotyöt 1985		FMOK-laskenta ohjelmalla ei saatu samoja käytönrajataulukoiden lukuarvoja, VIM-kirjan tai Ilmajohdotyöt kirjan avulla
Avuksi verkkotyökalu- ja rakennusohjelma Profila ja Voimatelin oma Excel laskenta ohjelmisto vuodelta 2012		Kumpikaan ohjelmisto ei sovellu yksittäisen puupylvään rakenteiden kuormituksen laskentaan ja käytönrajataulukoiden arvoihin ei päästä
Aloitettiin alusta isommalla kartoituksella vanhoihin ja uusiin standardeihin ja laskentamallien kartoittamiseen		RJ3:n historiasta tarvitaan vanhat suositukset ennen niiden päivittämistä ja aloitettava alusta, laajemmalla kartoituksella
Vanhat verkostosuositukset RJ 10:95, RJ 11:96 ja RJ 12:96 otettiin tutkittavaksi, jotta löytyisi laskentamalli VIM:n aikaisille laskuille		Ratkaisu suosituksista RJ 11:96 ja RJ 12:96 tehtiin tukemaan RJ 3:95:sta, joista löytyi ratkaisumalli
Orsirakenteiden vaikutus pylvään valintaan on epäselvää, eikä sen laskentaan löydy esimerkkejä/standardin ohjeita		Tutustuimme poistettuihin standardeihin. Vaikutus näkyy korjauskertoimina, jotka muuttavat pylvään pituutta
FMOK- laskentaohjelman lopputulos pylvään kestävydestä poikkeaa VIM:n aikaisten taulukoiden tuloksista		FMOK-laskentaohjelma päivitettävä ennen RJ 3:95 verkostosuosituksen päivittämistä

Verkostosuositusten päivityksen tarve poistui RJ 4:95 osalta ja RJ 3:95 siirtyi laskentaohjelmiston päivityksen ajankohtaan. Tutkimme tarkasti jäljelle jääneen suosituksen päivitettävät viitaukset, tekstit, laskentaesimerkit, kuvat ja käytönrajataulukot. Tilaajalle toimitetaan yhteenveto poistavista tai muokattavista kohdista nykyisen voimassa olevien standardien mukaisesti.

## 8 POHDINTA

Opinnäytetyön voi sanoa onnistuneen loppujen lopuksi hyvin, vaikka alkuperäiseen tavoitteeseen ei päästykään. Selvitystyön lopputuloksena havaittiin RJ 3:95 pitävän sisällään lukuisia viittauksia muihin verkostosuosituksiin ja päivitystyö kannattaa organisoida kokonaisuus huomioon ottaen. Aihe oli haastava ja materiaalin keräämiseen kului paljon aikaa, mutta lopputulos oli niin tekijöiden kuin ti-laajankin mielestä onnistunut. Tekijät saivat myös uutta tietoa ilmajohtoverkon rakenteesta ja sen suunnittelussa huomioitavista asioista.

Vaikka puupylvään mitoitusta onnistuttiin kirjaamaan laajasti, jäi opinnäytetyössä silti jatkokehittävää. Opinnäytetyöhön listattiin tärkeimmät pylvään mitoitusta varten tarvittavat kaavat, mutta kaikille tilanteille sopivia kaavoja ei tutkitusta aineistosta löydetty. Opinnäytetyössä ei voitu julkaista laskentatyökalujen käyttämiä kaavoja, sillä ne eivät kuulu julkisiin materiaaleihin. Mitoituksen kaikkia tilanteita kattavia kaavoja varten tulisi tutustua laajemmin mekaniikan ja eri materiaalien lujuusopin mukaisiin kaavoihin.

Puupylvään kestävyys ja siihen kohdistuvien mekaanisten kuormien laskeminen yllätti haasteellisuudellaan. Kaavoja esiintyi työn aikana paljon ja niihin oli osittain haastavaa päästä käsiksi. Haastetta aiheutti myös kaavojen osittainen soveltaminen. Kaavoilla saadut tulokset olivat tekijöiden mielestä uskottavia, mutta niihin tulee silti suhtautua varauksella. Standardista otettujen kaavojen tuloksia voidaan pitää luotettavina, mutta sovelletuissa VIM-kaavoissa saattaa esiintyä virheitä. VIM:n kaavoja käsittelevässä osiossa mainitaan johtimen vaakasuora köysivoima, mutta sitä ei käsitellä tarkemmin. Tämä johtui siitä, että VIM ei selitä kuinka tämän köysivoiman suuruus selvitetään, jonka vuoksi sitä ei voitu käsitellä tarkemmin tässä opinnäytetyössä. Köysivoiman vaikutus näkyisi pylväillä, joissa esiintyy johtokulmia.

VIM:n kaavoissa ei myöskään anneta tarkkaa selvitystä, mitä kaikilla kaavoissa esiintyvillä suureilla tarkoitetaan. Tämä johti siihen, että esimerkiksi kaavassa 32 esiintyvälle suurelle  $P$  jouduttiin testaamaan eri vaihtoehtoja, jotta saatiin varmuus pylvääseen vaikuttavien puristavien voimien määrästä. Tästä syystä tämän opinnäytetyön kaavoissa saattaa esiintyä virheitä, jotka johtuivat tulkinnallisista epäselvyyksistä. Kaavoja on kuitenkin testattu useilla eri pylvään arvoilla ja niistä saatuja tuloksia verrattiin laskentatyökalujen tuloksiin. Kokonaisuuden hallitseminen myös haastavimmille tapauksille edellyttäisi laajempaa perehtymistyötä, jota ei voitu toteuttaa tämän työn puitteissa.

Puuttumaan jäi myös johdinjännityksen muutos muussa kuin nollasää-kuormituksessa. Johtimen jännityksen tulisi muuttua tuulen, jään ja lämpötilan muutoksen myötä suuremmaksi, joka lisäisi pystyvoiman suuruutta eri mitoitustilanteissa. Lisäksi eri orsirakenteiden vaikutus pylvästä kallistaviin voimiin jätettiin huomiotta tässä opinnäytetyössä.

Kokonaisuudessaan opinnäytetyö tarjoaa silti kattavasti tietoa keskijänniteilmajohtoverkon puupylväiden käytönrajoista sekä tärkeimpien mekaanisten kuormien mitoituksesta. Oikeiden lähdetietojen löytyminen ratkaisi monia keskeneräisiä asioita ja tiedot saatiin kasattua järkeväksi kokonaisuudeksi.

## 9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli kaksi verkostosuosituksen päivitystä, joka muotoutui selvitystyön aikana ilmenneiden tekijöiden myötä yhden suosituksen päivitystyöksi. Toinen päivitys (RJ 4:95) kumoutui selvitystyön myötä kokonaisuudessaan, sillä se osoittautui tarpeettomaksi varmennettujen johtojen poistumisen myötä. Jäljelle jääneestä verkostosuosituksesta RJ 3:95:sta tehtiin tarkka päivityssuunnitelma, joka toimitettiin tilaajalle. Verkostosuosituksen sisältämien taulukoiden laskentakaavat selvitettiin ja niitä verrattiin nykyisin voimassa oleviin kaavoihin. Laskentakaavat ja niiden käyttöön liittyvät ohjeistukset koottiin yhteen selkeäksi kokonaisuudeksi.

Opinnäytetyöstä muodostui tutkielma, jossa kartoitettiin vanhoja ja voimassa olevia vaatimuksia, laskukaavoja ja niiden arvoja. Tietoa kerättiin vanhoista määräyksistä ja voimassa olevista standardeista. Kaavojen ja standardien lukuarvojen avulla saatiin laskettua käytönrajataulukoiden arvoja, joita tilaaja voi hyödyntää oman laskentaohjelmistonsa päivityksessä.

Liitteeseen 1 saatiin tuloksena yksi esimerkki kaavojen käyttämisestä. Esimerkki on niin sanotusti yksinkertaisin mahdollinen mitoitustilanne, jossa on mukana mahdollisimman vähän muuttujia. Tuloksia saatiin myös muista mitoitustilanteista, mutta niitä ei kirjattu tähän opinnäytetyöhön. Työn ohella tilaajalle päivitystyön tueksi toimitettavia materiaaleja ei julkaista tämän työn yhteydessä.

Ilmajohtoverkon mekaaninen suunnittelu on kokonaisuudessaan haasteellinen tehtävä, jonka mitoittaminen vaatii lukuisien muuttujien huomioon ottamisen. Puupylvään ja sen osien on kestävä niihin kohdistuva kuormitus, jota tulee tarkastella jokaisessa eri kuormitustilanteessa. Profilan kaltaiset laskentatyökalut ovatkin tärkeässä asemassa tämän päivän sähköverkon suunnittelussa, jolloin tarvittavat muuttujat huomioidaan automaattisesti. Joskus yksittäisen pylvään tarkastelu on kuitenkin tarpeellista, jolloin mitoittamisen periaatteet on hyvä tuntea.

## LÄHTEET

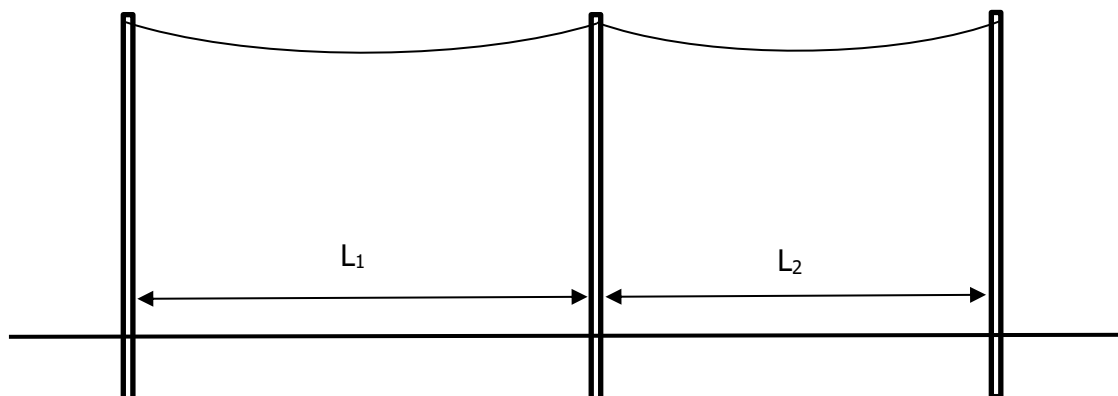
- Adato Energia Oy. (1987). *RJ 16:87*. Helsinki: Sähköenergialiitto ry.
- Adato Energia Oy. (1991). *RJ 35-91*. Helsinki: Sähköenergialiitto ry.
- Adato Energia Oy. (1996). *RJ 12:96*. Suomi: Sähköenergialiitto ry. Haettu 11.05.2023
- Adato Energia Oy. (2014). *RJ 11:14*. Helsinki: Energiateollisuus ry. Haettu 24.04.2023
- Adato Energia Oy. (2014). *RJ 14:14*. Helsinki: Energiateollisuus ry.
- Adato Energia Oy. (2017). *Adato*. Haettu 11.04.2023 osoitteesta Tietoa meistä:  
<https://www.adato.fi/tietoa-meista/>
- Elenia. (2023). *Puisto- ja pylväsmuuntajat*. Elenia, Suomi. Haettu 12.04.2023 osoitteesta  
<https://www.elenia.fi/vastuullisuus/turvallisuus/sahkoverkon-turvallisuus>
- Energiavirasto. (2022). *Tilastot ja julkaisut*. Haettu 14.04.2023 osoitteesta Verkkotoiminnan julkaisut: <https://energiavirasto.fi/verkkotoiminnan-julkaisut>
- Ensto. (2020). *Sähkönjakeluverkkojen ilmajohtoratkaisut*. Haettu 13.04.2023 osoitteesta Ensto:  
<https://www.ensto.com/globalassets/brochures/brochures/overhead-lines/finnish/sahkonjakeluverkkojen-ilmajohtoratkaisut.pdf>
- Fingrid. (2023). *Fingrid*. Haettu 25.04.2023 osoitteesta Siirtoalueiden karttakuva:  
[https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/Siirtoalueiden\\_karttakuva/](https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/Siirtoalueiden_karttakuva/)
- Fingrid. (2023). *Fingrid Oyj:n sähkönsiirtoverkko*. Noudettu osoitteesta  
[https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/sahkonsiirto/a3\\_kartta\\_selite\\_22.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/sahkonsiirto/a3_kartta_selite_22.pdf)
- HeadPower Oy. (2019). *HeadPower ohjeistot*. Haettu 21.03.2023 osoitteesta Puupylväät:  
<https://ohjeistot.headpower.fi/hpo273/2019>
- HeadPower Oy. (2020). *Puupylvään perustaminen*. Haettu 16.03.2023 osoitteesta Liite 61:  
<https://ohjeistot.headpower.fi/hpo273/2019>
- Monni, M. (2010). Ilmajohtoverkostotyöt. *Ilmajohtoverkostotyöt*. Adato Energia Oy, Helsinki.
- Pajala, H.;& Kärenlampi, M. (2022). *Profila-koulutusmateriaali*. Hitachi Energy. Haettu 25.04.2023 osoitteesta <http://www.profila.fi/HITACHI%20ABB%20Profila%20-%20Ilmajohtosuunnittelu%20-%20Profila-%20koulutusmateriaali.pdf>
- Prysmian Group. (2013). *FE Teräsköysi*. Haettu 12.04.2023 osoitteesta Avojohtimet ja avolangat:  
[https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business\\_markets/markets/downloads/datasheets/FE.pdf](https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/FE.pdf)
- SESKO ry. (2004). *SFS 2662* (3. painos p.). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SESKO ry. (2012). *SFS-EN 50341-1*. Helsinki: Suomen Standardisointiliitto SFS ry.
- SESKO ry. (2015). *SFS-EN 50341-2-7*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- SESKO ry. (2015). *SFS-käsikirja 601*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- STUK. (2020). *Sähkön siirto ja voimajohdot*. (STUK, Toimittaja;Säteilyturvakeskus, Tuottaja;& STUK viestintöpalveluyksikkö) Haettu 15.05.2023 osoitteesta Jakelujohdot ja muuntamot:  
<https://www.stuk.fi/aiheet/sahkonsiirto-ja-voimajohdot/jakelujohdot-ja-muuntamot>
- Sähkönumerot. (2023). *Pylväs Versopylväs - 312 LK3,170/240 - Versowood*. Haettu 08.06.2023 osoitteesta <https://www.sahkonumerot.fi/5049842>
- Sähkötarkastuskeskus. (1993). *Vahvavirtailmajohtomääräykset* (A-4 p.). Jyväskylä: Gummerius Kirjapaino Oy.
- Tukes. (2023). *Pien-, keski- ja voimajohto*. Tukes sähkö. Haettu 12.04.2023 osoitteesta  
<https://tukes.fi/sahko/sahkotyot-ja-urakointi/sahkotyoturvallisuus/turvallisuus-sahkojohtojen-laheisyudessa>

Voimatel. (2022). *Voimatel*. Haettu 12.05.2023 osoitteesta Maastosuunnittelu sähköverkon rakentamisessa:

[https://moodle.savonia.fi/pluginfile.php/1815972/mod\\_resource/content/2/VTel%202022%20syksy%20Joni%20Torvinen.pdf](https://moodle.savonia.fi/pluginfile.php/1815972/mod_resource/content/2/VTel%202022%20syksy%20Joni%20Torvinen.pdf)

## LIITE 1: KANNATUSPYLVÄÄN MITOITUS

Suoran johto-osan pylvään mitoitus, kun mitoituskuormana on tuuli. Lasketaan keskimmäisen pylvään kestävyys ja siihen kohdistuvat kuormitukset. Johto-osan pylväävät ovat saman korkuisia.



$$L_1 = 100 \text{ m}$$

$$L_2 = 80 \text{ m}$$

$$L_m = \frac{L_1 + L_2}{2} = 90 \text{ m}$$

Pylväälle tulevan jänteen pituus

Pylväältä lähtevän jänteen pituus

Keskimääräinen jänne

**Johtimen tiedot**

Pigeon ACSR 85/14

Poikkipinta-ala = 99,3 mm<sup>2</sup>

Halkaisija = 12,8 mm

Paino = 3,37 N/m

**Johtimien aiheuttama tuulikuorma**

$$h = 10 \text{ m}$$

vertailukorkeus

$$z_o = 0,05$$

karheuden pituus

$$V_h(h) = 21 \text{ m/s}$$

Keskituulennopeus

$$\rho = 1,394 \text{ kg/m}^3$$

Ilman tiheys (- 20°)

$$q_h(h) = \frac{\rho \cdot V_h^2(h)}{2} = 307,4 \text{ Pa}$$

Keskituulenpaine

$$I_v(h) = \frac{1}{c_o \ln\left(\frac{h}{z_o}\right)} = 0,189$$

Turbulenssin tiheys

$$q_p(h) = [1 + 7I_v(h)]q_h(h) = 714 \text{ Pa}$$

Puuskatuulenpaine

$$L(h) = 300 \left(\frac{h}{200}\right)^{0,67+0,05 \ln(z_o)} = 63,1 \text{ m}$$

Turbulenssin pituuskaala

$$B^2 = \left( \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \frac{Lm}{L(h)}} \right) = 0,319$$

$$G_c = \frac{1 + 2k_p I_p(h) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_p(h)} = 0,706$$

$$\phi = 0$$

$$Q_{Wc_V} = q_p(h) G_c C_c d \cos^2 \phi \frac{L_1 + L_2}{2} = 537,6 \text{ N}$$

$$Q_{Wc_U} = 0$$

$$3 * Q_{Wc} = 1612,8 \text{ N}$$

### **Pylvään oma tuulikuorma**

$$G_{pol} = 1$$

$$C_{pol} = 0,9$$

$$A_{pol} = L * 0,84 * \frac{d+D}{2} = 2,07 \text{ m}^2$$

$$Q_{W_{pol}} = q_p(h) G_{pol} C_{pol} A_{pol} = 1229,3 \text{ N}$$

### **Johtimen omapaino**

$$G_L = 3,37 \frac{\text{N}}{\text{m}} * L_m = 303,3 \text{ N}$$

$$Q_I = 0 \text{ N}$$

### **Orren kuorma (Ensto SH66)**

$$m_{orsi} = 21,5 \text{ kg}$$

$$G_{orsi} = m_{orsi} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 210,9 \text{ N}$$

### **Pylvään kestävyys**

Pylvään 312 tiedot (Taulukko 1)

Pituus L = 12 m

Latvahalkaisija d = 17 cm

Tyvihalkaisija D = 24 cm

Paino m = 319 kg

$$G_p = m_p * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3129,4 \text{ N}$$

$$\lambda = \frac{24 * h}{d + D} = 372,18 \text{ mm}$$

$$\omega = \frac{\lambda^2}{2400} = 57,72$$

$$A = \frac{\pi}{4} * \left( \frac{1}{3} * (d + 2D) \right)^2 = 36870 \text{ mm}^2$$

$$W = 0,1 * D^3 = 1382400 \text{ mm}^3$$

Taustakerroin

Rakenteellinen kerroin

Tuulen kohtauskulma

Tuulivoima orren suunnassa

Tuulivoima ortta vasten

Kolmen johtimen aiheuttama kuorma

Pylvään rakenteellinen kerroin

Puupylvään vastuserroin

Pylväänprojektioala

Pylvään oma tuulikuorma painopisteestä

Johtimen massa kerrottuna tuulijänteellä

Jääkuorma

(Ensto, 2020)

Orren pystykuorma

(Sähkönumerot, 2023)

Pylvään painosta aiheutuva puristava voima

Pylvään lambda

Nurjahduserroin

Pylvään keski-pinta-ala

Pylvään taivutusvastus

**Vaakavoima**

$$F_V = (Q_{Wc_V} + Q_{Wc_U}) * 3 + Q_{W_{pol}} = 2\,842,1\,N$$

Kunkin johtimen ja pylvään omasta tuulikuormasta muodostuva vaakavoima

**Pystyvoima**

$$F_P = G_L * 3 + G_{orsi} + Q_I * 3 + G_{pol} = 4\,250,4\,N$$

Johtimen omapaino ja orren vaikutus (kuormitustekijänä vain tuuli)

**Pylvään mitoitusarvo**

$$R_d = X_d = \frac{X_k}{\gamma_M} = \frac{41,8\,kN}{1,4} = 29,86\,N/mm^2$$

Kannatuspylvään mitoitusarvo

**Kuormitusten yhteenlasku**

$$E_d = F_d = \left( \frac{\omega * F_P}{A} + \frac{F_V * 0,84 * L}{W} \right) = 27,38\,N/mm^2$$

Pylvääseen kohdistuvien kuormien mitoitusarvo

**Lopputulos**

$$R_d \geq E_d \rightarrow 29,86\,N/mm^2 \geq 27,38\,N/mm^2$$

Pylväs kelpaa