

Iida Anttila

# LUJUUSKOORDINAATIO VOIMAJOHTOJEN SUUNNITTELUSSA JA RAKENTAMISESSA

Diplomityö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Pekka Verho  
Kari Lahti  
Lokakuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Iida Anttila: Lujuuskoordinaatio voimajohtojen suunnittelussa ja rakentamisessa  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikan DI-ohjelma  
Lokakuu 2022

---

Voimajohtojen lujuuskoordinaatiolla pyritään minimoimaan vikojen tai vaurioiden aiheuttamien häiriöiden kesto ja kustannukset. Tätä toteutetaan suunnittelussa komponenttien mekaanisten lujuuksien koordinoinnilla ja eri kertoimilla voimajohdon kuormiin ja komponenttien materiaaliominaisuuksiin. Rakentamisvaiheessa lujuuskoordinaatio voidaan todeta eri komponenttien käyttöasteita vertailemalla.

Tässä diplomityössä perehdyttiin voimajohtojen suunnittelua ja rakentamista Suomessa ohjaavaan standardiin SFS-EN 50341-1, sen kansalliseen liitteeseen SFS-EN 50341-2-7 sekä vertailun vuoksi käytännöllisempää tietoa aiheesta tarjoaviin kansainvälisiin julkaisuihin. Näiden pohjalta tutkittiin lujuuskoordinaation toteutumista Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n voimajohtojen suunnittelussa ja rakentamisessa. Työssä perehdyttyjen vika- ja vaurioraporttien perusteella Fingridin voimajohdoilla on toimiva lujuuskoordinaatio, mistä johtuen toimeksiantaja halusi tässä työssä tarkastettavan myös mahdollisen voimajohtokomponenttien ylimitoituksen määrän. Työssä perehdyttiin tarkemmin esimerkkinä voimajohtohanke Metsälinjaan, mistä mahdollisesti saataisiin kehityskohtia tulevaisuuden hankkeisiin.

Työn tuloksina todettiin, että Fingridin voimajohtosuunnittelussa lujuuskoordinaatiota toteutetaan eurooppalaisen standardin mukaan osavarmuusluvuilla kuormissa ja materiaaliominaisuuksissa. Rakentamisvaiheessa voimajohtokomponenttien mekaanisissa lujuuksissa todettiin olevan paikoin paljonkin marginaalia käyttöasteissa johtuen esimerkiksi suunnittelun standardiratkaisusta ja komponenttikatalogien suppeudesta. Lujuuskoordinaation peruseräteen toteutuminen on kuitenkin hyvällä tasolla Fingridin voimajohtotoiminnassa.

Työn lopussa pohdittiin ilmastomuutoksen myötä muuttuvien ilmastollisten kuormien vaikutuksia voimajohtoihin. Voimajohtokomponenttien lujuuksissa oleva marginaali riittänee, mutta tulevaisuudessa mitoitusperiaatteita voidaan joutua muuttamaan.

Avainsanat: Lujuuskoordinaatio, voimajohdot

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Iida Anttila: Strength Coordination in Design and Construction of Overhead Transmission Lines  
Master's Thesis  
Tampere University  
Master's Programme in Electrical Engineering  
October 2022

---

Strength coordination aims to minimize the costs and duration of disruptions on transmission lines. In the design of overhead transmission lines, it is implemented by coordinating the strengths of different components and by applying factors to component material properties and line actions. In the construction phase the strength coordination may be verified by comparing usage rates of the line components.

The European standard SFS-EN 50341-1 and its national normative aspects SFS-EN 50341-2-7 guide the design and construction of transmission lines in Finland. Along with these standards this thesis is based on international publications that provide more practical approach on the subject. The subject of this thesis was to investigate how strength coordination is implemented in the design and construction in the Finnish transmission network owned and managed by Fingrid Oyj. Indicated by the examined disruption reports Fingrid's lines perform very well regarding strength coordination which rose the concern if the line components are overengineered. The subject was studied with a case line project, Metsälinja, with an intention to improve future projects.

This thesis found that the design of Fingrid's transmission lines implement strength coordination as it is recommended in the European standard, by using partial factors in the loads on the lines and material properties of the components. Investigation of construction documents and test reports indicated some line components' usage rates of mechanical strength were quite low. This turned out to be a result of standardization of line design and limited component catalogues. However, the main principle of strength coordination is realized in Fingrid's transmission line operations.

This thesis also briefly considers the possible effects of changing climatic load cases caused by the climate change to the transmission lines. Most line components' usage rates in strengths allow increasing climatic loads to some extent but design criteria may need to be updated sometime in the future.

Keywords: Strength coordination, overhead transmission lines

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin toimeksiantona Fingrid Oyj:n voimajohtoyksikössä kevään ja kesän 2022 aikana. Työ on viimeinen silaus maisteriopinnoissani Tampereen yliopiston Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnan sähkötekniikan yksikössä.

Paljon kiitoksia Keijo Välimaalte mielenkiintoisesta aiheesta, ohjauksesta ja unelman toteuttamisesta. Ritva Lainetta haluan kiittää tärkeästä asiantuntija-avusta, opastuksesta lujuuksien maailmaan sekä kommentteista. Hannu Kuikkaa, Mikko Jalosta ja muita Fingridin asiantuntijoita kiitän neuvoista ja avusta. Tähänastisen urani yhdestä siisteimmästä, opettavaisimmasta ja hauskaasta työpäivästä Metsälinjan työmaalla haluan kiittää Risto Uusitaloa. Kiitollisena kaikista Fingridillä saaduista opeista olen entistäkin varmempi, että kantaverkko on mun juttu.

Kiitos työni ohjaaja Pekka Verho ja tarkastaja Kari Lahti Tampereen yliopistosta arvokkaista kommentteista.

Kiitos kuuluu myös läheisilleni, jotka ovat uskoneet minuun ja kannustaneet tämän urakan aikana.

Helsingissä, 17.10.2022

Iida Anttila

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TAUSTA.....	3
2.1 Suomen sähkösiirtoverkko .....	3
2.2 Voimajohto .....	3
2.2.1 Pylväät.....	7
2.2.2 Perustukset.....	10
2.2.3 Eristimet.....	11
2.2.4 Virtajohtimet.....	13
2.2.5 Ukkosjohtimet .....	13
2.2.6 Maadoitukset .....	14
2.2.7 Muut.....	15
3. VOIMAJOHDON RAKENTAMINEN .....	19
3.1 Johtoalue ja perustukset .....	19
3.2 Pylväät ja eristimet.....	20
3.3 Johtimien veto.....	21
3.4 Testit ja tarkastukset .....	23
4. VOIMAJOHDON KUORMAT.....	26
4.1 Ilmastolliset kuormat .....	26
4.1.1 Tuulikuorma .....	26
4.1.2 Jääkuorma .....	29
4.1.3 Yhdistetty tuuli- ja jääkuorma .....	31
4.1.4 Lämpötilavaikutukset kuormiin .....	33
4.1.5 Suomen NNA:n erikoiskuormat .....	33
4.2 Varmuuskuorma.....	34
4.3 Turvallisuuskuorma.....	34
5. VOIMAJOHDON SUUNNITTELU.....	36
5.1 Suunnitteluperiaatteet .....	36
5.2 Esisuunnittelu.....	39
5.3 Yleissuunnittelu.....	40
5.4 Rakennesuunnittelu .....	41
5.4.1 Pylvääseen syntyvät kuormat.....	42
5.4.2 Mekaaninen mitoitus .....	45
5.5 Lujuuskoordinaatio.....	47
5.6 Eristyskoordinaatio.....	49
6. VOIMAJOHDON VIAT JA VAURIOT.....	51
6.1 Jääkuorman aiheuttamat viat .....	51
6.2 Töidenaikaiset virheet ja ulkopuolisten vaikutus .....	53
6.3 Haruskorroosio ja materiaaliviat .....	55
6.4 Yhteenveto vioista ja vaurioista .....	56

7.VOIMAJOHDON LUJUUSKOORDINAATIO .....	58
7.1    Lujuuskoordinaatio Fingridin voimajohdoilla .....	58
7.2    Lujuuskoordinaatio yleissuunnittelussa .....	60
7.2.1 Metsälinjan yleissuunnittelun lujuuskoordinaatio .....	61
7.3    Lujuuskoordinaatio voimajohtojen rakentamisessa .....	62
7.3.1 Metsälinjan komponenttien lujuudet .....	64
7.4    Voimajohtojen lujuuskoordinaatio muualla maailmassa.....	65
8.TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT .....	67
8.1    Miten lujuuskoordinaatio tulisi huomioida Fingridin voimajohtotoiminnassa .....	67
8.2    Ilmastonmuutos ja sään ääri-ilmiöt.....	67
9.YHTEENVETO.....	69
LÄHTEET .....	71
LIITE 1: ERISTINRAKENTEIDEN LUJUUDET .....	74

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced, teräsvahvisteinen alumiini-johdin
Cigré	Conseil International des Grands Réseaux Electriques, kansainvälinen suurten sähköjärjestelmien neuvosto
COV	coefficient of variation, hajontakerroin, keskihajonnan suhde keskiarvoon
EDS	everyday stress, mitoituksessa käytetty perustila
FAT	factory acceptance test, tehdastesti
gon	gooni, kulman mittayksikkö
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen sähkö- ja elektroniikkainsinöörien järjestö
IoT	Internet of Things, esineiden internet
kV	kilovoltti
NNA	National Normative Aspects, standardin kansalliset velvoittavat vaatimukset
OPGW	Optical Ground Wire, valokuitu-ukkosjohdin
RBD	Reliability Based Design, todennäköisyyspohjainen lähestymistapa käyttövarmuuteen
SFS-EN	Suomessa ja Euroopassa vahvistettu standardi
VIM	Vahvavirtailmajohtomääräykset
YVA	ympäristövaikutusten arviointi
$\alpha_i$	jäätymislukusta riippuva kerroin toispuolisen jään kuormitustapauksiin
$B_I$	tuulennopeuden pienennyskerroin jäätymisen yhteydessä
$E_d$	kuormitusten kokonaisvaikutuksen mitoitusarvo
$F_d$	kuormituksen mitoitusarvo
$F_K$	kuormituksen ominaisarvo
$\gamma_G$	oman painon osavarmuusluku
$\gamma_U$	kuormituskerroin
$\gamma_F$	kuorman osavarmuusluku
$\gamma_M$	materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
$h$	maan pinnasta mitattu vertailukorkeus
$I_{50}$	jääkuorman huippuarvo 50 vuoden toistumisajalla
$I_v(h)$	turbulenssin tiheys vertailukorkeudella $h$
$\Phi_C$	lujuuskerroin huomioiden todellisen ja oletetun poissulkurajan 10 %
$\Phi_N$	lujuuskerroin huomioiden kuormalle altistuvien komponenttien lukumäärän
$\Phi_Q$	lujuuskerroin huomioiden laadun
$\Phi_R$	lujuuskertoimien tulo
$\Phi_S$	lujuuskerroin huomioiden lujuuskoordinaation
$\psi$	kuormituksen yhdistelmäkerroin
$\psi_I$	jääkuorman yhdistelmäkerroin
$q_h(h)$	keskituulenpaine vertailukorkeudella $h$
$q_p(h)$	puuskatuulenpaine vertailukorkeudella $h$
$Q_T$	kuormitus
$R_C$	ominaislujuus
$R_d$	rakenteen kestävyden mitoitusarvo
$s$	jänteen pituus
$s_e$	ekvivalenttijänne

$s_q$	painojänne
$s_t$	tuulijänne
$\Sigma Y$	summa y
$T$	teoreettinen toistumisaika ilmastollisille kuormille
$V_h(h)$	keskituulennopeus vertailukorkeudella h
$X_d$	materiaaliominaisuuden mitoitusarvo
$X_k$	materiaaliominaisuuden ominaisarvo
$y$	korkeusero vierekkäisten johtimien kiinnityskohdissa



# 1. JOHDANTO

Tämä diplomityö tehtiin toimeksiantona Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:lle (Fingrid). Työn tavoitteena oli perehtyä voimajohtojen suunnittelua ja rakentamista olennaisesti ohjaavaan standardiin SFS-EN 50341-1 *Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä* sekä sen NNA:han (National Normative Aspects) eli Suomen kansalliseen liitteeseen SFS-EN 50341-2-7. Kyseiset standardit ohjeistavat voimajohdon lujuuskoordinaatioon, johon työn toimeksiantaja Fingridin omaisuudenhallinnan voimajohtoyksikkö halusi työssä perehdyttävän. Työn keskeinen tavoite oli lujuuskoordinaation määritelmän ja soveltamiskohteiden selkeytys voimajohtojen suunnittelussa ja rakentamisessa. Nykytilanteen arvioinnin pohjalta mahdollisiin epäkohtiin oli tavoitteena saada kehittämisehdotuksia. Tavoitteena oli myös kuvata voimajohtotoiminnan eri vaiheet pohjustuksena voimajohtotoiminnan lujuuskoordinaation tutkimiselle. Tämän diplomityön aiheen ja tarpeen syntyyn vaikutti voimajohtorakentamisen merkittävä kasvu tulevina vuosina sekä ilmastomuutoksen myötä huoli luonnonvarojen käytöstä ja toisaalta muuttuvien ilmastollisten kuormien vaikutuksista voimajohtorakenteisiin.

Lujuuskoordinaatiota oikein sovellettaessa voimajohtojen suunnittelussa ja rakentamisessa saadaan mahdolliset vikatilanteet optimoitua niin, että suurella todennäköisyydellä ensimmäisenä vikaantuva komponentti aiheuttaa vähiten kustannuksia ja korjausaikaa [44:Liite A.] Voimajohdoilla työssä viitataan pääasiassa 110–400 kV jännitetasojen voimajohtoihin. Työssä perehdytään lähinnä yleisimmin Suomessa suurjännitteisessä vaihtosähkönsiirrossa käytössä oleviin ilma-avojohtoihin. Edellä mainittujen standardien ohella diplomityön tutkimusaineistona oli myös muita ilmajohtoihin liittyviä standardeja ja julkaisuja sekä Fingridin tekniset eritelvät, vika- ja vaurioraportteja ja projektiaineistoja. Lisäksi työssä saatiin tietoa Fingridin eri asiantuntijoilta. Eri maiden verkkoyhtiöiltä saatiin lyhyen kyselyn tuloksina tietoa vertailua varten.

Työn taustoitukseksi esitellään Suomen kantaverkko ja tarkemmin voimajohto komponentteineen. Seuraavaksi perehdytään voimajohtojen rakentamiseen ja siihen liittyvään komponenttien testaukseen. Voimajohdon suunnittelua käsittelevää lukua pohjustetaan voimajohtoon vaikuttavien kuormien käsittelyllä. Voimajohdon suunnittelu -luvussa käydään läpi suunnitteluperiaatteet ja -vaiheet sekä määritellään lujuuskoordinaatio. Tämän jälkeen työssä esitetään johtopäätökset tutkituista vika- ja vaurioraporteista.

Työn tuloksia käsitellään luvussa Voimajohdon lujuskoordinaatio. Luvussa käydään lyhyesti läpi myös muiden maiden kantaverkkoyhtiöiden tapaa soveltaa lujuskoordinaatiota. Lopuksi vielä pohditaan Fingridin voimajohtotoiminnan tulevaisuutta niin tämän työn tulosten kuin ilmastonmuutoksen kannalta.

Fingrid Oyj on Suomen kantaverkkoyhtiö, jolla on sähkömarkkinalakiin perustuva luonnollinen monopoliasema. Fingrid on Energiaviraston määräämä järjestelmävastaava kantaverkonhaltija. Yhtiön osakkeista suurimman osan omistaa Suomen valtio, Huoltovarmuuskeskus ja suomalaiset eläkevakuutusyhtiöt. Fingridin osakkeet eivät ole julkisesti kaupan. Kantaverkonhaltijana Fingrid vastaa sähkönsiirtoverkon kulutuksen ja tuotannon tasapainosta, sähkömarkkinoista sekä rajasiirtoyhteyksistä naapurimaihin. Yhtiön strategiana on sähkömarkkinoiden tehokas kehittäminen, korkea käyttövarmuus sekä ilmastonmuutoksen torjuminen mahdollistamalla uusiutuvan energian liittäminen osaksi sähkönsiirtoverkkoa. [15, 19]

Yhtiö perustettiin vuonna 1996, kun Euroopan Unionin myötä sähkömarkkinat avattiin ja uusi sähkömarkkinalaki velvoitti eriyttämään sähkönmyynnin ja verkkotoiminnan hallinnollisesti. Sitä ennen Suomessa sähkönsiirtoverkon omisti pääasiassa Imatran Voima Oy ja Pohjolan Voima Oy. Suomen valtio yhdessä verkonomistajien kanssa sopivat Fingridin perustamisesta ja se sai lain määräämän aseman järjestelmävastaavana. [16]

Fingridin henkilöstömäärä oli 451 vuonna 2021. Yhtiön liikevaihto samana vuonna oli 1090,9 miljoonaa euroa. Fingridin päätoimipaikka on Helsingissä ja sillä on toimipaikat myös Oulussa, Hämeenlinnassa, Varkaudessa, Rovaniemellä, Jyväskylässä ja Vaasassa. Fingridillä on kaksi sen täysin omistamaa tytäryhtiötä: sähkömarkkinoiden keskittetystä tiedonvaihtopalvelusta vastaava Fingrid Datahub Oy sekä sähkön alkuperätakuuteen ja tehoreserveihin keskittyvä Finextra Oy. Fingrid omistaa yhdessä pohjoismaiden kantaverkkoyhtiöiden kanssa eSett Oy:n, joka hoitaa taseselvitykset, -poikkeamat ja -laskutukset omistajiensa puolesta. Fingrid tekee myös tiivistä yhteistyötä muiden pohjoismaiden kantaverkkoyhtiöiden kanssa Nordic RCC:n (Regional Coordination Centre) kautta. [22]

## 2. TAUSTA

### 2.1 Suomen sähkösiirtoverkko

Suomen sähkösiirtoverkkoon kuuluu Fingridin omistama kantaverkko, sähköasemat, näiden kautta liitynnät jakeluverkkoihin ja voimalaitoksiin sekä rajasiirtoyhteydet Ruotsiin, Norjaan, Venäjälle ja Viroon. Suomen sisäinen sähkösiirtoverkko on vaihtosähköllä toteutettu. Suomen sähköjärjestelmä kuuluu vaihtosähköyhteyksin yhteispohjoismaiseen sähköjärjestelmään, joka edelleen on tasasähköyhteyksin yhteydessä Keski-Eurooppaan ja Venäjälle. Suomen sähköjärjestelmä vaatii toimivat rajasiirtoyhteydet ja riittävän siirtokapasiteetin, koska maa ei pysty omalla sähköntuotannollaan kattamaan koko kulutusta. Kasvavalla tuulivoiman määrällä Suomi on lähivuosina omavarainen sähköntuotantokapasiteetin osalta, mutta tuuliolosuhteiden vaihtelun ja suuntaajakytkenän takia yhteispohjoismaisen sähköjärjestelmän merkitys kasvaa. Rajasiirtoyhteyksillä varmistetaan myös korkea käyttövarmuus ja yhtenäiset sähkömarkkinat.

Suurjännitteistä sähköä siirretään Suomessa pääasiassa ilmajohtoilla, mutta sitä on mahdollista siirtää myös voimakaapeleilla, jotka asennetaan maahan tai merenpohjaan. Suomen rajasiirtoyhteydet Keski-Ruotsiin ja Viroon on toteutettu tasasähkökaapeleilla merenpohjassa. Suurilla jännitteillä vaihtosähkökaapelin tuottama kapasitiivinen varausteho rajoittaa merkittävästi siirrettävää pätötehoa. Varaustehoa voidaan kompensoida rinnakkaisreaktoreilla. Kustannukset suurjännitteiselle vaihtosähkökaapelille ovat moninkertaiset verrattuna vastaavalle ilmajohtolle, ja niitä syntyy muun muassa kompensoinnista ja asennuksesta maahan upotettuna tai tunneleihin. Kaapeleiden käytön etuja verrattuna ilmajohtoihin on esimerkiksi vähäinen tilantarve ja immuniteetti säänilmiöiden vaikutuksille. Suurkaupungeissa suurien tehojen siirtämiseen vaihtosähkökaapelien käyttö on tilanpuutteen takia ainut vaihtoehto. Helsingin on pääsemässä suurkaupunkien joukkoon tällä mittarilla, kun 400 kV kaapelin on määrä valmistua vuonna 2026. [10:4.6, 17, 18]

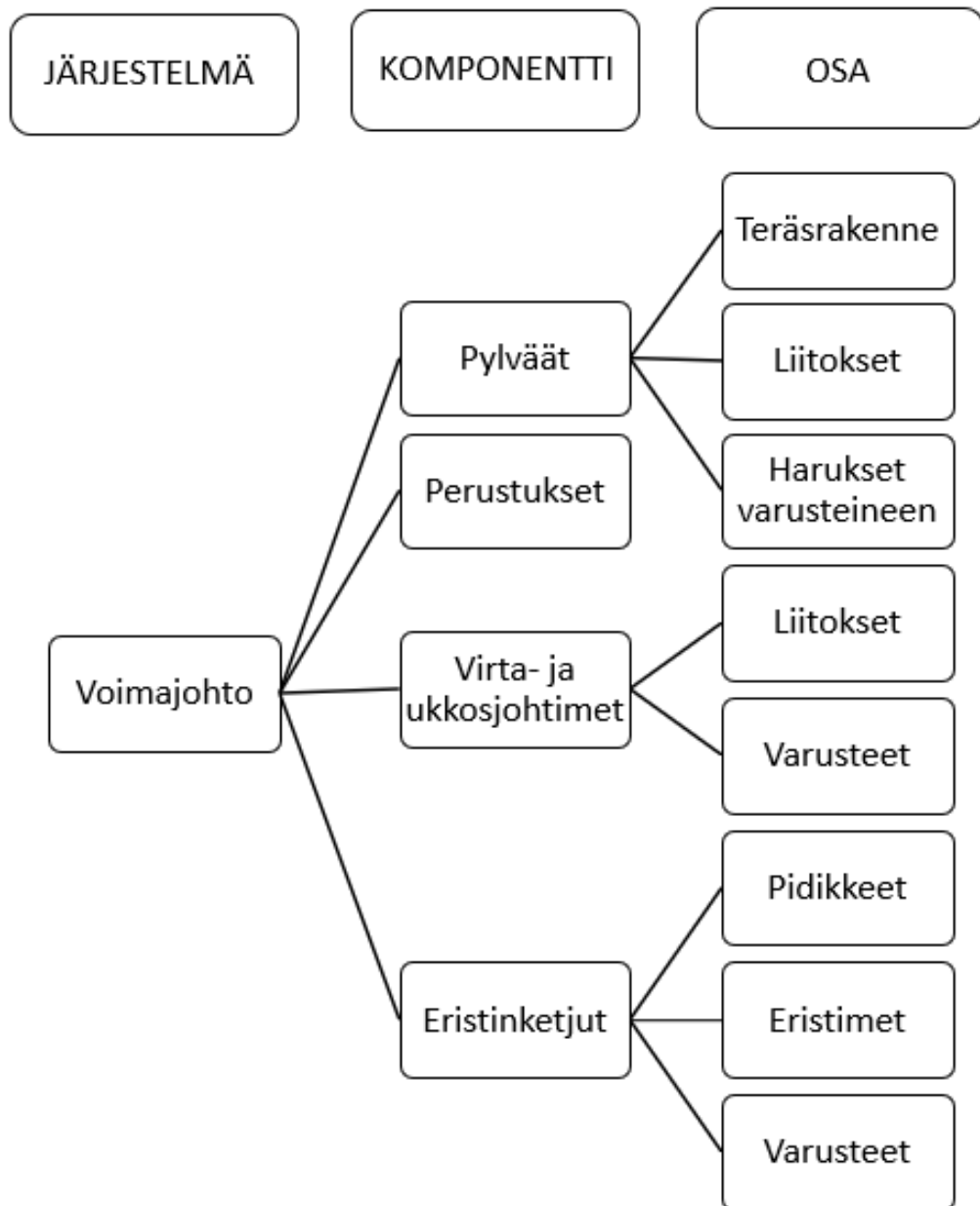
### 2.2 Voimajohto

Voimajohto voidaan käsittää järjestelmänä, jonka tarkoitus on siirtää sähkötehoa pitkien etäisyyksien päähän. Voimajohtolla tarkoitetaan tässä yhteydessä avojohtoa. Voimajohto koostuu komponenteista, kuten pylväät, perustukset, eristimet, johtimet ja ukkosjohtimet. Kukin komponentti koostuu eri osista. Kuvassa 1 on esiteltynä voimajohto

ja sen yleisimmät komponentit periaatekuvana. Kansainvälinen standardi IEC 60826 (International Electrotechnical Commission) määrittää voimajohdon osat kuvan 2 mukaisesti. Kuvaa 2 on hieman täydennetty vastaamaan Fingridin käsitystä voimajohdosta.



**Kuva 1.** Tavanomainen 110 kV voimajohto ja sen komponentit osineen [18.]



**Kuva 2.** Voimajohto, sen komponentit ja komponenttien osat [mukaillen 27:4.2, vapaa suomennos.]

Voimajohtoa täytyy tarkastella komponenttiensa summana ja yhtenä kokonaisuutena. Voimajohto on osa sähköjärjestelmää, jonka on oltava käyttövarma. Käyttövarmuutta voidaan arvioida joko deterministisesti tai todennäköisyyspohjaisesti. Yleisesti käytössä oleva deterministinen käyttövarmuus tulee järjestelmän kyvystä kestää normaalit kuormitustilanteet, mutta myös N-1-kriteeri. N-1-kriteerillä tarkoitetaan, että sähköjärjestelmän täytyy kestää tavanomainen yhden komponentin, kuten voimajohdon, vikaantumisen ja verkosta irtoaminen ilman, että se aiheuttaa vikoja muualle verkkoon. Normaalissa

käyttötilanteessa täytyy huomioida kuormituksen jatkuvat muutokset rakenteiden korkeuden ja lujuuksien määrittämisessä. Todennäköisyyspohjainen lähestymistapa, RBD (reliability based design), ottaa huomioon eri vikojen todennäköisyydet. Sen ongelmaksi muodostuu kuitenkin helposti tarkasteltavien mahdollisten vikojen suuri lukumäärä ja tarkkojen todennäköisyyksien määritteleminen. Kahden lähestymistavan yhdistäminen käyttövarmuuden toteuttamisessa on mahdollista ja järkevääkin, niiden tukiessa toisen mahdollisia puutteita. RBD täydentää determinististä näkökulmaa esimerkiksi tunnistamalla kuormat ja lujuudet satunnaisina muuttujina ja ilmastollisten kuormien toistumisajat eri luotettavuustasoilla. [4:5.2;14.3, 9:6.4]

Voimajohdon suunnittelussa on huomioitava luotettavuus, varmuus ja turvallisuus. Todennäköisyyspohjaisesti määriteltävään luotettavuuteen vaikuttaa ilmastolliset kuormitukset, materiaalien lujuudet ja niihin liittyvät tilastot. Varmuutta mitoittaessa pyritään estämään ja minimoimaan hallitsemattomat viat tai sarjavauriot. Varmuuden mitoitus perustuu deterministiseen näkökulmaan. Luotettavuutta ja varmuutta käsitellään yhteydessä toisiinsa ja molemmilla on yleisesti komponenttien lujuutta kasvattava vaikutus. Turvallisuus ihmisille pyritään takaamaan huomioimalla rakentamisen ja kunnossapidon aikaiset kuormat. Ihmisten turvallisuuteen liittyvät kuormat tulee ylimitoittaa, jotta rakenteiden lujuuksien ylittyminen olisi erittäin epätodennäköistä. [4:5.2, 27:5.2]

Voimajohdot suunnitellaan taulukon 1 luotettavuustasojen mukaan. Suomessa sähkönsiirtoverkon voimajohdoista kaikki 400 kV sekä tärkeät alempien jännitetasojen johdot kuuluvat tasoon 3. Luotettavuustasoon 2 kuuluu kaikki tavalliset yli 45 kV voimajohdot ja alemman jännitetasojen erikoisjohdot. Tason 1 voimajohtoja ovat kaikki tilapäiset ja alle 45 kV tavalliset johdot. Tasolla 1 ilmastollisten kuormien teoreettinen toistumisaika T on 50 vuotta, tasolla 2 T on 150 vuotta ja tasolla 3 T on 500 vuotta. [44:3.2, 45:3.2]

*Taulukko 1. Luotettavuustasot [44:3.2.]*

<b>Luotettavuustaso</b>	<b>Teoreettinen toistumisaika T ilmastollisille kuormille (a)</b>
1	50
2	150
3	500

Mitoittaessa voimajohtoa täytyy yhdistellä eri vaikutuksia ja kuormitustilanteita. Johdon luonnollinen teho määrittää tehon, jolla johdon induktanssi ja kapasitanssi kumoavat toisensa eli se ei tuota eikä kuluta loistehoa. Johdon mitoitukseen vaikuttaa myös koronailmiöiden vakavuus, kun osittaispurkaukset aiheuttavat häviöitä sekä ääni- ja radiohäiriöitä. Koronailmiöön vaikuttaa muun muassa johtimen poikkipinta, vaihe-etäisyydet ja osajohtimien lukumäärä, ilmasto-olosuhteet sekä nippujohtimen geometria. Voimajohdon mekaaniselle kuormitukselle on asetettava järkevä yläraja, jossa on optimoitu riittävän sähkönsiirtokyvyn mahdollistaminen, mutta myös kustannuskysymykset. Voimajohdon mitoituksessa on huomioitava myös johdon terminen raja. Fingridin johtimien terminen raja on yleisimmin käytetyillä johtimilla 80 °C, jonka yli mentäessä johtimen mekaaniseen lujuuteen tulee pysyvää heikkenemistä. Johdinta lämmittäviin virtalämpöhäviöihin vaikuttaa virta, johtimen materiaali ja poikkipinta sekä sää. Siinä missä vaiheiden etäisyyttä toisistaan pienentämällä mekaaninen kuorma pienenee ja luonnollinen teho kasvaa, niin lisääntyy myös koronailmiön haitat. Johdon mitoituksessa on otettava huomioon kaikki näkökulmat, ja näin löytää tietyille johdolle paras mahdollinen toteutus. [4:14.3, 51]

Johdon siirtokapasiteettia pyritään mitoituksessa maksimoimaan, jolloin tarkastellaan järjestelmän stabiilisuutta, termistä rajaa sekä luonnollista tehoa. Järjestelmän stabiilisuudella tarkoitetaan sähköjärjestelmän tasapainoisuutta normaalitilassa ja sen kykyä palautua häiriöistä. Stabiilisuutta tarkastellaan taajuuden ja jännitteen arvoissa. Johdon siirtokapasiteetin rajoittavaksi tekijäksi harvemmin osoittautuu sen terminen kapasiteetti, vaan järjestelmän stabiilisuus. [3, 4:14.2, 51]

Voimajohdot vaativat suuria investointeja ja niiden mitoitusta ohjaa vahvasti taloudellinen näkökohta. Materiaalien lisäksi voimajohdon kustannuksia muodostuu maankäytöstä, erilaisista luvista ja käsittelyistä, rakentamisesta ja suunnittelusta. Voimajohdon elinkaarikustannuksia syntyy lisäksi teho- ja koronahäviöistä, vanhojen rakenteiden purkamisesta sekä kunnossapidosta. Voimajohtojen kustannuksia voidaan peilata niiden rakentamisesta saatuihin hyötyihin, kuten parantunut luotettavuus ja laatu sekä sähköenergian hinnan pienentyminen. [12:3.7, 48:5.4]

## 2.2.1 Pylväät

Voimajohtopylväiden tehtävänä on kannatella johtimia ja kahden pylvään väliä kutsutaan jänteeksi. Jänteen pituus on tyypillisesti satoja metrejä. Yhdessä pylväässä voi olla yksi tai useampi virtapiiri. Pylväsmateriaaleina voidaan käyttää puuta, terästä, betonia tai komposiittia. Puun käyttöä pylväissä rajoittaa maksimikorkeus, mekaaniset rajat ja ympäristölle haitalliset kyllästämisaaineet. Teräsrakenteiset pylväät voivat olla joko putki- tai

ristikkorakenteisia. Kuvassa 3 näkyy yleisiä Suomessa käytettäviä pylvästyyppejä, jotka ovat vasemmalta oikealle: harustettu teräsputkipylväs, kaksi vapaasti seisovaa teräsristikkopylvästä, harustettu teräsristikkopylväs sekä vielä yksi vapaasti seisova teräsristikkopylväs.



**Kuva 3.** Yleisiä 400 kV teräspylvästyyppejä Suomessa.

Suomessa käytetään paljon harustettuja pylväitä. Harustettujen pylväiden pylväsalka on perustuksessa kiinni nivelellisesti, jolloin suurin osa vaakakuormista siirtyy harusten kautta maahan. Pylväsalkaan ja sen kautta perustukseen kohdistuu vain pieni vaakasekä puristuskuorma. Tästä johtuen pylväs- ja perustusrakenteita ei tarvitse mitoittaa taivutusmomenteille, mikä keventää elementtejä pienentäen niiden kustannuksia. Suomessa on perinteisesti myös hyvin tilaa rakentaa tilaa vieviä harusrakenteita. Harustetut rakenteet ovat myös joustavia verrattuna vapaasti seisoviin, joten ne vaimentavat esimerkiksi johtimen rikkoontumisen tai sarjasortumisen vaikutuksia voimajohtolle. Harukset kiinnitetään maahan harusankkureilla. Terästen kosketus maahan estetään käyttämällä betonisia elementtejä, ja lisäksi käytetään haruseristimiä ehkäisemään maaperän ja vikavirtojen aiheuttamaa korroosiota. Harustetut pylväät rajoittavat maankäyttöä, joten niiden käyttöä pyritään nykyään välttämään esimerkiksi pelloilla. Fingrid on kehittänyt erityisen peltopylvään, joka mahdollistaa maan- ja työkoneiden käytön jopa pylvään jalokojen välissä. Joissain maissa myös ilkvallan uhka voi olla esteenä harustettujen pylväiden käytölle. [4:12.8, 10:4.3, 36, 51]

Voimajohtopylväitä on eri tarkoituksiin seuraavat tyypit:

- kannatuspylväät
- kulmapylväät
- kiristyspylväät



- päätepylväät

Kannatuspylväät kestävät hyvin pysty- ja poikittaisia kuormia (esimerkiksi tuulikuormia), mutta ei yleisesti hyvin suuria pitkittäisiä kuormia, joita voi syntyä esimerkiksi johtimen katkeamisesta ja epäkeskisestä jääkuormasta. Korkeita, erikoisrakenteisia kannatuspylväitä käytetään yleisesti vesistöjen ylityksiin. Kannatuspylväät ovat kevytrakenteisimpia ja halvempia kustannuksiltaan verrattuna muihin voimajohdon pylväisiin. Voimajohtoreittiä on mahdotonta toteuttaa viivasuorana ja johtoreittiin täytyy tehdä kulmia. Kulmat ilmaistaan gooneina (lyhenne gon), joka on yksi sadasosa suorasta kulmasta. Johtokulmilla 0–3 gon käytetään niin kutsuttuja suoran paikan pylväitä. Erilaisilla harustetuilla kulmapylväillä saadaan johtokulmaksi jopa 13–15 goonia. Sitä suuremmilla johtokulmilla on käytettävä vapaasti seisovia kannatus- tai kiristyspylväitä 400 kV:lla. 110 kV:lla voidaan käyttää myös harustettuja kiristyspylväitä. Kulmapylväät suunnitellaan kestäväksi poikittaisia ja kohtisuoria kuormia. Kiristyspylväillä ylläpidetään virta- ja ukkosjohtimien jännitystä riittävällä tasolla sekä mahdollistetaan johtoreittiin isommat kulmat. Kiristyspylväiden kestävyys suurissa pitkittäisissä kuormissa mahdollistaa niiden käytön estämään laaja sarjasortuminen. Kiristyspylväitä joudutaan käyttämään myös vierekkäisten jänneiden suurissa korkeuseroissa eristimien toiminnan varmistamiseksi. Sähköasemalla olevat päätepylväät yhdistävät voimajohdon sähköasemaan. Rakenteeltaan päätepylväät ovat massiivisimpia ja niiden on kestävä johtimien toispuolinen kuormitus. [1, 4, 12, 36]

Voimajohtopylväiden ulkomuodon esteettisyyteen alettiin kiinnittämään enemmän huomiota 1990-luvulla ja ryhdyttiin rakentamaan niin kutsuttuja maisemapylväitä. Maisemapylväitä on Suomessakin käytetty monissa, etenkin näkyvissä paikoissa, ja näin pyrittiin saamaan hyväksyvämpi asenne kansalta suurten rakenteiden pystyttämiseen. Suomen monet, ympäristöstä inspiraationsa saaneet, taiteelliset pylväät ovat saaneet erityishuomiota palkintoina ja mainintoina esimerkiksi Cigrén (Conseil International des Grands Réseaux Electriques) julkaisussa [4]. Kuvassa 4 on suunnitelmakuva vuonna 2022 Kuopion Savilahteen yliopistollisen sairaalan lähetyville rakennetusta, dna-ketjua muistuttavasta, maisemapylvästä Viäntö [47.]



*Kuva 4. Viäntö-maisemapylväs [47.]*

### **2.2.2 Perustukset**

Voimajohdon, ja tarkemmin voimajohtopylväiden, perustukset ovat nimensä mukaisesti perustana koko voimajohtorakenteelle. Perustukset siirtävät kuormat pylväiltä maaperään. Maaperä on ainutlaatuinen ja muuttuva, mikä tuo haasteita perustusten suunnitteluun. Oikeanlaisten perustusten määrittämistä ja suunnittelua varten tehdään maaperätutkimus, josta selviää maaperän koostumus, kantavuus, pohjaveden taso, routiminen ja mahdolliset maaperän geotekniset riskit, kuten vajoamat ja vyörymät. [4:13, 12:21, 44:8]

Maaperätutkimusten lisäksi kestävä perustuksen valintaan vaikuttaa käytettävä pylvästyyppi, vaikuttavat kuormitukset sekä ympäristö- ja ilmasto-olosuhteet. Perustukset tehdään paikallavalettavista, valmiselementeistä tai teräsrakenteista maaperän mahdollisuuksista riippuen. Maaperää voidaan vahvistaa teräsbetoni- tai teräspaaluilla, jolloin kaivaminen voidaan minimoida. Voimajohtopylvään perustus voi olla yhtenäisperustus tai kullekin pylvään jalalle voidaan tehdä oma erillisperustus. Erillisperustuksia ovat myös harusten ankkurit. Yhtenäisperustus mitoitetaan kaatavalle momentille ja erillisperustukset pääasiassa pystykuormille. Yhtenäisperustukset voivat olla laatta-, antura-, teräsarina-, paalu- tai pilariperustuksia. Erillisperustuksina voidaan käyttää porrastettuja antura- tai pilarianturaperustuksia, kaivinpaalu-, pysty- tai vinopaaluperustuksia sekä pilari- ja suurpaaluperustuksia. [4:13, 36, 44:8, 51]

### **2.2.3 Eristimet**

Voimajohdon eristimillä virtajohtimet ovat mekaanisesti kiinni voimajohtopylväissä. Eristimillä on sähköinen tehtävä pitää jännitteisten johtimien ja maadoitettujen pylväiden välillä potentiaaliero, eli estää maassa olevien pylväiden jännitteisyys. Eristimillä myös pidetään jännitteiset osat erossa toisistaan ja näiden etäisyydet riittävinä. Eristimet ovat suurjännitteisillä voimajohdoilla eristinketjuina, jotka koostuvat lautaseristimistä tai komposiittisauvaeristimistä. Eristysketjujen asennosta riippuen niitä voidaan käyttää kiristämään tai kannattamaan johdinta. Kannatuspylväillä eristinketjut ovat pystysuunnassa ja kiristyspylväillä vaakasuunnassa. Eristinketjujen asennoilla mahdollistetaan myös kulmat johdolle. Kannatuspylväillä käytetään yleensä I- tai V-eristimiä, nimettynä muotonsa mukaan. I-eristimessä on yksi eristinketju tai -sauva. V-eristimessä on kaksi eristinketjua tai -sauvaa v-kirjaimen muodossa, ja tällaisella rakenteella mahdollistetaan lyhyempi orsi ja kapeampi johtokatu. Kiristyspylväillä käytetään usein kahta rinnakkaista eristinketjua tai -sauvaa, joista esimerkki kuvassa 5.



**Kuva 5.** Kiristyspylväällä komposiittieristinsauvat (vasemmalla) ja lasieristinketjut (oikealla.)

Eristinmateriaalina voidaan käyttää keraamisia eli karkaistua lasia tai posliinia tai ei-ke-raamisia kuten komposiittia tai polymeerisiä materiaaleja. Suomessa voimajohdoilla on perinteisesti käytetty lasi- ja posliinieristimiä, mutta komposiittieristimien osuus on kas-vamassa niiden kevyen, mutta lujan rakenteen vuoksi. Komposiittieristimet kestävät myös paremmin likaa ja ne ovat kevyen rakenteensa ansiosta helpommin asennetta-vissa. Kuvassa 5 on nähtävillä oikealla puolella lasieristinketju ja vasemmalla vastaava, huomattavasti kevytrakenteisempi komposiittieristinsauva. Eristimien muotoilulla opti-moidaan jännitelujuus ja pyritään estämään likaantuminen ja vedestä johtuvat ongelmat. Komposiittieristimillä veden tunkeutuminen ytimeen voi aiheuttaa eristimen hajoamisen. Eristimien tulee olla mekaanisesti lujia sekä kestää pintavirrat, valokaaret, eroosio, ult-raviolettisäteily ja eri lämpötilat. [2:3.7, 12:17]

Eristinketjujen päissä on käytettävä yli 220 kV voimajohdoilla galvanoidusta teräksestä tehtyjä korona- tai suojarenkaita. Renkailla ohjataan sähkökentän jakaumaa ja sen suuruutta, ja näin minimoidaan koronailmiön vaikutukset ja sähkökentän voimakkuus eristimien pinnalla. Renkailla myös suojataan eristinvarusteita valokaarelta. Suuri sähkökenttä eristimien pinnalla yhdistettynä epäpuhtauksiin aiheuttaa materiaalia heikentäviä osittaispurkauksia. [4:11.4, 21, 51]

## 2.2.4 Virtajohtimet

Virtajohtimien tehtävä voimajohdolla on siirtää sähkötehoa. Suurjänniteisillä voimajohdoilla virtajohtimet ovat tyypillisesti kerrattuja avojohtimia, ja materiaalina toimii nykyään pääasiassa alumiini ja alumiiniseokset. Virtajohtimissa käytetään myös terästä mekaanisen lujuuden parantamiseksi. Vaikka kupari on johtavuudeltaan ylivoimainen materiaali, on alumiini nykyään yleisimmin käytössä sen hinnan, keveyden ja kemiallisen kestävyyden takia. Alumiinin huonompi johtavuus tarkoittaa paksumpia johtimia ja täten pienempiä koronavaikutuksia. Yleisimmin käytössä olevassa ACSR-alumiinijohtimessa (Aluminium Conductor Steel Reinforced) on teräsydin lisäämässä mekaanista lujuutta. Alumiiniseoksilla niin ikään vahvistetaan johtimen lujuutta, mutta lisäksi parannetaan sen suorituskykyä korroosiolle alttiissa ympäristössä. [12:15, 37:3]

Johtimen valinnassa täytyy kiinnittää huomiota sen sähköisiin ominaisuuksiin. Resistanssi määrittää johtimen virrankantokyvyn ja häviöt. Konduktanssilla määritetään ilmajohdon vuotovirtahäviöt, ja sen suuruuteen vaikuttaa jännite ja sääolot. Induktanssiin vaikuttaa kiertävä magneettivuo. Kapasitanssi kuvaa kahden johtavan materiaalin potentiaalieron varausta, ja sen suuruuteen vaikuttaa eri etäisyydet ja sähkökentän jakautuminen. [9:2.4, 13:4]

Virtajohtimet ovat usein nippujohtimia, jotka koostuvat useammasta osajohtimesta. Jakamalla vaihe useammalle osajohtimelle johdon pinnan kentänvoimakkuus pienenee vähentäen koronailmiötä sekä sähkömagneettisia ja akustisia häiriöitä. Nippujohtimilla johtimen resistanssia saadaan pienennettyä ja johdon luonnollista tehoa suurennettua. [9:2.4, 13:4.3]

## 2.2.5 Ukkosjohtimet

Ukkosjohtimien tehtävä voimajohdolla on suojata virtajohtimia ilmastollisilta ylijännitteiltä, jotka ovat jyrkkiä transienttiylijännitteitä. Ukkosjohtimet sijoitetaan voimajohdolla virtajohtimien yläpuolelle, jonne mahdollinen salamanisku todennäköisimmin osuu. Ukkosjohti-

mien sijoitus määräytyy niin, että suurella todennäköisyydellä ylilyönnin aiheuttavat suu-  
virtaiset salamaniskut eivät osu suojauskulman sisällä oleviin virtajohtimiin. Suojaus-  
kulma määritetään sähkögeometrisen mallin mukaan, jossa huomioidaan johtimien etäi-  
syydet toisiinsa ja maahan sekä salaman lopullinen iskukohta salamavirran funktiona.  
Virtajohtimelle osuva salamaniskun aiheuttama virta leviää johdinta pitkin ja voi aiheuttaa  
vaurioita. Ukkosjohtimilta virtajohtimille haitallinen ylijännite siirtyy maadoituksiin. Sala-  
maniskun osuessa ukkosjohtimeen, virta jakaantuu eri suuntiin ja pylväältä kohti maata.  
Virran purkautuessa maahan pylvään jalan resistanssin kautta voi kehittyä korkea jän-  
nite, joka tarpeeksi suurena siirtyy ylilyöntinä pylväästä virtajohtimiin. Tätä kutsutaan ta-  
kaisuksi. Vikatilanteissa ukkosjohtimet yhdistävät eri pylväiden maadoitukset, mikä lie-  
ventää vian vaikutusta voimajohdolle. Ukkosjohtimilla on myös pienentävä vaikutus maa-  
sulku- ja induktiojännitteille. [2:6.4, 10:1.1, 12:22.1, 50]

Ukkosjohtimien materiaalina voidaan käyttää terästä, mutta teräsalumiinijohtimilla on pa-  
rempi virran- ja korroosionkesto sekä pienempi resistanssi, joten niiden käyttö on yleistä  
Suomessa. Ukkosjohtimina käytetään myös OPGW-tyyppiä (OPTical Ground Wire),  
jossa johtimen sisällä on tiedonsiirtoon hyödynnettävissä olevia valokuituja. Valokuiduilla  
varustetut ukkosjohtimet olivat aiemmin hieman tavallisia massiivisempia, joten niiden  
käyttö edellytti huomion kiinnittämistä pylvään yleisiin kuormiin ja mitoittamiseen. Nykyään  
OPGW-ukkosjohtimet vastaavat mekaanisilta ja sähköisiltä ominaisuuksiltaan konven-  
tionaalista ukkosjohdinta. Yleisesti voimajohdolla on kaksi ukkosjohdinta, tavallinen te-  
räsalumiinijohdin ja OPGW. [12:16, 51]

## 2.2.6 Maadoitukset

Maadoituksilla jokin kohta virtapiiristä yhdistetään maahan johtavan osan eli maadoitus-  
elektrodin kautta. Maadoituksen tarkoitus on ohjata vikavirrat maahan ja pienentää nii-  
den vaikutuksia sen sijaan, että ne aiheuttaisivat vahinkoa virtapiirin komponenteille, ih-  
misille tai eläimille. Suojamaadoituksella johtavat, virtapiiriin kuulumattomat osat maa-  
doitetaan, jotta niihin ei synny vaarallisia kosketusjännitteitä. Voimajohdolla metalliset  
osat kuten ihmisten kosketeltavissa olevat voimajohtopylväät, suojamaadoitetaan. Käyt-  
tömaadoituksella estetään heikkovirtajärjestelmien häiriöt pitämällä jännite-epäsymmet-  
ria ja maasulkuvirta pieninä sekä pidetään virtajohtimien jännite turvallisissa rajoissa.  
Työmaadoituksella varmistetaan turvallinen työskentely maadoittamalla eli oikosulke-  
malla jännitteettömät, normaalisti jännitteiset, osat. [10:7, 12:22]

Voimajohdon maadoitusjärjestelmään kuuluvat ukkosjohtimet, metalliset rungot, maa-  
doitusjohtimet ja maadoituselektrodit maan alla. Yleisesti kaikki maadoitusjärjestelmän

osat on yhdistetty toisiinsa. Maadoituselektrodin materiaalina voidaan käyttää korroosi-onkesteviä ja mekaaniselta lujuudeltaan riittäviä materiaaleja, kuten kuparia, alumiinia tai terästä (esimerkiksi sinkitettyä). Maadoitusten suunnittelussa täytyy tietää kyseisen verkon kohdan vikavirran suuruus ja kesto, maaperän resistiivisyys sekä maadoituselektrodin ominaisuudet. SFS-standardi 6001 Suurjännitesähköasennukset antaa raja-arvon virran kestoajasta riippuvalle hyväksyttävälle kosketusjännitteelle, jonka perusteella määritetään maksimiarvo maadoitusjännitteelle. Standardissa SFS-EN 50341-1 on annettu kosketusjännitteille eri rajoja riippuen paikasta missä ne voivat esiintyä, suuremmat sallitut jännitteet suuren resistiivisyyden maaperän paikoissa, joissa ihmisten voidaan olettaa käyttävän kenkiä lisäämään resistanssia. [10:7, 12:22, 43:10, 44:6]

Pylväsmaadoituksella vähennetään salamaniskuista mahdollisesti aiheutuvia takaiskuja, parannetaan maasulkusuojauksen toimintaa ja pienennetään pylvään maadoitus- ja kosketusjännitettä. Pylväsmaadoituksen perusmaadoitukseen kuuluu pylvään perustuksen alla olevat J-lenkit ja eri jalat yhdistävät kupariköydet. Joissain maissa myös perustusten raudoitukset ja harusankkurit voidaan yhdistää maadoitusverkkoon, mutta Suomessa näin ei tehdä. Maaperän ominaisuuksista riippuen voidaan myös käyttää lisämaadoituksia, jotka ovat yleensä säteittäisiä vaakaelektrodeja. Pylvään ollessa paikoissa, missä ihmisten voidaan olettaa liikkuvan säännöllisesti, käytetään kosketusjännitteiltä suojaamaan potentiaalinhjauselektrodeja, jotka sijoitetaan pylvään jalkojen ympärille. Vikavirta pyritään ohjamaan purkautumaan paikkoihin, joissa ihmisiä ei oletettavasti oleskele laajentamalla maadoituselektrodia näissä paikoissa. Huonosti johtavassa maaperässä voidaan myös käyttää läpimeneviä maadoituselektrodeja ulottuen pylväältä toiselle. Suomessa maaperä on tyypillisesti kallioperää, jonka suuri ominaisresistanssi tekee maadoituksesta haastavaa. [10:7.4]

### **2.2.7 Muut**

Edellä esiteltyjen lisäksi voimajohtoihin kuuluu myös erinäisiä lisäkomponentteja, joiden virtajohtimiin liittyviä tehtäviä on muun muassa suojata sitä värähtelyiltä, pitää se paikallaan ja tehdä siitä näkyvämpi. Nämä komponentit ovat yleensä yksinkertaisen näköisiä, mutta ne täytyy mitoittaa kestämiään samat kuormat ja voimat, kuin muutkin voimajohdon osat. [4:9]

Virtajohtimien pidikkeillä johdin kiinnitetään eristinketjuun ja eristimet kiinnitetään pylväisiin eristinkiinnikkeillä. Pidikkeitä on kannatukseen ja kiristykseen, pylvästyypin mukaan. Vedonalaisia johtimien liitoksia tai johdinjatkoksia tehdään esimerkiksi räjäytettävillä tai

poikkeustapauksissa puristettavilla liitoksilla. Liitokset, jotka eivät altistu suurille mekaanisille kuormituksille tehdään yleensä ruuvattavilla liitoksilla. [10:4.3, 36, 37:6.3]

Tuuli aiheuttaa virtajohtimeen liikettä, ja pienillä tuulennopeuksilla värähtelyä, joka vahingoittaa johdinta. Värähtelyä pyritään vähentämään pienentämällä jänteen jännitystä, valitsemalla erityisiä johtimia tai asentamalla johtimeen värähtelynvaimentimia. Nippujohtimilla värähtelyä voidaan vaimentaa välisiteen ja vaimentimen yhdistelmällä. Välisiteillä nippujohtimien osajohtimet pidetään erillään toisistaan. [10:4.3, 48:5]

Voimajohdon eri vaiheiden jännitteiden ollessa eri suuruisia syntyy sähköstaattista ja -magneettista epätasapainoa, joka tuottaa häiriöitä rinnakkaisiin tiedonsiirtoyhteyksiin, suojaraleisiin ja generaattoreiden roottoreihin. Vuorottelemalla eri vaiheiden fyysistä sijaintia säännöllisesti voimajohdolla voidaan pienentää tätä haitallista epätasapainoa, kun vaiheiden induktanssit saadaan yhtä suuriksi. Kuvassa 6 näkyy vuorottelun toteutus voimajohtopylväällä. [4:4.7, 9:2.4]



**Kuva 6.** Vaiheiden vuorottelu pylväällä.



Voimajohtojen korkeudella mahdollisesti lentäviä tai liikkuvia lintuja tai lentoliikennettä varoittamaan voimajohdon läheisyydestä käytetään erilaisia näkyvyysmerkintöjä. Tyypillisiä näkyvyysmerkintöjä ovat värikkäät muoviset lento- ja lintuhuomiopallot tai virtajohdolta tehonsa saavat lentohuomiovalot. Pylväät voidaan myös maalata huomiota herättävillä väreillä. Kuvassa 7 on lentokentän läheisyydessä olevia pylväitä ja lentohuomiopalloja. Voimajohtopylväät tulee myös varustaa opastavilla ja varoittavilla kylteillä sekä turvatikkailla ja askeltapeilla. [4:9.14]



**Kuva 7.** Lentohuomiopalloja ja huomiovärein maalattuja pylväitä.

Siirtyviä vaarajännitteitä pyritään ehkäisemään reittisuunnittelulla, mikä ei kuitenkaan aina ole mahdollista. Vaarajännitteet voivat siirtyä voimajohdolta alemman jännitetaso johtimiin, viestintäverkkoihin tai metallirakenteisiin kapasitiivisesti, konduktiivisesti tai induktiivisesti. Indusoituvien vaarajännitteiden ja syntyvien magneetti- ja sähkökenttien pienentämiseksi voimajohtopylväille voidaan asentaa ukkosjohtimien kaltaiset reduktiojohtimet alemmas pylväälle. Näin voidaan tehdä pylväillä, joissa on kahta eri jännitetasoa, alemman tason johtimien viereen. Myös kahden virtapiirin keskenään käänteisillä vaihejärjestyksillä voidaan rajoittaa syntyviä haittoja. Kapasitiiviset vaarajännitteet eli influenssijännitteet voivat olla jännitteeltään suuria, mutta tehon jäädessä pieneksi niiden

vaikutukset eivät yleensä ole merkittäviä, lähinnä äänihäiriöitä ja mahdollisesti käyttöhäiriöitä telejohtojen ylijännitesuojien laukeamisesta. Konduktiivisia vaarajännitteitä voi syntyä voimajohtimen pudotessa telejohdon tai -järjestelmän maadoituksen päälle. Tällaiset viat ovat kuitenkin harvinaisia, joten niihin ei juuri varauduta muuten kuin pyrkimällä sijoittamaan telejärjestelmien maadoitukset pois voimajohtojen läheltä ja maadoittamalla voimajohdot. Induktiivisia vaarajännitteitä syntyy, kun virrallisen johtimen synnyttämä kiertävä magneettikenttä ulottuu lähellä olevaan johtoon ja näin indusoi siihen pitkittäisen sähkömotorisen voiman. Jännitteitä indusoituu normaali- ja vikatilanteissa. Niiden vaikutusta voidaan pienentää maadoituksilla, kolmen vaiheen symmetrisellä sijoittamisella pylväillä, ylijännitesuojilla ja maksimoimalla etäisyydet muihin järjestelmiin. Erityistä huomiota on kiinnitettävä myös jännitteettömien järjestelmien työmaadoittamiseen. [11:10.4, 13, 34]

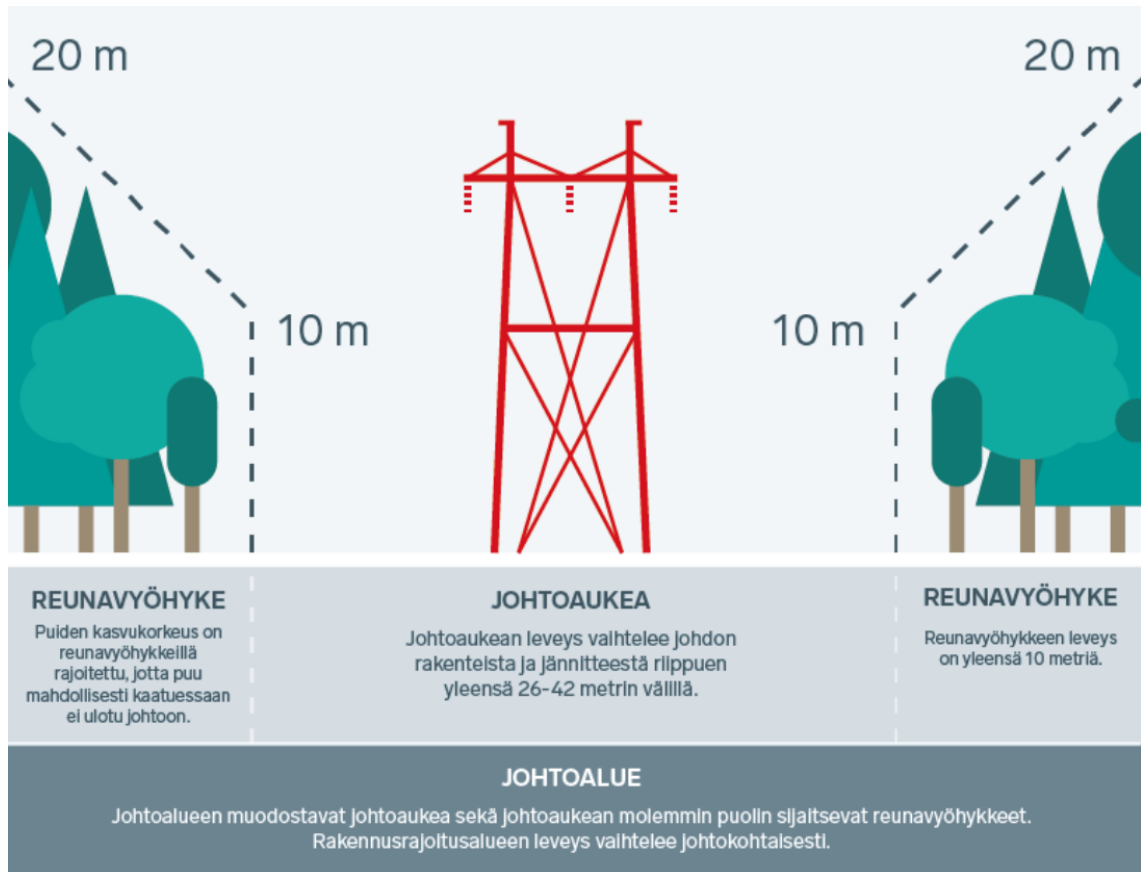
## 3. VOIMAJOHDON RAKENTAMINEN

Fingridin pääurakoitsija tarkistaa yleissuunnittelijan suunnitelmat ja niiden soveltuvuuden ennen rakennustöiden aloittamista. Voimajohdon rakentaminen alkaa johtoalueen raivaamisella ja työmaaliikenteen järjestämisellä. Sitten rakennetaan perustukset, kootaan ja pystytetään pylvää, vedetään johtimet ja asennetaan eristimet ja varusteet. Rakentamiseen voi kuulua myös vanhojen voimajohtorakenteiden poistoa, joka täytyy suunnitella huolella etukäteen. Rakentamisen lopuksi tehdään lopputarkastukset.

Voimajohdon rakentamista edeltää yleissuunnittelussa rakennetutkimukset, joissa varmistetaan voimajohdon rakentamisen sopivuus tietylle paikalle laillisesti, teknisesti ja ympäristötekijät huomioiden. Tutkimuksilla määritetään johtokadun leveys, voimajohtorakenteiden tarkat sijainnit ja mahdolliset erikoisia toimenpiteitä vaativat paikat. Kaikessa työmaahan liittyvässä toiminnassa tulee huomioida vaikutukset ja korjata mahdolliset vauriot ympäristöön. Voimajohtotyömaalla on huomioitava mahdolliset lähellä olevat jännitteiset järjestelmät ja indusoituvien vaarajännitteiden riski maadoittamalla kaikki johtavat osat, esimerkiksi johdinkelat. [4:15.2]

### 3.1 Johtoalue ja perustukset

Johtoalue on voimajohdolle lunastettava maa-alue, joka rajoittaa maankäyttöä rakentamisen ja kasvillisuuden osalta sekä mahdollistaa voimajohdon turvallisen käytön. Johtoalue käsittää johtoalueen ja reunavyöhykkeen kuvan 8 mukaisesti. Johtoalueen leveys riippuu jännitetasosta ja rakenteista säilyttäen turvalliset etäisyydet jännitteisiin osiin. Johtoaukea raivataan yleisesti kaikesta yli 3 metrin korkuisesta kasvillisuudesta, mutta maa-alueen hyötykäyttö on tiettyjen rajoitusten puitteissa mahdollista. Fingrid mahdollistaa ja kannustaa johtoalueen hyötykäyttöä luvanvaraisesti esimerkiksi joulukuusien viljelyllä ja pölyttäjähönteisten suosimien kasvien kasvattamisella. Reunavyöhyke on johtoaukean molemmin puolin oleva, yleensä 10 metrin levyinen alue, jossa kasvuston korkeus on rajoitettua. Reunavyöhykkeellä estetään puiden ylettyminen voimajohtoon ja siitä seuraavat vikatilanteet voimajohdolle. Johtoaluetta pitää säännöllisesti raivata voimajohdon eliniän ajan. Voimajohtotyömaalle täytyy johtoalueen raivauksen lisäksi järjestää pääsy työmaaliikenteelle. Pääsy työmaalle voi olla rajoitettua, esimerkiksi vain talvi-aikaan kulkureitin mennessä suon tai järvenjään yli. [4:15.3, 18]



**Kuva 8.** Johtoalue [18.]

Ensimmäisenä raivatulla voimajohtotyömaalla rakennetaan perustukset. Perustusten kaivaukset tehdään maaperästä riippuen erilaisilla kaivinkoneilla, poraamalla tai räjähteillä. Kaivauksien yhteydessä asennetaan myös pylväsmaadoitukset maadoitussuunnitelmien mukaan. Paikallavalettujen betoniperustusten kaivantoihin laitetaan vahvistusraudoitukset ennen betonin valua. Valun jälkeen betoni tiivistetään, jälkitärytetään tarvittaessa sekä jälkihoidetaan riittävien lujuuden ja ominaisuuksien saavuttamiseksi. Perustuksissa käytettävälle betonille määritetään projektispesifikaatiossa lujuusluokka ja muut ominaisuudet. Etukäteen valmistettavat elementit ja ankkurit sijoitetaan maahan. Perustuksen ylösvetoa vastustamaan päälle tarvitaan kunnollinen tiivistetty täyttö. [4:15.4]

### 3.2 Pylväät ja eristimet

Voimajohtopylväiden kasaaminen ja pystytys ovat vaativia työvaiheita, ja niitä varten on hyvä tehdä huolellinen suunnitelma ja valmistelut. Teräsristikopylväät voidaan kasata ja pystyttää eri tavoin, joista seuraavaksi neljä esimerkkiä. Manuaalisessa menetelmässä pylväs kootaan alhaalta alkaen ylöspäin osa kerrallaan. Menetelmää käytetään erityisesti paikoissa, joissa raskaiden nostolaitteiden käyttö on mahdotonta maasto-olojen tai taloudellisten tekijöiden vuoksi. Toisessa menetelmässä pylväs kootaan maassa

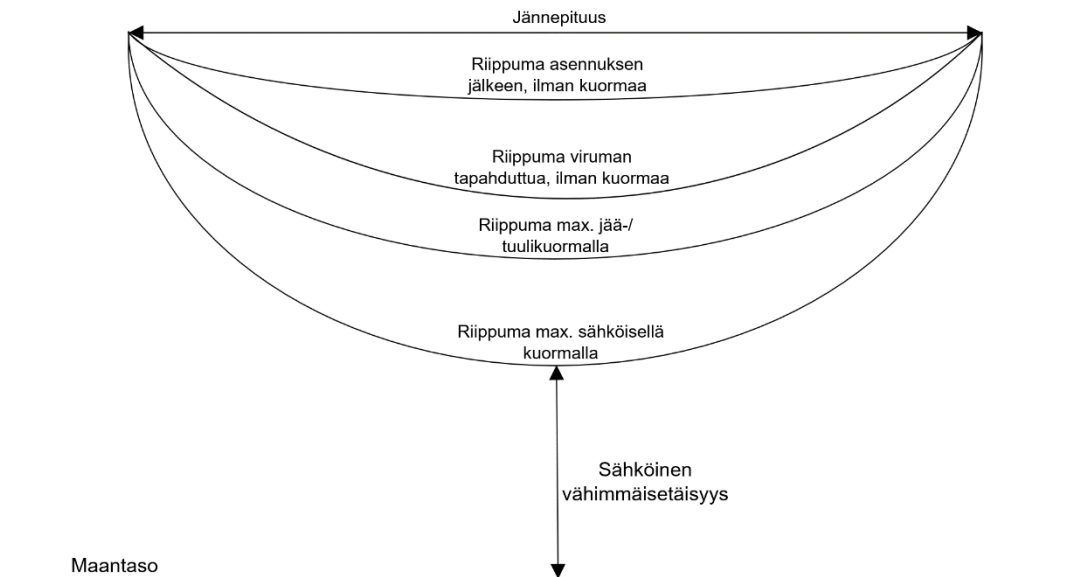
osissa, jotka sitten nostovälineillä pystytetään. Pylväs voidaan kasata myös kokonaan maassa, jonka jälkeen se kallistetaan ja nostetaan pystyyn. Tätä menetelmää käytetään etenkin kevytrakenteisempien harustettujen pylväiden pystytyksessä tasaisella maalla. Voimajohtopylväs voidaan kasata myös muualla kuin voimajohtoalueella, josta se sitten kuljetetaan pylväspaikalle. Menetelmää voidaan käyttää kevytrakenteisille pylväille etenkin vaikeakulkuisessa maastossa. Pylvään kasauksessa on huolehdittava tasaisesta alustasta, jotta pylväs rakenne pysyy suorana eikä siihen synny vääntymiä tai painaumia. Nostovälineinä pylvään pystytyksessä voidaan käyttää esimerkiksi raskashelikoptereita ja ajoneuvonostureita. Pylvään stabiliteetista on huolehdittava koko pystytyksen ajan. Pylväiden kiinnitykset ja harusten kireydet asennetaan pystytysvaiheessa esikiristykseen, jotka loppuvaiheessa kiristetään lopulliseen kiristysmomenttiin pylväs rakenteen yläosasta aloittaen. Harukset kiristetään vielä uudelleen vuoden päästä kesällä johtimien asennuksesta. [4:15.5, 21]

Eristimien käsittely vaatii erityistä huolellisuutta ja ne on tarkastettava vaurioiden varalta ja puhdistettava ennen kasaamista ja asentamista. Eristin ketjut voidaan kiinnittää pylväeseen ennen sen pystytystä pilottijohto mukana tai vasta pystyssä olevaan pylväeseen, tilanteesta riippuen. Eristin ketjuihin kiinnitetään johtimien vetoa varten johdin veto pyörät. Johtimien vedon aikana pitäisi kiinnittää huomiota, että eristimiin ei vaikuta vääntäviä tai taivuttavia voimia. Kannatus pylväiden eristin rakenteiden pitäisi antaa heilua vapaasti ja myötäillä johdin vetopyörien liikettä. [6:8]

### 3.3 Johtimien veto

Ennen johtimien vetoa täytyy määrittää kiristystilanteen riippuma riippuma-jännityslaskelmilla, jotta johtimet kestävät niille määritetyt kuormat eikä riippuma aiheuta sähköisten vähimmäisetäisyyksien alituksia. Laskelmat tehdään kaikille kuormitustapauksille perustuen EDS-tilaan (everyday stress). Suomen NNA ohjeistaa käyttämään laskelmissa hyperbolista kaavaa, jossa johdin käsitellään köysikäyränä. Alle 500 metrin mittaisilla jän-teillä voidaan käyttää myös paraabelikaavaa. Riippuma määritetään ekvivalenttijänteen perusteella eri lämpötiloille ottaen huomioon viruman. NNA ohjeistaa käyttämään ukkos-johtimien ja tukieristimiin kiinnitettyjen virtajohtimien laskelmissa ekvivalenttijänteen sijaan todellista jännepituutta. Riippumaan vaikuttaa lisäksi jänteen pituus,  $\Sigma Y$  sekä johti-men vedon aikana tapahtunut viruma. Johtimet kiristetään asennuksessa ylijännitykseen, koska johdinmateriaali viruu nimelliseen jännitykseensä kuukausien tai vuosien aikana. Virumisen aikana ei oleteta tapahtuvan äärimmäisiä sääilmiöitä ja näistä johtuvia kuormia johtimille, jotka vaikuttaisivat virumaan. Johtimen vedon aikana lämpötilaa ja

jännitystä tulee seurata jatkuvasti, jotta lopullinen jännitys on oikea. Jotta sähköiset vähimmäisetäisyydet toteutuvat, lopulliseen riippumaan ja sitä kautta asennettavaan jännitykseen vaikuttaa kuvan 9 mukaisesti viruman lisäksi mitoitettujen tuuli- ja jääkuormien sekä sähköisen kuormituksen maksimiarvot. [4:15.6, 12:29.1, 28:10.5, 45:4.12]



**Kuva 9.** Johtimen riippuman muodostuminen [48:2, vapaa suomennos.]

Johtimen veto voidaan tehdä löysänä tai kiristyksessä. Johtimen vedossa voidaan myös käyttää helikopteria. Löysänä vedettävä johdin vedetään kelalta pylvään kohdalle maassa, josta se nostetaan ja kiinnitetään. Löysänä vetoa ei juurikaan käytetä suurjännitteisten voimajohtojen asennuksessa, koska siinä johdin altistuu vaurioille ja sen seurauksena on alttiimpi koronailmiölle. Alemmilla jännitetasoilla pienet vauriot johtimien pinnassa eivät ole niin kriittisiä, koska alle 110 kV jännitteillä ei esiinny koronailmiötä. Johtimien kireänä vetoa käytetään yleisesti siirtovoimajohtojen asennuksessa, ja se on myös Fingridin vaatima vetotapa. Siinä vedettävä johdin on jatkuvassa kiristyksessä eikä se pääse kosketuksiin maan kanssa. Ensin vedetään pilottijohto eristinketjujen päässä olevien johdinvetopyörien läpi koko kiristysvälille. Pilottijohdolla kiristysvälille vedetään paksumpi vetojohto, jonka ohjauksessa johtimet vedetään ohjauslaudan, niin kutsutun krokotiilin, välityksellä. Krokotiilin tehtävänä on pitää johtimet suorassa ja järjestyksessä sekä estää niiden kiertyminen. Kuvassa 10 näkyy johtimet vedettynä johdinvetopyörille. Johtimet vedetään yhdelle kiristysvälille kerrallaan. Kiristysvälin toisessa päässä on vetokone ja toisessa jarrukone, jotka pitävät johtimen sopivassa, hallittavassa kireydessä.



**Kuva 10.** Virtajohtimet vedossa johdinvetopyörällä 400 kV johdolla.

Kiristysvälin ollessa usein pidempi kuin kelassa oleva johdin, joudutaan johtimille tekemään jatkokset. Fingrid käyttää yleensä räjäytettäviä johdinjatkoksia ja erikoistapauksissa puristettavia. Kun johdin on vedetty koko kiristysvälille, sen toinen pää kiinnitetään eristinketjun kiinnikkeeseen ja se kiristetään oikeaan jännitykseen toisesta päästä. Tämän jälkeen johtimet voidaan kiinnittää välissä oleviin kannatuspylväisiin. Kiinnitettyihin johtimiin asennetaan värähtelynvaimentimet, välisiteet ja muut varusteet. Johtimia ei voida asentaa yhtä aikaa, mikä aiheuttaa voimajohtorakenteille mitoituksessa huomiotavia toispuolisia kuormia. Jotkin pylväsrakenteet voivat vaatia tilapäisen taakauksen johtimien vedon ajaksi. [4:15.6, 5:2.1, 28:4.2-5, 45:4.12]

### 3.4 Testit ja tarkastukset

Voimajohtokomponenttien ja käytettävien materiaalien laatu varmistetaan erilaisilla testeillä ja tarkastuksilla. Tyypitesteillä varmistetaan suunnitellun komponentin toimivuus. Kriittisten materiaalien ja komponenttien, kuten pylväiden, johtimien, eristimien ja varusteiden, tyypitestiä täytyy olla hyväksytty ennen kuin niitä valmistetaan ja asennetaan Fingridin voimajohtoprojekteissa. Fingrid edellyttää tyypitestiä suorittamista valtuutetussa laboratorioissa. Standardit ohjeistavat tyypitestiä vaatimuksista voimajohtojen eristimille ja varusteille, jos testit on projektispesifikaatiossa vaadittu. Tyypitestiä täytyy täyttää erillisten standardien vaatimukset. Standardityypitestiä lisäksi rakenteille

voidaan suorittaa lisätyyppitestejä, joita ovat esimerkiksi radiohäiriö-, liansieto-, jäännöslujuus- ja valokaarikestoisuustesti. Pylväät, eristinketjut ja kaikki aiemmin käyttämättömät rakenteet täytyy koekasata, jotta varmistetaan niiden sopivuudesta. Pistotesteillä pyritään varmistamaan, että valmistuserä täyttää vaatimukset testaamalla satunnaisesti valittuja näytteitä toimituserästä. Rutiinitesteillä valmistusprosessin aikana pyritään tunnistamaan ja poistamaan vialliset materiaalit ja komponentit testaamalla kaikki valmistetut yksiköt. Työmaalla tehtävillä hyväksymistesteillä varmistetaan vaatimusten täyttymiset esimerkiksi liitosten ja maadoitusresistanssien osalta. [21, 44:10]

Komponenttien ja materiaalien vaatimusten täyttymistä varmistetaan myös tarkastuksilla eri vaiheissa. Valmistuksen aikaisissa tarkastuksissa todetaan, että valmistus tapahtuu standardien ja valmistajan laadunvarmistusmenetelmien mukaisesti. Asennustöiden tarkastuksissa varmistetaan urakoitsijoiden vaatimusten mukainen työskentely. Luovutus-tarkastus tehdään asennustöiden ja hyväksymistestin päätyttyä. Voimajohtoon käyttöönotto-tarkastus tehdään juuri ennen sen käyttöön kytkemistä. Lisäksi kaikille sähköasennuksille on tehtävä varmennustarkastus viimeistään 6 kuukauden kuluttua käyttöönotosta. Takuuajan loputtua tehdään takuutarkastus. [21]

Fingridin voimajohtopylvästyypit testataan rikkoontumiseen saakka, jotta voidaan määrittää materiaalin käyttäytyminen ja rakenteen suorituskyky. Testissä täytyy varmistaa, että itse pylväsrakenne säilyy rikkoontumatta ennen viimeistä mitoittavaa kuormitustapausa. Esimerkiksi ukkospukki voi taipua varmuuskuormituksella, vaikka kyseinen kuormitustapaus ei olisi kriittinen muun pylväsrakenteen kannalta. Pylvästyypistä riippuen testissä käytettävä kuorma on 1,0- tai 1,1-kertainen murtorajatilan kuormasta. Käytännössä Fingridin testatut rakenteet ovat kestäneet nämä kuormat, jolloin testit on lopetettu turvallisuussyistä ennen rakenteen sortumista. Testissä testataan kuormatapaukset, jotka aiheuttavat kriittisimmän kuorman pylvään orrelle, jaloille, ukkospukeille ja haruksille. Myös turvallisuus- ja varmuuskuormat testataan. Mittauksia testissä tehdään venymäliuska-anturilla ja dynamometrillä. Lisäksi pylväiden teräksille tehdään materiaalitestejä ja -mittauksia tehdastesteissä. [21, 36]

Lasieristinketjuille tehdään Fingridin ohjeiden mukaan tyyppi-, pisto- ja rutiinitestejä. Eristinketjujen osat testataan erikseen ja yhdessä eristinketjukokonaisuutena. Testeillä varmennetaan yksikön mitat, siirtymät, galvanointi, metalliosien kovuus ja lukkiutumismenetelmä sekä testataan mekaanisen lujuuden ja lämmön kesto. Eristinketjuille tehdään jännitelujuustestit eri jännitemuodoilla, jotta saadaan selville jännitelujuus kuivana ja saateessa. Eristinketjut testataan myös oikosulkuvoimien kestoisuuden ja radiohäiriöjännit-



teiden suuruuden varmentamiseksi. Mahdollisuuksien mukaan tyyppitesteissä eristinketjun lisäksi olisi hyvä olla johtimet, pylvään orsirakenne sekä tarvittavat varusteet. Komposiittieristinsauvoille tehdään tyyppi-, pisto- ja rutiinitestien lisäksi myös suunnittelutestejä. Suunnittelutesteillä varmistetaan eristimen suunnittelun, materiaalien ja valmistusmenetelmien soveltuvuus. Komposiittieristinsauvat tyyppitestataan samoin kuin lasieristinketjut, ja lisäksi testataan eristimien koronakestoisuus kuivassa ja pisaraolosuhteissa. Komposiittieristimet testataan myös vesidiffuusio- ja vetotesteillä. [21]

Virta- ja ukkosjohtimille Fingridin voimajohdoilla tehdään tyyppi-, pisto- ja rutiinitestit. Testeillä johtimista määritetään ja varmennetaan niiden kertauksen pituus ja suunta, poikkipinta, inertti, DC-resistanssi, alumiinin ja teräksen noususuhteet, johdinlankojen lukumäärä ja tyyppi, massa, jännitysvenymäkäyrä, vetolujuus sekä veto- ja riippumaominaisuudet. Lisäksi johdinlangoista testataan erikseen esimerkiksi vetolujuudet. OPGW-johtimille tehdään edellisten lisäksi myös testejä veden läpäisevyydestä, lämpötilan vaihtelusta, oikosulun ja salamaniskun vaikutuksista. Lisäksi valokuidut ja johdinlangat testataan erikseen. [21]

Kaikkien Fingridin voimajohtovarusteiden tulee läpäistä niille määritetyt testit. Johdinliitosten resistanssit mitataan aina ja lisäksi voidaan testata mekaaninen lujuus ja rakenne. Eristin- ja johdinvarusteet testataan tyyppi-, pisto- ja rutiinesteillä, joilla varmistetaan niiden suunnitellut ominaisuudet, galvanoinnit, lukitukset ja kytkennät sekä niiden kestävyys korona- ja radiohäiriöissä, lämpötilamuutoksissa, vedossa, käyttö- ja murtorajatilojen kuormissa. Värähtelynvaimentimet ja välisiteet testataan tyyppi- ja pistotesteillä, joilla varmistetaan esimerkiksi mitat ja materiaaliominaisuudet ja erilaiset niihin vaikuttavat mekaaniset ja sähköiset kuormat. Fingridin voimajohtojen suunnittelussa ja rakentamisessa on paljon vaatimuksia, joista tässä työssä on keskitytty lujuuteen liittyviin. Esimerkiksi teräsosien sinkityksellä, vaimentimien ominaisuuksilla ja komponenttien iskukestävyysvaatimuksilla pyritään pidentämään voimajohdon käyttöikä. [21]

## 4. VOIMAJOHDON KUORMAT

Voimajohtoon vaikuttaa pysyviä, muuttuvia ja satunnaisia mekaanisia kuormia. Pysyvää kuormaa aiheuttaa rakenteiden oma ja siihen liitettyinä olevien komponenttien paino. Muuttuvat kuormat määritetään tilastollisin tai kokemusperäisin menetelmin. Muuttuvia kuormia on esimerkiksi jää- ja tuulikuormat sekä johtimien kiristyksestä aiheutuvat kuormat. Satunnaisia kuormia voivat olla esimerkiksi johtimien katkeamiset ja lumivyöryt. Kuormille altistuvat voimajohdon komponentit täytyy mitoittaa lujuudeltaan kestämiin mitoitettuihin kuormiin. [4.13, 44:3.5]

Eurooppalainen standardi määrittää velvoittavat mitoituksen standardikuormitustapaukset, joita ovat tuulikuormat, yhdenmukaiset ja toispuoliset jääkuormat eri taivutuksilla, yhdistetyt tuuli- ja jääkuormat, minimilämpötila tuulella tai ilman, vääntävät ja johdon suuntaiset varmuuskuormat sekä turvallisuuteen liittyvät rakentamisen ja kunnossapidon kuormat. Ilmastollisten kuormien vaikutuksia määritetään kaikille pylvästyypeille. Tilapäiset asennuskuormat ovat NNA:ssa määritetty johtimien vedon eri vaiheille, joissa syntyy toispuoleisia kuormia. Näitä eri asennuskuormia sovelletaan kannatus-, kiristys-, päätte- ja sarjasortumisia estäville pylväille. Lisäksi kannatuspylväille sovelletaan varmuuskuormitus. Suomen NNA lisää kuormitustapauksiin myös huippujään ja lumen yhdistelmän. [44:4.12, 45:4.13]

### 4.1 Ilmastolliset kuormat

#### 4.1.1 Tuulikuorma

Tuuli aiheuttaa voimajohdon eri osille kuormia. Tuuli on ilman liikettä ja se kohdistaa voiman kaikkeen pintaan, johon se on kosketuksissa. Voimajohdon kaikki maanpinnan yläpuoliset komponentit ovat alttiita tuulen vaikutuksille, ja kaikkien rakenteiden ollessa liitettyinä toisiinsa myöskään maan alla olevat perustukset eivät säästy tuulikuormilta. Eri kuormitustapauksia varten Suomen NNA antaa eri tuulille määritelmät. Huipputuuli on 50 vuoden toistumisajan tuulikuorma, johon vaikuttaa puuska, maasto, korkeus ja lämpötila. Kova tuuli määritetään olevan 70 % huipputuulen arvosta, tai 45 % erikoistapauksissa. Nimellistuuli on 0,4-kertainen huipputuulen arvo ja erikoistapauksissa voidaan käyttää kerrointa 0,25. [45:4.13]

Tuulen voimajohdolle aiheuttamiin kuormiin vaikuttaa maastonmuodot ja standardit määrittelevät tuulikuorman mitoitukseen maastoluokat. Kansainvälinen standardi IEC 60826

määrittää maastoluokat A-D yleispiirteisesti laakeista rannikkoalueista kasvavan määrän esteiden alueisiin aina asuinlähiöihin ja tiheisiin metsiin. EN-50341-1 on jakanut maastoluokat tarkemmin viiteen eri luokkaan. Maastoluokka 0 käsittää meri- ja avomeren rannikkoalueet. Järvet ja tasangot, joissa ei ole merkittävää kasvillisuutta, kuuluvat maastoluokkaan I. Matalan kasvillisuuden ja vähintään 20 kertaa korkeutensa pituisten etäisyyksien välein olevien yksittäisten esteiden alueilla ollaan maastoluokassa II. Maastoluokka II on määritetty Suomen NNA:ssa perusmaastoksi. Luokkaan III kuuluu alueet, joissa esteitä on tiheämmin kuin luokassa II, esimerkiksi taajamat ja pysyvät metsät. Suomen oloissa soveltumattoman luokan IV alueiden aloista vähintään 15 % on keskimäärin yli 15 metrin korkuisia rakennuksia. Standardi antaa kullekin maastoluokalle karheuden pituuden ja maastokertoimen. Suomen NNA lisää maastoluokkiin vielä luokan 0+ käsittäen suojaisat rannikkoalueet ja sisäsaariston sekä luokan II+, johon kuuluu sisämaan vaihtelevan maaston alueet. [27:6.2, 44:4.3]

Tuulikuormaa määrittäessä täytyy ensin määrittää maan pinnasta mitatulle vertailukorkeudelle  $h$  keskituulennopeus  $V_h(h)$  ja -paine  $q_h(h)$  sekä turbulenssin tiheys  $I_v(h)$  ja puuskatuulenpaine  $q_p(h)$ . Keskituulennopeuteen tietyllä vertailukorkeudella vaikuttaa perustuulennopeus (Suomessa yleisesti 21 m/s), tuulen suuntakerroin, maaston karheuden pituus ja muotokerroin. Tietyn vertailukorkeuden keskituulenpaineeseen vaikuttaa ilman tiheys ja keskituulennopeus. Turbulenssin tiheys tietyllä vertailukorkeudella saadaan määritettyä maaston muotokertoimen ja karheuden pituuden avulla. Puuskatuulenpaine saadaan laskettua keskituulenpaineesta ja turbulenssin tiheyden kautta. [44:4.3]

Yleisesti voimajohdon komponenttiin kohdistuva tuulikuorma voidaan määrittää kansainvälisen standardin mukaan voimana pinta-alaa kohti nimellistuulennopeuden, ilmanpaineen, ilmantiheyden, maastokertoimen, komponentin muotokertoimen ja rakenteellisen kertoimen avulla. Nimellistuulennopeus määritetään 10 minuutin keskiarvona yli 10 metrin korkeudella. Eurooppalainen standardi sen sijaan määrittää voimajohtokomponenttiin vaikuttavan tuulikuorman 50 vuoden toistumisajan voimana, joka ottaa huomioon puuskatuulenpaineen tietyllä vertailukorkeudella, komponentin rakenteellisen kertoimen ja muotokertoimen sekä komponentin projektiopinta-alan. Näistä yleisistä kaavoista johdetaan tuulikuormien laskeminen yksittäisille komponenteille. Nämä tarkemmat tuulikuorman kaavat ottavat huomioon myös tuulen suunnan kulmana tuulen ja komponentin välillä. Yleisesti Suomessa tuulikuormat lasketaan tuulen suunnan kulmille  $0^\circ$ ,  $\pm 20^\circ$  ja  $\pm 45^\circ$  NNA:n mukaan. Jos tuulen suuntaa ei voida määrittää, mitoitetaan tuulikuormat  $90^\circ$  kulman tuulensuunnalla. [27:6.2, 44:4.3, 45:4.13]

Voimajohdon virtajohtimiin kohdistuu tuulenpaineen vaikutuksesta poikittaisia voimia ja jännitysten kasvua. Tuulen vaikutuksesta virtajohtimet alkavat myös värähdellä ja heilua, mikä aiheuttaa rasittavia voimia johtimien kiinnikkeille ja tilapäistä etäisyyksien pienenemistä. Värähtelyn vaikutuksia pienennetään värähtelynvaimentimilla johtimilla lähellä kiinnityskohtia. Etäisyyksiä mitoittaessa on otettava huomioon johtimia mahdollisesti heiluttavat tuulikuormat. Johtimien tuulikuorma lasketaan orren suuntaisesti ja orren suuntaan kohtisuorasti. Tuulikuorman suuruuteen vaikuttaa puuskatuulenpaine, johtimen vertailukorkeus, rakenteellinen kerroin, muotokerroin, halkaisija, tuulijänne, tuulen suunnan kulma orteen nähden ja johdon suuntakulman muutos. [27:6.2, 44:5.4]

Eristimiin vaikuttaa tuulikuormaa johtimien välityksillä sekä tuulenpaineen vaikutuksesta eristinrakenteeseen. Eristimiin vaikuttavan tuulenpaineen aiheuttamaan tuulikuormaan vaikuttaa puuskatuulenpaine, vertailukorkeus, rakenteellinen ja vastuskerroin (yleensä 1,2) sekä eristimen projisoitu pinta-ala. Projisoitu pinta-ala saadaan laskettua eristinketjun tai -sauvan mitoista ja tuulen ja eristimen välisen kulman arvosta. [44:4.4, 45:4.4]

Tuuli aiheuttaa voimajohtopylväisiin kohdistuvia kuormia johtimien ja eristinten välityksellä, mutta myös pylväsrakenteet itsessään ovat alttiita tuulikuormille. Eurooppalainen standardi esittää pylväiden tuulikuormien laskentaan kaksi menetelmää. Ensimmäisessä pylväs jaetaan osiin ja vastuskertoimen lisäämisellä runko-osien tasoihin otetaan huomioon suojavaikutukset, eli että kaikkiin osiin tuuli ei vaikuta yhtä voimakkaasti. Toisessa menetelmässä pylvään sauvoja käsitellään erikseen ja vastuskertoimella ei huomioida suojavaikutuksia. Toinen menetelmä soveltuu erityisesti epäsäännöllisen muotoisille pylväsrakenteille. Suomen NNA opastaa käyttämään ensimmäistä menetelmää määriteltäessä tuulikuormia ristikko- ja putkipylväille. Ristikkopylväsrakenteisiin suoraan vaikuttava tuulikuorma lasketaan puuskatuulenpaineesta, vertailukorkeudesta, rakenteellisesta kertoimesta (NNA:ssa arvona 1,0) ja vastuskertoimista, tehollisista pinta-aloista sekä tuulen suunnan kulmasta orteen nähden. Putkipylväiden tuulikuormaa laskettaessa huomioidaan puuskatuulenpaine, vertailukorkeus, rakenteellinen ja vastuskerroin sekä projektiopinta-ala. Putkipylvään vastuskertoimen suuruuteen vaikuttaa poikkileikkauksen muoto. [44:4.4, 45:4.4]

Johtimen laukkaaminen tai tanssiminen (englanniksi galloping) on suuriamplitudista ja matalataajuista heiluntaa. Laukkaaminen on matalaturbulenttisen tuulen aiheuttamaa dynaamista kuormaa voimajohdolle. Laukkaamista aiheuttaa johtimen poikkileikkauksen aerodynaaminen epävakaas, esimerkiksi epäsymmetrisen jääkertymän vuoksi. Laukkaaminen voi aiheuttaa voimajohdolla oiko- ja maasulkuja johtimien osuessa toisiinsa,

pysyviä venymiä, väsymiä ja vaurioita johtimiin ja varusteisiin sekä pahimmillaan pylväs-rakenteiden sortumisia. Johtimien laukkaaminen voi aiheuttaa suuria kohtisuoria ja pitkittäisiä kuormia pylväille. Laukkaamisen vaikutuksia voidaan lieventää sivuunvirittävillä heilureilla, välisiteillä, ilmavirran ohjaimilla, vaimentimilla ja kierteisillä painoilla. [1:3.5, 4:10.5]

#### 4.1.2 Jääkuorma

Jääkuormalla tarkoitetaan voimajohdon komponentteihin kertyvää jäätä. Standardit määrittävät kaksi ilmastollista jäätymistyyppiä jäänmuodostumistavan mukaan: jäätävä sade ja huurrejää. Jäätävän sateen aiheuttama jää voi olla märkää lunta tai kirkasta jäätä. Huurrejää on pehmeää tai kovaa huurretta. Jääkuorma on satunnainen muuttuja ja sen määrittämiseen on käytettävä tilastollisia jäätietoja tai kokemusperäistä tietoa. Jääkuorman muodostumiseen vaikuttaa merkittävästi maasto-olosuhteet. Jääkuorman yksikkönä käytetään tyypillisesti Newtonia johtimen pituusyksikköä kohti (N/m) tai kertyneen jään säteittäisenä paksuutena millimetrejä. Suomen NNA määrittää ominaisjääkuormat johtimille taulukon 2 jäätymisluokan mukaan, joka määräytyy rakenteen suhteellisen korkeuden mukaan. Suhteellisella korkeudella tarkoitetaan johtimen ja ympäröivän maaston keskimääräisen tason korkeuseroa. Eri kuormitustapauksia varten Suomen NNA antaa eri jäätyypeille määritelmät. Huippujää on 50 vuoden toistumisajan jääkuorma eli ominaisjääkuorma ja nimellisjää on 35 % huippujään arvosta, tai erikoistapauksissa 25 %. [27:6.3, 44:4.5, 45:4.5-13]

Taulukko 2. Johtimen jääkuorma [45:4.5.]

Jäätymisluokka	Suhteellinen korkeus (m)	Ominaisjääkuorma $I_{50}$ (N/m)	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Vastuskerroin	Jään tyyppi
I	0...50	10	500	1,15	huurre
II	50...100	10...25	500	1,15	huurre
III	100...200	25...50	500	1,15	huurre
IV	> 200	> 50	500	1,5	huurre

Jääkuormaa kertyy lähinnä johtimiin, etenkin ukkosjohtimiin. Ukkosjohtimissa ei synny niiden pääasiallisen sähköisen kuormittamattomuuden takia lämmittäviä virtalämpöhäviöitä, joten niiden lämpötila on usein sama kuin ympäröivän ilman. Kuormitetuissa virta-

johtimissa syntyy virtalämpöhäviöitä, joten niihin ei kerry samalla tavalla jäätä. Luonnollisesti kuormittamattomaan tai vähänkuormitettuun virtajohtimeen voi alkaa sopivissa oloissa kertyä jääkuormaa. Jääkuormat johtimissa aiheuttavat pystyvoimia ja lisäävät johdinjännityksiä. Ongelmallista jääkuormissa on etenkin se, että jäätä kertyy vain ukkosjohtimiin, joiden riippuma kasvaa jään painosta. Suomessakin on useita tapauksia, joissa jääkuorman venyttämät ukkosjohtimet ovat roikkuneet virtajohtimien alapuolella. Johdin kyllä tiettyyn riippuman rajaan asti palautuu kuorman poistuttua, mutta ukkosjohtimen osuttua virtajohtimeen syntyy maasulku. Johtimet eivät myöskään kestä ääretöntä jäästä aiheutuvaa lisäpainoa, joten jääkuorman poisto on tärkeää. Voimajohdon pylväiden ja perustusten mitoituksessa tulee kiinnittää huomiota jään kertymisen aiheuttamiin kohtisuoriin kuormiin sekä johtimien riippumatarkasteluihin [48:2.3.] Suomen NNA ohjeistaa jättämään huomiotta rakenteiden ja eristimien jääkuormat, ellei sitä erikseen vaadita. Niiden jääkuormia voidaan käsitellä samoin kuin johtimien, kunhan kiinnitetään erityistä huomiota niiden vastuskertoimiin.

Suomessa alueilla, joissa jääkuormaa kertyy tavanomaista enemmän, käytetään erityisiä kuvassa 11 näkyviä jääkuormapylväitä, joiden rakenteet ovat lujempia ja ukkospukit korkeampia. Näillä alueilla käytetään myös järeämpää ukkosjohdinta. Jääkuormapylväiden mitoituksessa käytetään jäätymislukon II ominaisjääkuormaa 20 N/m, kun yleisesti Fingridin voimajohdoilla käytetään jäätymislukkaa I. Suomessa on myös törmätty tapauksiin, joissa jäätä kertyy johtimelle ikään kuin spiraalimaisesti, kun jäätä kertyy aluksi johtimen yläosaan, joka sitten painostaan pyörähtää ja altistaa seuraavan kohdan johtimessa jään kertymiselle. Tämä ilmiö pyörittää johdinta aiheuttaen vääntävää voimaa johtimeen ja sen kiinnikkeisiin. Fingrid ja jakeluverkkoyhtiö Caruna pyrkivät ehkäisemään jääkuormien aiheuttamia vaurioita voimajohdoille asentamalla IoT-antureita (Internet of Things), jotka seuraavat ilman lämpötilaa ja johtimen kulmaa hälyttäen liian suurista riippumista. Ratkaisulla pyritään vähentämään jääkuormapartiointia. [8, 35]



**Kuva 11.** Jääkuormaa johtimissa ja jääkuormapylväs [35.]

Jääkuormaa voidaan poistaa johtimilta eri keinoin. Suomessa jäätä poistetaan esimerkiksi helikopterista eristinsauvan avulla tai maasta heitonarulla hankaamalla. Kansainvälisesti käytössä on myös muita keinoja jäänpoistoon, kuten johtimien lämmitys virran avulla, sähködynaamiset menetelmät suurilla jännite- tai virtaimpulsseilla tai lunta hylkivät renkaat. Poistettaessa jäätä johtimilta työ on suunniteltava huolella ja asennettava riittävät taakaukset, koska suuren jääkuorman äkillinen poistaminen voi johtaa rakenteita vaurioittaviin tai läpilyöntejä aiheuttaviin johtimien suuriin heilahteluihin. [4:10.3-4]

### 4.1.3 Yhdistetty tuuli- ja jääkuorma

Voimajohtokomponenttien kuormista on tarkasteltava myös kertyneen jään ja tuulen yhdessä aiheuttamia poikittaisia ja pystysuoria kuormia. Yhdistetyn tuuli- ja jääkuorman tarkastelussa huomioidaan tuulennopeus, kertyneen jään massa sekä sen muoto (=ekvivalentti halkaisija) ja vastaava vastuskerroin. IEC- ja EN-standardit esittävät yhdistetyn tuuli- ja jääkuorman käsittelyyn käytettäväksi menetelmää, jossa yhdistetään pienen todennäköisyyden ja huippuarvon yhdistämistä suuren todennäköisyyden ja matalaan arvoon. Näin saadaan kaksi käsiteltävää pääyhdistelmää: pienen todennäköisyyden huippujääkuorma yhdessä suuren todennäköisyyden tuulennopeuden kanssa sekä suuren todennäköisyyden nimellisen jääkuorman ja pienen todennäköisyyden tuulennopeuden yhdistelmä. [27:6.4, 44:4.6]

Jään kertyminen johtimeen kasvattaa sen poikkipintaa, jolloin siihen kohdistuu suuremmat tuulikuormat [48:2.3.] Kertynyt jääkerros on muodoltaan epäsäännöllinen, mutta se oletetaan tarkasteluissa sylinterin muotoiseksi, jotta saadaan määritettyä sen ekvivalentti halkaisija, ja näin johtimen jääkuorman vaikutuksesta kasvanut poikkipinta. Jääkuorma voisi myös aiheuttaa johtimeen isomman riippuman, jolloin se on alttiimpi suuremmille heilahteluille tuulessa. Kuten aiemminkin on mainittu, johtimen heilahtelut voivat aiheuttaa ylilyöntejä ja mekaanisia rasituksia voimajohtokomponenteille. Toisaalta tuuli voi myös helpottaa voimajohtojen kuormaa pudottamalla johtimelle kertyneen jään.

Äärimmäinen tuulen ja jään yhdistelmäkuorma voi syntyä jäämyrskyssä. Jäämyrskyt ovat romahduttaneet voimajohtopylväitä esimerkiksi Kanadassa ja Kiinassa. Kanadan Québecissa oli erityisen voimakas jäämyrsky vuonna 1998. Jäätävää sadetta kertyi voimajohtojen paikoin yli 100 mm, kun rakenteet oli mitoitettu kestäämään vain alle puolet siitä. Jääkuorma romahdutti voimajohtopylväitä dominoefektinä satojen kilometrien matkalta jättäen miljoonat ilman sähköä. Jäämyrskyn mittavat vahingot edistivät voimajohtosuunnittelun ja jäänpoistomenetelmien kehitystä Kanadassa. Kiinassa Jiangxissa vuoden 2008 jäämyrskyssä satoja voimajohtopylväitä sortui. Alueen voimajohtot ovat maankäytön rajallisuuden takia vuoristoalueilla, joissa jään kertyminen on voimakkaampaa. Pylväät sortuivat mitoitettua jääkuormaa jopa kolminkertaisen jääkuorman painosta. Jäämyrskyn syitä ja vaikutuksia tutkinut tutkijaryhmä [52] tiedosti, että voimajohtoja ei ole järkevää ylilimitoittaa kestäämään vastaavia jäämyrskyjä, vaan on panostettava verkon vahvistamiseen uusilla voimajohtojilla sekä kehitettävä entisestään jäänpoisto- ja -estomenetelmiä. [25, 52]

Myös Suomessa on ollut eräs tapaus, jossa voimajohtojen todellinen jääkuorma osoittautui standardissa mitoitettua jääkuormaa 10 kertaa suuremmaksi. Tässä tapauksessa ukkosjohtimiin kertynyt jääkuorma oli saanut ne riippumaan virtajohtimien alapuolelle. Pylväät kestivät kyseisen jääkuorman, mutta kovassa tuulessa olisi voinut syntyä muuta vahinkoa. Joihinkin paikkoihin johtimiin kertyy oletettua huomattavasti enemmän jääkuormaa, josta saadaan tietoa lähinnä kokemusperäisesti. Kunhan poikkeuksellista jääkuormaa kerryttävät paikat ovat etukäteen tiedossa, voidaan äärimmäisiin jääkuormiin varautua erityisillä jääkuormapylväillä tai järeämmillä ukkosjohtimilla. Äärimmäinen jääkuorma on romahduttanut myös Suomessa teräspylväsrakenteen, tosin kyseessä oli korkea ja kapea tv-masto vuonna 1970. Ylläs-tunturin päällä seisseen maston ekvivalentti halkaisija oli lähes kaksinkertaistunut jääkuormasta ja masto oli romahtanut. Voimajohtojen teräsristikkorakenteissa sauvat eivät ole yhtä tiheästi kuin mastoissa, joten niihin ei kerry jäätä samalla tavalla.



#### 4.1.4 Lämpötilavaikutukset kuormiin

Seuraavissa kuormanmitoitustilanteissa otetaan huomioon lämpötilan vaikutukset: minimilämpötila yhdistettynä nimelliseen tuulennopeuteen tai ilman muita ilmastollisia kuormia, normaali vertailulämpötila huipputuulennopeuden esiintyessä, yleisesti oletettava 0°C lämpötila jäätyksen yhteydessä, myös alemmat lämpötilat, jos lämpötilan voidaan olettaa laskevan lumisateen jälkeen sekä lämpötila, jota käytetään yhdistetyn jää- ja tuulikuorman yhteydessä. Suomessa esiintyvät minimilämpötilat (°C) on määritetty NNA:ssa taulukon 3 mukaisesti. Lämpötila-alueen soveltuvuus ja lämpötila-arvojen poikkeamat voidaan tarkentaa projektikohtaisesti. Fingridin teknisissä eritelmissä minimilämpötilana johtimien kuormien mitoituksessa käytetään yleisesti lämpötilaa -55°C. [21, 44:4.7, 45:4.7]

Taulukko 3. Sovellettavat minimilämpötilat (°C) Suomessa eri luotettavuustasoilla [45:4.7.]

Lämpötila-alue	Luotettavuustaso 1	Luotettavuustaso 2	Luotettavuustaso 3	3 vuoden arvo
Etelä-Suomi	-40	-45	-50	-30
Keski-Suomi	-45	-50	-55	-36
Pohjois-Suomi	-50	-55	-60	-42

#### 4.1.5 Suomen NNA:n erikoiskuormat

Yhdistetty lumi- ja jääkuorma on Suomen NNA:n erikoisuus, jota syntyy jään muodostumisen alkuvaiheessa, kun lunta ja jäätä alkaa kertyä johdolle eikä esimerkiksi tuuli ole ehtinyt pudottaa sitä. Tämä tuo voimajohdon kuormaan johdintyyppistä ja paikallisista olosuhteista riippuvan lisäkertoimen  $\Psi_i$ , jonka suuruus on 1,0 ja 3,0 välillä. Jään ja lumen yhdistelmäkuorma on osoittautunut usein mitoittavaksi kuormaksi määrittäessä ukkos- ja virtajohtimien välisiä etäisyyksiä Fingridin voimajohdoilla. [36, 45:4.13]

Suomen NNA:han on ehdotettu valinnaisen erikoisjääkuormatapauksen lisäämistä. Ehdotus syntyi, kun Naantalissa vedenylityspylväät olivat sortuneet toispuolisen jääkuorman takia. Erikoisjääkuorma toisi mitoitukseen yhdistelmäkerroimen  $\Psi_i$  arvoksi vähintään 2,0. [41]

## 4.2 Varmuuskuorma

Varmuuskuormalla taataan voimajohdon suuntainen kestävyys ja pylväiden vääntökestävyys, kun varaudutaan johtimen katkeamiseen tai muihin toispuoleisiin kuormiin. Varmuuskuormaa onkin perinteisesti käsitelty johdin poikki -kuormana. Varmuuskuorma huomioimalla pyritään estämään voimajohdon sarjasortuminen, etenkin johdoilla, jotka ovat tärkeitä, altistuvat merkittävälle jääkuormille tai ylittävät vesistöjä. Näihin paikkoihin voidaan myös lisätä varmuuskuormaa entisestään lisäkertoimilla, mitoittamalla erillisiä sarjasortumisia estäviä pylväitä ja huomioimalla ilmasto-olosuhteet. [27:6.6, 44:4.8]

Virta- tai ukkosjohtimen katkeaminen aiheuttaa pitkittäisiä ja vääntäviä kuormia voimajohdolle, jotka pahimmillaan voivat aiheuttaa sarjasortumisen kiristysvälille. Johtimen katkeamisesta aiheutuu jänteeseen löysää, josta seuraa epätasainen kuorma voimajohdolle. Tarpeeksi suuri epätasainen kuorma voi aiheuttaa pylvään sortuman, joka edelleen aiheuttaa viereiselle pylväälle epätasaisen pitkittäisen kuorman ja voi kaataa sen. Koko voimajohdon sarjasortuminen pyritään estämään mitoittamalla kiristyspylväät tai erityiset sarjasortumisen estävät pylväät kestäväksi viereisen sortuneen pylvään aiheuttama kuorma. Kaikkia pylväitä ei ole taloudellista mitoittaa kestäväksi sarjasortumista, sen ollessa kuitenkin melko harvoin esiintyvä vika. Sarjasortumisia estävien rakenteiden käyttöä voisi olla syytä harkita myös johtimen vedossa, jossa syntyy väistämättä toispuoleisia kuormia. Sarjasortumia voidaan estää mitoittamalla voimajohtopylvään orsi tai ukkospuikki kestäväksi pienempää pitkittäistä kuormaa kuin muu pylväs rakenne, jolloin ne vaurioituvat jättäen pääosan pylvästä vahingoittumattomaksi. [1:liite I, 44:4.8]

Vääntökestävyyttä mitoitetaan staattisella jäännöskuormalla johtimen kiinnityskohtaan, kun jokin viereisen jänteen johdin löystyy jännityksestään. Staattisen jäännöskuorman määrittämisessä ei huomioida poikkeavia lämpötiloja tai tuuli- tai jääkuormia, ellei erikseen määritellyt. Suomessa ei käytetä staattista jäännöskuormaa, vaan kyseinen kuormitus mallinnetaan lisäämällä yhden osajohtimen EDS-kuorma. Myöskään johdon suuntaisen varmuuskuorman mitoituksessa ei normaalisti huomioida poikkeuksellisia sääoloja. [27:6.6, 44:4.8]

## 4.3 Turvallisuuskuorma

Voimajohdon turvallisuuskuormiin kuuluu rakentamisen ja kunnossapidon kuormat. Voimajohtorakenteiden tulee kestää riittävällä varmuusmarginaalilla mitoitettuja turvallisuuskuormia huomioiden työmenetelmät, väliaikaiset harustukset ja nostojärjestelyt. Kaikki askelmat, kulku- ja työtasot, orret ja muut kiivettävät sauvat on mitoitettava kestäväksi asentajien painosta aiheutuva yleisesti mitoitettu 1,0 kN suuruinen turvallisuuskuorma.

Kansainvälisessä standardissa annetaan asentajien painosta aiheutuvalle kuormalle arvo 1,5 kN. [27:6.5, 44:4.9]

Kansainvälinen standardi erittelee tarkemmin eri rakennusvaiheissa huomioitavat turvallisuuskuormat. Voimajohtopylväiden pystytyksestä aiheutuvat kuormat tulisi huomioida rakenteiden ja etenkin nostokohtien lujuuksien mitoittamisessa. Johtimien vedosta ja riippumisesta aiheutuu huomioon otettavia johdinjännityksiä, kohtisuoria kuormia kiinnitys- ja jännityskohtiin, poikittaisia kuormia kulmapylväille, väliaikaisiin päätepylväisiin pitkittäisiä ja harustettujen pylväiden tapauksessa myös poikittaisia kuormia sekä pitkittäisiä kuormia kannatuspylväisiin. Asennustöitä, etenkin kiipeämisiä, pyritään välttämään tuulisina hetkinä, joten turvallisuuskuormia mitoittaessa voidaan tuulikuormat jättää huomiotta. Suomen NNA:ssa rakentamisen ja kunnossapidon turvallisuuskuormissa käytetään -20°C lämpötilaa. [27:6.5, 45:4.13]

## 5. VOIMAJOHDON SUUNNITTELU

### 5.1 Suunnitteluperiaatteet

Yleisesti kansainvälisen standardin mukaisesti järjestelmän suunnitteluperiaatteena voidaan pitää kaavan (1) mukaista ajatusta, että kuormituksen tulee olla pienempi kuin mitoitettu lujuus. Lisäämällä kuormaa myös komponentin lujuutta täytyy lisätä.

$$\gamma_U Q_T < \Phi_R R_C, \quad (1)$$

jossa  $\gamma_U$  on kuormituskerroin (uusille johdoille voidaan käyttää arvoa 1),  $Q_T$  on kuormitus,  $\Phi_R$  on lujuuskertoimien tulo ja  $R_C$  on ominaislujuus. Lujuuskertoimien tulo  $\Phi_R$  saadaan kaavasta (2). Eristimille ja johtimille voidaan standardien avulla määrittää ominaislujuudet, joita voidaan suoraan hyödyntää mitoituksessa. Pylväät ja perustukset ovat eri osien yhdistelmiä, joten valmiin komponentin ominaislujuuden määrittämiseen ei ole suoraviivaista keinoa. Yksittäisten kappaleiden testeillä voidaan todeta käytettävän komponentin sopivuus. Komponenteilla, joiden lujuudessa on suurta hajontaa, luotettavuutta täytyy lisätä teettämällä testejä useammille kappaleille.

$$\Phi_R = \Phi_N \times \Phi_S \times \Phi_Q \times \Phi_C, \quad (2)$$

jossa  $\Phi_N$  ottaa huomioon kuormitukselle  $Q_T$  altistuvien komponenttien lukumäärän  $N$ ,  $\Phi_S$  määrittää valitun komponenttien välisen lujuuskoordinaation,  $\Phi_Q$  huomioi komponenttien laatueroamat sekä todellisen poissulkurajan ja oletetun poissulkurajan 10 % eron osoittava  $\Phi_C$ . Oletetulla poissulkurajalla 10 % tarkoitetaan, että mitoitettu lujuus kestää siihen kohdistuvan kuorman 90 % todennäköisyydellä. Lujuuskertoimien määrittämisessä käytetään hajontakertoimia eli COV-kertoimia (coefficient of variation) määrittämään hajontaa komponenttien lujuuksissa. [5:3.6, 27:5.2]

Lujuuskoordinaation käytännön toteuttamiseen on kansainvälisen standardin mitoituksen mukaan kaksi menetelmää: käyttämällä eri komponenteille eri poissulkurajoja tai suunnittelemalla lujuuskoordinaatiossa luotettavuudelle tavoitetaso lujuuskertoimen  $\Phi_S$  avulla. Suurin poissulkuraja tulisi valita lujuudeltaan heikoimmaksi mitoitettavalle komponentille. Lujuuskoordinaatiota voidaan toteuttaa kahden komponentin välillä lujuuksien mitoituksessa kansainvälisen standardin mukaan lujuuskertoimen  $\Phi_S$  avulla, kun otetaan huomioon molempien komponenttien hajontakertoimet. Kaavoista (1) ja (2) voidaan johtaa komponenttien lujuuden mitoitukseen kaava (3). Tällöin ensin hajoavaksi mitoitettun

komponentin lujuuskertoimeksi  $\Phi_S$  valitaan 1,0 ja komponenttien hajontakertoimista riippuen luotettavammaksi mitoitettun komponentin lujuuskertoimeksi  $\Phi_S$  valitaan arvoa 1,0 pienempi arvo. [5:2.3, 27:7.2]

$$R_C \geq \frac{\gamma_{QT}}{\Phi_N \Phi_S \Phi_Q \Phi_C} \quad (3)$$

Eurooppalaisessa standardissa käytetään kuorman mitoituksessa kansainvälisestä poiketen osavarmuuslukumenetelmää. Osavarmuuslukumenetelmässä otetaan suunnittelussa huomioon kuormitukset, materiaaliominaisuudet ja geometria, ja näiden kautta varmistetaan, että rajatiloja ei ylitetä missään mitoitustilanteissa. Materiaaliominaisuuden osavarmuusluvulla katetaan poikkeamat ominaisarvoista sekä epätarkkuudet ja epävarmuudet geometrisissä ominaisuuksissa ja kestävyysmallissa. Kuorman osavarmuusluku riippuu valitusta luotettavuustasosta ja sillä saadaan huomioitua epävarmuudet ja epätarkkuudet mallinnuksessa ja poikkeamat ominaisarvoista. Kuormien osavarmuusluvut saadaan yleensä kokemukseräisesti ja teoreettisista tarkasteluista. Yhdistämällä osavarmuusluku ominaisarvoon saadaan mitoitussarvot  $F_d$  kuormalle ja  $X_d$  materiaaliominaisuudelle kaavojen (4.1–2) mukaisesti.

$$F_d = \gamma_F F_K, \quad (4.1)$$

jossa  $\gamma_F$  on kuorman osavarmuusluku ja  $F_K$  on kuorman ominaisarvo.

$$X_d = X_K / \gamma_M, \quad (4.2)$$

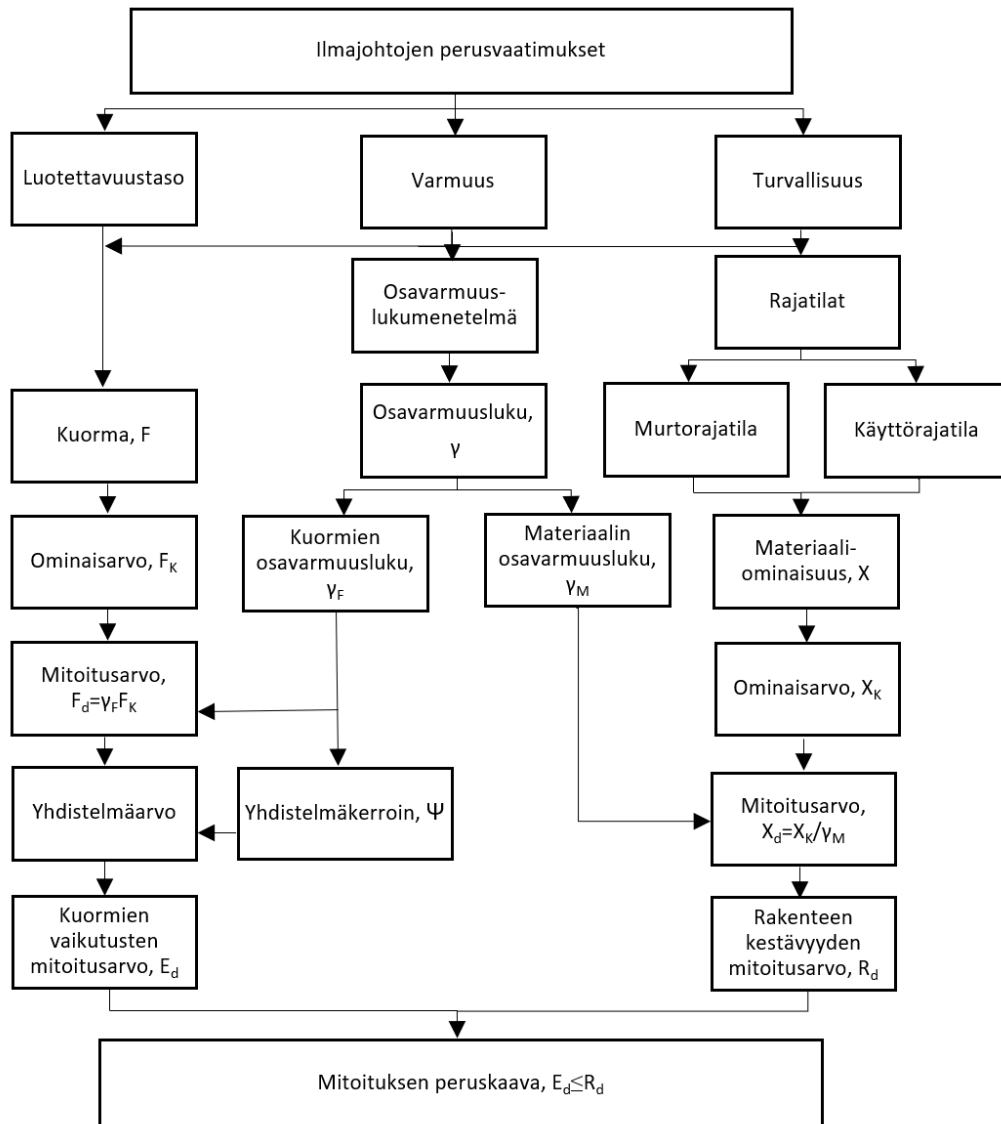
jossa  $X_K$  on materiaaliominaisuuden ominaisarvo ja  $\gamma_M$  on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku. Komponentin materiaaliominaisuuden ominaisarvo kuvaa tiettyä todennäköistä arvoa, ja se määritetään testeillä. [44:3]

Muuttuvia kuormia mitoittaessa käytetään yhdistelmäkerrointa  $\psi$  ottamaan huomioon pienennetty todennäköisyys sille, että eri toisistaan riippumattomien kuormien epäedullisimmat arvot esiintyisivät yhtä aikaa. Muuttuvan kuorman yhdistelmäarvo esitetään yleensä yhdistelmäkertoimen ja muuttuvan kuorman ominaisarvon tulona, mutta se voidaan määrittää myös erikseen standardeissa tai lyhyemmän toistumisajan kuormituksenä. Kansainvälisessä standardissa yhdistelmäkertoimen virkaa toimittaa pienennyskerroin  $B_i$ , joka huomioi tuulenopeuden kanssa kerrottuna huipputuulen pienen esiintymistodennäköisyyden jään kanssa yhtä aikaa. [27:6.4, 44:3.6]

Kansainvälisen standardin tavoin EN-50341-1 määrittää mitoituksen perustavaksi ajatukseksi, että kuormitusten täytyy olla mitoitettua lujuutta pienempää, joskin eri termein, katso kaava (5).

$$E_d \leq R_d, \quad (5)$$

jossa  $E_d$  on kuormitusyhdistelmien vaikutus ja  $R_d$  on rakenteellinen kestävyys. Yleisesti EN-standardin mukaan suunnittelu noudattaa kuvan 12 periaatetta. [44:3]



**Kuva 12.** Suunnitteluperusteet standardissa 50341-1 [44:3.]

Suomen NNA esittää voimajohtojen mitoituksessa käytettävät kuormitustapaukset, lämpötilat, yhdistelmäkerroimet ja osavarmuusluvut taulukon 4 mukaan. Fingridin teknisissä eritelmissä muutama arvo on tarkennettu, ja ne näkyvät taulukossa punaisella värillä.

Taulukko 4. Kuormitustapaukset, lämpötilat, yhdistelmäkerroimet ja osavarmuusluvut [21, 45:4.]

No	Kuormitustapaus	Lämpötila	Tuuli	Jää	Taso I		Taso II		Taso III	
		°C	$\Psi_w$	$\Psi_i$	$\gamma_w$	$\gamma_i$	$\gamma_w$	$\gamma_i$	$\gamma_w$	$\gamma_i$
1a	Huipputuuli	0	1,0		1,0		1,2		1,4	
	Nimellinen keski-tuuli	0	0,58							
1b	Minimilämpötila	$T_{min} / -55$								
2a	Huippujää + lumi	0		1,0...3,0 / 2,0 (110 & 220 kV), 1,7 (400 kV)		1,0		1,25		1,5
2b	Toispuolinen jää, poikittainen taivutus	0		$\alpha_i$		1,0		1,25		1,5
2c	Toispuolinen jää, pitkittäinen taivutus	0		$\alpha_i$		1,0		1,25		1,5
2d	Toispuolinen jää, vääntötaivutus	0		$\alpha_i$		1,0		1,25		1,5
2e	Irronnut jää yhdessä jänteessä	0		0,7		1,0		1,25		1,5
3a	Huippujää + nimel-listuuli	0	0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,25	1,0	1,5
3b	Kova tuuli + nimel-lisjää	0	0,7	0,35	1,0	1,0	1,2	1,0	1,4	1,0
4	Asennus, kunnos-sapito	-20			$\gamma_P = 1,5$					
5	Varmuus- ja satun-naiset kuormat	0			$\gamma_A = 1,0$					
		Oman painon osavarmuusluku on $\gamma_G = 1,0$ kaikissa ta-pauksissa								

Taulukossa 4 esiintyvä  $\alpha_i$  määräytyy sovellettavan jäätymislukon mukaan, seuraavin arvoin:

$$\alpha = 0,50 \quad \alpha_1 = 0,35 \quad \alpha_2 = 0,70 \quad \alpha_3 = 0,35 \quad \alpha_4 = 0,70.$$

## 5.2 Esisuunnittelu

Uuden voimajohdon suunnittelu alkaa esisuunnittelusta, jossa määritetään johtoreitti eri vaihtoehtoiseen kahden sähköaseman välille. Johtoreittien valinnassa täytyy huomioida asutus, elinkeinotoiminta ja luonnonolot. Alueiden käyttötavoitteet, maankäyttösuunnitelmat ja maakuntakaavat ohjaavat reittisuunnittelua. Myös nykyinen sähköverkko ja tulevat saneeraustarpeet vaikuttavat suunniteltavaan johtoreittiin. Voimajohdot pyritään sijoittamaan olemassa oleviin johtoalueisiin, mutta käyttövarmuuden ylläpitämiseksi liian moni johto ei voi olla samassa johtoalueessa. Yleisesti johtoreitin valinnassa pyritään

löytämään paras teknistaloudellinen vaihtoehto. Esisuunnittelussa voimajohtohankkeelle hankitaan tutkimus- ja hankeluvat sekä tehdään alustavat poikkileikkaukset ja määritetään sähkö- ja magneettikentät.

Voimajohdon esisuunnittelussa tehdään aina vähintään ympäristöselvitys viranomaisneuvotteluineen johtoalueen ympäristöstä. Ympäristövaikutusten arviointi (YVA) tehdään lain mukaan vähintään 220 kV yli 15 kilometrin pituisille voimajohdoille. YVA:ssa tunnistetaan, arvioidaan ja esitetään voimajohtohankkeen todennäköiset sekä merkittävät ympäristövaikutukset viranomaisten ja sidosryhmien kuulemisten ja tutkimusten perusteella. [38, 42]

### 5.3 Yleissuunnittelu

IEC 60826 -standardi esittää suositellun menetelmän voimajohdon suunnitteluun. Siirtäessä esisuunnittelun jälkeen yleissuunnitteluun määritetään käytettävä luotettavuustaso ja sen perusteella lasketaan ilmastolliset muuttujat ja kuormat. Kun varmuus- ja turvallisuusvaatimukset on määritelty, lasketaan niihin liittyvät kuormat. Kaikkien laskettujen kuormien perusteella määritetään lujuuskoordinaatio ja valitaan kuorma- ja lujuuskertoimet, joiden perusteella voidaan laskea ominaislujuudet komponenteille. Komponentin ominaislujuudella tarkoitetaan standardien takaamaa minimilujuutta. Ennen siirtymistä yksityiskohtaisempaan voimajohtokomponenttien suunnitteluun, on hyvä vielä tarkistaa tulosten soveltuvuus paikallisiin turvallisuusmääräyksiin. [23, 27:5.1]

Fingrid teettää voimajohtojen yleissuunnittelun ulkopuolisilla suunnittelukonsulteilla. Yleissuunnittelija toimittaa tulosaineistona Fingridille seuraavat aineistot:

- yleistiedot, sopimukset ja lausunnot
- pylväsluettelo, risteämät ja poikkeukset johdon suunnitteluun
- kartat, johtoaluekuva ja profiilit
- tiedot pylväistä
- maaperätutkimuksen tulokset ja perustusten suunnitelmat
- johdinten vaihejärjestyskuvat ja tiedot asennettavista varusteista
- maadoitussuunnitelmat ja vaarajänniteselvitykset
- yleissuunnitelmat erotin- ja sähköasemista
- mahdolliset muutokset muihin johtoihin



Yleissuunnittelua ohjaa Fingridin tekniset eritelvät sekä Suomessa voimassa olevat standardit, määräykset ja lait. Merkittävin standardi on eurooppalainen SFS-EN 50341-1 Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteellä ja sen Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt SFS-EN 50341-2-7. Voimajohtoihin ja sähkötekniikkaan liittyvien määräysten lisäksi, yleissuunnittelussa täytyy huomioida myös esimerkiksi lait ja määräykset koskien lunastusta, maankäyttöä, rakentamista, luonnonsuojelua, liikennettä ja muuta infrastruktuuria. Fingridin vakioratkaisuja esimerkiksi pylväs- ja perustusrakenteisiin käytetään aina mahdollisuuksien mukaan. Fingridin tekniset eritelvät antavat ohjeistuksen muun muassa komponenttien vakioratkaisuihin, suunnitteluun, testaukseen ja asentukseen, jätteiden käsittelyyn, laadunvalvontaan sekä räjäytystöihin. [21]

## 5.4 Rakennesuunnittelu

Fingrid määrittää teknisissä eritelmissään parametrit voimajohtojen yleissuunnitteluun. Käytettävä luotettavuustaso on joko 2 tai 3 jännitetason ja johdon kriittisyyden mukaan. Maastoluokkana käytetään luokkaa II eli perusmaastoa, jossa kasvillisuus on matalaa, yksittäisiä puita ja rakennuksia on esteinä sekä perustuulenopeus on NNA:ssakin mainittu 21 m/s. Jollei projektispesifikaatiossa erikseen mainita muuta, jäätymislukka on I (kts. taulukko 2) ja yhdistelmäkertoimena huippujään ja lumen yhdistelmäkuormassa käytetään arvoa 2,0 110 kV ja 220 kV jännitetasoilla ja arvoa 1,7 400 kV voimajohtoilla. Virtajohtimien maksimilämpötilaksi on määritetty Fingridin eritelmissä 80°C, ukkosjohtimien 40°C ja molempien johtimien minimilämpötilaksi -55°C. Projektispesifikaatiossa voidaan määrittää myös muu minimilämpötila. [21, 45:4]

Rakennesuunnittelua varten Fingridin teknisissä eritelmissä käytetään NNA:n määrittämiä kuormitustapauksia taulukon 4 mukaisesti pienin muutoksin. Fingrid ohjeistaa viruman kompensoinnin huomioimista asennus- ja kunnossapitokuormiin sekä luotettavuuden nostamista jääkuorman osavarmuusluvussa kovan tuulen ja nimellisjääkuorman yhdistelmässä. Voimajohtorakenteiden ja komponenttien materiaaliominaisuuksien osavarmuusluville Fingridin tekniset eritelvät antavat eurooppalaisen standardin ja NNA:n mukaiset arvot.

Fingridin voimajohtopylväiden vakioratkaisuissa, niin kutsussa pylväsperheessä, on pylvästyyppejä 110 kV ja 400 kV jännitetasoille normaalien pylvästyyppien lisäksi myös muun muassa erityisille jääkuorma-alueille, vesien ylityspaikkoihin sekä kahden jännitetason yhteispylväisiin. Pylväsperheen pylväille on yleispiirustukset osaluettelointeen, määritetyt käytönrajat ja laskennassa käytettävät parametrit. Pylvään käytönrajat mää-

rittävät lujuuden, johtimien korkeuden ja käyttörajatilan pylvään korkeudesta, johtokulmasta,  $\Sigma Y$ :stä ja jännepituudesta riippuen. Käytettäessä pylväasperheen ulkopuolisia ratkaisuja täytyy niille tehdä lujuuslaskelmat eri kuormatapauksille, määritellä käytönrajat sekä valmistus- ja asennusohjeet. Fingridillä on samaan tapaan vakioratkaisuja myös harustettujen, peltopylväiden ja viankorjauspylväiden sekä sähköasemien, reaktoreiden ja kondensaattoreiden perustuksille. Muut käytettävät perustukset suunnitellaan perustuslaskelmien perusteella, joissa hyödynnetään pylväiden lujuuslaskennan tuloksia. [21]

Fingridin voimajohdoilla käytetään pääasiassa 400 kV virtajohtimina teräsvahvisteista alumiinijohdinta Finch kolmella osajohtimella. 110 kV jännitetasolla yleisin virtajohdintyyppi on teräsvahvisteinen alumiinijohdin Duck kahdella osajohtimella. Ukkosjohtimina käytetään yleensä Sustrong-tyyppiä ja sitä vastaavaa OPGW:tä. Johtimille tehdään yleissuunnittelussa riippuma-jännityslaskelmat oikeiden kiristysten selvittämiseksi ja vähimmäisetäisyyksien täyttymiseksi. Voimajohdolla käytettävien eristimien ja varusteiden valinnan tekee urakoitsija Fingridin teknisten eritelmien mukaisesti. [21]

#### 5.4.1 Pylvääseen syntyvät kuormat

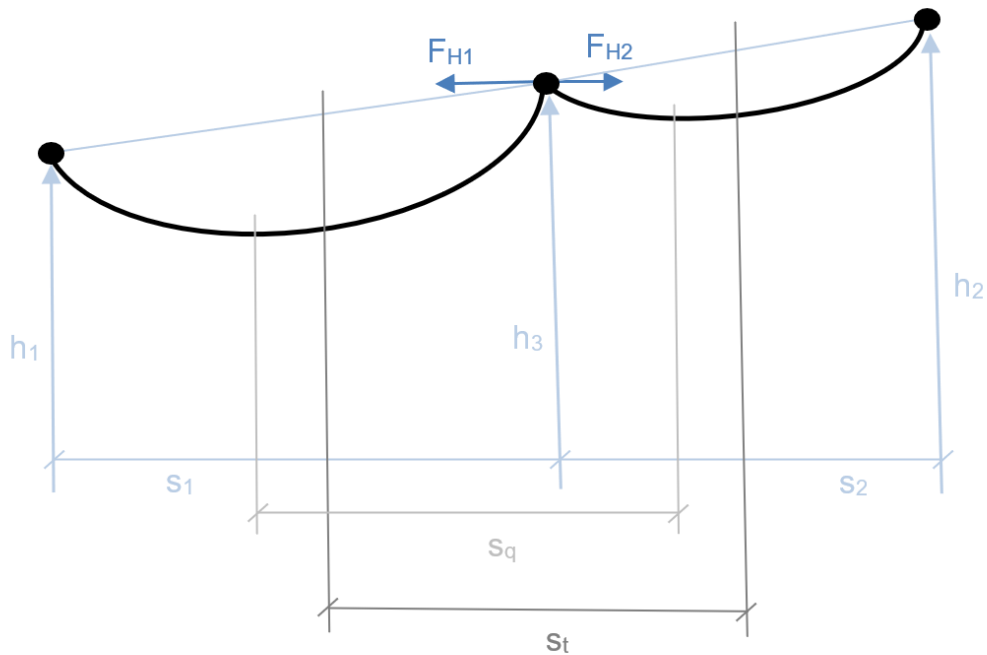
Johtimen jännitykseen vaikuttaa sähköinen kuorma, sääolosuhteet, johtimen alkukiristys, viruma ja lopullinen kuormanaikainen jännitys, pylvään ja eristimien joustavuus, johtimen vetomenetelmä ja jännepituudet sekä  $\Sigma Y$ , mihin palataan työssä myöhemmin. Voimajohdon mitoitus tehdään niin kutsutun EDS-tilan (everyday stress) mukaan, jolle voimajohto altistuu suurimman osan käyttöajastaan [4:8.3.] Suomessa käytetään EDS-tilana tyypillisesti lämpötilan  $0^{\circ}\text{C}$ , tuuletonta ja jäätöntä ilmaolosuhdetta. EDS-tilassa johtimet ovat viruneet normaalin käyttötilaansa, noin vuoden päästä asennuksesta. Lämpötilan nousu aiheuttaa lämpölaajenemista johtimessa ja täten vähentää jännitystä, ja päinvastoin lämpötilan laskiessa johtimen jännitys kasvaa. Johdinjännitys vähenee johtimen viruessa kuorman ja ajan vaikutuksessa. Ulkoiset kuormat, kuten tuulen ja jään aiheuttamat, lisäävät johtimen jännitystä. Johdinjännitykset vaikuttavat kiristyspylväiden pitkitäisiin kuormiin, kulmapylväiden poikittaisiin kuormiin, varmuuskuormiin, pystykuormiin vaihtelevassa maastossa sekä perustuksiin, haruksiin ja niiden ankkureihin. [1:4]

Voimajohdon kiristysväliksi kutsutaan kahden kiristyspylvään väliä, jossa on tyypillisesti useampi jänne. Ekvivalenttijänne  $s_e$  lasketaan kaavan (6) mukaan kiristysvälien jännteistä.

$$s_e = \sqrt{(\sum s^3)/\sum s}, \quad (6)$$

jossa  $s$  on jänteen pituus. Ekvivalenttijänteen avulla voidaan laskea kiristysvälin johtimien riippumia ja jännityksiä, kunhan jänneiden pituudet eivät eroa suuresti toisistaan, kiristysvälillä ei ole suuria kulmia ja maastossa ei ole suuria korkeuseroja. [1:4.4, 49:2.2-3]

Voimajohtopylvääseen vaikuttavia pystykuormia aiheutuu sen niin kutsutusta omapainosta, joka käsittää pylvään, eristimien ja muiden pysyvästi kiinnitettyjen osien aiheuttaman pystysuoran kuorman sekä jääkuormasta. Lisäksi johtimet aiheuttavat pylvääseen kiinnityskohtaansa vaak- ja pystysuoria kuormia. Vaakasuoria kuormia aiheuttaa johtimen suuntainen kuorma sekä johtimiin vaikuttava tuulen johtimen vaakasuora komponentti. Johtimien eri tasoilla olevat kiinnityspisteet aiheuttavat pystykuormia johtimien kiinnityspisteisiin. Kuvassa 13 on esitettyä pylvään, jonka lihavoidulla mustalla piirretyn johtimen kiinnityskohdan korkeus on  $h_3$ , tuuli- ja painojänne sekä sen eri puolilta vaikuttavat johtimen köysivoiman vaakakomponentit  $F_{H1}$  ja  $F_{H2}$ . Köysivoiman avulla voidaan laskea johtimen riippuma. Köysivoimat ja riippumat on laskettava erilaisissa sää- ja kuoratilanteissa. Yksi huomioitava erikoistilanne on johdin poikki -tilanne, jossa viereisen jänteen yksi osajohdin on katkennut. Kuvassa 13  $h_1$  ja  $h_2$  ovat vierekkäisten pylväiden johdinkiinnitysten korkeudet ja  $s_1$  ja  $s_2$  etäisyydet niihin, eli jännevälit. Tuulijänne  $s_t$  määrittää tietyn pylvään vierekkäisten jänneiden keskipisteiden välisen etäisyyden mitattuna tuulta vastaan kohtisuorasti. Painojänne  $s_q$  on viereisten jänneiden alimpien kohtien vaakasuora etäisyys. [10:4.2, 36, 49:2.2-3]



**Kuva 13.** Pylvään tuulijänne  $s_t$ , painojänne  $s_q$  sekä köysivoimien vaakakomponentit  $F_{H1}$  ja  $F_{H2}$  [49.]

Kuten kuvassa 13 on esitetty, myös tosielämässä johtimien kiinnityskorkeus vaihtelee jäniteittäin, mikä aiheuttaa voimajohtorakenteille huomioitavia pystysuoria kuormia. Summa-Y tai  $\Sigma Y$  määrittää prosentteina korkeuseron vierekkäisiin kiinnityskorkeuksiin. Se on nimensä mukaisesti summa pylvään molemmilla puolilla olevien jänneiden korkeuseroista, kuten nähdään kaavoista (7.1–3), joissa viitataan jo aiemmin kuvassa 13 esiintyviin johtimien kiinnityskorkeuksiin ja jänteisiin. Negatiivinen  $\Sigma Y$ :n arvo keventää pylvään kuormitusta, mutta puristaa eristimiä, ja positiivinen päinvastoin. Ideaalinen  $\Sigma Y$ :n arvo onkin lähellä nollaa. Korkeuserot johtimien kiinnityskohdissa voidaan myös esittää vertikaalisena johtokulmana, mutta Suomessa käytetään yleisesti  $\Sigma Y$ :tä. [1:4.5, 36, 49:2.3]

$$\Sigma Y = y_1 + y_2, \quad (7.1)$$

jossa

$$y_1 = \frac{h_3 - h_1}{s_1} \quad (7.2)$$

$$y_2 = \frac{h_3 - h_2}{s_2} \quad (7.3)$$

## 5.4.2 Mekaaninen mitoitus

Voimajohdon mekaaninen kestävyys eli lujuus siihen kohdistuvia eri kuormia vastaan pyritään varmistamaan mekaanisella mitoituksella. Pylväiden ja perustusten rakenteellista suunnittelua varten tarvitaan tietoa johtimien ja eristimien kiinnityspisteisiin vaikuttavista poikittaisista, pitkittäisistä ja pystysuuntaisista kuormista osavarmuuslukuineen, määritetyistä käyttö- ja murtorajajaloista, sovellettavasta lujuuskoordinaatiosta sekä rakenteisiin itseensä vaikuttavista kuormista. Lisäksi rakenteelliseen mitoitukseen liittyy olennaisesti suunniteltu johtoreitti kulmineen ja korkeuseroineen sekä rakenteisiin kiinnitettävien johtimien ja eristimien yksityiskohdat. [44:Liite L]

Keskeistä komponenttien lujuuksia ja kuormituksia määriteltäessä on rajatilojen käsitteet. Kansainvälinen ja eurooppalainen standardi käyttävät näistä kahdesta rajatilasta erilaisia käsitteitä, IEC:n *damage limit* ja *failure limit* ja EN-standardien *ultimate limit* eli murtoraja ja *serviceability limit* eli käyttöraja. Murtorajatila kuvaa komponentin lujuuden rajaa, jonka ylittyessä rakenne sortuu. Käyttörajatila määrittää komponentin lujuuden rajan, jonka ylittyessä rakenne ei enää täytä käyttövaatimuksia ja näin johtaa rakenteen vaurioon. [27:3.1, 44:3.3]

Teräksiset ristikkopylväät käsitellään rakenteellisessa analyysissä yleisesti nivelöityinä sauvarakenteina, joissa on jokaisessa kohdassa epästabiiisuuden estävä riittävä jäykkyys. Rakenteen sisäiset voimat ja momentit voidaan määrittää 1- tai 2-kertaluvun teorioilla. 1-Kertaluvun teoriolla muodonmuutosten vaikutuksia määritetään rakenteen alkuperäisen geometrian kautta ja 2-kertaluvun teoriassa huomioidaan vaikutukset rakenteen muodonmuutoksista. Rakenteita analysoidaan kimmoteorian mukaan olettaen, että materiaali venyy jännityksessä lineaarisesti. Murtorajajaloissa ristikkopylväiden sauvojen kestävyys täytyy määrittää poikkileikkauksissa, vedossa, taivutuksessa ja puristuksessa. Myös rakenteen liitosten kestävyyttä täytyy tarkastella. Käyttörajatarkastelut liittyvät yleensä rakenteen siirtymiin, ellei muuta ole vaadittu. Ristikkopylväät kestävät vetoa myötölujuuteensa asti, sen jälkeen rakenne saavuttaa käyttörajatilansa. Myötölujuuden ylittyessä rakenteeseen tulee pysyviä muodonmuutoksia. Murtorajajalon yllä mentäessä rakenne saavuttaa vetolujuutensa rajan. Puristusta ristikkopylväs kestää nurjahduslujuutensa asti, jolloin se saavuttaa murtorajajalon. Samoin rakenne kestää taivutusta käyttörajajaloon asti palautuvana ja murtorajajaloon asti nurjahtamatta. [27:7.3, 44:7.3]

Teräsputkipylväiden rakenteellisessa analyysissä tarkastelu tehdään kimmoteorian ja 2-kertaluvun teorian avulla. Käyttörajajalossa rakenteeseen tulee muodonmuutoksia tai taipumia. Puristusta putkipylväs kestää murtorajajalossa nurjahduskestävyyteensä asti ja

vetoa vetolujuuteensa asti. Myös teräsputkipylväiden liitosten lujuudet on mitoitettava kestäviksi, ja eurooppalainen standardi antaa mitoitusperusteet ruuvi-, holkki-, laipallisiin ruuvi- ja hitsattuihin liitoksiin sekä betoniupotuksiin ja pohjalevyn ja ankkuripulttien liitoksille. [27:7.3, 44:7.4]

Harustetut pylväät analysoidaan yleensä 2-kertaluvun teorian mukaisesti, mutta myös 1-kertaluvun teoriaa ja kimmoteoriaa voidaan käyttää erikseen määrättyissä tapauksissa. Harustetun rakenteen mitoittamisessa huomioidaan harustus yhdestä tai useammasta tasosta. Käytettävän haruksen mitoitus perustuu valmistajalta saatuihin todennettuihin tietoihin, kuten vetolujuuteen ja kimmokertoimeen. Haruksen kestävyys murtorajatilassa mitoitetaan vetolujuuden mukaan. Käyttörajatilataarkastelussa huomioidaan haruksen myötölujuus ja löystyminen sekä harustetun pylvään lujuus. Harukset on varustettava EN-standardin mukaan kiristysmekanismilla, jotta niitä voidaan tarvittaessa kiristää niiden löystyessä mahdollisesti käytössä. [27:7.3, 44:7.7, 45:7.7]

Voimajohtopylväiden perustukset mitoitetaan tarkastelemalla ylösvetoa, puristusta ja kaatavia voimia. Perustuksen ja maaperän väliset vuorovaikutukset tulee huomioida tarkastelemalla pylväältä, aktiivisesta maanpaineesta ja pysyvistä painoista tulevia kuormia sekä pohjaveden nostovaikutuksia ja maakerrosten aiheuttamia reaktivoimia. Käyttörajatilassa perustuksen lujuus voi pienentyä, sen paikka voi siirtyä tai siihen kohdistuu kiertoa. Murtorajatilassa perustus on noussut, siirtynyt tai kiertynyt merkittävästi, esimerkiksi IEC-standardin antamien raja-arvojen 5–10 cm tai 5°–10° yli. EN-standardissa ei anneta tarkkoja raja-arvoja muodonmuutoksille. Perustuksiin kohdistuu huomioitavia kuormia myös pylvään kallistumisista ja pakkomuodonmuutoksista. Perustukset tulee lujuuskoordinaation mukaan yleisesti mitoitaa 10 % kestävämmiksi kuin niiden kannattelemat pylväät. Tämä voidaan toteuttaa kertomalla pylväiltä perustuksille siirtyvät kuormat kertomella 1,1 tai kertomalla perustusmateriaalin kestävyuden ja ominaisuuden osavarmuusluku kertoimilla 1,1 ja 1,21. [27:7.3, 44:8.6, 45:8]

Virta- ja ukkosjohtimien mekaaninen kestävyys mitoitetaan käyttörajatilassa värähtelyn, kriittisten etäisyyksien tai 70–80 % sen ominais- tai vetolujuuden arvon mukaan, mikä arvoista antaakaan alimman rajan. Murtorajatilassa ratkaisee johtimen vetomurtolujuus. Johtimien vetomurtolujuuteen huomioidaan osavarmuusluvun arvo, joka on oltava Suomen NNA:n mukaan vähintään 1,5. Johtimien suunnittelussa tulee huomioida pysyvä venymä eli viruma ja sen vaikutus riippumaan. [27:7.3, 44:9, 45:9]

Myös eristimet, rakenteiden liitokset ja muut varusteet täytyy luonnollisesti mitoittaa kestäviksi. Käyttörajallassa eristimille määritetään tyypillisesti 70 % lujuudesta ja murtorajatilassa lujuuden ylittyminen eli eristimen rikkoutuminen. Johtimien liitosten ja varusteiden käyttörajallassa rakenteeseen on syntynyt pysyviä muodonmuutoksia tai johtimen liitos on huonontunut. Murtorajatilassa johtimen liitos tai varuste on hajonnut. Suomen NNA määrittää johtimien kiinnityksille vaatimuksen estää johtimen luisumisen esto kiinnikkeessä sen katkettua viereisessä jänteessä. Lisäksi johtimen liitoksen murtolujuuden on oltava vähintään 90 % johtimen nimellismurtolujuudesta, jos liitokseen tai pidikkeeseen kohdistuu merkittäviä rasituksia. Varusteiden materiaalien tulee kestää vähintään Suomen NNA:n määrittämä minimilämpötila  $-40^{\circ}\text{C}$ . [27:7.3, 44:10-11, 45:10-11]

## 5.5 Lujuuskoordinaatio

Lujuuskoordinaatiolla tarkoitetaan järjestelmän eri komponenttien keskinäistä tarkastelua, jonka tavoitteena on määritellä komponenteille ideaalinen, todennäköinen vaurioitumisjärjestys. Lujuuskoordinaatiolla pyritään minimoimaan mahdollisen vaurion kustannukset ja korjausaika. Ensimmäisenä vaurioituva komponentti ei saisi aiheuttaa muidenkin komponenttien vikaantumista ja siitä edelleen sarjasortumista. Rinnakkain tärkeän kalliin komponentin kanssa oleva halvempi komponentti täytyy olla lujuudeltaan ja luotettavuudeltaan mitoitettu vastaamaan tärkeämpää komponenttia, ellei se ole erityisesti suunniteltu rajoittamaan tärkeään komponenttiin kohdistuvaa kuormaa. Ensimmäisenä vaurioituvan komponentin lujuuden variaatio pitäisi olla mahdollisimman pientä, jotta määritetty lujuuskoordinaatio toteutuu korkealla todennäköisyydellä. Tarkoituksena on optimoida vaurioitilanteet 90 % todennäköisyydellä tiedostaen, että täydellinen 100 % luotettavuus on mahdotonta saavuttaa materiaaliominaisuuksien satunnaisen jakaantumisen takia. Myös etenkin kustannussyistä on hyväksyttävä mahdollisuus vikoihin ja vaurioihin ylipäättään. Voimajohdon täydellisen luotettavuuden tavoittelu komponenttien ylimitoittamisella ei ole taloudellisesti järkevää. Sähkönsiirron lähes täydellistä luotettavuutta ja käyttövarmuutta sen sijaan voidaan ja pyritään tavoitella esimerkiksi kahdenetuilla komponenteilla, silmukoidulla verkolla ja varavoimalla. [5:2.3, 27:72, 44:Liite A]

Voimajohdon lujuuskoordinaatio on määritelty ilmajohtojen keskeisissä standardeissa kansainvälisessä IEC 60826 Overhead transmission lines – Design criteria ja eurooppalaisessa SFS-EN 50341-1 Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä sekä sen suomalaisessa NNA:ssa SFS-EN 50341-2-7. Standardit antavat komponenttien mitoituslaskelmiin tarvittavia kertoimia erilaisten kuormitusten huomioonottamiseksi. NNA täydentää yhteisen eurooppalaisen standardin vaatimuksia ottaen huomioon kansalliset erityispiir-

teet, kuten ilmasto-olosuhteet ja maaperän ominaisuudet. NNA:ssa voidaan myös tarkentaa kunkin maan tyypillisiä käytäntöjä, jotka eivät kuitenkaan saisi olla yhteisen eurooppalaisen standardin kanssa ristiriidassa tai sen asettamien minimivaatimusten alapuolella.

Eurooppalainen standardi, kansainvälisen tavoin, antaa liitteessä A opastavan suunnittelukriteerin lujuuskoordinaation toteuttamiseen voimajohtojärjestelmässä ja sen pääkomponenteissa sisäisesti taulukon 5 mukaisesti.

Taulukko 5. Tyypillinen lujuuskoordinaatio voimajohdolla [44:Liite A.]

	<b>Pääkomponentti</b>	<b>Pääkomponentin sisäinen koordinaatio <sup>*)</sup></b>
<b>Ensiksi vaurioituva</b>	Kannatuspylväs	<u>Pylväs</u> , perustus, varusteet
<b>Ei vaurioidu ensiksi 90 % varmuudella</b>	Kiristyspylväs	<u>Pylväs</u> , perustus, varusteet
	Johto-osapylväs	
	Päätepylväs	
	Johtimet	<u>Johtimet</u> , eristimet, varusteet
HUOM. Yllä esitettyä lujuuskoordinaatiota voidaan soveltaa useimpiin ilmajohtoihin. Kuitenkin on olemassa eräitä tilanteita, joissa voidaan käyttää eri kriteerejä ja siten johtavat toisenlaiseen vaurioitumisjärjestykseen.		
<sup>*)</sup> Jokaisen pääkomponentin sisällä alleviivattu komponentti on heikoin 90 % varmuudella.		

Suosittelussa lujuuskoordinaatiossa ensimmäisenä voimajohdon pääkomponenteista vaurioituisi kannatuspylväs ja viimeisenä johtimet. Pylvään sisäisessä koordinaatiossa perustukset eivät saisi vaurioitua ensimmäisenä. Suunnittelukriteeri on kuitenkin vain yleinen ja voi tulla tilanteita, joissa toisenlainen lujuuskoordinaatio on toimivampi. Tästä kansainvälinen standardi antaa esimerkkinä vesistöjä ylittävät voimajohdot, jossa pylväiden uudelleen pystyttäminen haastavissa olosuhteissa on huonompi vaihtoehto kuin johtimien uudelleenveto, joten johtimet voitaisiin poikkeuksellisesti mitoittaa lujuudeltaan heikoimmiksi. Myös suurten teiden ylittävät, erikoisrakenteiset ja tiheän asutuksen lähellä olevat pylväät voi olla järkevää mitoittaa luotettavimmiksi lujuuskoordinaatiolla [1:1.5.] Esimerkiksi Helsingissä jakeluverkkoyhtiö Helen käyttää 110 kV sähköverkoonsaan normaalia enemmän lujuudeltaan kestävämpiä kiristyspylväitä tärkeiden liikenneväylien risteämissä. [24, 27:7.2, 44:Liite A]

Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa [39] tutkijapari selvitti keinoja estää puupylväiden sortuminen johdinta painavan kuorman vaikutuksesta. Tutkimuksessa määritettiin ensin pylvään kestävä kuorma staattisilla ja dynaamisilla johtimelle pudotettavilla kuormilla. Sitteen tutkijat testasivat johdinkiinnikkeiden kiinnityslujuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Pylvään ja johdinkiinnikkeiden lujuuksia koordinoimalla saadaan haluttu vaurioitumisjärjestys, että johdin tippuu ennen kuin pylväs sortuu. Haluttu lujuuskoordinaatio voidaan



toteuttaa suurentamalla pylvään kokoa tai vähentämällä johdinkiinnikkeen kiinnityslujuutta. Lujuuskoordinaatiota ei voi soveltaa kokonaiselle, satojenkin kilometrien pituiselle, voimajohdolle kerralla, vaan täytyy huomioida erilaiset paikat ja olosuhteet. Lujuuskoordinaatio on tärkeää huomioida myös rakentamisvaiheessa, jossa komponentteihin kohdistuvat kuormat ja voimat voivat olla hyvin poikkeavia suunnitellusta normaalikäytöstä. [27:7.2, 39, 44:Liite A]

## 5.6 Eristyskoordinaatio

Eristyskoordinaatio on ikään kuin sähköistä lujuuskoordinaatiota. Eristyskoordinaatiolla komponenttien sähkölujuuden mitoitus tehdään suhteessa mahdollisten ylijännitteiden suuruuteen ja esiintymistiheyteen tarkoituksena vähentää käyttöhäiriöt ja laitevauriot taloudellisesti hyväksyttävälle tasolle. Tavoitteena on lujuuskoordinaation tavoin minimoida vaurioiden kestot ja niiden aiheuttamat kustannukset. [2:7]

Eristyskoordinaatiossa selvitetään ensin eri mitoittavien jänniterasitusten suuruudet ja esiintymistiheydet. Eri jänniterasituksia komponenteille aiheuttaa pientaajuiset ylijännitteet (esimerkiksi maasulussa tai alitehoisen johdon Ferranti-ilmiössä) ja transienttiylijännitteet. Transienttiylijännitteet voivat olla muodoltaan loivia tai jyrkkiä. Loivia transienttiylijännitteitä syntyy tasoitusilmiöinä verkon äkillisissä muutoksissa, esimerkiksi vikojen syntyessä tai kytkentöjen yhteydessä. Jyrkkiä transienttiylijännitteitä verkkoon aiheuttaa useimmiten salamaniskut joko suoraan johtimelle tai indusoituneena ylijännitteenä. [2:7, 10:1.1]

Ylijännitteiden vaikutuksia pyritään rajoittamaan ylijännitesuojauksella sekä pienentämään pientaajuiset ja loivat transienttiylijännitteet verkonsuunnittelulla. Esimerkiksi verkon tehokkaalla maadoittamisella, releistyksellä, riittävällä reaktoriliitännällä ja jännitteensäädöllä voidaan vähentää ylijännitteitä. Jyrkkien transienttiylijännitteiden rajoituskeinoja ovat muun muassa ylijännitesuojat, ukkosmastot ja -johtimet, suojakipinävälit ja pylväsmaadoitukset. Eristyskoordinaatiossa analysoidaan eri ylijännitesuojalaitteiden ominaisuudet, niiden suojaustaso ja mihin niitä on järkevä sijoittaa. Suojaustasolla määritetään todennäköinen suojalaitteisiin vaikuttava maksimiylijännite. [2:7, 10:1.2-5, 26:5.1]

Eristyskoordinaatiossa määritetään sallittavan vikatiheyden mukaan järjestelmän suorituskriteeri sekä jännitelujuudeltaan riittävä eristysrakenne. Jännitelujuudella tarkoitetaan eristerakenteen kykyä kestää jänniterasitukset ilman sähköpurkauksia pitäen eristysväli johtamattomana. Sähköpurkaukset voivat olla osittaispurkauksia, jolloin eristeväli on

osittain johtava, tai täysin eristevälin johtavaksi tekeviä läpilyöntejä. Sähköpurkaus voi tapahtua myös ylilyöntinä, jolloin johtava yhteys kulkee eristimen ohi esimerkiksi ilmassa.

Eristemateriaali on joko palautuva tai palautumaton riippuen siitä menettääkö se lujuusominaisuutensa läpilyönnin vaikutuksesta. Palautuvia eristeitä ovat kaasut kuten ilma, ja palautumattomia ovat yleisesti kiinteät eristeet. Eristerakenteet voidaan testata jännitelujuuden määrittämiseksi salamasyöksy-, vaihto- ja kytkentäsyöksyjännitteillä. Eristysrakenteen kestotaso määrittää sen jännitelujuusominaisuudet tai vaihtoehtoisesti koejännitteen, jolla eristerakenteessa ei synny läpi- tai ylilyöntiä joko ollenkaan tai 90 % todennäköisyydellä. Käytännön eristerakenteiden jännitelujuuteen vaikuttaa myös ilmastolliset olosuhteet, kuten lämpötila, kosteus, ilmanpaine ja lika, joista määritetään korjauskertoimet oikaisemaan laboratorioissa tyypillisesti saatuja testituloksia. Eristemateriaalin ominaisuudet muuttuvat vanhetessa. [2:7.1, 10:1.3-4, 26:5.1]

Lopullinen eristystaso saadaan edellä kuvattujen vaiheiden kautta. Eristyskoordinaatiota voidaan soveltaa konventionaalisesti marginaalina kestotason ja suojaustason välillä tai tilastollisesti, kun otetaan huomioon käsiteltävien suureiden tilastolliset jakaumat ja vaurioitumisriski. Tilastollista menetelmää käytetään vain yli 300 kV järjestelmille. [2:7.1, 10:1.5]

Käytännössä eristyskoordinaatiolla määritetään riittävät pituudet eristimien pintamatkalle ja eristinrakenteille, etäisyydet vaiheiden ja vaiheiden ja maan välille sekä ukkosjohtimien ja pylväsmadoitusten ominaisuudet. Riittävien etäisyyksien määrittämisessä täytyy huomioida myös eri kuormitustilanteet, joista Suomen NNA:ssa mainitaan minimi- ja maksimilämpötila, huippu- ja nimellistuuli sekä huippujään ja lumen yhdistelmä [45:5.6.] Eristyskoordinaatio täytyy luonnollisesti tehdä koko sähköverkolle. Yleisesti voimajohtojen eristystasot mitoitetaan alemmas kuin sähköaseman, jotta mahdollisten ylilyöntien aiheuttamien häiriöiden vaikutukset saataisiin minimoitua. Näin suojellaan sähköasemien kalliita laitteita, kuten muuntajia. Johdoilla on myös mahdollista suorittaa jälleenkytkentöjä ohimenevien vikojen jälkeen, toisin kuin sähköasemien laitteilla ja kiskoilla. Sähköasemilla onkin tästä syystä erinäisiä ylijännitesuojia. Tärkeää on huomioida myös, että riittävät etäisyydet säilyvät johdolla tehtävässä jännitetyössä. Koska korkea ilmankosteus ja ukonilma nostavat läpilyönnin mahdollisuutta, kunnossapitotöitä ei saa tehdä avojohdoilla näissä olosuhteissa. [2:7.1, 12:12.2-5]

## 6. VOIMAJOHDON VIAT JA VAURIOT

Suomen kantaverkon siirtovarmuus on viime vuosina vakiintunut erinomaiselle tasolle, keskiarvon ollessa kymmenen edeltävän vuoden ajalta 99,9998 %. Vuonna 2021 siirtovarmuus oli 99,99992 %. Siirtovarmuus saadaan laskettua siirretyn energian suhteesta siirretyn ja häiriöiden takia siirtämättä jääneen energian summaan. Häiriöitä Fingridin verkossa on vuosittain vajaa 300 kappaletta, joista reilu 70 % on sääilmiöiden aiheuttamia. Muita tunnettuja häiriöiden aiheuttajia ovat ulkopuoliset tekijät, työntekijät ja laitteet. Tässä diplomityössä perehdyttiin Fingridin voimajohtojen viimeisen kymmenen vuoden ajan järjestelmällisiin vika- ja vaurioraportteihin [32], joiden perusteella on seuraavana esitetty yleisimpiä syitä voimajohtovikoihin sekä esimerkkitapauksia. Myös joitain yksittäisten vikojen ja vaurioiden raportteja, jopa vuodesta 1999 lähtien, on tutkittu. [20]

Johtoviat voivat olla ohimeneviä tai pysyviä. Vian satuttua johdon relesuojaus yrittää tehdä pika- ja aikajälleenkytkennän. Ohimenevät viat poistuvat jälleenkytkennällä. Viat, jotka eivät poistu jälleenkytkennöillä ovat pysyviä, toimenpiteitä vaativia vikoja. Fingridin voimajohtoilla on viimeisten kymmenen vuoden aikana ollut keskimäärin 3,4 pysyvää vikaa vuodessa. Voimajohdolle voidaan joutua tekemään pakotettuja keskeytyksiä, jos johtovian riski on suuri eikä korjaustoimenpiteitä voi tehdä turvallisesti jännitteisen johdon lähellä. Pakotettuja keskeytyksiä joudutaan tekemään esimerkiksi johdolle kallistuneiden tai sen alapuolella liian pitkiksi kasvaneiden puiden poistamiseksi sekä katkenneiden harusten korjaamiseksi.

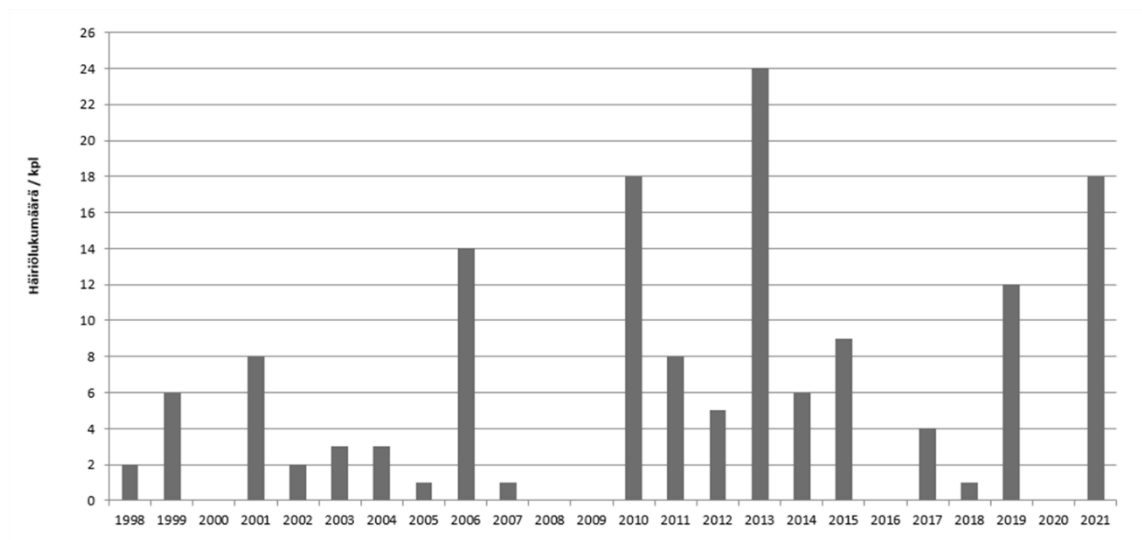
Voimajohdon vaurioituessa täytyy selvittää sen juurisyyt perusteellisesti. Vaurion sattuessa todelliset siihen vaikuttaneet ilmastolliset kuormat on syytä määrittää, jotta voidaan selvittää, oliko kuorma odottamattoman suuri vai oliko verkossa tai mitoituksessa jotain vikaa. Vian havainnoimisen mitoituksessa pitäisi johtaa korjaustoimenpiteisiin vastavissa kohteissa tai suunnitteluperiaatteissa. Vaurioiden tutkinnalla voidaan myös havaita odottamattomia ilmiöitä ja ominaisuuksia, mikä on tärkeää toiminnan kehittymisen kannalta. [1:Liite J]

### 6.1 Jääkuorman aiheuttamat viat

Merkittävä vikojen ja vaurioiden aiheuttaja voimajohtoilla on ukkosjohtimiin kertyvä jääkuorma. Viimeisen kymmenen vuoden aikana on useita tapauksia, joissa ukkosjohdin on riippunut virtajohtimien tasalla tai alapuolella ja tuulen aiheuttaman heilahduksen myötä jännitteisen virtajohtimen ja maadoitetun ukkosjohtimen yhteen osuessa aiheuttanut

maasulkuja tai jopa ukkosjohtimen poikkipalamista. Muutamia jääkuorman kannalta ongelmallisia paikkoja on ollut kohdat, joissa ukkos- ja virtajohtin risteävät, jolloin jääkuorman painosta riippuva ukkosjohtin osuu helposti virtajohtimeen. Jääkuorman poiston yhteydessä yllättäen pudonneet jääkuormat ovat toispuoleisten kuormien vaikutuksesta kaataneet pylväitä. Myös ukkospukkeja on vääntynyt jääkuorman painosta.

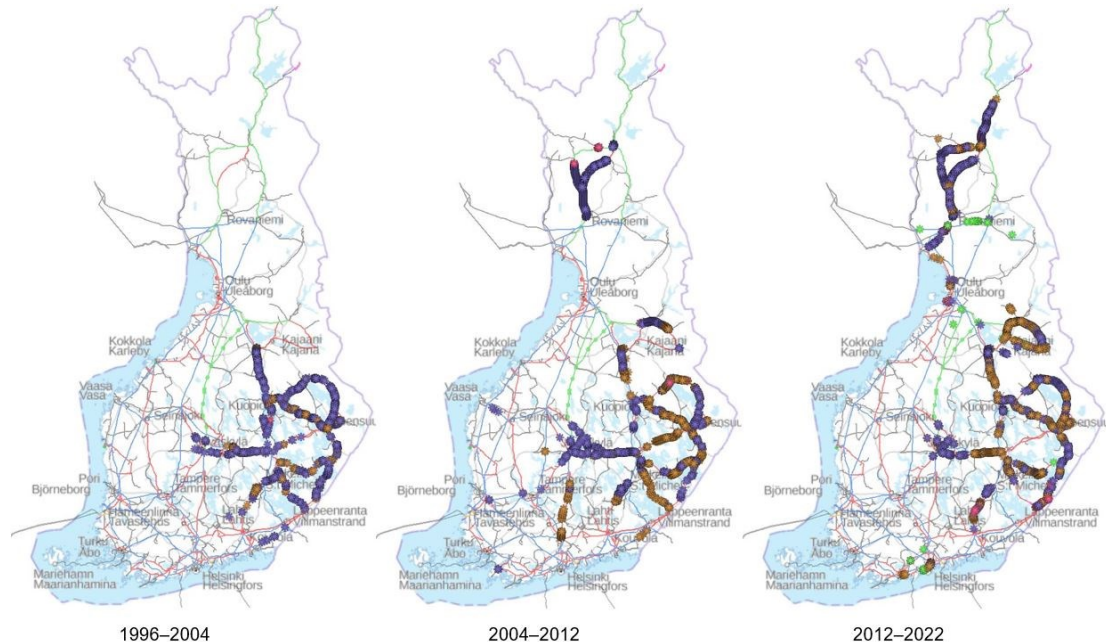
Tietyt jäänkertymisen paikat ovat tiedossa ja niitä partioidaan talviaikaan, mutta useissa raporteissa on myös mainittu, että jääkuormaa on löytynyt odottamattomista paikoista. Jääkuorman kertyminen on erilaista vuosittain talviolosuhteista riippuen, kuten kuvasta 14 voidaan nähdä lumi- ja jääkuormien aiheuttamien vikojen määrä vuosien 1998 ja 2021 välisenä aikana. Häiriöiden lukumäärässä on nähtävissä pientä kasvua, mikä voisi selittyä ilmaston muuttumisella, mutta myös kantaverkon laajentumisella. Tulevan kymmenen vuoden aikana kantaverkkoon investoidaan ennätysellinen 3 miljardia euroa, ja voimajohtojakin rakennetaan paljon. On siis odotettavissa myös jääkuormien lisääntymisen. Ilmastonmuutoksen myötä talvet tulee olemaan leudompia, mikä saattaa vähentää huurrejään kertymistä ja lisätä jäätävän sateen vaikutuksia.



**Kuva 14.** Lumi- ja jääkuormien aiheuttamat häiriöt Fingridin voimajohtoilla vuosina 1998–2021 [32.]

Fingridin voimajohtoilla havaittuja huurrekertymiä on raportoitu vuodesta 1996 alkaen ja kuvassa 15 on esitetty huurrehavaintojen sijainnit kartalla. Kuvassa 15 on jaettu huurrehavainnot kolmeen lähes yhtä pitkään ajanjaksoon, jotta voidaan hahmottaa huurrekuormien kehitys. Voidaan huomata, että Itä-Suomessa on selkeä jääkuorma-alue ja viime vuosina myös Lapissa huurrehavainnot ovat lisääntyneet. On kuitenkin otettava huomioon, että huurrehavaintojen kirjaus ei ole ollut järjestelmällistä koko raportointiai-

kana. Kantaverkko on myös laajentunut jonkun verran kyseisenä aikavälinä, mikä selittää pienen osan havaintojen kasvusta. Merkittävää voimajohtojen suunnittelun kannalta on huurrehavaintojen leviäminen uusille alueille. Toisaalta joillain alueilla huurrehavainnot ovat vähentyneet.



**Kuva 15.** Huurrehavainnot Fingridin voimajohdoilla vuosina 1996–2022.

Alueilla, joissa huurrejäätä kertyy merkittävästi ja epätasaisesti kannatuspylväiden ukkospuakit ovat riskialttiita vaurioille syntyvistä pitkittäisistä kuormista johtuen. Ukkosjohtimien epätasaisesta jääkuormasta johtuvaa jännitystä voidaan pienentää esimerkiksi pidemmällä kannatuskiinnikkeillä, luiston sallivilla kiinnikkeillä tai suunnittelemalla ukkospuakit sortumaan minimoimalla vaikutukset muuhun pylväsrakenteeseen. Fingrid käyttää joissain suuren jääkuorman esiintymän alueilla jääkuormapylväitä ja vahvempia ukkosjohtimia. [1:liite I]

## 6.2 Töiden aikaiset virheet ja ulkopuolisten vaikutus

Osa vioista tai häiriöistä voimajohdoille aiheutuu ulkopuolisten tai työntekijöiden virheistä. Näihin inhimillisiin virheisiin ei voida varautua komponenttien mekaanisessa mitoituksessa, vaan niiden estämiseksi pyritään tarkkaan ohjeistukseen voimajohdon lähellä työskentelemisestä. Kytöntävirheet ja virheelliset maadoitustoimenpiteet ovat aiheuttaneet vikatilanteita. Johtimiin on syntynyt vaurioita räjähdystyömailta singonneista kivistä ja aseiden ammuksista. Traktoreilla ja muilla työkoneilla on ajettu pylväisiin tai haruksiin pahki aiheuttaen pylväiden kaatumisia, pylväsalkojen putoamisia pilareilta ja

harusten katkeamisia. Joitakin nosturin osumisia johtimiin on myös tapahtunut aiheuttaen vikoja verkkoon. Joissakin tapauksissa puita on kaatunut tai kaadettu ihmisen toimesta vahingossa voimajohdoille. Tuuli ja linnut ovat kuljettaneet oksia tai muita esineitä voimajohdolle aiheuttaen vikoja tai pakotettuja keskeytyksiä.

Johdinliitokset ovat väärin asennettuina ja materiaaliominaisuuksien puutteellisuuden takia aiheuttaneet joitain johtimien osin sulamista, katkeamista ja irtoamista. Ruotsin kantaverkon puolelta oli eräs tapaus, jossa vääräntyyppinen johdinliitos ei ollut kestänyt, mikä voitaisiin nähdä lujuuskoordinaatio-ongelmana mitoituksessa. Vastaavia vikoja ei ole raportoitu Fingridin voimajohdoilta viimeisen kymmenen vuoden ajalta. Eräessä tapauksessa voimajohtopylväs kaatui väärin asennettujen harusankkurien vuoksi, jolloin pylväsjalca romahti sille liian suuren kuorman vaikutuksesta. Voimajohtopylväs on sortunut myös mitoitettua suuremman johtokulman asennuksen takia. Eräällä voimajohtotyömaalla haastava johdinvetojärjestely johti pylvään orren pään murtumiseen. Kyseisessä johdinvedossa jouduttiin käyttämään krokotiilia väärinpäin ja sen juututtua johdinvetopyörälle virheellisistä korjaavista toimenpiteistä johtuen kiinnityskohdan kuorma kasvoi liian suureksi ja orren pää murtui. Voimajohtopylvään sisäinen lujuuskoordinaatio oli onnistunut, sillä pylväs ei kokenut vaurioita kuin pienestä orrenpään osasta, jotka pystyttiin korjaamaan ilman suurempia vahinkoja.

Kunnossapitotöidenkin aikaisia vikoja on sattunut muutamia viimeisen kymmenen vuoden aikana. Haruseristyksiä asennettaessa ainoana Suomen kantaverkossa tyyppiään ollut betonipylväs sortui. Pylvään suunnitteludokumentteja ei löytynyt, mutta tutkittaessa rakennetta havaittiin, että pylvään rakenne oli epäsymmetrinen betonin ja sen sisäisen raudoituksen osalta. Tästä johtuen osa pylvään rakenteesta oli liian ohut kestävänsä siihen kohdistuvan kuorman. Lisäksi betoniraudoituksen määrä ei ollut normien mukainen. Vikoja on myös aiheutunut pylväiden kaaduttua perustusten korjaustyössä ja johtoa purettaessa.

Eräessä tapauksessa helikopterin kyydissä ollut lannoitekuuppa osui ukkosjohtimeen ja pilotin hätälaukaistua kuuppa irti ukkosjohdin alkoi laukkaamaan ja pylväitä kaatui sen seurauksena parin kilometrin matkalta. Kyseiset pylväät olivat paikoin vanhoja ja heive-  
röisiä puupylväitä, joita ei luonnollisesti ollut mitoitettu kestävänsä vastaavaa kuormaa. Tämän työn yhteydessä tapaukseen perehtyessä heräsi kysymys, olisiko toisenlainen lujuuskoordinaatio ollut toimivampi. Ukkosjohtimen irtoaminen olisi voinut säästää pylväitä sortumiselta. Ukkosjohtimet käsitellään kaiketi virtajohtimia vastaavina, joten ne yleensä mitoitetaan vaurioitumaan viimeisten joukossa, mutta onko se kuitenkin aina

järkevää? Ukkosjohtimien uudelleenveto lienee nopeampaa kuin pylvään korjaus tai korvaus uudella, vaikka sekin aiheuttaa käyttökatkon. Lujuuskoordinaatio ei kuitenkaan huomioi turvallisuutta. Ukkosjohtimen tiputtua maahan ei välttämättä aiheudu suojalaitteita havahduttavaa vikaa, jolloin se aiheuttaa mahdollisen vaaran alueella liikkuville. Lienee kuitenkin epätodennäköistä, että ukkosjohdin irtoaisi ja tippuisi maahan osumatta virtajohtimeen. Ukkosjohtimen osuessa virtajohtimeen syntyy maasulku ja ukkosjohdin voi syttyä palamaan aiheuttaen käyttöhäiriön. Pylvästyypistä riippuen ukkosjohdin voi irrotessaan pudota myös orrelle.

### **6.3 Haruskorroosio ja materiaaliviat**

Haruskorroosio aiheuttaa vikoja harustuksen maanalaisissa rakenteissa, kuten kaksoisilmukoissa ja u-pulteissa. Vioittuneet osat voivat romahduttaa voimajohtopylvään. Harusrakenteiden materiaalina yleisesti käytettävä teräs ja johtavassa maaperässä olevat kupariset maadoitukset muodostavat sähkökemiallisen parin. Nämä jalousasteeltaan erilaiset metallit synnyttävät terästä syövyttävän korroosiovirran. Haruskorroosiota pyritään lieventämään ja ehkäisemään haruseristyksillä tai betonisten pilarien käyttämisellä haruserustuksina. Erityisen ongelmallista haruskorroosio on sulfidisavisessa maassa. Muinaisilla merenpohjan alueilla esiintyvä rikkipitoinen sulfidisavi muodostaa esimerkiksi kaivuutöissä hapettuessaan terästä syövyttävää rikkihappoa. Useita Fingridinkin voimajohtopylväiden harusrakenteita syövyttäneitä ja katkonutta sulfidisavimaata vastaan yhtiössä kehitettiin betoninen pilariharusankkuri, joka on osoittautunut toimivaksi. Eräessä tapauksessa haruskorroosion kaatama voimajohtopylväs vaurioitti myös viereisiä pylväsrakenteita. Yhdessä viereisessä pylväässä orrenpää vääntyi ja toisessa ukkospukki irtosi orresta, mikä näkyy kuvassa 16. Pylväiden sisäinen lujuuskoordinaatio näyttää onnistuneen, sillä sarjasortumisen sijaan viereiset pylväät kokivat pienempiä vaurioita. [10:4.3, 31]



*Kuva 16. Viereisen pylvään kaatumisen johdosta irronnut ukkospukki [32.]*

Joidenkin vikojen tarkempi tutkinta ja rikkoontuneiden komponenttien ulkopuolisen tutkimuslaitoksen selvitys on paljastanut joitakin materiaaliominaisuuksien virheellisyyksiä ja vaurioiden juurisyitä. Eristinlautasten kiinnikkeissä kuppisilmukoissa oli ollut valmistusvikoja, jotka johtivat voimajohdolla eristinketjujen hajoamiseen. Tämä aiheutti pakotettuja keskeytyksiä korjaustoimenpiteiden suorittamiseksi. Eräs yli 80 vuotta vanha voimajohdopylväs kaatui, kun sen ristiharuksen kiristyskappale murtui. Tarkemmat tutkimukset paljastivat, että kiristyskappale oli murtunut noin 15 vuotta aiemmin, ja ajan kuluessa korroosion myötä aiheuttanut lopullisen murtumisen ja pylvään kaatumisen. Pylvääseen oli törmännyt viitisentoista vuotta aiemmin purjeliitokone, mikä ei kuormana ole rakenteen lujuuden mitoituksessa huomioonotettava.

## 6.4 Yhteenveto vioista ja vaurioista

Yllä esitetyistä viime vuosien aikana sattuneista vioista ei ole havaittavissa selkeitä ongelmia lujuuskoordinaation kannalta. Sen sijaan jotkin viat ovat osoittaneet toimivan lujuuskoordinaation, kun esimerkiksi pylvään jalan sortumisen sijaan orren kärki on vaurioitunut tai kiristyspylväät ovat estäneet suuremmat sarjavauriot. Kaikista voimajohdoilla sattuneista vioista ei ole kattavaa raporttia saatavilla ja osassa on myös jouduttu arvioimaan vian mahdollista aiheuttajaa tarkemman tiedon puutteessa.



Jääkuormat ovat olleet yksi merkittävin vikojen aiheuttaja tarkastelun kohteissa. Voisi herätä kysymys, onko mitoitettava jääkuorma tarpeeksi suuri. Olisiko esimerkiksi jääkuormapylväiden käyttö laajemmin perusteltua? Ongelmana kuitenkin on, kuten kuvassa 15 esitetty, jääkuorma-alueiden muuttuminen ja uusien syntyminen. Jääkuorma-alueet tunnistetaan usein vasta valmiiden voimajohtojen kerätessä jääkuormaa liikaa. Voimajohtojen mitoittamisessa suunnitteluvaiheessa ei voida varautua epätodennäköisiin kuormiin. Oikea suunta lieneekin Fingridinkin toiminnassa näkyvä jääkuormien kertymisen havainnointi ja poisto ennen vikojen syntyä. Suunnittelussa jääkuorman aiheuttamia vikoja voidaan ennakoida esimerkiksi minimoimalla ukkosjohtimien risteämät virtajohtimien kanssa.

## 7. VOIMAJOHDON LUJUUSKOORDINAATIO

### 7.1 Lujuuskoordinaatio Fingridin voimajohtoilla

Fingridin toiminnassa näyttää olleen toimiva lujuuskoordinaatio. Kaikissa toiminnoissa ei välttämättä käytetä termiä lujuuskoordinaatio, mutta ajatus on ollut jo kauan selkeä. Yleissuunnittelijat ymmärtävät suunnittelussaan mitkä osat voimajohtoa täytyy mitoittaa lujemmiksi kuin toiset, ja näin on välttytty väärän lujuuskoordinaation aiheuttamilta suurilta vaurioilta. Toisaalta suuri osa, vajaa 70 %, verkosta on rakennettu ennen eurooppalaisen standardin ilmestymistä Vahvavirtailmajohtomääräysten [49] ja sen edeltäjien vaatimusten mukaisesti. Kuluvana vuosikymmenenä kantaverkkoa tullaan rakentamaan paljon nykystandardien mukaan, joten tämän eron vaikutus pienenee.

Vuoden 1993 Vahvavirtailmajohtomääräyksissä (VIM) annetaan suoria arvoja esimerkiksi rakenteiden tuulikuormille, kun taas nykystandardit esittävät kaavoja, joilla voidaan laskea tarkasti mallinnettujen rakenteiden kuormat. VIM:ssä ei varsinaisesti mainita lujuuskoordinaatiota, mutta siellä mainitaan esimerkiksi, että perustusten tulee kestää suurin voimajohdon kuorma, antamatta kuitenkaan keinoja sen toteuttamiseen. Pylväiden keskinäisen lujuuskoordinaation voidaan VIM:n perusteella katsoa toteutuvan, kun kantatuspylväille huomioidaan ilmastolliset kuormat ja kiristyspylväille niiden lisäksi myös tyyppillisesti isommat asennuskuormat. Nykystandardi ja Fingridin tekniset eritelvät esittävät korkeamman yleisen maksimilämpötilan 80°C ja minimilämpötilan -55°C, kuin VIM:n 70°C ja -40°C. Maksimilämpötilaa selittää aiemmin yleisemmin käytössä ollut kupari, VIM:ssä oli mainittu myös alumiinille sovellettava 80°C. Myös yleinen jääkuorman arvo 25 N/m on suurempi kuin nykyinen 10 N/m. Nykystandardeissa ilmastollisten kuormien mitoittamiseen liittyy kuitenkin muitakin kertoimia, joten kuormien suuruudet eivät ole merkittävästi pienempiä kuin aiemmin. VIM:ssä ei mainita ilmastollisia yhdistelmäkuormia, joista nykyään esimerkiksi huippujään ja lumen yhdistelmäkuorma on ollut usein mitoittava Fingridin voimajohtoilla. [49]

Fingridin voimajohtoja pyritään standardisoimaan tyyppiratkaisuilla, mikä voi johtaa joidenkin komponenttien ylimitoitukseen ja pylvään sisäisen lujuuskoordinaation epäloogisuuksiin. Tällä ratkaisulla voidaan osaltaan minimoida käytettävien tyyppipylväiden määrää. Voimajohtosuunnittelun standardoinnilla pyritään myös helpottamaan rakentamisen aikaista työtä ja minimoimaan virheitä, kun eri rakenteiden välillä on selkeä esimerkiksi kokoero. Mahdollisimman standardoitu toimintatapa tehostaa ja sujuvoittaa suunnittelua. Tästäkin syystä pylväskohtainen lujuuskoordinaation toteutus ei onnistu, mutta yleisesti

suunnitteluperiaatteissa se voidaan toteuttaa lisäkertoimilla. Ilman standardoituja ratkaisuja ylimitoitusta ja kustannuksia saataisiin vähennettyä, mutta on syytä pohtia yksittäisten komponenttien kustannussäästöjen merkitystä isossa kokonaisuudessa. Toisaalta tästä voisi seurata enemmän virheitä tai ajankulua rakentamisvaiheessa, mikä lisäisi kustannuksia. Pienempi marginaali ei toisi turvaa tulevaisuuden mahdollisesti kasvavia kuormia varten.

Fingridin vakiopylväiden lujuuslaskelmista nähdään missä osassa pylvästä on suurimmat käytönrajat milläkin maksimikuormalla. Ilmastollisista kuormista kovan tuulen ja jään yhdistelmä aiheuttaa laskelman mukaan suurimmat käyttöasteet pylväälle. Laskelmiin on otettu mukaan materiaalikertoimet sekä lujuuskoordinaation huomioiva lisäkerroin kirstys- ja suuremman kulman kulmapylväille. Lisäkerroin on mukana poikkeuksellisesti myös asennuskuormituksissa. Asennuskuormituksissa useimmiten pylväiden orret ovat lähempinä käytönrajojaan, kun taas ilmastolliset kuormat kuormittavat eniten rungon paarteita. Suuren kulman pylväillä kulman suuruus vaikuttaa siihen, onko rungolla vai orsilla suurempi käyttöaste taulukon 6 mukaisesti. Taulukosta 6 nähdään, että kyseisen vapaasti seisovan suurien johtokulmien pylvään käytönrajat ovat yli 100 % asennustapauksissa, minkä takia pylväs täytyy taakata johtimien asennuksen ajaksi.

*Taulukko 6. Esimerkki tyyppipylväiden maksimikäyttöasteista maksimikuormituksilla. [14]*

<b>Pylväs</b>	<b>Sää- ja kuormatilat</b>		<b>Asennustapaukset</b>	
4Y30 20 gon	52 %	67 %	138 %	104 %
4Y30 60 gon	87 %	61 %	128 %	98 %
4Y27 20 gon	51 %	67 %	129 %	104 %
4Y27 60 gon	86 %	61 %	119 %	98 %
4Y24 20 gon	50 %	67 %	135 %	104 %
4Y24 60 gon	85 %	61 %	125 %	98 %
4Y21 20 gon	48 %	67 %	145 %	105 %
4Y21 60 gon	83 %	61 %	133 %	99 %
4Y18 20 gon	48 %	67 %	140 %	104 %
4Y18 60 gon	84 %	61 %	129 %	98 %

Harustetuilla pylväillä harukset ovat aina testeissä pettäneet ensimmäisenä. Tapahtuneissa vioissa onnistunutta lujuuskoordinaatiota orren tai ukkospukin taipumisella ennen pylvään muun rakenteen sortumista selittää jo asennettujen muiden johtimien ja harusten jousen lailla tukeva vaikutus pylvääseen.

Osana tätä diplomityötä perehdyttiin yhden merkittävän rakenteilla olevan voimajohto-hankkeen yleissuunnitteluun ja rakentamiseen. 400 kV Metsälinja on 303 kilometriä pitkä voimajohto Muhokselta Petäjävvedelle. Pitkä voimajohto on jaettu useampaan yleissuunnittelu- ja rakentamisvaiheeseen. Metsälinja vahvistaa Suomen pohjois-etelä-sähkön-siirtoa sekä mahdollistaa kasvavan tuulivoiman liittämisen verkkoon ja Suomen pitämi-sen yhtenäisenä hinta-alueena sähkömarkkinoilla.

Työssä perehdyttiin Metsälinjan suunnitteludokumentteihin sekä saatiin tietoa hankkeen projektipäälliköltä ja muilta asiantuntijoilta. Tämän diplomityön toimeksiantaja halusi sel-vityksen toteutuneesta lujuuskoordinaatiosta voimajohdoilla sekä Metsälinja-hankkeen komponenttien mekaanisten lujuuksien marginaaleista. Tätä varten työssä perehdyttiin FAT- (factory acceptance test) ja tyyppitestien raportteihin. Fingridin voimajohdot ovat osoittautuneet tähän asti olevan hyvin kestäviä ja tämän työn osana haluttiin varmistaa, ettei voimajohtoja suunnitella ja rakenneta liian ylimitoitettuna. Voimajohto on kallis ja tärkeä rakenne, joten sen liika ylimitoitus tuhlaisi rahaa ja luonnonvaroja. Toisaalta voi-majohtojen rakenteissa olisi hyvä olla tarpeeksi marginaalia, jotta ne kestävät tulevai-suuden muuttuvat ilmasto-olot.

## 7.2 Lujuuskoordinaatio yleissuunnittelussa

Fingridin yleissuunnittelua ohjaavien teknisten eritelmien mukaan taulukon 5 (sivu 48) mukainen tyypillinen lujuuskoordinaatio voidaan katsoa toteutuvan, kun pylväiden vauri-oituminen ennen perustuksia varmistetaan lisäkertoimilla pylväiden aiheuttamiin kuor-miin tai perustusten lujuuksiin. Samoin lisäkertoimien käytöllä varmistetaan, että kannatuspylväät vaurioituvat ennen muita pylvästyyppejä. Esimerkiksi kiristyspylvään perus-tuksen lujuus tai siihen pylvään aiheuttamat kuormat voidaan tyypillisissä tapauksissa kertoa lisäkertoimilla 1,1 pylvästyypin mukaan ja 1,1 perustuksen luotettavuuden lisää-miseksi eli yhteensä lisäkertoimella  $1,1 \times 1,1 = 1,21$ . Komponenttien materiaaliominaisuuksien osavarmuusluvulla otetaan huomioon hajonta ominaisuuksissa. Tähän voi-daan kertoa mukaan halutessa lujuuskoordinaation mukainen kerroin 1,1, kuten perus-tuksien ja eri pylvästyyppeiden kohdalla. Tähän ei ole standardeissa varsinaisesti ohjeis-tettu, vaikka taulukon 5 mukainen lujuuskoordinaatio suosittelee mitoittamaan johtimet heikommiksi, kuin eristimet ja varusteet. [21, 44, 45]

Yleissuunnittelussa lasketaan suunniteltujen pylväiden mitoittavat kuormitustapaukset. Vastaavat kuormitustapaukset ovat saatavilla myös vakiopylväiden osalta lujuuslaskel-mista. Pylväiden lujuuslaskelmissa komponenteille lisätään tietyt materiaalien osavar-muusluvut. Kaikissa dokumenteissa ei kuitenkaan käytetä termiä osavarmuusluku vaan

esimerkiksi materiaalikerroin. Ylimääräisiä kertoimia voidaan lisätä esimerkiksi kiristyspylväille ja johtimien asennuskuormien mallintamisessa. Pylväiden lujuuslaskelmista saadaan pylväiltä perustuksiin tulevat kuormat, joiden perusteella lasketaan perustuslaskelmat. Perustuslaskelmissa huomioidaan lujuuskoordinaatio lisäämällä pylväältä tuleviin kuormiin osavarmuusluku, jolloin saadaan perustusten mitoittavat kuormat. Osavarmuusluku-termistä käytetään laskelmissa myös esimerkiksi termiä koordinaatiokerroin, joka viittaa lujuuskoordinaatioon.

### 7.2.1 Metsälinjan yleissuunnittelun lujuuskoordinaatio

Työssä tarkasteltiin Metsälinja-hankkeen pylväskerheeseen kuuluvia pylväitä ja niiden käyttöastetta maksimituulijänteen perusteella. Vakiopylväiden lujuuden käytönraja määräytyy pylvään korkeuden, johtokulman ja  $\Sigma Y$ :n arvojen määrittämän maksimituulijänteen pituudesta. Käytönrajan taulukoitua tuulijänteen pituutta verrattiin todelliseen tuulijänteeseen, josta saatiin mekaanisen lujuuden käyttöaste. Käyttöasteiden laskennassa on huomioitu osavarmuuskertoimet. Tarkastelun kohteina olleiden pylväiden käyttöaste oli keskimäärin 75 %. Fingrid edellyttää käyttöasteen olevan alle 90 % keinona varautua rakentamisen aikaisiin muutoksiin, kuten pylväspaikan muuttumiseen. Käyttöaste oli yli 90 % osalla pylväistä ja parilla pylväällä oli suurempi  $\Sigma Y$ :n arvo, kuin käytönrajoissa määriteltä. Pylväät, joiden käyttöaste on yli 100 % tarkastetaan aina erikseen. Tyypipylväiden käytönrajat lasketaan maksimitapauksissa, ja todelliset pylväät on harvoin mitoitettu johtokulman, jänteen pituuden ja  $\Sigma Y$ :n kannalta äärirajoille. Yleensä tarkempi tarkastelu osoittaaakin yli 100 % käyttöasteisen pylvään olevan todellisuudessa käytönrajojen sisällä. Ongelmana pylväiden tarkastelussa oli, että kaikille tyypipylväille ei ollut samanlaisia, selkeitä käytönrajoja. Osalle pylväistä ei ollut käytönrajoja ollenkaan, joten nämä yksittäiset pylväät eivät olleet mukana tarkastelussa.

Metsälinjan eristinketjujen ja eristimien käyttöasteista kiristys- ja kannatuspylväillä oli tehty kattava raportti, josta on nähtävillä kooste liitteessä 1. Kannatusketjujen käyttöasteeseen vaikuttaa eri kuormitustapaukset. Johtimen jännityksen muuttuminen eri kuormien ja lämpötilojen vaikutuksesta aiheuttaa kuormaa kiristysketjuille. Kohtisuoria kuormia ketjuille aiheuttaa johtimien jännitykset, eristimien, varusteiden ja johtimien painot sekä jään ja lumen paino. Poikittaista kuormaa syntyy tuulen vaikutuksesta. Raportissa oli laskettu 400 kV virta-, ukkos- ja OPGW-johtimien eristimien ja varusteiden kuormat eri kuormitustilanteissa. Kiristyspylväiden osalta raportissa oli laskettu johtimien jännitykset ja riippumat. Raportissa merkittävää oli eristimien ja eristinketjujen matalat lujuuksien käyttöasteet, jotka suurimmillaankin olivat alle 35 %. Eristimien suurin käyttöaste on kovan tuulen ja nimellisen jääkuorman yhdistelmässä.

Huippujään ja lumen yhdistelmäkuorma aiheutti lähes kaikilla johtimilla niin kannatuskuin kiristyspylväilläkin suurimman kuorman ja lujuuden käyttöasteen. Pienimmät käyttöasteet ja kiristyspylväillä johtimien pienimmät riippumat olivat minimilämpötilassa  $-55^{\circ}\text{C}$ . Vastaavasti johdinten pienimmät jännitykset syntyvät maksimilämpötiloissa  $80^{\circ}\text{C}$  virtajohtimilla ja  $40^{\circ}\text{C}$  ukkos- ja OPGW-johtimilla. Suurin riippuma virtajohtimilla oli odotetusti maksimilämpötilassa, mutta ukkos- ja OPGW-johtimilla suurimman riippuman aiheutti huippujään ja lumen yhdistelmäkuorma.

Matalat käyttöasteet eristimien ja eristinketjujen lujuuksissa selittyy ensinnäkin sillä, että halutun lujuuskoordinaation varmistamiseksi eristimien materiaalin osavarmuuslukuna käytetään lukua 2,0 ja varusteille lukua 1,6. Nämä nostavat komponenttien minimilujuuden arvoa. Toiseksi komponenttien valmistajat eivät voi valmistaa jokaiselle vaaditulle lujuudelle vaan tietyin välein, esimerkiksi eristimien minimivetolujuudet ovat tyypillisesti 120, 160 tai 210 kN. Matalat käyttöasteet takaavat komponenttien kestävyys tulevaisuudessa, vaikka kuormat kasvaisivat paljonkin. Onko eristinketjujen ylimeritys näin reilusti kuitenkaan järkevää, kun muiden voimajohtokomponenttien lujuuksien käyttöasteet ovat huomattavasti suurempia? Komposiittieristimiä on tosin nykyään mahdollista teetää useammalle eri mekaanisen lujuuden arvolle. Toisaalta ylimerityksen pienentämisen mahdollisten kustannussäästöjen merkitystä on syytä pohtia isossa kokonaisuudessa.

### 7.3 Lujuuskoordinaatio voimajohtojen rakentamisessa

Työssä tutkittiin muutamien viimeaikaisten voimajohtohankkeiden vapaasti seisovien pylväiden perustuksia ja niiden betoni- ja rauditusmääriä tarkoituksena kartoittaa, miten eri hankkeiden perustukset suunnitellaan ja mitoitetaan. Jotkut perustukset oli toteutettu yhdellä isolla kaikki jalat kattavalla perustuslaattalla. Joissain tapauksissa jokaiselle pylvään jalalle voidaan tehdä oma erillislaattaperustus, joihin kuuluu yleisesti vähemmän betonia ja terästä, kuin kaikkien jalkojen yhteiseen laattaan. Isojen laattojen käyttö voi helposti olla ylimeritettua, mutta joskus ne voivat olla ainoa vaihtoehto riittävän kestävyys saavuttamiseksi. Syynä voi olla myös yleiset suunnittelukriteerit, kuten Ruotsin kantarverkko-yhtiö Svenska kraftnätillä, joka käyttää ainoastaan isoja perustuslaattoja voimajohtopylväillään. Fingridin voimajohtojen käytetään molempia vaihtoehtoja, suunnittelijasta riippuen. Kaikkiin kohtiin, esimerkiksi kallioon, ei voida laittaa laattaperustusta, vaan käytetään kallioankkureita, jolloin käytettävät betoni- ja teräsmäärät ovat huomattavasti pienempiä.

Erään voimajohtoprojektin rakentamisvaiheessa oli esitetty perusteet kannatuspylväiden eristimien ja varusteiden valinnalle. NNA:n mukaan suunnittelija oli laskenut kriittisimmän

kuormitustilanteen komponenttien ja jääkuorman painojen sekä tuulen vaikutusten perusteella. Mitoittavaksi kuormaksi osoittautui huippujään ja nimellistuulen yhdistelmäkuorma, jossa kohtisuora kuorma oli 53 kN ja poikittainen kuorma 17 kN. Kun otettiin huomioon Fingridin teknisissä eritelmissä määritetyt materiaaliominaisuuksien osavarmuusluvut eristimille 2,0 ja varusteille 1,6, saatiin mekaanisen kestävyuden rajoiksi eristimille 112 kN ja varusteille 90 kN. Fingridin teknisissä eritelmissä on määritetty 400 kV eristimille vähintään 160 kN nimellinen lujuus, minkä mukaan komponentit valittiin, vaikka esimerkiksi 120 kN nimellisen lujuuden komponentit olisivat olleet riittävät.

Samassa dokumentissa on vastaavat tulokset kiristysketjuille. Mitoittaviksi kuormiksi materiaaliominaisuuksien osavarmuusluvut huomioiden saatiin eristimille 348 kN ja varusteille 280 kN. Kiristysketjujen rinnakkaisiksi eristimiksi valittiin 210 kN eristimet, jolloin ne yhdessä kestävät ( $2 \times 210 \text{ kN} =$ ) 420 kN kuorman. Saman 420 kN kuorman kestävät varusteet valittiin, jolloin niiden käyttöaste maksimikuormalla olisi vain 67 %. Kannatusketjuihin verrattuna suurempi mitoitettava kuorma kiristysketjuille takaa toimivan lujuuskoordinaation. On ilmeisesti ajateltu, että sarjassa eristimien kanssa olevien varusteiden täytyy olla lujuudeltaan yhtä suuret kuin eristimet. Tällöin eristimet varusteineen käsitellään lujuuskoordinaatiossa yhtenä ja ne vaurioituisivat yhtä aikaa. Taustalla on myös ajatus, että toisen ketjun rikkoontuessa ehjä ketju kestäisi kuorman yksinäänkin. Tästä kuitenkin seuraa reiluhkoa ylimitoitusta. Eristimien ja niiden varusteiden hajoamisjärjestyksellä ei liene suurta merkitystä voimajohtokokonaisuuden kannalta.

Eräällä voimajohtotyömaalla haastavassa johtimien vedossa, jossa samalla vedettiin vanhoja johtimia pois ja uusia tilalle, pylvään osa murtui. Johtimien vedossa jouduttiin käyttämään krokotiilia väärinpäin, jolloin se oli alttiimpi kääntymään väärinpäin, mikä tapahtuikin yhdellä johdinvetopyörällä. Krokotiilin jumiuduttua annettiin vahingossa vetokoneella löysää väärään paikkaan, jolloin pylvään orren pää murtui liiasta kuormasta. Tilanteessa päästiin vahingossa demonstroimaan käytännössä johdin poikki -kuormaa, ja selvisi, että pylvään sisäinen lujuuskoordinaatio toimi oikein. Esimerkiksi pylvään jalan sortumisen sijaan murtunut ja katkennut orren pää ei aiheuttanut suurta keskeytystä johtimien vetoon, kun korvaavat rakenteet asennettiin pylvääseen. Koko pylvästä ei jouduttu uusimaan, vain joitakin sauvoja orren päästä. Tämä inhimillisestä virheestä aiheutunut kuorma ei tietenkään ole sellainen, joka voitaisiin tai pitäisi ottaa suunnittelussa mitoituksessa huomioon, mutta se tarjosi tätäkin työtä varten tärkeän tiedon, että pylvään sisäinen lujuuskoordinaatio oli toimiva.

Eristinketjujen kiinnityskohdat pylväissä eli u-pultit ovat samoja kaikilla 400 kV pylväillä. Tästä johtuen joillain pylväillä u-pultin lujuus voi olla jopa suurempi kuin perustuksen,

mikä ei aina ole suositeltavan lujuuskoordinaation mukaista. Toisaalta u-pulttien lujuus testataan materiaalin lujuutena suorana tankona, joten valmiin u-mallisen pultin lujuus voi olla eri. U-pultin ja perustuksen lujuuksia tai todellista vaurioitumisjärjestystä on hankala todeta, koska niihin vaikuttaa eri voimat. Voimajohtokomponenteista ensimmäisenä vaurioituu kuitenkin todennäköisesti ennen u-pultteja ja perustuksia jokin muu komponentti. Jos esimerkiksi pylvään jalka romahtaa, u-pultteihin ja perustuksiin vaikuttava kuorma pienenee tai häviää eikä nähdä kumpi näistä olisi lujempi. Täten suurta ongelmaa u-pulttien ylimitoituksesta ei syntyne.

Merkittävä kuorma voimajohtorakenteille syntyy johtimien vedossa. Eräällä voimajohtotyömaalla johtimien kiristyksessä huomattiin kahdessa kiristysvälin eri päiden pylväissä muodonmuutoksia eli ne eivät kestäneet asennusten aikaisia kuormia. Pylväät eivät olleet Fingridin vakiopylväitä, ja niiden suunnittelussa mallinnus oli jäänyt puutteelliseksi. Pylväille tehtiin uudet, tarkemmat mallinnukset, joissa huomattiin tarve vahvistavien rakenteiden lisäämiselle. Pylväät eivät olisi kestäneet myöskään kovia tuulia tai tuulen ja jään yhdistelmäkuormia. Samassa yhteydessä tarkistettiin muita johdon pylväitä, jotka kaipasivat myös vahvistuksia. Vahvistukset suunniteltiin ja asennettiin. Toisen pylvään myötölujuus ei ollut ylittynyt, joten se palautui alkuperäiseen muotoonsa. Toiseen pylväeseen tuli pysyviä muodonmuutoksia ja sen alaosa jouduttiin uusimaan kokonaan. Lienee pieni onni onnettomuudessa, että suunnitteluvirhe tuli ilmi rakentamisen aikana, eikä käytössä, jolloin useampi pylväs olisi voinut vaurioitua pahasti aiheuttaen käyttökätkön. Vaurioiden minimointia edesauttoi työntekijöiden tarkkaavaisuus työmaalla, kun muutokset pylväissä huomattiin hyvissä ajoin.

### **7.3.1 Metsälinjan komponenttien lujuudet**

Metsälinjan komponenttien testiraporteista selvisi niiden todelliset lujuuden arvot, joita verrattiin nimellisiin arvoihin. Vain joku yksittäinen testikappale ei täyttänyt vaatimuksia. Pääasiassa komponenttien lujuuksissa oli hyvin marginaalia ja hajonta oli pientä. Testeillä todettujen ja nimellisten lujuuksien suhde oli keskimäärin 128 %. Kunkin komponenttiryhmän testatun ja nimellisen lujuuden keskimääräinen suhde on nähtävissä taulukossa 7. Testejä oli tehty komposiitti- ja lasieristimille, varusteille, virta- ja ukkosjohtimille, pulteille ja pylväiden eri osille. Testeissä saatiin arvoja komponenttien veto-, murto- ja myötölujuuksille.



Taulukko 7. Metsälinjan komponenttien keskimääräiset lujuuksien marginaalit.

Komponentti	Testattu / nimellinen lujuus (ka)
Komposiittieristimet	130 %
Lasieristimet	145 %
Varusteet	132 %
OPGW	141 %
Pultit ja U-pultit	113 %
Pylväiden teräsosat	117 %
Johtimet	116 %

Eniten marginaalia oli lasieristimien ja OPGW-johtimien lujuuksissa, joista osa kesti testeissä lähes puolet nimellislujuutta isompaa voimaa. Myös varusteiden osalta marginaalia lujuuksissa oli reilusti. Kokonaisuudessa testattavia varusteita oli satoja ja ne ovat kuitenkin voimajohtokokonaisuudessa pieniä massoja, joten niiden ylimitoitus ei ole taloudellisesti niin merkittävää kuin esimerkiksi johtimien tai pylväiden. Varusteet valitaan valmistajien katalogeista, joissa ei ole tuotteita kaikille mahdollisille nimellislujuuksille, mistä johtuu suuretkin marginaalit lujuuksien arvoissa. Pienimmät marginaalit olivat joidenkin pulttien vetolujuuksissa, jotka olivat hyvin lähellä nimellistä arvoaan. Vakiojohtimina käytetyt Duck, Finch ja Sustrong testattiin todellisilta vetolujuuksiltaan keskimäärin 16 % nimellistä suuremmiksi.

## 7.4 Voimajohtojen lujuuskoordinaatio muualla maailmassa

Osana laajempaa eristimiin liittyvää kyselyä muille eurooppalaisille kantaverkkoyhtiöille saatiin myös tämän työn kannalta kiinnostavaa tietoa lujuuskoordinaation toteuttamisesta voimajohtotoiminnassa. Kyselyyn saatiin vastauksia 8 kantaverkkoyhtiöltä ja yhdeltä verkkoyhtiöltä. Vastauksia saatiin Alankomaista, Belgiasta, Norjasta, Ranskasta, Ruotsista ja Saksasta. Kolme vastanneista yhtiöistä oli Saksasta. Kyselyssä kysyttiin käytettävistä osavarmuusluvusta, mekaanisen lujuuden marginaaleista ja lujuuskoordinaation soveltamisen tarkkuudesta. Osa yhtiöistä ei ollut vastannut kaikkiin näihin kysymyksiin. Yhteistä kaikissa vastauksissa oli, että tiukkaa vaatimusta voimajohtojen heikommaksi mitoitettavaksi komponentiksi ei ole. Myös eristimien ja varusteiden mekaanisen lujuuden marginaalit olivat samaa luokkaa kuin Suomessa Fingridillä. Materiaalioinaisuksien osavarmuusluvut olivat niiden osalta kyselyyn vastanneiden yhtiöiden mukaan suurempia kuin Suomessa käytettävät 1,6 varusteille ja 2,0 eristimille. Norjassa ja Alankomaissa osavarmuusluku oli eristimille ja varusteille sama 2,0. Belgiassa osavarmuusluvut määräytyvät kuormitustilanteen mukaan. Saksan kolmessa verkkoyhtiössä varusteille käytetään suurempaa osavarmuuslukua 2,4 kuin eristimille 2,3. Materiaalioinaisuksien osavarmuusluvuilla huomioidaan komponenttien tuotannon laadun

tasaisuuden. Osavarmuusluvun kasvaessa tuotannon laatu on epätasaisempaa. Kyselyn vastausten perusteella voidaan päätellä, että ainakin kyselyyn vastanneiden maiden osalta EN-standardin ohjeistama lujuuskoordinaation soveltaminen ymmärretään samalla tavalla. Tämä vahvistaa ajatusta toimivasta lujuuskoordinaatiosta Fingridin voimajohtotoiminnassa. Osavarmuuslukujen eroavaisuudet voivat selittyä vanhojen kansallisten normien vaatimuksina.

Cigrén vuonna 1996 julkaisun maailmanlaajuisen kyselyn tuloksien [7] mukaan 28:sta kyselyyn osallistuneesta maasta 15 ilmoitti soveltavansa voimajohtojen suunnittelussa lujuuskoordinaatiota, ja niistä vain 7 kansainvälisen IEC-standardin mukaisesti. Suomessa ei kyselyn vastauksen perusteella huomioitu lujuuskoordinaatiota vuonna 1996. Yleisesti selvitykseen osallistuneissa maissa sovellettiin tuolloin pääasiassa determinististä tai osittain RBD-lähestymistapaa suunnittelussa. RBD-menetelmä lienee tullut myöhemmin voimajohtojen suunnitteluun Eurooppaan, kuin esimerkiksi Kanadaan. Euroopan maista mikään ei soveltanut kansainvälisen standardin mallia, vaan lujuuskoordinaatiota toteuttavilla mailla oli omat käytännöt siihen. Eurooppalainen standardi 50341-1 on ilmestynyt ensimmäisen kerran vuonna 2001, jolloin mainittiin myös lujuuskoordinaatio viitaten kansainväliseen standardiin. Myös vuonna 2006 ilmestyneessä, nykyisen NNA:n edeltäjässä, SFS-EN 50341-3-7 Suomen kansallisissa velvoittavissa määrittelyissä mainittiin lujuuskoordinaatio. Tässä Suomen vanhassa kumotussa NNA:ssa opastettiin vain mitoittamaan kulma-, kiristys- ja päätepylväät kestävimmiten osavarmuusluvulla 1,1, kuten nykyversiossakin. Myös useasta tasosta harustettujen pylväiden materiaaleille määrättiin käytettäväksi lisäkertoimia. Tänä päivänä vastaavanlaajuisessa kyselyssä luultavasti ainakin Suomesta ja muista EN-standardia noudattavista maista tulisi myöntäviä vastauksia lujuuskoordinaation soveltamiseen. [7]

## 8. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

### 8.1 Miten lujuuskoordinaatio tulisi huomioida Fingridin voimajohtotoiminnassa

Fingridin voimajohtojen suunnittelussa ja rakentamisessa lujuuskoordinaatio on osoittautunut toimivaksi sattuneiden vikojen ja vaurioiden vähäisten vaikutusten perusteella. Joidenkin komponenttien osalta toimeksiantajan huoli liiallisesta ylimitoituksesta on kuitenkin aiheellinen. Tämä ei ole kuitenkaan yksiselitteisesti ratkaistavissa esimerkiksi suunnittelun optimoinnin ja komponenttivalmistajien katalogien vuoksi.

Joitain ideoita toiminnan kehittämiseksi heräsi työn aikana. Vakiopylväiden käytönrajojen yhtenäistäminen ja niiden tarkistamisen automatisointi sujuvoittaisivat työtä ja minimoisivat mahdollisia virheitä. Myös esimerkiksi eristinvarusteiden valintaa voisi halutessa tarkastella uusiksi, jos halutaan nostaa eristinketjujen matalaa käyttöastetta. Niin standardeissa kuin teknisissä eritelmissäkin esitetyn lujuuskoordinaation toteutuminen olisi hyvä varmistaa komponenttien valinnassa. Tutkimuksessa ei noussut selkeitä korjaus- tai muutostarpeita esimerkiksi Fingridin teknisiin eritelmiin, mutta tehtiin lyhyt kooste ehdotuksista toiminnan kehittämiseksi.

### 8.2 Ilmastonmuutos ja sään ääri-ilmiöt

Suomen ilmaston on ilmastonmuutoksen vaikutuksesta ennustettu muuttuvan etenkin talven osalta. Talven lämpötilojen ennustetaan nousevan ja sademäärien kasvavan. Tämän voisi päätellä tarkoittavan jäätävien sateiden yleistymistä Suomessa, kun talven keskilämpötilat ovat menneinä vuosina 1991–2020 olleet Helsingissä  $-2,5^{\circ}\text{C}$  ja Sodankylässä  $-11,4^{\circ}\text{C}$ . Jäätävän sateen kannalta otollisin lämpötila on lähellä  $0^{\circ}\text{C}$ , jota kohti ollaan siis menossa. Myrskytuulien on myös ennustettu voimistuvan Suomessa, joka tietysti yhdistettynä mahdollisiin jääkuormiin ei lupaa hyvää voimajohtojen kuormituksille. Ennusteen mukaan maaperän lyhentyvä routakausi tiennee ongelmia sähkönjakeluverkoille, kun helpommin myrskyssä kaatuvat puut aiheuttavat häiriöitä. Suomessa ollaan tosin hyvää vauhtia rakentamassa säävarmaa sähkönjakeluverkkoa Sähkömarkkinalain vaatimusten mukaan, joten suuremmilta käyttöhäiriöiltä ehkä säästytään tulevaisuuden maakaapeloiduissa sähkönjakelussa. [29, 30]

Kuten aiemmin mainittu, jäätävät sateet ja jäämyrskyt ovat aiheuttaneet maailmalla jo vuosia suuria käyttöhäiriöitä sähkönsiirtoon, mutta Suomessa jäätävän sateen aiheuttamiin kuormiin ei ole vielä ollut tarpeellista puuttua voimajohtojen osalta. Tulisiko siihen kuitenkin varautua hiljalleen, kun ilmastonmuutosennusteet vihjaavat siihen suuntaan? Suomen ja Ruotsin yhteishankkeessa Aurora Linessa maiden välille rakennetaan uusi rajasiirtoyhteys ilmajohdoin Ruotsin Messauresta Suomen Pyhänselkään. Länsinaapurin kantaverkkoyhtiö Svenska Kraftnät mitoittaa maansa puolen ilmajohdot kestämään jäätävää sadetta, toisin kuin Fingrid Suomessa. Ruotsissa on ollut 1920-luvulla jäämyrsky, jonka seuraukset olisivat nykyään merkittävät sähkönsiirtoverkolle. Svenska Kraftnät varautuukin jäämyrskyjen varalle kriisinhallinnassaan ja voimajohtojen suunnittelussa [46.]

Kanadalaisessa tutkimuksessa [33] on arvioitu jäätävän sateen määrää ja vaikutusta ilmajohtorakenteisiin vuosille 2041–2070 ja 2071–2100 käyttäen ilmastonmuotossimulaatioita. Ennusteet tuleville vuosikymmenille vaihtelevat eri simulaatioiden välillä, mutta kaikkien tuloksien mukaan eri osissa Kanadaa jäätyvät sateet joko lisääntyvät tai vähenvät nykytilanteesta. Jäätävän sateen ja sitä kautta voimajohtorakenteisiin mahdollisesti vaikuttavan jääkuorman määrä näyttäisi enemmän lisääntyvän kuin vähentyvän, mutta jäätävän sateisia päiviä tulee olemaan lähes sama määrä vuodessa kuin nykyään. Tutkimustuloksissa on hyödynnetty äärimmäisen jääkuorman kertymisessä kolmen tunnin dataa, ja tutkijaryhmä tunnistaa tästä johtuvan tulosten epätarkkuuden. On kuitenkin selvää, että ilmasto tulee muuttumaan niin Kanadassa kuin meillä Suomessa, ja paikallisesti tämä voi tarkoittaa suuriakin muutoksia, joilla voisi olla merkitystä myös voimajohtojen kuormiin. Voimajohdot suunnitellaan vähintään 50 vuoden käyttöiälle, joten tukena on hyvä olla ilmastoennusteita useille tuleville vuosikymmenille. [33]

Toinen kanadalainen tutkimus [40] arvioi ilmastonmuutoksesta mahdollisesti johtuvien kasvavien tuulennopeuksien ja jäämäärien vaikutusta voimajohtojärjestelmän luotettavuuteen. Tutkimuksessa selvisi, että huipputuulennopeuksien keskiarvon kasvaminen pienentää luotettavuutta ja päinvastoin keskiarvon pienentyminen parantaa luotettavuutta. Huipputuulennopeuksien keskijajonnan kasvu pienentää luotettavuutta. Samanlaiset, joskin selkeästi pienemmät muutokset luotettavuuteen, havaittiin huippujään kertymisen muutoksissa. Tulevaisuuden voimajohtojen mitoittamisessa ei voida kuitenkaan tutkijoiden mukaan vain suoraan käyttää suurempia tuulennopeuksia tai jääkuormia, vaan on huomioitava yksittäisten komponenttien vaikutukset vikoihin ja niiden kehittämismahdollisuudet sekä keinot toteuttaa haluttu lujuuskoordinaatio. [40]

## 9. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä perehdyttiin Fingridin voimajohtojen suunnitteluun ja rakentamiseen sekä niitä ohjaaviin standardeihin EN-50341-1 ja EN-50341-2-7, ja niiden ohjeistuksiin lujuuskoordinaation soveltamiseen. Vertailun vuoksi työssä tutkittiin myös vastaavaa kansainvälistä standardia IEC 60826. Myös muita aiheeseen liittyviä julkaisuja, etenkin käytännön lujuuskoordinaatiosta, on pyritty hyödyntämään kokonaiskuvan selkeyttämiseksi.

Lujuuskoordinaatiota käsitellään kattavammin kansainvälisessä standardissa ja pohjois-amerikkalaisissa julkaisuissa, kuin eurooppalaisissa. Siellä vallalla on ehkä enemmän RBD-ajattelu, johon lujuuskoordinaatio oleellisesti kuuluu. Suomessa kuitenkin toimitaan eurooppalaisen standardin mukaan. Kahta eri mitoituksen menetelmää voidaan verrata ja jossain määrin nähdä yhteneväisyyksiä, mutta lujuuskoordinaation toteuttamiseen ei ole niin selkeitä työkaluja tarjolla eurooppalaisessa toimintatavassa. Kansainvälisesti tehtyjen kyselyjen perusteella voidaan todeta, että osassa maita lujuuskoordinaation toteuttaminen on kuitenkin samansuuntaista, eikä sitä sovelleta missään kyselyihin vastanneista maista ehdottoman tarkasti.

Vika- ja vaurioraportteihin perehtymisen perusteella voidaan todeta, että Fingridin sähkösiirtoverkon voimajohtojen lujuuskoordinaation hallinta vaikuttaisi olevan erinomaisella tasolla. Voimajohdoille sattuneiden vikojen ja vaurioiden syyt eivät ole tutkittujen raporttien mukaan olleet lujuuskoordinaatiossa, vaan esimerkiksi materiaalipuutteissa ja mitoitettua suuremmissa jääkuormissa. Viat ja vauriot ovat kuitenkin osoittaneet Fingridin voimajohtojen toimivan lujuuskoordinaation, kun suuremmilta sarjavaurioilta on vältytty. Lujuuskoordinaation käsite ei välttämättä ole ollut tuttu pitkään, mutta ajatus on ollut selkeä, esimerkiksi perustusten ja kiristyspylväiden mitoittamisella vahvimiksi.

Tässä työssä tarkempi perehtyminen voimajohtojen suunnitteluun ja rakentamiseen osoitti, että standardin ehdottamaa täydellistä lujuuskoordinaatiota on haastava toteuttaa yksittäisille pääkomponenteille. Komponenttien katalogeista voidaan joutua valitsemaan huomattavasti mitoitettua suuremman lujuuden yksiköitä. Myös suunnittelun standardointi voi sekoittaa ideaalisen lujuuskoordinaation toteutumista. Lienee kuitenkin tärkeämpää, että yleisellä tasolla lujuuskoordinaation pääajatus toteutuu, eli mahdollisten vikojen ja vaurioiden kesto ja kustannukset saadaan minimoitua.

Työssä tutkittiin voimajohtojen komponenttien testitulosten ja nimellisten lujuuden arvojen suhdetta sekä eri komponenttien käyttöasteita lujuuden kannalta. Harva komponentti oli maksimikäytönrajallaan tai suuresti ylimitoitettu, mutta näitäkin löytyi. Suurilta osin ylimitoitukset selittyvät komponenttikatalogien suppeudella tai vakiokomponenttien käytöllä. Komponenttien lujuuksissa on hyvä pitää joku marginaali materiaaliominaisuuksien varianssin takia, mutta myös varautumisena muuttuviin olosuhteisiin. Ilmastonmuutos uhkaa koventaa tuulia ja lisätä jäätäviä sateita myös Suomessa, mikä saattaa muuttaa voimajohtojen kuormitusten mitoitusta tulevaisuudessa. Ei ole kuitenkaan yksiselitteistä tapaa selvittää, kuinka suuria ilmastollisten kuormien kasvuja nykyinen voimajohtojen mitoitus kestää. Ilmastolliset kuormat voimajohtojen voimat voivat joissain paikoissa kasvaa ja toisissa pienentyä. Oman hankaluutensa arvioimiseen tuo myös ilmasto-olojen muuttamisen vaikea ennustettavuus.

Työn tavoitteet täyttyivät lujuuskoordinaation käsitteen selkeyttämisen ja toteutumisen osalta. Lujuuskoordinaation tarkka toteutus osoittautui tutkimuksessa hieman monimutkaisemmaksi, kuin standardien perusteella saattoi olettaa. Tärkeä päätelmä työssä on kuitenkin, että kussakin tilanteessa täytyy punnita eri näkökohtia, kuten taloudellisuutta sekä töiden sujuvuutta ja näin optimoida paras ratkaisu. Isompia kehityskohteista voimajohtojen suunnittelun ja rakentamisen osalta ei työssä havaittu, mutta joitakin kehitysideoita heräsi. Toimeksiantaja lienee tyytyväinen työn lopputulokseen, että lujuuskoordinaation hallinta on yleisesti hyvällä tasolla.

# LÄHTEET

- [1] F. Agnew, C. Jerry Wong, M. D. Miller, Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading: Fourth Edition, Reston: American Society of Civil Engineers, 2020
- [2] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen, V. Palva, Suurjänniteteekniikka, Otatieto, 2003
- [3] J. Bastman, Käyttöperiaatteista, Siirtorajoista, Luentomateriaali, Tampereen yliopisto, 2021
- [4] Overhead Lines - A Cigre Green Book, Cigré, 2015
- [5] Probabilistic Design of Overhead Transmission Lines, Technical Brochure 178, Cigré, 2001
- [6] Composite Insulator Handling Guide, Technical Brochure 184, Cigré, 2001
- [7] Review of IEC 829: Loading and strength of overhead lines, Technical Brochure 109, Cigré, 1996
- [8] Digita ja Digital Matter julkistavat uuden IoT-anturin sähkölinjojen ennakoivaan kunnonvalvontaan, Digita Oy, 2022. Saatavissa: <https://www.digita.fi/ajankoh-taista/digita-ja-digital-matter-julkistavat-uuden-iot-anturin-sahkolinjojen-enna-koivaan-kunnonvalvontaan/> 30.3.2022
- [9] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot I Järjestelmäteknikka Ja Sähköverkon Laskenta, Otatieto, 2011
- [10] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot II Verkon Suunnittelu, Järjestelmät Ja Laitteet, Otatieto, 2011
- [11] J. Elovaara, Y. Laiho, Sähkölaitostekniikan perusteet, Otakustantamo, 1988
- [12] The Planning, Design and Construction of Overhead Power Lines, Eskom Holdings Ltd, 2010
- [13] M. Farzaneh, S. Farokhi, W. A. Chisholm, Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines, McGraw Hill Professional Publishing, 2012
- [14] 4Y-pylvään lujuuslaskelma, Fingrid Oyj, 2020
- [15] Esittely, Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/esittely/> 26.1.2022
- [16] Fingrid Oyj – Kaksi vuosikymmentä, Fingrid Oyj. Saatavissa: [https://www.fingrid.fi/contentassets/b6f25b051ac34113b037da71daa0666b/fingrid\\_historiikki.pdf](https://www.fingrid.fi/contentassets/b6f25b051ac34113b037da71daa0666b/fingrid_historiikki.pdf) 26.1.2022
- [17] Helsingin 400 kilovoltin kaapeliyhteys, Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suunnittelu-ja-rakentaminen/helsingin-kaapeliyhteys/> 4.2.2022

- [18] Naapurina voimajohto, Fingrid Oyj. Saatavissa: [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/fingrid\\_naapurina\\_voimajohto\\_2020.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/fingrid_naapurina_voimajohto_2020.pdf) 16.3.2022
- [19] Osakkeet ja osakkeenomistajat, Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sivut/sijoittajat/osakkeet-ja-osakkeenomistajat/> 26.1.2022
- [20] Sähkön siirtovarmuus, Fingrid Oyj. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kanta-verkko/sahkonsiirto/sahkon-siirtovarmuus/> 24.3.2022
- [21] Technical Specification for OHTL, Fingrid Oyj, 2022
- [22] Vuosikertomus, Fingrid Oyj, 2022. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/vuosikertomus/> 31.3.2022
- [23] E. Ghannoum, Evolution of IEC 60826 “Loading and Strength of Overhead Lines”, Electrical Transmission in a New Age s. 59-73, ASCE, 2002
- [24] Helen Sähköverkko Oy:n sähkönjakeluverkon kehittämissuunnitelma 2022, Helen Sähköverkko Oy, 2022. Saatavissa: [https://www.helensahkoverkko.fi/globalassets/hsv/dokumentit/helen\\_sahkoverkko\\_kehittamissuunnitelma\\_2022\\_asiakaskuuleminen.pdf](https://www.helensahkoverkko.fi/globalassets/hsv/dokumentit/helen_sahkoverkko_kehittamissuunnitelma_2022_asiakaskuuleminen.pdf) 4.5.2022
- [25] The January Ice Storm, Hydro Québec. Saatavissa: <https://www.hydro-quebec.com/ice-storm-1998/a-perfect-storm.html> 22.2.2022
- [26] IEC 60071-1:2019 Insulation co-ordination. Part 1: Definitions, principles and rules, IEC, 2019
- [27] IEC 60826:2017 Overhead transmission lines – Design criteria, IEC, 2017
- [28] IEEE Guide for the Installation of Overhead Transmission Line Conductors, IEEE Std 524-2016, IEEE, 2016
- [29] Ennustettu ilmastonmuutos Suomessa, Ilmasto-opas.fi, 2017. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/74b167fc-384b-44ae-84aa-c585ec218b41/ennustettu-ilmastonmuutos-suomessa.html> 23.2.2022
- [30] Talvisään tilastoja, Ilmatieteen laitos. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/talvivilastot> 23.2.2022
- [31] M. Jalonen, Harusvartaiden korroosio, Fingrid Oyj, 2022
- [32] M. Jalonen, voimajohtojen vika- ja vaurioraportit, Fingrid Oyj, 1999–2022
- [33] D. Jeong, K. Koenig, L. Sushama, M. Vieira, Projected changes to extreme ice loads for overhead transmission lines across Canada, Sustainable cities and society, Vol.39, s.639-649, 2018
- [34] H. Kuikka, asiantuntijalausunnot, Fingrid Oyj, 2022
- [35] J. Lahtoniemi, asiantuntijalausunnot ja kuva, Fingrid Oyj, 2022
- [36] R. Laine, asiantuntijalausunnot, Fingrid Oyj, 2022
- [37] Y. Ojala, Voimajohdoilla käytettävät vaihejohtimet, Eltel Networks, 2001



- [38] E. Paitula, asiantuntijalausunnot, Fingrid Oyj, 2022
- [39] J. Potvin, T. Short, Resiliency Testing of Overhead Distribution Components and Systems s.1-5, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2016
- [40] S. Rezaei, L. Chouinard, S. Langlois, F. Légeron, Analysis of the effect of climate change on the reliability of overhead transmission lines, Sustainable cities and society, vol.27, s. 137-144, 2016
- [41] P. Riisö, Voimajohtokoulutus-tallenne, 2021
- [42] P. Saari, asiantuntijalausunnot, Fingrid Oyj, 2022
- [43] SFS 6001:2018 Suurjännitesähköasennukset, SFS, 2018
- [44] SFS-EN 50341-1 Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt, Liite A, SFS, 2013
- [45] SFS-EN 50341-2-7 Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteellä. Osa 2-7 Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt, SFS, 2015
- [46] Vägledning for krishantering inom elförsörjningen, Svenska kraftnät, 2014. Saatavissa: <https://www.svk.se/siteassets/3.sakerhet-och-hallbarhet/elbereds-kap/dokument/vagledning-for-krishantering.pdf> 4.5.2022
- [47] B. Tošković, Parviainen Arkkitehdit Oy, Viäntöä Savilahteen, Kuopion kaupunki, 2021. Saatavissa: <https://www.kuopio.fi/-/viantoa-savilahteen> 27.1.2022
- [48] Overhead Conductor Manual 2nd Edition, Southwire Company, 2007
- [49] Vahvavirtailmajohdomääräykset, Sähkötarkastuskeskus, 1993
- [50] V. Vainio, Ukkosjohdin antaa salamalle reitin maahan ja suojaa sähköhäiriöissä, Fingrid Oyj, 2021. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/ukkosjohdin-antaa-salamalle-reitin-maahan-ja-suojaa-sahkohairioissa/> 27.1.2022
- [51] K. Välimaa, asiantuntijalausunnot, Fingrid Oyj, 2022
- [52] P. Zhang, Y. Tan, J. Ai, R. Chen, B. Gao, H. Zhang, C. Jia, Lessons Learned from the Ice Storm in 2008 in Jiangxi China, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009

# LIITE 1: ERISTINRAKENTEIDEN LUJUUDET

<b>KANNATUSPVLVÄÄT</b>		<b>Sustrong</b>		<b>OPGW</b>	
Finch	oma paino 130 kg, eristimet 39 kg ja 138,06 kg + 43,4 kg	oma paino 2,1 kg	oma paino 3,2 kg		
<b>Eristimet</b>		<b>Keiju</b>	<b>Keiju</b>		
Suurin käyttöaste [%]	34,4	Suurin käyttöaste [%]	Suurin käyttöaste [%]		
Kuormitustapaus	kova tuuli + nimellinen jää	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus		
Kuorma, kohtisuora [kN]	24,635	Kuorma, kohtisuora [kN]	Kuorma, kohtisuora [kN]		
Kuorma, poikittainen [kN]	-49,533	Kuorma, poikittainen [kN]	Kuorma, poikittainen [kN]		
Pyvästyppi	2Hk	Pyvästyppi	Pyvästyppi		
Nfo	122	Nfo	Nfo		
Pienin käyttöaste [%]	6,2	Pienin käyttöaste [%]	Pienin käyttöaste [%]		
Kuormitustapaus	minimi lämpötila	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus		
Kuorma, kohtisuora [kN]	15,131	Kuorma, kohtisuora [kN]	Kuorma, kohtisuora [kN]		
Kuorma, poikittainen [kN]	0,161	Kuorma, poikittainen [kN]	Kuorma, poikittainen [kN]		
Pyvästyppi	1H	Pyvästyppi	Pyvästyppi		
Nfo	119	Nfo	Nfo		
<b>Eristinkeiju</b>					
Suurin käyttöaste [%]	20,8	Suurin käyttöaste [%]	Suurin käyttöaste [%]		
Kuormitustapaus	huippujää + lumi	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus		
Kuorma, kohtisuora [kN]	66,403	Kuorma, kohtisuora [kN]	Kuorma, kohtisuora [kN]		
Kuorma, poikittainen [kN]	-0,023	Kuorma, poikittainen [kN]	Kuorma, poikittainen [kN]		
Pyvästyppi	1H	Pyvästyppi	Pyvästyppi		
Nfo	148	Nfo	Nfo		
Pienin käyttöaste [%]	5,0	Pienin käyttöaste [%]	Pienin käyttöaste [%]		
Kuormitustapaus	minimi lämpötila	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus		
Kuorma, kohtisuora [kN]	16,109	Kuorma, kohtisuora [kN]	Kuorma, kohtisuora [kN]		
Kuorma, poikittainen [kN]	0,685	Kuorma, poikittainen [kN]	Kuorma, poikittainen [kN]		
Pyvästyppi	1H	Pyvästyppi	Pyvästyppi		
Nfo	153	Nfo	Nfo		
<b>KIRISTYSPVLVÄÄT</b>					
Finch	oma paino 100 kg, eristimet 61 kg	Sustrong	oma paino 5,4 kg	OPGW	oma paino 6,1 kg
Suurin jännitys [N]	62,789	Suurin jännitys [N]	Suurin jännitys [N]	Suurin jännitys [N]	Suurin jännitys [N]
Kuormitustapaus	minimi lämpötila -55°C	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus
Pienin rippuma [m]	2,77	Pienin rippuma [m]	Pienin rippuma [m]	Pienin rippuma [m]	Pienin rippuma [m]
Kuormitustapaus	minimi lämpötila -55°C	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus
Pienin jännitys [N]	24,235	Pienin jännitys [N]	Pienin jännitys [N]	Pienin jännitys [N]	Pienin jännitys [N]
Kuormitustapaus	maksimi lämpötila 80°C	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus
Suurin rippuma [m]	18,62	Suurin rippuma [m]	Suurin rippuma [m]	Suurin rippuma [m]	Suurin rippuma [m]
Kuormitustapaus	maksimi lämpötila 80°C	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus	Kuormitustapaus
Keskimmäinen käyttöaste [%], eristimet	43,41	Keskimmäinen käyttöaste [%], keiju	Keskimmäinen käyttöaste [%], keiju	Keskimmäinen käyttöaste [%], keiju	Keskimmäinen käyttöaste [%], keiju
Keskimmäinen käyttöaste [%], keiju	24,31				

16,34  
huippujää + lumi  
12,257  
-0,004  
1H  
148  
1,34  
minimi lämpötila  
1,008  
0,017  
1H  
119

20,4  
huippujää + lumi  
12,257  
-0,004  
1H  
148  
1,69  
minimi lämpötila  
1,016  
0,017  
1H  
119

31,006  
huippujää + lumi  
2,35  
minimi lämpötila -55°C  
7,81  
maksimi lämpötila -40°C  
18,42  
huippujää + lumi  
25,68

62,789  
minimi lämpötila -55°C  
2,77  
minimi lämpötila -55°C  
24,235  
maksimi lämpötila 80°C  
18,62  
maksimi lämpötila 80°C  
43,41  
24,31

31,006  
huippujää + lumi  
2,35  
minimi lämpötila -55°C  
7,81  
maksimi lämpötila -40°C  
18,42  
huippujää + lumi  
25,68

31,334  
huippujää + lumi  
2,32  
minimi lämpötila -55°C  
1,004  
maksimi lämpötila 40°C  
20,72  
huippujää + lumi  
23,68