



## **VOIMAJOHTOJEN TERÄSPERUSTUKSET**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2022

Sami Liikanen

Tarkastajat: Apulaisprofessori Jukka Lassila

Professori Timo Björk

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Sami Liikanen

### **Voimajohtojen teräsperustukset**

Sähkötekniikan diplomityö

2022

112 sivua, 56 kuvaa ja 22 taulukkoa

Tarkastajat: Apulaisprofessori Jukka Lassila ja Professori Timo Björk

Avainsanat: voimajohtot, perustukset, teräsrakenteet

Fingrid Oyj on suomalainen kantaverkkoyhtiö, joka vastaa kantaverkon käytön suunnittelusta ja valvonnasta, sekä verkon ylläpidosta ja kehittämisestä. Yhtiö rakennuttaa vuosittain satoja kilometrejä uusia voimajohtoja. Perinteisesti voimajohtojen perustusratkaisuna on käytetty elementtirakenteisia tai paikallavalettuja teräsbetoniperustuksia. Vaihtoehtoisen ratkaisun muodostavat viime vuosina yleistyneet teräsrakenteiset perustukset. Diplomityön tavoitteena oli selvittää voimajohtojen teräsperustusten suunnittelussa ja toteutuksessa huomioitavat tekniset reunaehdot, sekä kartoittaa haastattelujen avulla toteutuneista projekteista saadut käytännön kokemukset ja havaitut kehitystarpeet.

Diplomityössä käsiteltäväksi on valittu kolme teräsrakenteisiin pohjautuvaa perustusratkaisua. Käsiteltäviä perustustapoja ovat teräsputkipaalut, läpi-injektoitavat pora-ankkurit ja ruuvipaalut. Teräsperustuksia vertaillaan perinteisiin ratkaisuihin suunnittelu- ja rakentamisvaiheen eroavaisuuksien, sekä ympäristövaikutusten näkökulmasta.

Työn tuloksena on esitetty teräsperustusten potentiaaliset käyttökohteet verrattuna betonirakenteisiin elementti- ja valuperustuksiin. Pylväspaikan maaperän ominaisuudet todettiin keskeisimmäksi optimaalisen perustustavan valintaan vaikuttavaksi tekijäksi. Teräsperustusten suunnittelu edellyttää kattavien ja laadukkaiden pohjatutkimusten suorittamista.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Sami Liikanen

### **Steel foundations of transmission lines**

Master's thesis

2022

112 pages, 56 figures and 22 tables

Examiners: Associate Professor Jukka Lassila and Professor Timo Björk

Keywords: transmission lines, foundations, steel structures

Fingrid Oyj is the Finnish transmission system operator that is responsible for operation and monitoring of the main grid, as well as grid maintenance and development. The company builds hundreds of kilometers of new transmission lines every year. Traditionally, precast or cast-in-place reinforced concrete foundations have been used as foundation solution for transmission lines. An alternative solution is foundations based on steel structures, which have become increasingly common in recent years. The scope of the thesis was to research the technical limitations to be considered in the design and construction of steel foundations for transmission lines, and to find out the practical experiences and observed development needs from completed projects through interviews.

Three different foundation solutions based on steel structures were chosen to be researched in this thesis. The foundation methods to be considered are steel pipe piles, injected drill anchors and screw piles. Steel foundations are compared to traditional solutions from the point of view of the differences in the design and construction phase, as well as the environmental effects.

As a result of the thesis, the potential applications of steel foundations compared to precast- and cast-in-place concrete foundations have been presented. The soil properties of the support location were found to be the most important factor influencing the choice of the optimal foundation solution. Designing steel foundations requires comprehensive and high-quality soil surveys to be carried out.

## KIITOKSET

Tämä diplomityö on tehty työnantajalleni Fingrid Oyj:lle kesän ja syksyn 2022 aikana. Haluan kiittää erityisesti Keijo Välimaata ja Mikko Jalosta mielenkiintoisen työn mahdollistamisesta. Kiitokset kuuluvat myös kaikille haastatelluille Fingridin ja urakoitsijoiden projektipäälliköille ja asiantuntijoille.

Kiitokset Lappeenrannan-Lahden teknilliselle yliopistolle laadukkaasta opetuksesta ja erityisesti diplomityön tarkastajina toimineille Jukka Lassilalle ja Timo Björkille arvokkaista kommentteista.

Opintoni ovat diplomityön valmistuessa loppusuoralla. Suurimmat kiitokset kuuluvat läheisilleni tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Jyväskylässä 9.12.2022

Sami Liikanen

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

$A_b$	paalun kärjen pinta-ala
$A_{s,i}$	paalun vaipan pinta-ala kerroksessa $i$
$c_u$	suljettu leikkauslujuus
$E_d$	kuormitusten kokonaisvaikutuksen mitoitusarvo
$F_d$	kuorman mitoitusarvo
$F_{t,d}$	akσιαalisen vetokuorman mitoitusarvo
$K_s \tan \varphi_a$	vaippakestävyyskerroin
$L$	pituus
$N_q$	paalun kärjen kantavuuskerroin
$q_b$	kärkikestävyys
$q_{s,i;k}$	vaippakitkan ominaisarvo pintayksikköä kohden kerroksessa $i$
$R_a$	ankkuroinnin ulosvetokestävyys
$R_b$	paalun kärjen geotekninen kestävyys
$R_c$	paalun geotekninen puristuskestävyys
$R_d$	kestävyyden mitoitusarvo
$R_s$	paalun vaipan geotekninen kestävyys
$R_t$	paalun vetokestävyys
$U_n$	nimellisjännite
$X_d$	materiaaliominaisuuden mitoitusarvo
$X_K$	materiaaliominaisuuden ominaisarvo

## Kreikkalaiset

$\sigma'_v$	tehokas pystysuora jännitys
$\gamma$	tilavuuspaino
$\gamma_A$	satunnaisen kuorman osavarmuusluku
$\gamma_I$	jääkuorman osavarmuusluku
$\gamma_G$	pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_M$	materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
$\gamma_P$	rakentamisen ja kunnossapidon aikaisten kuormien osavarmuusluku
$\gamma_W$	tuulikuorman osavarmuusluku
$\Psi_I$	jääkuorman yhdistelmäkerroin
$\Psi_W$	tuulikuorman yhdistelmäkerroin
$\varphi$	leikkauskestävyyskulma

## Lyhenteet

ACSR	teräsvahvisteinen alumiinijohdin (aluminium conductor steel reinforced)
AACSR	teräsvahvisteinen seosalumiinijohdin (aluminium alloy conductor steel reinforced)
CC1–CC3	seuraamusluokka
CEN	eurooppalainen standardointijärjestö (European Committee for Standardization)
CENELEC	eurooppalainen sähköalan standardointijärjestö (European Committee for Electrotechnical Standardization)
CIGRE	kansainvälinen sähköalan yhteistyöjärjestö (Conseil International des Grands Réseaux Electriques, The International Council on Large Electric Systems)
CO <sub>2e</sub>	hiilidioksidiekvivalentti

CPT	puristinkairaus (cone penetration test)
CPTU	sähköinen puristinkairaus huokosvedenpainemittauksella (piezocone penetration test)
FEM	elementtimenetelmä (finite element method)
GL1–GL3	geotekninen luokka
gon	gooni (kulman mittayksikkö)
GPS	maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä (global positioning system)
GTK	Geologian tutkimuskeskus
GWP	lämmityspotentiaali (global warming potential)
IEC	kansainvälinen sähköalan standardointijärjestö (International Electrotechnical Commission)
kN	kilonewton
kV	kilovoltti
NAG	nettohapontuottopotentiaali (net acid generation)
NNA	kansalliset velvoittavat vaatimukset (National Normative Aspects)
OPGW	valokuitu-ukkosjohdin (optical ground wire)
PHS	potentiaalinen hapan sulfaattimaa
PTL1–PTL3	paalutustyöluokka
RC1–RC3	luotettavuusluokka
SESKO	Suomen sähköalan kansallinen standardointijärjestö
SFS-EN	Suomessa ja Euroopassa vahvistettu standardi
SYKE	Suomen ympäristökeskus
THS	todellinen hapan sulfaattimaa
YVA	ympäristövaikutusten arviointi

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	10
2	Kantaverkko ja voimajohtorakenteet .....	12
2.1	Fingrid Oyj.....	12
2.2	Voimajohtorakenteet .....	14
3	Voimajohtopylväiden perusrakenteet .....	18
3.1	Betoniperustukset .....	18
3.2	Teräsputkipaalut.....	22
3.3	Läpi-injektoitavat pora-ankkurit .....	24
3.4	Ruuvipaalut.....	26
4	Maaperätutkimukset.....	28
4.1	Yleiset vaatimukset .....	28
4.2	Painokairaus.....	29
4.3	Tärykairaus .....	32
4.4	Heijarikairaus.....	32
4.5	Puristinkairaus (CPT/CPTU).....	33
4.6	Puristin-heijarikairaus .....	34
4.7	Siipikairaus .....	35
4.8	Porakonekairaus .....	37
4.9	Aggressiivinen maaperä .....	38
4.10	Nykytila ja kehitystarpeet.....	41
5	Teräsperustusten suunnittelu.....	43
5.1	Sovellettavat standardit ja Eurokoodit .....	43
5.2	Voimajohdon mitoitusperiaatteet ja kuormitustapaukset .....	44
5.3	Perustuskuormat.....	49
5.4	Perustussuunnittelun yleiset vaatimukset .....	50



5.5	Maaperän ominaisuudet.....	53
5.6	Teräsputkipaalut.....	54
5.6.1	SSAB RRPileCalc.....	57
5.7	Läpi-injektoitavat pora-ankkurit .....	60
5.8	Ruuvipaalut.....	61
5.9	Suunnitteluprosessin nykytila ja kehityskohteet.....	62
6	Rakentaminen .....	64
6.1	Asennuksessa käytettävä kalusto .....	64
6.2	Rakentamisvaiheen vaatimukset.....	68
6.2.1	Mittatarkkuus .....	68
6.2.2	Laadunvarmistus ja koekuormitukset.....	72
6.2.3	Dokumentointi .....	74
6.3	Vaikutukset rakentamisvaiheen aikatauluihin .....	74
6.4	Ympäristövaikutukset.....	76
6.4.1	Materiaalien hiilijalanjälki.....	77
6.4.2	Rakentamisvaiheen ympäristövaikutukset .....	83
7	Korroosio ja elinkaari.....	86
7.1	Sähkökemiallinen korroosio .....	87
7.2	Korroosion esiintymismuodot.....	88
7.3	Maaperän ominaisuuksien vaikutus .....	89
7.4	Haruskorroosio.....	91
7.5	Teräspäälustusten korroosiosuojaus .....	94
7.6	Kunnonhallinta.....	97
8	Kustannukset.....	99
9	Johtopäätökset.....	103
10	Yhteenveto.....	108
	Lähteet .....	109

# 1 Johdanto

Diplomityön toimeksiantajan Fingrid Oyj:n tehtävänä on ylläpitää ja kehittää Suomen sähkönsiirron kantaverkkoa. Tulevan vuosikymmenen aikana kantaverkkoon kohdistuu kolmen miljardin euron investoinnit, joilla mahdollistetaan uusiutuvan sähköntuotannon ja uusien teollisuuskuluttajien liittäminen kantaverkkoon. Merkittävänä osana investointiohjelmaa yritys rakennuttaa lähivuosina tuhansia kilometrejä uusia 110–400 kV voimajohtoja.

Perinteisesti voimajohtopylväiden perustusratkaisuna on käytetty harustetuilla pylväillä maahan asennettavia tehdasvalmisteisia betonielementtejä ja vapaasti seisovilla pylväillä paikalla valettavia teräsbetoniperustuksia. Pehmeä maaperä edellyttää lisäksi erillistä paalutusta tai kantavaan kerrokseen asti ulottuvaa massanvaihtoa. Ehjän kallion esiintyessä lähellä maanpintaa voidaan hyödyntää suoraan kallioon juotettavia tartuntoja.

Teräsuperustukset voivat parhaimmillaan tarjota kustannussäästöjä, nopeuttaa rakentamisen aikatauluja ja vähentää ympäristövaikutuksia verrattuna betoniperustuksiin. Erityisesti pehmeillä suoalueilla voidaan välttyä erilliseltä paalutukselta, laajoilta kaivannoilta, sekä suurien murske- ja betonimäärien kuljettamiselta.

Tässä työssä käsiteltävät rakenteet on rajattu pora- tai lyöntipaalutuksella asennettaviin teräsputki- ja läpi-injektoitaviin pora-ankkureihin, sekä ruuvipaaluihin. Ratkaisut ovat potentiaalisia vaihtoehtoja nykyisten betoniperustusten rinnalle erityisesti pohjanvahvistusta vaativissa maaperän olosuhteissa. Fingrid on kehittänyt teräsputki- ja läpi-injektoitavien pora-ankkureiden käyttöä usean vuoden ajan ja rakenteita on hyödynnetty muutamissa hankkeissa. Diplomityön kirjoitushetkellä on käynnissä kehityshanke tyyppirakenteiden suunnittelemiseksi ja yhtenäisten toteutustapojen määrittelemiseksi. Maailmanlaajuisesti kehitettyjä ja käytettyjä voimajohtojen perustusratkaisuja on esitelty muun muassa kansainvälisen energia-alan yhteistyöjärjestö CIGRE:n julkaisuissa mukaan lukien erityyppiset teräsuperustukset. Ulkomailla erilaisin variaatioin toteutetut ja myös Suomessa muiden verkko-yhtiöiden hankkeissa pilotoidut ruuvipaaluperustukset ovat potentiaalinen vaihtoehto soveltuville hienojakoisille maalajeille. Julkaisuihin esiintyvistä perustusratkaisuista diplomityön ulkopuolelle on rajattu teräshehikoihin pohjautuvat perustusratkaisut, jotka eivät tarjoa valittuihin rakenteisiin verrattavia hyötyjä haasteellisten pehmeikköalueiden rakentamiseen.

Voimajohtojen elinkaari on pitkä, jolloin rakenteisiin valittavien ratkaisujen tulee olla toimivia kaikissa kuormitustapauksissa ja kestää koko elinkaaren ajan ilman merkittävää kunnossapitotarvetta. Tämä edellyttää oikeaa mitoitusta ja muun muassa korroosion vaikutuksen huomioimista. Teräsperustuksia on toistaiseksi käytetty Suomen voimajohdoilla suhteellisen vähän verrattuna betoniperustuksiin, lukuun ottamatta haruslaattojen yhteydessä yleisesti käytettyjä teräksisiä kaksoissilmukoita. Diplomityössä käsiteltävien rakenteiden kunnonhallinnasta ei ole ehtinyt muodostua pitkäaikaista kokemusta tai aineistoa. Erityisesti teräsputkipaaluja käytetään kuitenkin merkittävästi muussa infrarakentamisessa, joten diplomityössä hyödynnetään myös Väyläviraston julkaisuja ja rakenteita muissa kohteissa käsitteleviä tutkimusaineistoja.

Diplomityön tavoitteena on selvittää voimajohtojen teräsperustusten suunnittelussa ja toteutuksessa huomioitavat tekniset reunaehdot, sekä kartoittaa haastattelujen avulla toteutuneista projekteista saadut kokemukset ja havaitut kehitystarpeet. Suunnittelun osalta käsitellään tarvittavat maaperätutkimukset, voimajohtojen perustuksiin kohdistuvat kuormat ja näiden lähtötietojen pohjalta suoritettava perustustyyppin valinta ja mitoitus. Rakentamisen osalta käsitellään asennuksessa vaadittava kalusto, mittatarkkuus, sekä asennustyön dokumentointi.

Teräsperustusten elinkaarta tarkastellaan kirjallisuusselvityksen ja olemassa olevista rakenteista kuntokartoituksissa kerättyjen aineistojen pohjalta. Elinkaaren tarkastelussa keskitytään erityisesti korroosioon ja siihen vaikuttaviin tekijöihin. Toisena näkökulmana selvitetään mahdollisia voimajohtojen kunnonhallinnassa hyödynnettäviä seurantamenetelmiä.

Teräsperustusten kustannus-, aikataulu- ja ympäristönäkökulmia käsitellään käyttäen vertailukohtana perinteisiä perustusratkaisuja. Vertailussa hyödynnetään laskelmien lisäksi teemahaastattelujen avulla kerättyjä suunnittelu- ja rakentamisprosessia koskevia kokemuksia.

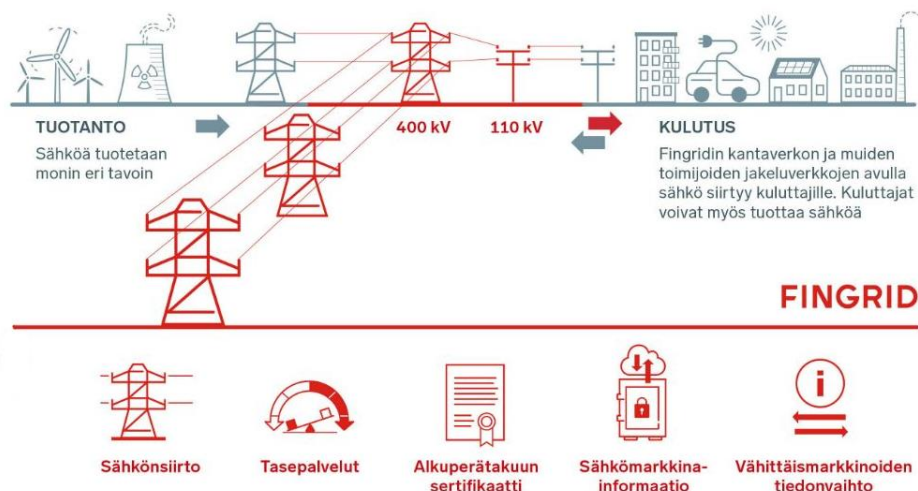
Diplomityön johtopäätöksissä on esitetty teräsperustusten potentiaaliset käyttökohteet verrattuna elementti- ja valuperustuksiin huomioiden pylvästyypin ja pylväspaikan maaperän ominaisuudet, sekä käsitelty tulevaisuuden tutkimus- ja jatkokehitystarpeita.

## 2 Kantaverkko ja voimajohtorakenteet

### 2.1 Fingrid Oyj

Fingrid Oyj sai alkunsa vuonna 1996, jolloin Imatran Voima Oy, Pohjolan Voima Oy ja Suomen valtio sopivat kantaverkkoliiketoiminnan ja voimansiirtoverkkojen keskittämisestä yhteen yhtiöön. Samasta ajankohdasta lähtien Fingridillä on ollut lain määräämä ja yhtiön verkkoluvassa määritelty järjestelmävastuu koko Suomen sähköjärjestelmästä. Yhtiön syntyyn vaikutti merkittävästi Suomen jäsenyys Euroopan unionissa 1995 ja direktiivi sähkömarkkinoiden avaamisesta, joka edellytti kantaverkkosiirtoa koskevan hallinnon eriyttämistä sähkön tuotannosta ja myynnistä. (Fingrid, 2022a).

Suomen sähköjärjestelmä koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista, jakeluverkoista sekä sähkön kuluttajista. Se on liitetty yhteispohjoismaiseen sähköjärjestelmään yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan järjestelmien kanssa. Lisäksi Viirosta on Suomeen kaksi tasasähköyhteyttä, joilla pohjoismainen järjestelmä on yhdistetty Baltian voimajärjestelmään. Fingridin vastuulla ovat kantaverkon valvonta, käytön suunnittelu, tasepalvelu, verkon ylläpito, rakentaminen ja kehittäminen sekä sähkömarkkinoiden toiminnan edistäminen. Fingridin rooli ja vastuualue osana Suomen sähköjärjestelmää on esitetty kuvassa 2.1. (Fingrid, 2022b).



**Kuva 2.1.** Fingridin rooli sähköjärjestelmässä. (Fingrid, 2022c).

Suomen kantaverkkoon kuuluu noin 14 400 kilometriä voimajohtoja ja lähes 120 sähköasema. Maanlaajuisen kantaverkon kautta kulkee noin 77 % kaikesta Suomessa siirretystä sähköstä. Fingridin vuoden 2022 alussa omistama kantaverkko on esitetty jännitetasoittain kuvassa 2.2. (Fingrid, 2022b).



**Kuva 2.2.** Suomen sähkösiirtoverkko. (Fingrid, 2022c).

## 2.2 Voimajohtorakenteet

Voimajohdon rakenteiden pääosat muodostuvat perustuksien varaan pystytetyistä pylväistä, sekä eristinketjujen kannattelemissa virta- ja ukkosjohtimista. Kuvassa 2.3 on esitetty tyyppillisen harustetun voimajohtopylvään pääosat (Fingrid, 2022d).



**Kuva 2.3.** Voimajohtopylvään pääosat. (Fingrid, 2022d).

Fingridin uudet voimajohdot rakennetaan 110 tai 400 kV jännitetasolle mitoitetuin rakentein lukuun ottamatta yksittäisten tasavirtayhteyksien poikkeavia rakenteita. Aiemmin laajemmin käytetty 220 kV jännitetaso on vähitellen poistumassa Pohjois-Suomea lukuun ottamatta ja useat kyseisen jännitetaso voimajohdot on purettu uusien voimajohtojen paikalta tai muutettu 110 kV käyttöön.

110 ja 400 kV jännitetasojen rakenteet ovat periaatteiltaan toisiaan vastaavia, mutta eristinketjujen pituuden lisäksi pylväiden kokoluokka eroaa merkittävästi. V-kannatinketjuilla varustetun 110 kV pylvään orren leveys on hieman yli 10 m ja 400 kV jännitetasolle siirryttäessä orren leveys kasvaa yli 24 metriin.

Suomessa 110 kV voimajohdon tyypillinen pylväiden välimatka eli jänneväli vaihtelee maastosta riippuen välillä 250–300 m ja 400 kV voimajohtolla välillä 300–450 m. Uusilla voimajohtoilta jännevälit ovat tyypillisesti vanhoihin rakenteisiin verrattuna pidempiä. Tarkasteltaessa pylväiden korkeusjakaumaa, Fingridin olemassa olevien 110 kV voimajohtojen pylväskorkeuksien mediaani on 16 m ja 400 kV voimajohtojen 28 m. Uusien voimajohtojen mediaanikorkeudet ovat hieman suurempia.

Voimajohtopylväät jaetaan käyttötarkoituksen mukaisesti kannatus- ja kiristyspylväisiin, sekä rakenteeltaan harustettuihin ja vapaasti seisoviin pylväisiin. Johtimet kiristetään eristinketjujen varaan kiristyspylväiden välille, jotka ottavat vastaan johtimista aiheutuvat pitkittäiset voimat. Kiristyspylväiden välille sijoitettujen kannatuspylväiden eristinketjut kannattavat normaalitilanteessa johtimista aiheutuvan painon ja tuulikuormat ilman merkittäviä pitkittäisiä voimia.

Harustettujen pylväiden jalkoihin kohdistuu pääasiassa puristusta. Tuuli aiheuttaa lisäksi rakenteesta riippuvia vähäisiä vaakavoimia. Pylvään jalat ovat perustuksilla tyvitapin varassa ilman erillistä kiinnitystä. Pylväs tukeutuu vetoa vastaan ottavien harusvajereiden varaan. Haruksia on pylväsrakenteesta riippuen yleisimmin 4–12 kappaletta. Historiassa 110–220 kV harustetut pylväät olivat tyypillisesti puujaloilla ja teräspalkkiorrella varustettuja. Fingridin verkossa kaikkien jännitetasojen uudet harustetut voimajohtopylväät ovat nykyään teräksisiä putkipylväitä tai pulttiliitoksilla kasattuja ristikkorakenteita.

Vapaasti seisovat pylväät ovat tyypillisesti L-profiileista pulttiliitoksilla kasattuja ristikkorakenteita. Pylvääseen kohdistuvat voimat välittyvät orrelta perustukselle yksittäisiin sauvoihin kohdistuvan vedon tai puristuksen välityksellä. Pylvääseen kohdistuva kaatava momentti saa aikaan yksittäisten pylväsjalkojen perustuksiin kohdistuvan alaspäin suuntautuvan puristuksen tai ylöspäin suuntautuvan vedon, sekä rakenteesta riippuvia sivuttaisvoimia ja momentteja.

Voimajohtojen rakenteet mitoitetaan standardissa SFS-EN 50341-1, sekä kansallisissa velvoittavissa vaatimuksissa (NNA) SFS-EN 50341-2-7 esitettyjen periaatteiden ja kuormitustapausten mukaisesti. Tarkemmin viidennessä luvussa esitetyissä kuormitustapauksissa on huomioitu muun muassa minimi- ja maksimilämpötilojen, tuulen, jään, lumen ja johdinkatkeamien vaikutukset.



Fingrid on kehittänyt tyyppirakenteita sisältävän pylväsperheen. Tyyppirakenteiden käyttö yksinkertaistaa ja nopeuttaa suunnittelu- ja rakentamisprosessia. Lähtökohtaisesti yleissuunnittelun tuloksena on tyyppirakenteita hyödyntävät suunnitelmat lähes kaikille rakennettavan voimajohdon pylväille ja perustuksille, jolloin kilpailutuksessa valittu urakoitsija pääsee hankkimaan materiaalit ja aloittamaan rakentamisen ilman aikaa vievää detaljisuunnittelua ja tilaajan suorittamaa suunnitelmien tarkastusta. Tyyppirakenteet kattavat lähes kaikki yleisesti tarvittavat pylvästyypit ja tarvittavat yksittäiset erikoisrakenteet esimerkiksi poikkeuksellisen suurille kulmille tai pylväskorkeuksille suunnitellaan projektikohtaisesti.

Kantaverkon uudet 110 kV voimajohdot rakennetaan lähtökohtaisesti 3x2-Duck (ACSR 305/39) ja 400 kV voimajohdot 3x3-Finch (ACSR 565/72) -virtajohtimilla. Ukkojohtimiksi asennetaan tyyppillisessä hankkeessa yksi Sustrong (AACSR 106/25) -ukkojohdin ja yksi ominaisuuksiltaan vastaava valokuituja sisältävä OPGW-ukkojohdin. Heikkojen maadoitusolosuhteiden tai jääkuorma-alueiden tapauksessa voidaan käyttää vahvempia ukkojohtimia. Johtimiksi valittuja vakioratkaisuja on käytetty tyyppirakenteiden mitoituksessa.

Kuvassa 2.4 on esitetty Fingridin pylväsperheeseen kuuluva 400 kV ristikkorakenteinen suoran paikan harustettu 1H-kannatuspylväs. Rakenne on yleisin pylvästyyppi uusilla yhden virtapiirin 400 kV voimajohdoilla. 400+110 kV yhteispylväiden rakenteena käytetään teräsputkipylväitä.



**Kuva 2.4.** 400 kV 1H-kannatuspylväs. (Sami Liikanen, 2022).

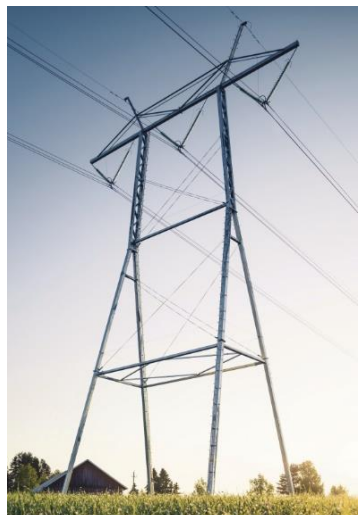


Kuvassa 2.5 on esitetty Fingridin pylväserheeseen kuuluva 400 kV vapaasti seisova 4Y-kulmakiristyspylväs. Rakenne on tyypillinen 400 kV yhden virtapiirin voimajohdolla käytettävä kiristyspylväs. Kulmapylvään orsi on suunniteltu epäsymmetriseksi riittävien virtajohtimien ja pylväsrakenteiden välisten etäisyyksien saavuttamiseksi.



**Kuva 2.5.** 400 kV 4Y-kiristyspylväs ennen johtimien asennusta. (Sami Liikanen, 2017).

Harustettujen pylväiden käyttöä pyritään välttämään peltoalueilla viljelylle aiheutuvan haitan vähentämiseksi. Sen vuoksi pelloilla käytetään ns. peltopylväitä, joiden rakenne mahdollistaa maatalouskoneilla työskentelyn pylväsjalkojen välissä ja pylväsalan tehokkaamman hyödyntämisen viljelyskäyttöön. Kuvassa 2.6 on esitetty 400 kV 1A-peltopylväs, joka soveltuu alaortta hyödyntämällä myös 400+110 kV yhteispylvääksi. Pylväsrakennetta käytetään suoran paikan kannatuspylväänä.



**Kuva 2.6** 400 kV 1A-peltopylväs. (Fingrid, 2016)

### 3 Voimajohtopylväiden perustusrakenteet

Luvussa esitellään Fingridin uusien voimajohtojen rakentamisessa käytettävien betoniperustusten yleisimmät rakenteet, sekä diplomityössä tarkasteltavaksi valitut teräsperustusten rakenteet. Betoni- ja teräsperustuksia vertaillaan diplomityön myöhemmissä luvuissa. Teräsperustusten suunnittelu ja rakentaminen käsitellään tarkemmin viidennessä ja kuudennessa luvussa.

#### 3.1 Betoniperustukset

Harustettujen voimajohtopylväiden perustukset rakennetaan pääsääntöisesti tehdasvalmisista teräsbetonielementeistä. Pylväsalkojen alle asennetaan pilarielementit, jotka kantavat pylväästä maahan kohdistuvan puristavan kuorman. Perustukseen kuuluu myös harusvaihjeraita varten asennettavat harusperustukset, jotka ottavat vastaan harusvaihjeraita välittävän vedon. Haruksia varten on perinteisesti asennettu betoniset haruslaatat, joihin kiinnittyvät U-pultin avulla kuumasinkitystä teräksestä valmistetut maan pinnalle ulottuvat kaksoissilmukat. Myös aiemmin historiassa asennettuja puisia haruslaattoja on edelleen käytössä.

Myöhemmin käsiteltävän haruskorroosion estämiseksi on kehitetty teräsbetonirakenteiset pilariharusankkurit, joissa maanalaiset teräsosat ovat täysin betonipeitteellä suojattuja. Pilariharusankkureita käytetään valtaosassa Fingridin uusia ja korjattavia harusperustuksia. Fingrid on teettänyt noin 7,5 vuoden ajan käytössä olleille pilariharusankkureille raudoituksen kuntotutkimuksen, jonka perusteella ratkaisun on havaittu toimivan ilman raudoituksessa ilmenneitä syöpymiä tai muita poikkeamia.

Kuvassa 3.1 on esitetty tehdasvalmisteisia harustetun voimajohtopylvään perustuselementtejä. Vasemmalla pylväsalkojen alle asennettavia pilarielementtejä ja oikealla pilariharusankkureita. Elementtien periaate ja rakenne ovat samat 110 ja 400 kV voimajohtojen kanssa. Elementtien korkeus ja anturalaatan koko valitaan perustuskuormien ja maaperän olosuhteiden perusteella. Elementtien massa vaihtelee tyypillisesti välillä 700–3500 kg, jolloin perustusten asennus voidaan suorittaa kaivuutyön yhteydessä samalla kaivinkoneella.



**Kuva 3.1.** Harustetun voimajohtopylvään perustuselementtejä. (Sami Liikanen, 2020).

Betonielementteihin pohjautuvia perustuksia käytetään myös peltopylväillä, jotka ovat harustamattomia neljän jalan varaan tukeutuvia putkipylväsrakenteita. Peltopylvään perustukset muodostuvat antura- ja pilarielementeistä, jotka kiinnitetään toisiinsa pulttiliitoksilla. Pulttiliitokset suojataan korroosiolta juotosvalun avulla. Valmiin peltopylvään perustuksen ympärille asennetaan murskeella täytettävä betonirengas ja teräksinen suojakaide, joilla suojataan perustusta ja pylväsalkaa lähellä työskentelevien maatalouskoneiden aiheuttamilta vaurioilta.

Kuvassa 3.2 on esitetty juotosvalua ja täyttööä odottava 400 kV peltopylvään elementtiperustus. Pohjanvahvistuksena on käytetty kyseisessä kohteessa suodatinkangasta ja 300 mm murskearinaa. Peltopylvään elementtien massa on yli 3000 kg ja kaivannot laajempia, jolloin on suositeltavaa käyttää vähintään 25 tn kaivinkonetta tai erillistä nosturia elementtien asennukseen.



**Kuva 3.2.** 400 kV 1A-peltopylvään elementtiperustus. (Sami Liikanen, 2020).

Vapaasti seisovien pylväiden perustukset ovat pääasiassa rakennuspaikalla valettuja ja rakenteeltaan huomattavasti massiivisempia kuin elementtiperustukset. Perustukset suunnitellaan yksilöllisesti perustuskuormien ja pohjatutkimustulosten perusteella. 110 kV vapaasti seisovien pylväiden perustuksille valetaan tyypillisesti yhtenäinen anturalaatta ja pylväsjalolle erillisenä valuna maanpinnan yläpuolelle ulottuvat pilarit. 400 kV vapaasti seisovien pylväiden perustus voi olla vaihtoehtoisesti yhtenäinen neljällä pilarilla varustettu anturalaatta tai neljä yksittäistä perustusta. Perustusten pilarit altistuvat toistuvalla säärasituksella ja niissä käytetään anturalaatoista poiketen suojahuokostettua betonimassaa. Voimajohtojen perustustöitä joudutaan suorittamaan vaihtelevissa ja haastavissa olosuhteissa, jolloin ammattitaitoisen työsuunnittelun ja laadunvalvonnan merkitys korostuu. Betonoinnin laadunvalvontaa suoritetaan työmaalla muun muassa ilmamäärien mittauksella, lämpötilaseurannalla, sekä laboratorioissa koestettavien puristuslujuus- ja huokosjakokappaleiden avulla.

Kuvassa 3.3 on esitetty 400 kV vapaasti seisovan kiristyspylvään tyypillinen valuperustus. Pylväsjalokojen kohdalle valetaan tässä tapauksessa 5 x 5 x 0,6 m anturalaatat, joiden keskeltä nousee maanpinnan yläpuolelle 2,4 m korkeat 0,9 x 0,9 m pilarit. Pohjanvahvistukseksi on tehty kyseisessä kohteessa noin 80 cm massanvaihto kantavaan kerrokseen asti.



**Kuva 3.3.** 400 kV vapaasti seisovan 3Y-kiristyspylvään anturavalu. (Sami Liikanen, 2020).

Ehjän ja yhtenäisen kallion tapauksessa voidaan porata ja juottaa perustuspilareiden pääteräiset suoraan kallioon ja välttää anturalaatan valaminen. Rikkinäinen tai muuten huonolaatuinen kallio on tarvittaessa louhittava ja rakennettava normaali valuperustus. Kuvassa 3.4 esitetty kalliotartuntoihin perustuva ratkaisu tarjoaa merkittävän kustannussäästön.



**Kuva 3.4.** 400 kV vapaasti seisovan 3Y-kiristyspylvään kallioperustus. (Sami Liikanen, 2020).

Tarvittaessa elementti- ja valuperustusten pohjanvahvistuksena voidaan käyttää muutaman metrin syvyyteen asti massanvaihtoa, jossa pehmeät maakerrokset korvataan kalliomurskeella ja tarvittaessa louheella. Kantavan kerroksen sijaitessa syvemmällä käytetään paalutusta ja elementtiperustuksilla lisäksi erillistä paaluhattua. Aiemmin voimajohtojen perustuksissa on käytetty tyypillisesti kyllästettyjä puupaaluja. Viime vuosina Fingridin hankkeissa on siirrytty pääsääntöisesti teräsbetoni- tai teräspaalujen käyttöön.

Kuvassa 3.5 on esitetty massanvaihdolla ja suojaseinillä toteutettava pilariharusankkurin asennus. Turve on poistettu kantavaan kerrokseen saakka ja korvattu kalliomurskeella. Elementin asennuksen jälkeen suojalaatikko täytetään kalliomurskeella ja muotoillaan täytöt perustuksesta pois päin kaataviksi. Pehmeikköjen perustustyöt ajoitetaan talviaikaan ja kulureittien ja pylväspaikkojen valmistelu jäädyttämällä aloitetaan hyvissä ajoin. Työn suorittaminen sulalle pehmeikölle vaatii olosuhteista riippuen huomattavia erityisjärjestelyjä.



**Kuva 3.5.** Massanvaihto ja suojaseinät pilariharusankkurille. (Sami Liikanen, 2021).



### 3.2 Teräsputkipaalut

Teräsputkipaalut voidaan jakaa toimintaperiaatteen perusteella tukipaaluihin, kitkapaaluihin ja koheesiopaaluihin. Käytännössä kaikki paalut kantavat kuormaa jossain määrin sekä kärjen, että vaipan välityksellä. Paalut jaetaan eri toimintatapoihin sen mukaisesti, otetaanko suurin osa kuormasta vastaan kärjen, kitkan vai koheesion välityksellä.

Tukipaalut kantavat puristavan kuorman kärkivastuksella kantavassa maakerroksessa tai kalliassa. Kitka- ja koheesiopaalut ottavat kuormat vastaan vaipan välityksellä. Kitkapaalun tapauksessa vaippavastus syntyy paalun vaippapinnan ja karkearakeisen maan välisestä kitkasta. Koheesiopaalun vaippavastus syntyy paalun vaippapinnan ja koheesiomaan välisestä adheesiosta.

Teräsputkipaalun kestävyys vetoa vastaan muodostuu paalun omasta painosta, paalun vaipan ja maan välisestä kitkasta ja koheesiosta, sekä mahdollisesta kalliotartunnasta.

Voimajohtojen teräsputkipaaluperustuksiin kohdistuu aina myös sivuttaisvoimia riippuen pylvästyypistä ja asennustarkkuudesta. Sivuttaisvoimien kestävyteen vaikuttaa erityisesti ympäröivän maaperän leikkauslujuus, sekä putkipaalun halkaisija ja seinämävahvuus. Kestävyttä voidaan parantaa kasvattamalla teräsputken halkaisijaa ja seinämävahvuutta tai raudoittamalla ja betonoimalla paalu sisältä.

Teräsputkipaalujen korroosiosuojaus perustuu pääsääntöisesti ylimitoitukseen, eli teräsputken seinämävahvuutta valittaessa huomioidaan riittävä korroosiovara. Teräsperustusten elinkaarta ja korroosiota käsitellään tarkemmin seitsemännessä luvussa.

Voimajohtoperustuksen tapauksessa asennetaan lähtökohtaisesti yksi halkaisijaltaan 170–600 mm teräsputkipaalu jokaista pylväsalkaa kohti. Paaluputki katkaistaan asennuksen jälkeen oikeaan korkoon ja asennetaan pylvästyypille soveltuva paaluhattu. Harustetut pylväät kiinnittyvät tyvitapin varaan ja vapaasti seisovien pylväiden kiinnitykseen käytetään pulttiilitosta. Asennustarkkuudesta johtuvia vähäisiä mittavirheitä voidaan korjata käyttämällä epäsymmetristä paaluhattua tai säätämällä kallistettujen paalujen tapauksessa katkaisukohdan korkoa.

Teräsputkipaalujen asennus voidaan suorittaa paalun toimintaperiaatteesta ja maaperän olosuhteista riippuen lyönti- tai porapaalutuksena. Lyöntipaalutus soveltuu parhaiten

asennettaessa paalu kärkivastuksen varaan kitkamaahan, jolloin paalun kantavuus todetaan loppulyöntisarjojen perusteella. Porapaalutus soveltuu vaipalla kantavien paalujen asennukseen koheesiomaihin tai kärjellä kantavan paalun asennukseen kalliopohjaan.

Vaipalla kantavien paalujen kestävyys kehittyy ajan kuluessa ja suunnitellun kestävyuden varmistamiseen käytetään koekuormituksia. Usein asennetaan perustuspaalujen lisäksi erilliset koepaalut myöhemmin suoritettavia koekuormituksia varten. Koepaalut pyritään sijoittamaan haastavimpiin maaperän olosuhteisiin, jolloin voidaan varmistua suunniteltujen kantavuuksien toteutumisesta.

Yhtenäisen paalun asennus on usein mahdollista jopa 20 m paalupituuteen asti. Uusien voimajohtojen perustustöitä suoritetaan kuitenkin usein jännitteisen ja vasta myöhemmässä työvaiheessa purettavan voimajohdon alla, jolloin jännitteisistä johtimista aiheutuu rajoituksia paalutuskaluston työskentelykorkeudelle. Teräsputkipaalut voidaan jatkaa paalutusmenetelmästä riippuen tehdasvalmisteisilla jatkoksilla tai hitsaamalla, mutta kaluston korkeudessa ei paalupituuksista riippumatta saavuteta etua teräsbetonipaalutukseen verrattuna.

Kuvassa 3.6 on esitetty Fingridin pilottikohteeseen harustetulle 400 kV kannatuspylväälle asennettu halkaisijaltaan 170 mm teräsputkipaaluperustus.



**Kuva 3.6.** 400 kV harustetun pylvään teräsputkipaaluperustus. (Risto Uusitalo, 2017).

Kuvassa 3.7 on esitetty Fingridin pilottikohteeseen 400 kV peltopylväälle asennettu halkaisijaltaan 406 mm teräsputkipaaluperustus. Perustus ja pylväsjalca on suojattu vastaavien betoniperustusten tavoin murskeella täytetyllä betonirenkaalla ja teräskaitteella. Paaluputki, paaluhattu ja pylväsjalan pohjalevy on kiinnitetty toisiinsa pulttiliitoksilla.



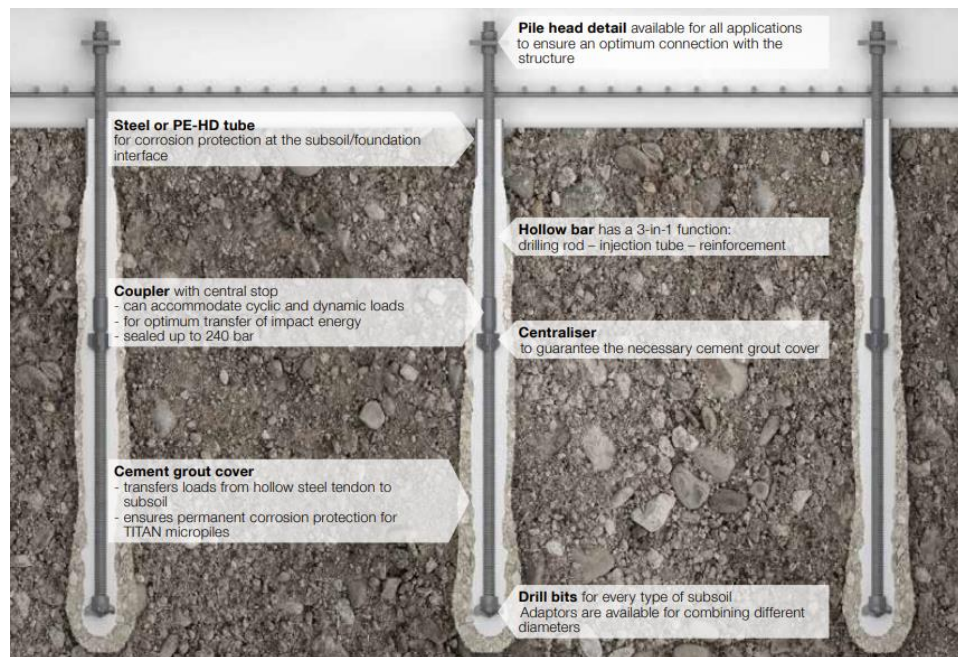
**Kuva 3.7.** 400 kV peltopylvään teräsputkipaaluperustus. (Risto Uusitalo, 2016).

### 3.3 Läpi-injektoitavat pora-ankkurit

Fingrid on kehittänyt läpi-injektoitavien pora-ankkurien käyttöä vaihtoehtoisena harusperustuksena perinteisen betonisen haruslaatan tai pilariharusankkurin rinnalla. Koerakenteissa ja tulevaisuudessa harusperustusten tyyppiratkaisuissa käytettäväksi on valittu saksalaisen Ischebeckin valmistama TITAN-järjestelmä, jota käytetään voimajohtoperustuksissa myös kansainvälisesti. Pora-ankkureita voidaan valmistajan mukaan kuormittaa puristuksena tai vetona. Periaatteeltaan vastaavia tuotejärjestelmiä on saatavilla useilta valmistajilta.

Menetelmä perustuu porakruunulla varustettuihin onttoihin terästankoihin. Porauksen yhteydessä syntyvä reikä injektoidaan ontton ankkuritangon ja kertakäyttöisen porakruunun reikien kautta sementtilaastilla, jolloin tangon ympärille syntyvä sementtivaippa jakaa tankoon kohdistuvan kuormituksen ympäröivään maaperään tai kallioon ja muodostaa samalla korroosiosuojauksen. Porareikä täyttyy sementillä pohjalta alkaen, jolloin injektoinnin onnistuminen on todettavissa visuaalisesti sementin noustessa maanpinnalle saakka. Pehmeissä ylimmissä maakerroksissa, kuten turpeessa, tangon ympärillä käytetään suojaputkea, jolloin vältetään laastin leviäminen ympäröivään maaperään. Ankkurin kuormitettavuus ja tarvittava porausvyvyys riippuvat ympäröivän maaperän tai kallion ominaisuuksista. Kuvassa 3.8 on havainnollisesti esitetty Ischebeckin valmistaman TITAN-järjestelmän toimintaperiaate maanvaraisessa asennuksessa.





**Kuva 3.8.** TITAN-järjestelmän periaate. (Ischebeck, 2022).

TITAN-järjestelmässä käytettävät tangot ovat onttoja ja varustettu ulkopinnaltaan jatkuvalla kierteellä. Kolmen metrin pituisten tankojen liittämisen toisiinsa tapahtuu kierteillä varustetuilla jatkosholkeilla. Kierteen avulla liitetään myös porakruunut ja yläosan kiinnityskappaleet. Tankoja valmistetaan mustina eli ilman korroosiosuojausta, kuumasinkittyinä, sekä kuumasinkityksellä ja epoksinnoitella varustettuna kaksoispinnoitettuna mallina.

Kuvassa 3.9 on esitetty Fingridin pilottikohteeseen asennettu harusankkuri. Injektointilaastin maaperään leviämisen estämiseksi turvekerroksessa on käytetty teräksistä suojaputkea. Ylimpänä ankkuritankona on käytetty epoksinnoitettua tyyppiä.



**Kuva 3.9.** 400 kV harustetun kannatuspylvään harusankkuri. (Risto Uusitalo, 2017).

### 3.4 Ruuvipaalut

Ruuvipaaluja on perinteisesti käytetty Suomessa lähinnä kevyiden rakenteiden ja rakennusten perustuksina. Perustustapaa ei ole toistaiseksi pilotoitu Fingridin voimajohtohankkeissa. Kansainvälisesti tarkasteltuna ruuvipaalut esiintyvät monissa julkaisussa useina erilaisina variaatioina ja valmistajat tarjoavat voimajohtojen perustuksiin räätälöityjä tuotevalikoimia.

Halkaisijasta ja maaperästä riippuen ruuvipaaluja voidaan asentaa käsin kiertämällä, käsi­käyttöisellä vääntökoneella tai koneellisesti. Voimajohtoperustuksiin soveltuvat kokoluokat ovat koneellisesti asennettavia. Kuvassa 3.10 on esitetty havainnollisesti ruuvipaalun periaatteellinen rakenne. Ruuvipaalun kestävyys perustuu paaluputken ympärille hitsattuihin ruuvilaippoihin, sekä osittain teräsputken vaippakestävyyteen. Teräsputken halkaisija ja seinämävahvuus, sekä ruuvilaippojen halkaisija, määrä ja keskinäinen etäisyys vaihtelevat merkittävästi riippuen käyttökohteen maaperästä ja mitoituksesta.



**Kuva 3.10.** Ruuvipaalun rakenne. (Magnum Piering, 2022).

Voimajohtojen ruuvipaaluperustukset voidaan mitoittaa kestävästi puristusta, vetoa, sivuttaisvoimia ja momenttia. Yhdysvaltalaisvalmistaja Magnum Pieringin referenssikohteissa ruuvipaaluja on hyödynnetty jopa suurilla kiristyspylväillä. (Magnum Piering, 2022).

Ruuvipaalujen merkittävänä etuna voidaan pitää tarvittavan asennuskaluston keveyttä ja maastokelpoisuutta, sekä perustustavan yksinkertaisuudesta johtuvaa nopeaa asennusaikaa. Teräsrakenteinen ruuvipaaluperustus saadaan rakennettua kerralla valmiiksi ja pylväsnosto on mahdollista suorittaa välittömästi perustuksen valmistuttua. Mahdollisesti

korroosiosuojauksena käytettävä suojabetonointi lisää kuitenkin työvaiheita, kustannuksia ja asennusaikaa.

Ruuvipaalujen asennus edellyttää suhteellisen tasalaatuista ja hienojakoista maaperää kivien vaikeuttaessa paalun tunkeutumista ja heikentäessä asennuksen mittatarkkuutta. Suuret kivet tai lohkareet voivat pahimmillaan pysäyttää tai rikkoa paalun.

Kuvassa 3.11. on esitetty yhdysvaltalaisen Magnum Pieringin valmistamia ruuvipaaluperustuksia. Yksittäiset ruuvipaalut on yhdistetty toisiinsa ja pylväsalkaan tehdasvalmisteisen paaluhatun avulla. Kuvassa 3.12 esitetyn harusankkurin tapauksessa on mahdollista käyttää yksittäistä ruuvipaalua lisäämällä soveltuvat kiinnitysosat kiilakiristintä varten.



**Kuva 3.11.** Voimajohtojen ruuvipaaluperustuksia. (Magnum Piering, 2022).



**Kuva 3.12.** Yksittäinen ruuvipaalu harusankkurina. (Magnum Piering, 2022).

## 4 Maaperätutkimukset

Luvussa käsitellään pylväspaikkojen maaperätutkimusten vaatimukset ja yleisesti käytetyt menetelmät. Teräspalkkipaalujen, läpi-injektoitavien harusankkureiden, sekä ruuvipaalujen potentiaaliset käyttökohteet sijaitsevat usein haastavissa maaperän olosuhteissa, jolloin mitoitus ja materiaalimenekin laskenta edellyttää luotettavalla menetelmällä tutkittuja ja riittävän tarkasti määriteltyjä maaperän parametrejä.

### 4.1 Yleiset vaatimukset

Geoteknisten tutkimusten tarkoituksena on tuottaa riittävästi rakennuspaikan ja sen ympäristön pohja- ja pohjavesiolosuhteita koskevia tietoja, joita tarvitaan oleellisten maapohjan ominaisuuksien asianmukaiseen kuvaamiseen ja mitoituslaskelmissa käytettävien maaparametrien ominaisarvojen luotettavaan arviointiin. (RIL, 2016).

Pohjatutkimus ulotetaan niin syväälle ja laajalle alueelle, että tunnistetaan kaikki maapohjan muodostumat ja kerrokset, joilla voi olla vaikutusta paalutustyöhön ja paalujen geotekniseen kestävyys, ja että tunnetaan maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. Käytettäessä tukipaaluja pohjatutkimuksen on osoitettava, ettei välittömästi perustustasona toimivan maakerroksen alla ole pehmeää maakerrosta, joka voisi johtaa suunnittelussa huomioimattomaan lävistysmurtumaan tai painumaan. (RIL, 2016).

Voimajohtopylväiden alustavat sijainnit koordinaatteineen määritellään yleissuunnittelun alkuvaiheessa suoritettavassa sijoitussuunnittelussa. Fingridin voimajohtohankkeissa maaperätutkimukset tehdään jokaiselle suunnitellulle pylväspaikalle. Tarvittavien maaperätutkimusten määrittelemiseksi pyydetään tarvittaessa geoteknisen asiantuntijan lausunto.

Fingridin voimajohtohankkeiden maaperätutkimusten määrittelyissä on ohjeistettu kairaus suoritettavaksi harustettujen pylväiden tapauksessa molempien pylväsjalkojen ja kaikkien harusperustusten kohdalta. Peltopylväillä kairaus suoritetaan kaikkien neljän pylväsjalan kohdalta. Vapaasti seisovilla pylväillä on suoritettu aiemmin viisi kairausta ja uusimmissa hankkeissa perustuksen pinta-alasta riippuen 10–30 kpl. Kaikki kairaukset vaaditaan

suoritettavaksi kovaan pohjaan saakka. Kairauksen pysähtyessä alle 1,8 m syvyydessä kiiveen tai kallioon, suoritetaan toinen kairaus noin yhden metrin etäisyydeltä. Tutkimusmenetelmänä käytetään painokairausta, puristin-heijarikairausta tai muuta vastaavaa ja luotettava tutkimusmenetelmää. Kaikkien kairauspisteiden sijainti mitataan GPS:llä kairauksen yhteydessä.

Maaperätutkimukset suoritetaan lähtökohtaisesti lumettomana ajankohtana, jolloin voidaan visuaalisesti havainnoida maaperä ja ympäröivät olosuhteet. Talviolosuhteita joudutaan kuitenkin usein hyödyntämään liikuttaessa monitoimikairalla pehmeikköalueilla.

Seuraavissa alaluvuissa on käsitelty geoteknisessä suunnittelussa yleisesti käytetyt pohjatutkimusmenetelmät ja niiden soveltuvuus ja luotettavuus erilaisissa maaperissä. Voimajohtojen pohjatutkimuksissa yleisimmin käytettyjä menetelmiä ovat painokairaus, heijarikairaus, puristin-heijarikairaus, sekä tarvittaessa lisätutkimuksina siipikairaus ja porakonekairaus. Lähtökohtana on, että pohjatutkimustapa määräytyy rakenteiden, kuormitusten ja rakennuspaikan olosuhteiden mukaan.

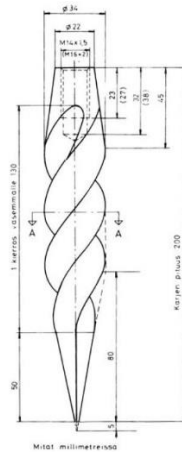
Siipikairausten tarve lisätutkimusmenetelmänä korostuu pehmeillä, joilla kantavan pohjan yläpuoliset pehmeät maakerrokset vaikuttavat merkittävästi teräsputkipaalujen mitoittamiseen. Porakonekairausten tarve tulee kyseeseen kallioon tukeutuvien teräsputkipaalujen tai kallioon injektoitavien harusankkurien tapauksessa, jolloin voidaan varmistua kalliokerroksen laadusta ja ehjyydestä, sekä määrittää paalupituudet riittävällä tarkkuudella.

## 4.2 Painokairaus

Painokairausta käytetään maakerrosten rakenteen ja rajojen likimääräiseen määrittämiseen kairausvastuksen, kairan käyttäytymisen ja muiden kairauksen aikana tehtävien havaintojen avulla. Kairaa kuormitetaan staattisesti painoilla (5, 15, 25, 50, 75 tai 100 kg) ja kiertämällä mikäli kaira ei painu enimmäiskuormalla. Kairausvastus määritetään tunkeutumiseen tarvittavan voiman ja 1 kN enimmäiskuormalla tietyn painuman syntymiseen tarvittavien puolikierrosten lukumäärän perusteella. Painokairauksen avulla saavutettuja tuloksia tarkennetaan tarvittaessa näytteenotolla, laboratoriotutkimuksilla, sekä muilla kairausmenetelmillä kuten siipi- ja porakonekairauksilla. (SGY, 1980).



Painokairaan kuuluvat vakio-osina painosarja, tangot, liitostapit ja kärki. Koneellisessa kairauksessa käytettävä kuormitus voi muodostua myös koneen painosta. Painokairan tangot ovat onttoja tai umpinaisia, halkaisijaltaan 22 tai 25 mm terästankoja. Kairauksen edessä tangot liitetään toisiinsa erillisillä kierretepeilla. Painokairan kärkenä käytetään kuvassa 4.1 esitettyä, # 25 mm teräksestä valmistettua, 200 mm pitkää kierrekärkeä. (SGY, 1980).



**Kuva 4.1.** Painokairan standardikärki. (SGY, 1980).

Käsin tehtävässä painokairauksessa tankojen kiertämiseen käytetään vääntövartta ja koneellisessa kairauksessa pyörityslaitetta. Painokairaus suoritetaan nykyään lähes poikkeuksetta tela-alustaisilla monitoimikairoilla, jolloin liikkuminen on mahdollista haastavassakin maastossa ja samalla kalustolla voidaan suorittaa useantyyppisiä kairauksia ja näytteenottoja. Kuvassa 4.2 on esitetty Geomachine Oy:n toimittama nykyaikainen tela-alustainen kevyt kairavaunu.

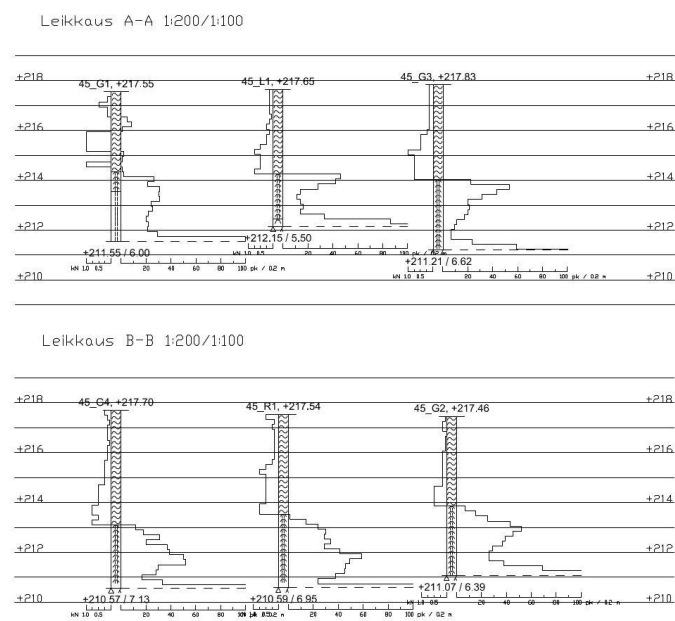


**Kuva 4.2.** GM50 -kairavaunu. (Geomachine Oy).

Kairaus lopetetaan, kun kaira ei enää etene syvemmälle edes lyömällä tai kun saavutetaan suunniteltu ohjesyvyys. Kairauksen päättymisen syy on aina kirjattava pöytäkirjaan. Samoin on aina merkittävä sellaiset kairausyritykset, joilla ei saavutettu määriteltyä ohjesyvyyttä. Kairauksen päättymisen mahdollisia syitä ovat: kairaus lopetettu määräsyvyyteen, kairaus päättynyt tiiviiseen maakerrokseen, kairaus päättynyt kiveen tai lohkareseen, kairaus päättynyt kiveen, lohkareseen tai kallioon, kairaus päättynyt kallioon. Kairaus on suoritettava syvissä rei'issä keskeytyksettä, jotta vältetään kairan maahan juuttumisesta aiheutuvat virheelliset kairausvastukset. (SGY, 1980).

Kairauksen tulokset esitetään diagrammissa, jossa vasemmalla puolella on vapaasti painunut osuus asteikolla 0–1 kN ja oikealla kiertämällä painuneet osuudet asteikkona puolikierrosten lukumäärä 0,2 m painumaa kohti. Diagrammiin merkitään myös maanpinnan korko, lopeutussyvyys, sekä kerroksittain arvioidut maalajit.

Kuvassa 4.3 on esitetty tyypillinen pylväspaikan painokairauksella suoritetusta pohjatutkimuksesta muodostettu diagrammi. Pehmeiköllä sijainneen pylväspaikan maaperä on tutkittu molempien pylväsalkojen, sekä kaikkien neljän harusperustuksen kohdalta. Viiden kairauksen on merkitty päättyneen kallioon tai kiveen. Tässä tapauksessa perustustapana on käytetty elementtiperustuksia ja pohjanvahvistuksena lyömällä asennettavia teräsbetonirakenteisia pienpaaluja, jolloin mahdollista kalliota ei ole varmistettu porakonekairauksella, vaan paalujen kantavuus todetaan loppulyöntisarjojen perusteella.



**Kuva 4.3.** Painokairauksen diagrammi. (Fingrid, 2019).

### 4.3 Tärykairaus

Tärykairaus on dynaaminen kairausmenetelmä, joka voidaan suorittaa kevyellä porauskallustolla. Tärykoneeksi soveltuu esimerkiksi kevyt käsikäyttöinen kallioporakone. Tankoina käytetään 22 tai 25 mm umpi- tai putkitankoja ja kärkenä halkaisijaltaan tankoja vastaavaa tai hieman suurempaa irtokärkeä. Tärykairaus on yksinkertainen ja nopea kairausmenetelmä, mutta sitä voidaan hyödyntää vain täydentävänä lisätutkimusvälineenä. Käytettävästi kalustosta johtuen iskutehon määrittäminen on vaikeaa, joten kairausvastuksen perusteella ei voida arvioida maakerroksen tiiviyttä. Tärykairauksen perusteella pyritäänkin arvioimaan maalajiryhmä ja kairauksen päättymisen syy kairan tunkeutumisenopeuden ja kairauksen aikana tehtävien ääni- ja tuntohavaintojen perusteella. (SGY, 1980).

Tärykairaus soveltuu erityisesti määräsyvyyteen ulottuviin kairauksiin, kun halutaan esimerkiksi varmistaa, ettei kallio ole tiettyä tasoa ylempänä. Menetelmä soveltuu myös esimerkiksi tukipaalun pituuden arviointiin, jos löyhärakenteisen kerroksen alla on tiivis pohjakerros tai kallio. (SGY, 1980).

Tärykairaus ei ole sellaisenaan käyttökelpoinen voimajohtojen pylväspaikkojen maaperätutkimuksiin, koska maakerrosten rakenteesta ei saada menetelmällä riittävää tietoa ja toisaalta esimerkiksi kalliopinnan sijainnin ja laadun varmistamiseen on käytettävissä luotettavampia lisätutkimusmenetelmiä, kuten myöhemmin käsitelty porakonekairaus. Tärykairausta voidaan tarvittaessa hyödyntää roudan tai erittäin kovan pintakerroksen läpäisyyn ennen painokairausta.

### 4.4 Heijarikairaus

Heijarikairaus on dynaaminen kairausmenetelmä, jossa kairaa kuormitetaan heijarin lyönneillä. Kairausvastus määritetään syvyysyksikköä kohti tarvittavien lyöntien määrästä. (SGY, 1980).

Menetelmää käytetään lähinnä karkearakenteisissa muodostumissa. Heijarikairausta voidaan käyttää myös moreenissa, mutta kivisessä moreenissa kairan tunkeutuminen on verrattain heikkoa. Käyttökohteita ovat esimerkiksi kiinteän pohjakerroksen yläpinnan ja



maakerrosten tiiviiden selvittäminen paalupituuksien määrittämiseksi. Heijarikaira tunkeutuu tiiviissä maakerroksissa jossain määrin paremmin kuin painokaira. (SGY, 1980).

Heijarikairan tankoina käytetään 32 mm umpi- tai putkitankoja, jotka liitetään toisiinsa kierretappien avulla. Suomessa käytettävä heijarin massa on 63,5 kg. Halkaisijaltaan 45 mm kärjen alapää on kartionmuotoinen muodostaen 90 asteen kärkikulman. Vapaapudotusheijarikairan heijarin pudotuskorkeus on 0,50 m ja heijaripukkikairauksessa 0,60 m. Suositeltava lyöntinopeus on 30 lyöntiä minuutissa, jota ei saa ylittää savimaissa. Heijarikairauksesta on Suomessa yleisen vapaapudotusheijarikairan ja historiassa käytetyn heijaripukkikairan lisäksi olemassa eurooppalaiset DPA ja DPB (Dynamic Probing Type A ja Type B) -menetelmät, jotka eroavat lähinnä kärjen ja pudotuskorkeuden osalta. (SGY, 1980).

Pehmeässä maaperässä kairatangot painetaan ensin pehmeiden kerrosten läpi ja aloitetaan lyönnit vasta, kun tankojen tunkeutuminen pysähtyy. Heijarikairassa on tyypillisesti pudotuskorkeusrajoitin, joka pysäyttää heijarin toiminnan 0,2 m välein. Lyöntien lukumäärä voidaan tällöin lukea laskurista ja kirjata muistiin. Heijarikairan kairatankoja on pyöritettävä vähintään metrin tunkeumavälein, jotta vältetään tankojen taipuminen. Tankojen käyryys on tarkastettava jokaisen kairauksen jälkeen ja vääntyneet tangot on oikaistava tai poistettava käytöstä. (SGY, 1980).

Heijarikairauksen tulokset esitetään diagrammilla samaan tapaan kuin painokairauksen tulokset. Yksikkönä käytetään lyöntien lukumäärää 0,2 m painumaa kohti.

#### 4.5 Puristinkairaus (CPT/CPTU)

Puristinkairaus (CPT) on staattinen kairausmenetelmä, jossa kairan kärkeä puristetaan 20 mm/s nopeudella ja mitataan kerroksittain etenemiseen vaadittu voima. Kairaus päätetään saavutettaessa suurin puristusvoima.

Sähköinen puristinkairaus huokosvedenmittauksella (CPTU) on menetelmä, jossa kairan kärkiosaan kohdistuvaa kärkivastusta, vaippakitkaa ja huokospainetta mitataan jännitys-venymäliuska-antureilla, joista saatavat mittausarvot tallennetaan sähköisesti. Mittausten tallennusväli vaihtelee tarkkuusluokasta riippuen välillä 20–100 mm. (SGY, 2001).

Sähköisen CPTU-kairauksen etuja ovat tarkkuus, toistettavuus ja usean parametrin lähes jatkuva rekisteröinti kairauksen aikana. Menetelmä aiheuttaa kuitenkin muita menetelmiä tarkempia vaatimuksia laitteiston kalibroinnille ja käytölle. (SGY, 2001).

CPT- ja CPTU-kairaukset soveltuvat sellaisenaan parhaiten koheesiomaiden ja löyhien kitkamaiden tutkimiseen. Vaihteleviin maaperiin ja voimajohtojen maaperätutkimukseen paremmin soveltuva menetelmänä voidaan pitää seuraavassa alaluvussa käsiteltävää yhdistettyä puristin-heijarikairausta. CPTU-kairauksen avulla on mahdollista saada erittäin tarkkaa tietoa maaperän ominaisuuksista, mutta menetelmä ei ole riittävän yksinkertainen ja kustannustehokas käytettäväksi voimajohtoprojektien maaperätutkimuksien yleisenä menetelmänä, jolloin mahdollinen käyttötarve rajautuu erikoistapauksiin.

Puristinkairauksesta laadittavassa diagrammissa kuvataan kärkivastus, vaippakitka, sekä CPTU-kairauksessa mahdollisesti mitattu huokospaine.

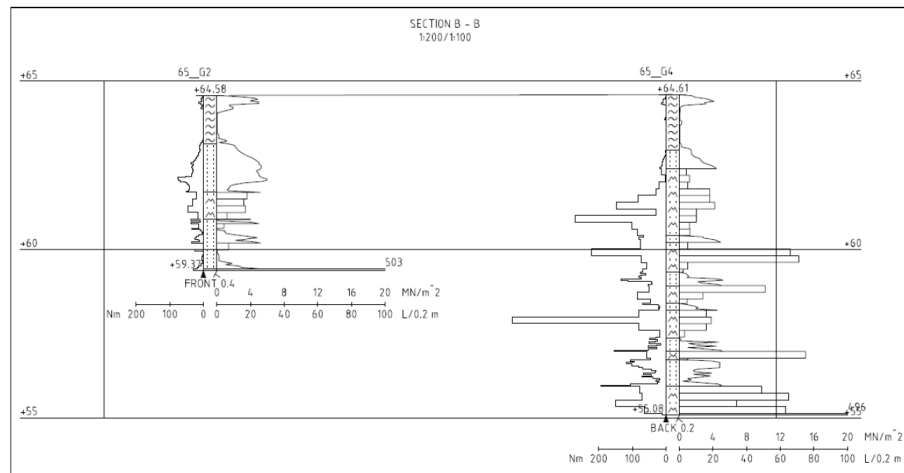
#### 4.6 Puristin-heijarikairaus

Puristin-heijarikairaus on menetelmä, jossa yhdistyvät mekaaninen puristinkairaus (CPT) ja vapaapudotusheijarikairaus. Kairaus aloitetaan puristinkairauksena, jossa tankoja puristetaan ja pyöritetään samanaikaisesti. Saavutettaessa kalustosta riippuva maksimipuristusvoima, tyypillisesti noin 30 kN, vaihdetaan heijarikairaukseen. Tankoja pyöritetään vaki nopeudella myös heijarikairauksen aikana. Takaisin puristinkairaukseen siirrytään, mikäli kokonaislyöntiluku on  $\leq 5$  yli 0,4 metrin matkalla. Puristin-heijarikairaus päätetään aina kairan pysähtymiseen heijarikairauksella. Kairaustapaa ei tule vaihtaa tiheästi vaihtuvissa kerroksissa (0–2 m välein) tulosten heikon tulkittavuuden vuoksi. (SGY, 2001).

Menetelmän käyttö edellyttää kairaustulosten automaattista rekisteröimistä tallennin- ja piirituriyksikköön. Mitattavia muuttujia ovat puristusvoima, vääntömomentti, lyöntien määrä, sekä kairaussyvyys. (SGY, 2001).

Puristin-heijarikairaus on painokairauksen ohella käytetyimpiä voimajohtokohteiden pohjätutkimusmenetelmiä. Menetelmän etuna on soveltuvuus monentyypisiin maakerrostumiin kahden vaihtoehdoisen kairausmenetelmän ansiosta.

Kuvassa 4.4 on esitetty puristin-heijarikairauksella suoritetusta pohjatutkimuksesta muodostettu diagrammi. Vasemmalla on esitetty kairan pyörytykseen käytetty vääntömomentti. Oikealla on esitetty puristamiseen käytetty voima ja heijarikairauksessa käytetyt lyönnit 0,2 m kerrosta kohti. Pehmeät kerrokset on läpäisty puristinkairauksella ja tiivimmissä kerroksissa on siirrytty heijarikairaukseen.



**Kuva 4.4.** Puristin-heijarikairauksen diagrammi. (Fingrid, 2015).

#### 4.7 Siipikairaus

Siipikairaus soveltuu hienorakeisten maalajien leikkauslujuuden määrittämiseen. Neljästä toisiaan vastaan kohtisuorasta levystä muodostettu siipi painetaan häiriintymättömään maahan ja siipeä kierretään maan pinnalta tarkoin määritellyllä vakionopeudella. Siiven kärkien kautta muodostuvan leikkauspinnan momentti mitataan. Leikkauslujuuden arvo saadaan määritettyä tarvittavan momentin ja leikkautumispinnan geometrian avulla. Siipikairauksella määritetty leikkauslujuus edustaa ns. suljettua leikkauslujuutta  $c_u$  eli maan tilavuus ja vesipitoisuus oletetaan vakioiksi. (SGY, 1995).

Menetelmä on yksinkertainen ja soveltuu osaksi pehmeikköalueilla tehtäviä pohjatutkimuksia. Ensisijaisesti soveltuvia maalajeja ovat savi, liejusavi, lieju, maatunut turve, sekä usein myös hieno- ja keskisiltti. Suuntaa antavia arvoja voidaan määrittää myös maatumattomasta turpeesta ja karkeasiltistä, mutta arvoja ei voida sellaisenaan soveltaa kantavuuslaskelmissa. Tutkimuksen avulla voidaan tässäkin tapauksessa saavuttaa käsitys lujuuden paikallisista

vaihteluista. Siipikairauksen tuloksista voidaan arvioida huippulujuuden lisäksi häiritty lujuus ja jäännöslujuus. (SGY, 1995).

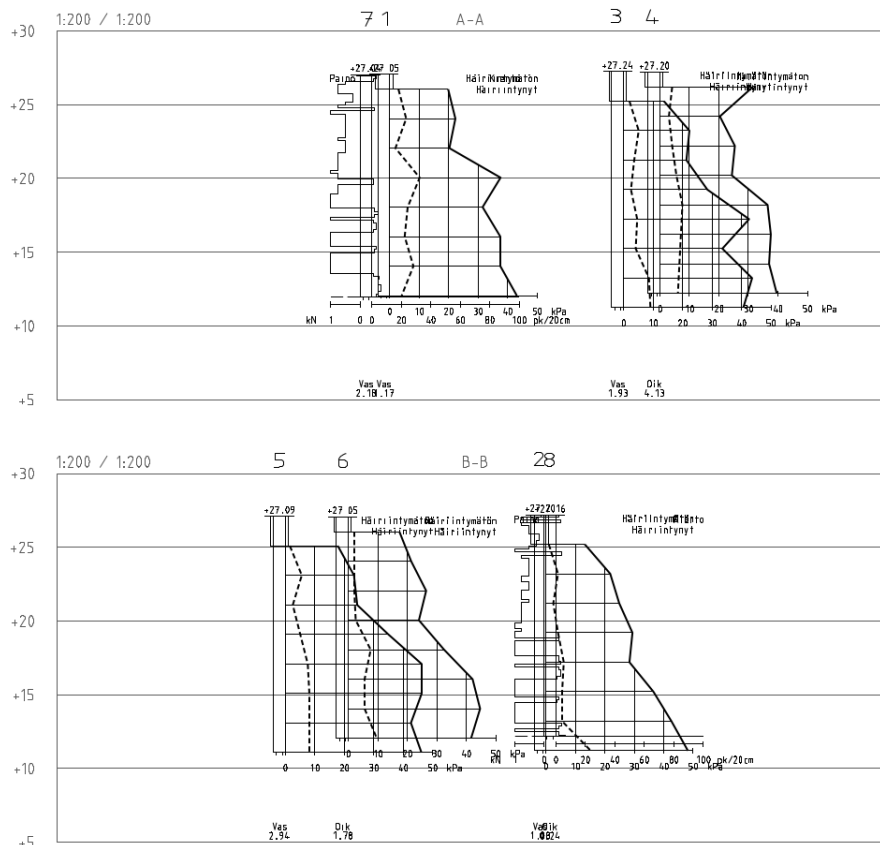
Siipikaira muodostuu yleensä neljästä pääosasta: momentinmittauslaite, tangot ja suoja-putket, siipiputki sekä siipi. Momentin mittaukseen on käytössä erilaisia ratkaisuja, joista nykypäivänä käyttökelpoisia ovat piirturimittari ja tietokoneella/tallentimella varustettu momenttimittari. Siiven korkeus on yleisesti kaksi kertaa sen leveys. Siipien yleisimmät koot ovat 55 x 110 mm (pieni standardisiipi), 65 x 130 mm (standardisiipi) ja 80 x 160 mm (iso standardisiipi). Siiven terien paksuus on normaalisti 2 mm. Tarvittaessa voidaan käyttää poikkeavia siipikokoja. (SGY, 1995).

Ennen siipikairausta on selvitettävä maakerrosten paksuus, sekä arvioitava maalajit ja kerrosrajat. Käytettävä siiven koko ja mittaussyvyys valitaan esimerkiksi painokairauksen tuloksien perusteella. Standardisiipeä (65 x 130 mm) käytetään pehmeissä maakerroksissa, joissa painokaira painuu suurimmassa osassa kerrosta 0–1 kN kuormituksella. Siipikoko 80 x 160 mm suositellaan käytettäväksi painonkairan painuessa maakerroksessa alle 0,5 kN kuormituksella. Pieni standardisiipi (55 x 110 mm) soveltuu kuivakuoreen ja muihin ylikonsolidoituneisiin saviin, sekä silloin kun painokairaa on jouduttu pääosin kiertämään. Siipikoko tulee valita siten, että mitattava momenttilukema on yli 20 % laitteen mittausalueesta. (SGY, 1995).

Siipiputkella varustetun kairan siipi on yläasennossa painettaessa kaira maahan 200–500 mm etäisyydelle halutusta mittaussyvyydestä. Tämän jälkeen siipi painetaan kairatankojen avulla jatkuvalla hitaalla liikkeellä oikeaan mittaussyvyteen. Mikäli siipi ei painu oikeaan syvyyteen kiven tai muun esteen takia, nostetaan siipi takaisin yläasentoon ja painetaan koko kairaa vähintään 0,5 m syvemmälle, jonka jälkeen siipi painetaan uudelleen ala-asentoon. Ilman siipiputkea kairattaessa painetaan kairatangot 200–500 mm etäisyydeltä oikeaan mittaussyvyteen hitaalla ja tasaisella liikkeellä. Tämän jälkeen kiinnitetään momentinmittauslaite. Mittaukset tehdään yleensä 0,5 m välein. Tehtäessä mittauksia tiheämmin, on käytettävä vierekkäisiä reikiä, joten etäisyys toisistaan on vähintään 1 m. Tarvittaessa mittaussväliä voidaan harventaa. Siipeä kierretään mittauksen aikana vakionopeudella, siten että kiertymisnopeus on mahdollisimman tarkasti 6 astetta minuutissa. Siiven kiertonopeutta tarkkailaan koko mittauksen ajan. Tutkimuksen aikana havaitaan suurin leikkauslujuutta vastaava mittalaitteen lukema ja siihen kulunut aika. Siiven kiertämistä jatketaan maksimikohdan yli vastaava aika, jotta voidaan varmistua huippulujuuden saavuttamisesta. Tämän jälkeen

määritetään häiritty leikkauslujuus pyörittämällä siipeä mittaussyvytydessä 20 täyttä kierrosta nopeudella 1 kierros / 1–2 sekunnissa. (SGY, 1995).

Kuvassa 4.5 on esitetty siipikairauksella suoritetusta pohjatutkimuksesta muodostettu diagrammi. Kahden vierekkäisen kairauspisteen tulokset on esitetty diagrammissa limittäin.



**Kuva 4.5.** Siipikairauksen diagrammi. (Fingrid, 2015).

#### 4.8 Porakonekairaus

Porakonekairaus on menetelmä, jonka avulla kairan kärki saadaan tunkeutumaan maakerrosten läpi myös kallioon ja samalla voidaan seurata suhteellista tunkeutumisenopeutta. (SGY, 1986).

Suomen maankamaran rakenteessa irtomaakerroksen alla sijaitsee usein kallio, jonka lujuus ja kairausvastus ovat normaalisti kallion päällä olevia maakerroksia suurempia. Kallioperä on kuitenkin lujuudeltaan vaihtelevaa ja monin paikoin sen pintaosat ovat rikkonaista ja rakoilevaa kiveä tai kitkamaalajien kaltaista löyhää massaa. Tällaisissa olosuhteissa

kalliopinnan toteaminen porakonekairauksella on epävarmaa, koska kalliota peittävän kitkaan kairausvastus on samaa luokkaa kuin rikkonaisen kallion. Useimmiten vastaan tulee kuitenkin kova kallio. Porakonekairauksessa kallion pinnalla tarkoitetaan tasoa, jossa tunkeutumisenopeus pienenee äkillisesti ja selvästi. Kallion pinta voidaan todeta saavutetuksi, mikäli tunkeutumisenopeus säilyy pienenä jatkettaessa kairausta vähintään kolme metriä. Kalliopintaa varmistettaessa voidaan käyttää apuna kairauksen yhteydessä syntyvän irtomateriaalin laatuun perustuvia havaintoja. (SGY, 1986).

Porakonekairauksen aika-painuma-tiedon perusteella voidaan karkeasti arvioida kallioperän ominaisuuksia. Suunniteltaessa porapaalutusta, tulisi porakonekairaukset ulottaa aina vähintään 2 m porapaalun suunnitellun kärjen alapuolelle, jotta saadaan riittävästi viitteellistä tietoa porapaalun alapuolisesta kallioperästä. Yleisesti käytettyä kalliovarmistuspituutta 3,0 m on tarpeen kasvattaa käytettäessä halkaisijaltaan 500 mm suurempia porapaaluja. (Väylävirasto, 2020).

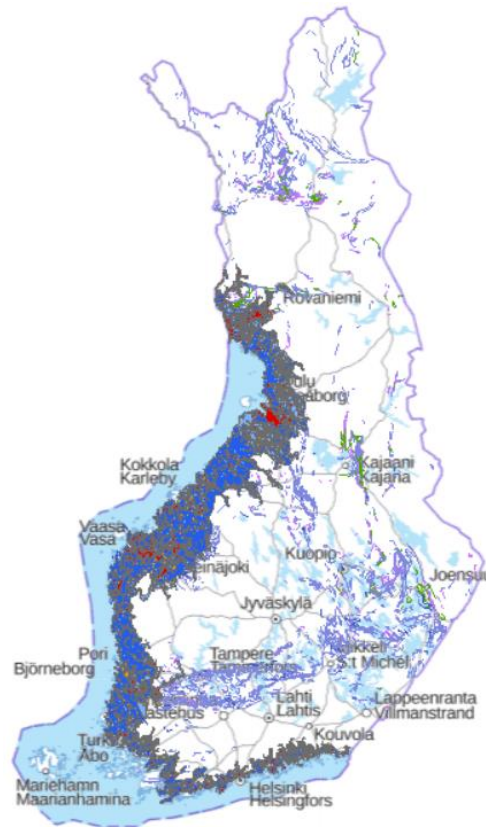
#### 4.9 Aggressiivinen maaperä

Ympäristöolosuhteiden aggressiivisuus tulee arvioida geoteknisessä suunnitteluvaiheessa, jotta voidaan ryhtyä varotoimenpiteisiin materiaalien suojaamiseksi tai tarkoituksenmukaisen vastustuskyvyn aikaansaamiseksi. (RIL, 2016).

Olosuhteet todetaan tavanomaisiksi pohjatutkimuksilla ja alueen historiatietojen perusteella tilanteissa, joissa ei ole aihetta olettaa maapohjan pilaantumista tai muutoin aggressiivisiä olosuhteita. Erityistutkimuksia tehdään epävarmoissa olosuhteissa. Tutkimusten perusteella todetaan, ylittävätkö tavanomaisten olosuhteiden raja-arvot vai eivät. Olosuhteita voidaan pitää korroosion kannalta tavanomaisina maaperän koostuessa ei-aggressiivisista ja kivennäismaalajeista muodostuneista luonnonmaakerroksista tai karkearakeisista täytöistä. (RIL, 2016).

Tavanomaisesta poikkeaviksi ja tietyissä tapauksissa aggressiivisiksi olosuhteiksi katsotaan yleensä runsaasti orgaanista ainesta sisältävät maapohjat, runsaasti rikkiä sisältävät maakerrokset, suolojen rikastamat löyhät täytöt, pilaantuneet maapohjat, sekä maa-alueet, joissa esiintyy tasavirtalähteiden aiheuttama potentiaalienttä. (RIL, 2016).

Merkittävän tunnistetun riskialueen muodostavat rannikon läheisyydessä sijaitsevat happamat sulfaattimaat. Suomen rannikkoalueita peitti vielä noin 7000 vuotta sitten Litorinameri. Meren pohjaan kerrostui kasvillisuutta, joka hapettomissa olosuhteissa hajotessaan muodosti nykyisiin maakerroksiin saostunutta rikkiä. Rakennuspaikan sijoittumista happamien sulfaattimaiden alueella voidaan arvioida alustavasti Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) happamat sulfaattimaat -palvelusta. Kuvassa 4.6 esitetyt happamien sulfaattimaiden alueet ulottuvat Suomessa pääosin 50–100 kilometrin etäisyydelle nykyiseltä rannikolta. Sulfaatteja esiintyy tyypillisesti hienorakeisissa savi- ja silttimaissa. Sisämaan sinertävät merkinnät kuvaavat grafiittia ja metallisulfideja sisältävän mustaliuskeen esiintymisalueita.



**Kuva 4.6.** Happamien sulfaattimaiden esiintymisalueet. (GTK, 2022).

Rikki esiintyy kerrostumissa pelkistyneenä olomuotona eli sulfidina. Maaperän sulfidit itsessään eivät aiheuta happamoitumista tai aggressiivisia olosuhteita. Sulfidien päästessä reagoimaan hapen kanssa muodostuu sulfaatteja. Sulfaatit reagoivat edelleen veden kanssa, jolloin muodostuu rikkihappoa. Rikkipitoista maakerrosta, jossa rikki on pelkistyneessä sulfidimuodossa, kutsutaan potentiaalisesti happamaksi sulfaattimaaksi (PHS). Hapettumisen ollessa käynnistynyt, rikkipitoista maata kutsutaan todelliseksi happamaksi sulfaattimaaksi

(THS). Rikkipitoinen sulfidimaa on väriltään tummaa ja vaalenee hapettuessaan visuaalisesti tavanomaista maa-ainesta vastaavaksi. Todellisen happaman sulfaattimaan tunnistaminen maastossa aistinvaraisesti on erittäin vaikeaa. (Ympäristöministeriö, 2022).

Poikkeavissa olosuhteissa korroosio- ja turmeltumisriskiä tulee arvioida maa- ja/tai pohjavesinäytteistä tehtävien kemiallisten analyysien avulla. Näytteenotto tulisi tehdä osana pohjatutkimuksia ja kohdistaa pohjasuhde- ja historiatietojen perusteella oletettuihin aggressiivisimpiin kohtiin. Ehdottomana minimääränä voidaan pitää tasalaatuisissakin olosuhteissa näytteiden tutkimista kahdelta eri syvyydeltä. Tässä tapauksessa toinen näyte otetaan pohjavesipinnan yläpuolelta ja toinen pohjavedenpinnan alapuolelta. Näytteenotto ulotetaan vähintään 1,5 m pohjavedenpinnan alapuolelle, ellei pohjavedenpinta ole syvällä. (RIL, 2016).

Kemiallinen analyysi tulisi tehdä mahdollisimman pian näytteenoton jälkeen, koska hapen pääseminen näytteeseen muuttaa mm. sulfidipitoisuutta ja pH-arvoa. Näytteen hapettuminen tulee estää mahdollisuuksien mukaan. Hapettumisen kannalta herkät analyysit tulisi tehdä isojen näytteiden sisältä otetuista osanäytteistä. (RIL, 2016).

Happamien sulfaattimaiden tutkimuksissa selvitetään maaperän nykytila, sekä ennustetaan maaperän tilaa tulevaisuudessa, jossa potentiaalisesti hapan sulfaattimaa hapettuu ja muuttuu todelliseksi happamaksi sulfaattimaaksi. Nykytila voidaan määrittää maaperän pH:n ja sulfaattipitoisuuden avulla. Tulevaisuuden kehitystä ennustetaan määrittämällä maaperän kokonaisrikkipitoisuus, nettohapontuottopotentiaali (NAG), sekä NAG-pH, joka on pH:n miniarvo kaiken rikin hapettuessa. Näytteistä tutkitaan myös korroosioon vaikuttava sähkönjohtavuus, sekä raudan ja rikin suhde. (Ympäristöministeriö, 2022).

Aiemmissa Fingridin voimajohtohankkeissa ei ole suoritettu näytteenottoja yksittäisiä kohteita lukuun ottamatta. Tulevissa hankkeissa pylväspaikan maaperä tulisi tutkia erityisesti suunniteltaessa teräspäälustuksia mahdolliselle happamien sulfaattimaiden alueelle tai muusta syystä aggressiiviseksi oletetulle maaperälle. Sulfaattimaiden huomiointi ja vaikutusten hallinta ympäristövaikutusten ja rakenteiden korroosion välttämiseksi on kehittynyt viime vuosina merkittävästi kaikessa infrarakentamisessa.

Fingridin vanhemman projektipäällikön Ritva Laineen mukaan nykyisin jo uusimpien voimajohtohankkeiden ympäristövaikutusten arvioinnissa (YVA) määritellään, että GTK:n karttojen mukaisilla riskialueilla on suoritettava näytteenotto jokaisella pylväspaikalla. Tutkimustulosten perusteella määritellään tarkemmat ohjeet maa-ainesten käsittelylle, sekä



perustusten korroosiosuojaukselle. Aurora Lineksi nimetyn Muhokselta Ruotsin Messaureen rakennettavan uuden 400 kV voimajohdon suunnittelussa happamat sulfaattimaat vaikuttivat muun muassa perustuksissa käytettävän betonin laatuun. Betoniperustuksissa käytetään tutkimusten perusteella määritellyillä pylväspaikoilla kemialliselta rasitukselta tavanomaista paremmin suojaavia XA2- ja XA3-rasitusluokkia. (Laine, 2022).

#### 4.10 Nykytila ja kehitystarpeet

Fingridin voimajohtohankkeiden maaperätutkimukset ovat aiemmissa hankkeissa pohjautuneet jokaisella suunnitellulla pylväspaikalla suoritettuihin painokairauksiin ja uusimmissa hankkeissa myös puristin-heijarikairauksiin. Tarkempia lisäkairauksia ja näytteenottoja on tehty yksittäisissä erityistapauksissa.

Haastateltujen Fingridin ja pääurakoitsijoiden edustajien mukaan suoritettujen maaperätutkimusten toteutuksessa ja tuloksissa on havaittu seuraavia puutteita ja haasteita:

- kairaus on keskeytetty huomattavan aikaisin ilman tunnistettua syytä
- aikaisin pysähtyneet kairaukset tuloksella kivi/kallio
- oletetun kallion pintaa ja laatua ei ole varmistettu
- pehmeiden maakerrosten kantavuudesta ja leikkauslujuudesta ei ole tarkkaa tietoa
- kerrosten maalajeista ei ole tarkkaa tietoa

Eltel Networksien projektipäällikkö Jukka Väljän mukaan maaperätutkimusten laadussa on tunnistettu yleisesti kehitettävää ja vaihtelua eri hankkeiden välillä. Joissain tapauksissa kantava maakerros ei tule vastaan vielä maaperätutkimuksen osoittamassa syvyydessä, jolloin virheellinen kairaustulos realisoituu toteutusvaiheessa esimerkiksi merkittävästi kasvavina paalupituuksina. Muutostilanteet aiheuttavat toteutusvaiheessa haasteita varatun materiaali-menekin kasvaessa ja vaikuttavat kustannuksiin. Oletettavasti syynä on, ettei painokaira tunkeudu maaperään yhtä tehokkaasti kuin paalut. Toisinaan maaperätutkimuksessa maaperä on esitetty erittäin pehmeänä ja suunniteltu pylväspaikka lähtötietojen perusteella paalutettavaksi. Perustustöiden yhteydessä maaperä saatetaan havaita todellisuudessa huomattavasti

kantavammaksi, jolloin perustus on toteutettavissa yksinkertaisemmin massanvaihdolla. (Väljä, 2022).

TMV Linen projektipäällikkö Toma Karkkulainen korosti maaperätutkimusten merkitystä poikkeavissa maaperän olosuhteissa. Maaperätutkimuksiin tulisi kiinnittää erityistä huomiota ja kohdistaa useampia kairauspisteitä haastaviksi havaittaville pylväspaikoille ja vastaavasti hyväksi havaittavalla maaperällä riittäisi kevyempi tutkimus. Painokairauksen yhteydessä havainnoidut maalajit perustuvat suurelta osin oletukseen. Tarvittaessa olisi hyödyllistä ottaa maaperänäytteitä, joiden merkitys korostuu erityisesti mahdollisia koheesiopaaluja suunniteltaessa. (Karkkulainen, 2022).

Eltel Networksin projektipäällikkö Markku Tuomelan mukaan porapaaluperustuksia koskien tärkein havaittu kehityskohde on todellisen kalliopinnan varmistaminen porakonekairauksella. Perustustöihin liittyvät riskit ovat porakonekairauksen jälkeen helposti hallittavissa. (Tuomela, 2022).

Haasteista huolimatta myös teräsperustusten suunnittelun koettiin yleisesti onnistuneen olemassa olevien lähtötietojen perusteella, eikä urakoitsijoiden toimesta ollut toteutettu täydentäviä lisätutkimuksia. Haastatellut pääurakoitsijoiden edustajat totesivat mahdollisten yleissuunnittelun aikana suoritettavien lisätutkimusten olevan hyödyllisiä ja vähentävän nykytilanteessa havaittuja ongelmakohtia.

Fingridin vanhemman projektipäällikön Antti Linnan mukaan maaperätutkimusten määrittelyjä kehitetään vastaamaan tunnistettuihin tarpeisiin. Tulevaisuudessa Fingridin voimajohdohankkeiden yleissuunnitteluvaiheen maaperätutkimukset suoritetaan kaikille pylväspaikoille puristin-heijarikairauksella ja määritetään lisätutkimukset ensimmäisten tutkimustulosten ja suunniteltavien perustustapojen perusteella. Porakonekairaus edellyttää pääsääntöisesti raskaampaa kairavaunua, jolloin lisätutkimuksia ja kalliopinnan varmistusta ei voida suorittaa yleisten tutkimusten yhteydessä samalla kevyellä kalustolla. (Linna, 2022).

Teräsperustuksien suunnittelun kannalta keskeisimpiä pylväspaikoille tarvittaessa suoritettavia lisätutkimuksia ovat:

- pehmeiden maakerrosten leikkauslujuuksien määrittely siipikairauksella
- kallion sijainnin ja laadun varmistus porakonekairauksella
- näytteenotot oletetuilla sulfidimailla korroosioriskin kartoittamiseksi

## 5 Teräsperustusten suunnittelu

Luvussa käsitellään ensin voimajohtorakenteiden suunnittelun lähtökohdat ja pylväsraakenteesta perustuksille siirtyvät kuormitukset, jonka jälkeen tarkastellaan erityyppisten teräsperustusten keskeisimpiä mitoitusperiaatteita huomioiden maaperän parametrit. Esimerkkinä suunnittelussa käytettävistä työkaluista esitellään SSAB Europen putkipaalutuotteet sisältävä RRPileCalc -laskentaohjelma. Fingridin hankkeiden teräsperustusten suunnittelun nykytilaa ja kehityskohteita käsitellään haastatteluilla kerättyjen havaintojen pohjalta.

### 5.1 Sovellettavat standardit ja Eurokoodit

CENELEC on eurooppalainen sähköalan standardointijärjestö, jonka jäsenenä on 34 maata. Järjestö valmistelee kansainvälistä kaupankäyntiä ja yhtenäisiä markkina-alueita edistäviä standardeja. Järjestö tekee yhteistyötä maailmanlaajuisen sähköalan standardointijärjestö IEC:n kanssa. Yhteistyön tuloksena lähes 80 % CENELEC:in standardeista on identtisiä tai perustuu IEC:n standardeihin. Suomen sähköalan kansallinen standardointijärjestö SESKO edustaa Suomea CENELEC:in ja IEC:n kansallisena komiteana. (CENELEC, 2022).

Voimajohtojen rakenteet suunnitellaan Suomessa CENELEC:in standardissa SFS-EN 50341-1, sekä kansallisessa liitteessä SFS-EN 50341-2-7 esitettyjen periaatteiden ja kuormitustapausten mukaisesti. Yleiset vaatimukset ja yhteiset määrittelyt sisältävää ensimmäistä osaa tulee tulkita yhdessä kansalliset velvoittavat määräykset sisältävän toisen osan kanssa. Kirjoitushetkellä voimassa oleva ensimmäinen osa on julkaistu vuonna 2014 ja toisen osan viimeisin muutos vuonna 2016.

Eurokoodit ovat eurooppalaisen standardointijärjestö CEN:n julkaisemia kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja, joiden tavoitteena on ollut poistaa kaupan teknisiä esteitä ja yhdenmukaistaa kansainvälisesti käytettäviä teknisiä määräyksiä. Eurokoodijärjestelmä on otettu Suomessa käyttöön vaiheittain vuodesta 2007 alkaen. Jäsenmaat voivat esittää kansallisissa liitteissä mm. varmuuslukuihin, paikallisiin olosuhteisiin ja mitoituskaavoihin liittyviä kansallisia valintoja. Ympäristöministeriö vastaa Suomen kansallisten liitteiden laatimisesta talonrakentamisen ja Väylävirasto liikenne rakentamisen osalta. (SFS, 2019).

Voimajohtojen perustussuunnittelussa keskeisiä ovat teräs- ja betonirakenteisiin, sekä geotekniseen suunnitteluun sovellettavat Eurokoodit. Suunnittelussa on noudatettava lisäksi voimassa olevia Suomen rakentamismääräyksiä ja projektin teknisiä spesifikaatioita.

## 5.2 Voimajohdon mitoitusperiaatteet ja kuormitustapaukset

Ilmajohdojen suunnittelussa käytetään Suomessa taulukossa 5.1 esitettyjä luotettavuustasoja 1, 2 ja 3 (SFS-EN 50341-2-7:2015). Valittu luotettavuustaso esitetään voimajohtoprojektin spesifikaatiossa. Fingridin 110 kV voimajohdot on määritelty luotettavuustasoon 2 ja 400 kV voimajohdot tasoon 3. Erikoistapauksissa luotettavuustasoa 3 käytetään myös 110 kV jännitetasolla. Luotettavuustaso vaikuttaa mitoituksessa käytettäviin osavarmuuslukuihin.

**Taulukko 5.1.** Ilmajohdojen luotettavuustasot. (SFS-EN 50341-2-7:2015).

Taso	Nimellisjännite	Johdon tyyppi
1	$U_n \leq AC\ 45\ kV$	Tavalliset johdot
	$U_n > AC\ 45\ kV$	Tilapäiset tai vähemmän tärkeät johdot
2	$U_n \leq AC\ 45\ kV$	Erikoisjohdot
	$U_n > AC\ 45\ kV$	Tavalliset johdot
3	kaikki	Erittäin tärkeät johdot, esim. kaikki 400 kV johdot

Lujuuskoordinaation toteuttamiseksi yli 45 kV jännitetason kulma-, kiristys- ja päätepylväiden osien kestävyys osavarmuusluku  $\gamma_M$  kerrotaan muilla kuin asennuskuormituksilla lisäkertoimella  $\gamma_S = 1,1$ . Kulmapylväillä tarkoitetaan tässä yhteydessä vähintään 10 asteen kulmia. (SFS-EN 50341-2-7:2015).

Kyseisissä tapauksissa mitoituksen peruskaavassa  $E_d \leq R_d$  rakenteellista kestävyyttä kuvaavan termin  $R_d$  määrittämisessä lasketaan materiaaliominaisuuksien mitoitusarvo  $X_d$  ominaisarvosta  $X_K$  kaavalla  $X_d = X_K / (\gamma_M \gamma_S)$ .

Perustusten tulee olla lujuuskoordinaation kannalta 10 % kestävämpiä kuin pylväiden, joten pylväältä perustuksille tulevien kuormien kertomisessa käytetään kerrointa 1,1. Kulma-, kiristys- ja päätepylväillä kuormat on lisäksi kerrottava muilla kuin asennuskuormituksilla lisäkertoimella 1,1, jolloin kokonaiskertoimeksi muodostuu näillä pylväillä 1,21. Perustusten

lujuuskoordinaatio voidaan vaihtoehtoisesti kohdistaa materiaalien osavarmuuslukuihin kerroimilla 1,1 ja 1,21. (SFS-EN 50341-2-7:2015).

Taulukossa 5.2 esitetyt uusien voimajohtojen suunnittelussa käytettävät standardikuormitustapaukset, lämpötilat, yhdistelmäkertoimet  $\Psi$  ja luotettavuustasoin esitetyt osavarmuusluvut  $\gamma$  on määritelty standardissa SFS-EN 50341-2-7:2016 Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt. Kuormitustapauksen 2a jääkuorman yhdistelmäkerroin  $\Psi_I$  määritetään projektin spesifikaatiossa. Jos kerrointa ei ole määritetty käytetään arvoa  $\Psi_I = 1,5$  huomioiden, että jääkuorman lopullisen muunnetun arvon  $\Psi_{I50}$  tulee olla vähintään 20 N/m. Fingridin hankkeissa käytetään 110 kV jännitetasolla kerrointa 2,0 ja 400 kV jännitetasolla kerrointa 1,7. Pienennyskerroimia  $\alpha_i$  käytetään laskettaessa peräkkäisiin jänteisiin epätasaisesti jakautuneen jääkuorman vaikutuksia.

**Taulukko 5.2.** Kuormitustapaukset. (SFS-EN 50341-2-7:2016).

No	Kuormitustapaus	Lämpötila	Tuuli	Jää	Taso 1		Taso 2		Taso 3	
		°C	$\Psi_w$	$\Psi_I$	$\gamma_w$	$\gamma_i$	$\gamma_w$	$\gamma_i$	$\gamma_w$	$\gamma_i$
1a	Huipputuuli	0	1,0							
1b	Minimilämpötila	$T_{min}$								
2a	Huippujää + lumi	0		1,0...3,0	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*	Irronut jää yhdessä jänteessä	0		0,7	1,0		1,25		1,5	
3a	Huippujää + nimellistuuli	0	0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,25	1,0	1,5
3b	Kova tuuli + nimellisjää	0	0,7	0,4	1,0	1,0	1,2	1,0	1,4	1,0
4	Asennus, kunnossapito	-20			$\gamma_P = 1,5$					
5	Varmuus- ja satunnaiset kuormat	0			$\gamma_A = 1,0$					
Oman painon osavarmuusluku on $\gamma_G = 1,0$ kaikissa tapauksissa.										

Kannatuspylväiden tapauksessa tarkastellaan kaikki kuormitustapaukset, lukuun ottamatta erikoisjääkuormia 2b-e, jotka tarkastellaan vain taulukossa 5.3 esitetyissä jäätymislukukissa III ja IV. Tapauksen 4 osalta kannatuspylväillä tarkastellaan asennuksen ja kunnossapidon aikainen tilanne, jossa johtimet ankkuroidaan kannatuspylväälle korkeintaan 25 % kaltevuudella. Pylväs mitoitetaan johtimen kiinnityspisteisiin kohdistuville lisäpystykuormille, jotka ovat 1/3 asennustilanteen aikaisista johdinvoimien mitoitusarvoista. Tapauksen viisi osalta huomioidaan varmuuskuormitus minkä tahansa johtimen kiinnityskohdassa. Johtimen katkeamista kuvaavan pitkittäisen varmuuskuorman arvo on minkä tahansa vaihejohtimen yhden osajohtimen tai ukkosjohtimen voima perustilassa kohdistuen eristimen kiinnityspisteeseen rakenteessa.

Kiristyspylväillä tarkastellaan kuormitustapaukset 1–3 vastaavasti kuin kannatuspylväillä. Kuormitustapauksessa 4 kiristyspylväillä tarkastellaan taulukossa 5.4 esitetyt asennustapaukset S1-S5 mahdollisen tilapäisen harustuksen kanssa ja ilman sitä. Asennettaessa johtimia jänteisiin pylvään eripuolilla on toispuoleisissa tapauksissa tarkasteltava epäedullisinta tilannetta. Kiristyspylvään mitoituksessa ei tarkastella erikseen kuormitustapausta 5.

Sarjasortumia estävillä pylväillä tarkastellaan kuormitustapaukset 1–3 vastaavasti kuin kannatuspylväillä. Kuormitustapauksessa 5 tarkastellaan tilanne, jossa yhden jänteen kaikki johtimet ovat irti (asennustapaukset S2-S3), muiden johtimien ollessa perustilassa.

Päätepylväillä ja -telineillä tarkastellaan kuormitustapaukset 1–3 vastaavasti kuin muilla pylväillä ottaen huomioon, että johtimet asennetaan päätepylväillä vain toiselle puolelle. Kuormitustapauksessa 4 tarkastellaan vaaditut asennustapaukset S2 ja S4-S6.

Taulukossa 5.3 on esitetty Suomessa käytettävät jäätymisluokat ja johtimien jääkuormat. Ominaisjääkuorma määräytyy taulukossa esitetystä suhteellisesta korkeudesta, joka määritellään johtimen ja tarkastelukohteesta 10 km säteellä olevan ympäröivän maaston keskimääräisenä korkeuserona. Mahdollisia suurempia pitkäaikaisiin tilastoihin tai kokemukseen perustuvia arvoja on käytettävä ja ne esitetään projektin spesifikaatiossa. Luokkien II ja III väliarvot lasketaan lineaarisella interpolaatiolla. Luokan IV jääkuormaparametrien arviointi tulisi suorittaa ilmatieteen asiantuntijoiden toimesta. (SFS-EN 50341-2-7:2015)

**Taulukko 5.3.** Johtimen jääkuormat. (SFS-EN 50341-2-7:2015).

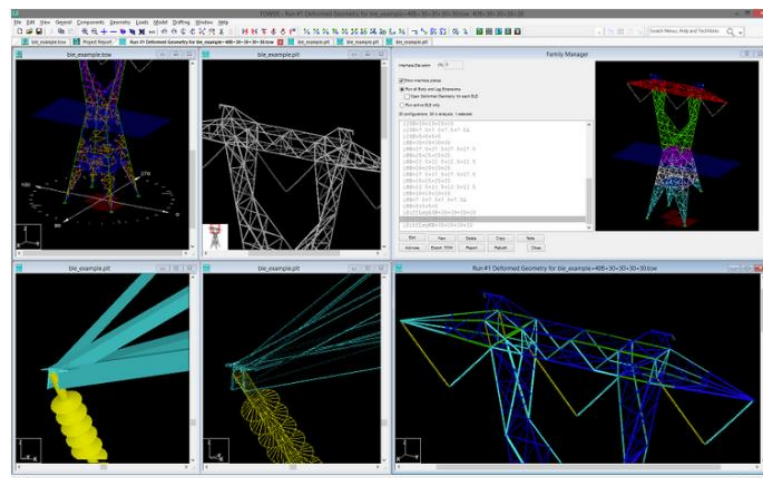
Jäätymisluokka	Suhteellinen korkeus [m]	Ominaisjääkuorma $I_{50}$ [N/m]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Vastuserroin	Jään tyyppi
I	0...50	10	500	1,15	huurre
II	50...100	10...25	500	1,15	huurre
III	100...200	25...50	500	1,15	huurre
IV	>200	>50	500	1,15	huurre

Taulukossa 5.4 on esitetty neljännen kuormitustapauksen laskennassa huomioitavat asennustapaukset S1-S6. Asennustapaukset kuvaavat rakentamisvaiheessa tai kunnossapitotöiden aikana mahdollisesti esiintyviä normaalitilasta poikkeavia epäsymmetrisiä johdinvoimia.

**Taulukko 5.4.** Asennustapaukset S1-S6. (SFS-EN 50341-2-7:2015).

Tapaus	Selite
S1	asennuskuormitus, kun kaikki johtimet ovat paikoillaan
S2	toispuolinen asennuskuormitus, jossa johtimet on asennettu vain pylvään yhdelle puolelle
S3	toispuolinen asennuskuormitus, jossa johtimet on asennettu vain yhdelle puolelle pylvästä ja osittain pylvään toiselle puolelle
S4	toispuolinen asennuskuormitus, jossa johtimet on asennettu vain yhdelle puolelle pylvästä, mutta puuttuvat pylvään toiselta puolelta
S5	keskimmäisen vaihejohtimen toispuolinen asennus
S6	uloimpien vaihejohtimien toispuolinen asennus

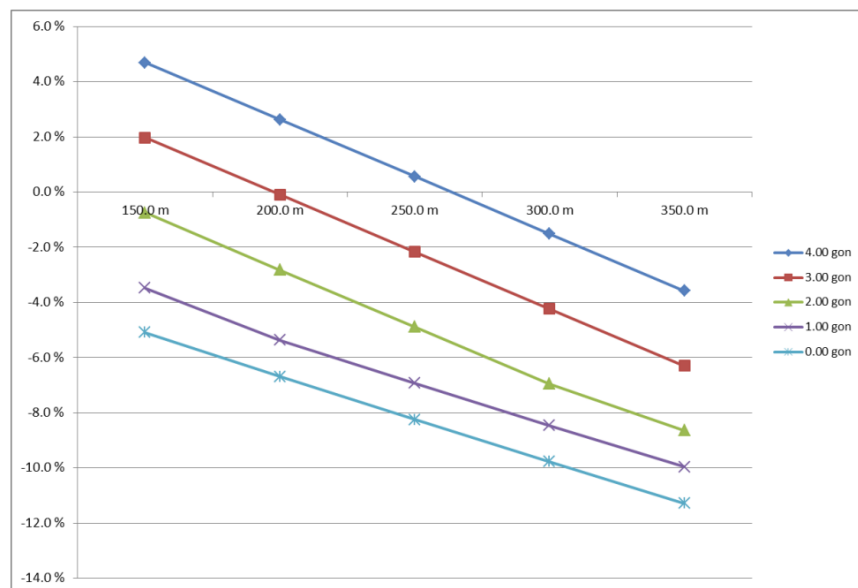
Voimajohtojen yleissuunnittelussa ja pylväsrakenteiden mallinnuksessa käytetään nykyään tarkoitukseen räätälöityjä ohjelmistoja, kuten Power Line Systemin tarjoamat PLS-CADD ja PLS-TOWER. Sijoitussuunnittelussa voidaan hyödyntää voimajohtoreitistä laserkeilauksella saatuja korkeusmalleja ja sijoittaa pylväsrakenteet helposti muokattavaan 3D-malliin. Pylväsrakenteiden mallinnukseen ja analysointiin soveltuvia ohjelmistoja voidaan hyödyntää uusien rakenteiden suunnittelun lisäksi tarkasteltaessa olemassa oleviin rakenteisiin kohdistuvia muutostilanteita tai tyyppipylväiden käytönrajoista poikkeavia kuormitustilanteita. Ohjelmistojen avulla saadaan laskettua myös perustussuunnittelussa tarvittavat perustuskuormat standardin määrittelemissä kuormitustilanteissa. Kuvassa 5.1 on esitetty havainnekuva pylväsrakenteiden mallinnukseen ja mitoittamiseen käytettävästä PLS-TOWER-ohjelmistosta.

**Kuva 5.1.** Havainnekuva PLS-TOWER-ohjelmistosta. (Power Line Systems, 2020).

Rakenteellisen kestävyuden lisäksi voimajohtojen sijoitus- ja rakennesuunnitteluun vaikuttaa merkittävästi mm. sähköisille etäisyyksille asetetut vähimmäisvaatimukset ja valitusta voimajohtoreitistä riippuvat erityispiirteet.

Fingridin voimajohtohankkeiden yleissuunnittelussa pyritään hyödyntämään mahdollisimman laajasti pylväsperheen tyyppirakenteita. Tyyppirakenteet kattavat lähes kaikki yleisesti tarvittavat pylväslajit ja mahdolliset yksittäiset erikoisrakenteet esimerkiksi poikkeuksellisen suurille kulmille tai pylväskorkeuksille suunnitellaan projektikohtaisesti. Tyyppipylväille on laskettu valmiiksi käytönrajat, jotka yksinkertaistavat ja nopeuttavat yleissuunnittelun aikana tehtäviä tarkasteluja. Rajatapauksissa pystytään joissain tilanteissa hyödyntämään tyyppipylvästä suorittamalla tarkempi tarkastelu. Lähtökohtana on kuitenkin pysyä käytönrajojen mukaisessa mitoituksessa ja jättää rakenteen käyttöasteeseen 5–10 % varaa mahdollisia rakentamisaikavaiheissa tehtäviä muutoksia ja pylvään siirtoja varten.

Kuvassa 5.2 on esitetty esimerkkinä valmiiksi lasketuista käytönrajoista Fingridin tyyppipylväisiin kuuluvan 110 kV 1H-pylvään heilahdusrajat, jotka perustuvat eristinketjujen heilahduskulmiin. Pystyakselilla on esitetty jännepituuden ja kulman funktiona lasketut  $\Sigma Y$ -arvot.  $\Sigma Y$ -arvo kuvaa viereisten pylväiden korkeuskulmien summaa ja vaikuttaa eristinketjuun ja orteen kohdistuvaan pystysuuntaiseen voimaan. Merkittävästi negatiivisen  $\Sigma Y$ -arvon tapauksessa siirrytään usein käyttämään kiristyspylvästä.



**Kuva 5.2.** 1H-pylvään heilahdusrajat. (Fingrid, 2015).



Taulukossa 5.5 on esitetty Fingridin 110 kV 1H-tyyppipylvään lujuusrajat, jotka on ilmoitettu pylväskorkeuksien, kulmien ja  $\Sigma Y$ -arvojen mukaisina suurimpina mahdollisina jännepituuksina.

**Taulukko 5.5.** 1H-pylvään lujuusrajat. (Fingrid, 2015).

Tyyppi 1 FG-110-3-015, jalka D273x5, ei ristiharuksia					Tyyppi 2 FG-110-3-016, jalka D273x5, ristiharukset				
Korkeus	Kulma	0 %	2 %	4 %	Korkeus	Kulma	0 %	2 %	4 %
H = 22 m	0 gon	350 m	350 m	350 m	H = 24 m	0 gon	400 m	400 m	400 m
	1 gon	330 m	325 m	320 m		1 gon	400 m	400 m	400 m
	2 gon	300 m	295 m	290 m		2 gon	400 m	400 m	400 m
H = 21 m	0 gon	350 m	350 m	350 m	H = 23 m	0 gon	400 m	400 m	400 m
	1 gon	350 m	345 m	340 m		1 gon	400 m	400 m	400 m
	2 gon	320 m	315 m	310 m		2 gon	400 m	400 m	400 m
H = 20 m	0 gon	350 m	350 m	350 m	H = 22 m	0 gon	400 m	400 m	400 m
	1 gon	350 m	350 m	350 m		1 gon	400 m	400 m	400 m
	2 gon	330 m	325 m	320 m		2 gon	400 m	400 m	400 m
						3 gon	400 m	400 m	400 m

### 5.3 Perustuskuormat

Fingridin harustetuille tyyppipylväille on laskettu määriteltyihin pylväiden käytönrajoihin pohjautuvat perustuskuormat. Yleissuunnittelussa pyritään hyödyntämään kyseisiä valmiiksi määriteltyjä perustuskuormia, jolloin tarkastelua ei ole normaalitilanteissa tarpeen tehdä yksittäisille harustetuille pylväille. Harustettujen pylväiden elementtirakenteisille tyyppiperustuksille on määritetty vastaavasti kuormitettavuudet, jolloin yleissuunnittelijan perustuskuormien ja pohjatutkimustulosten perusteella suorittama perustuselementtien valinta on suhteellisen suoraviivaista. Käytönrajojen perusteella tehtävä tarkastelu saattaa kuitenkin pylvään todellisista kuormista määräytyen johtaa perustusten ylimitoitukseen.

Vapaasti seisovien pylväiden perustuskuormat lasketaan standardien mukaisiin kuormitustapauksiin perustuen erikseen jokaiselle pylväälle. Perustussuunnittelu tehdään tämän jälkeen pylväskohtaisesti määritettyjen perustuskuormien ja maaperätutkimustulosten perusteella.

Harustettujen ja vapaasti seisovien kannatuspylväiden jalkojen suurimmat perustuskuormat esiintyvät tyypillisesti kuormitustapauksilla huipputuuli tai kova tuuli + nimellisjää. Harustettujen kannatuspylväiden suurimmat haruskuormat esiintyvät tyypillisesti huipputuulella tai varmuuskuormalla ja kiristyspylväiden asennustilanteessa. Vapaasti seisovien kiristyspylväiden suurimmat kuormat esiintyvät tyypillisesti asennustilanteessa.

Taulukossa 5.6 on esitetty Fingridin harustettujen tyyppipylväiden perustuskuormia jaettuna suuruusluokkien mukaisiin mitoitusryhmiin. Kuormat edustavat kyseisten pylväslajien suurimpia käytönrajojen mukaisia perustuskuormia. Ominaiskuormat on kerrottu pylväslajista riippuvilla kertoimilla. Tarvittaessa yksittäisten pylväiden perustuskuormat voidaan laskea todellisen tilanteen mukaisesti, jolloin perustus voidaan mitoittaa optimaalisesti.

**Taulukko 5.6.** Fingridin harustettujen tyyppipylväiden perustusten mitoituskuormia.

Mitoitusryhmät	Mitoitusarvo [kN] sisältäen kertoimet
<b>Pylväsjalca</b>	
110 kV 1H	347
110 kV 2H, 2HK, 3H	428
400 kV 1H, 110 kV 4H	552
400 kV 2H	583
400 kV 2HK, 400/110 kV 1HX, 2HX	615
400/110 kV 2HXK	748
<b>Harus</b>	
110 kV 1H, 2H, 2HK	198
400 kV 1HX	280
110 kV 1H (jääk.), 2H (jääk.), 400 kV 1H, 2H	310
110 kV 3H, 4H, 400 kV 2H, 2HX	380–435

#### 5.4 Perustussuunnittelun yleiset vaatimukset

Geoteknisten suunnitteluvaatimusten määrittämiseen voidaan käyttää geoteknisiä luokkia 1, 2 ja 3. Geotekniset luokat vastaavat rakentamismääräyksissä esitettyjä pohjarakenteiden suunnittelutehtävien vaativuusluokkia tavanomainen, vaativa ja poikkeuksellisen vaativa. GL3-luokan rakenteita voi kuitenkin kuulua myös vaativuusluokkaan vaativa. Ympäristöministeriön ohjeessa rakennusten suunnittelijoiden kelpoisuudesta annetaan erikseen ohjeet pohjarakennesuunnittelijan ja kantavien rakenteiden suunnittelijan osalta. Alustava geoteknisen luokan valinta tehdään tavallisesti ennen geoteknisiä tutkimuksia. Geotekninen luokka

voidaan tarvittaessa vaihtaa jokaisessa suunnittelu- tai rakentamisvaiheessa esimerkiksi pohjatutkimusten osoittaessa odotettua haastavammatt maaperän olosuhteet. (RIL, 2017).

Geotekniseen luokkaan 1 kuuluvat pienet ja suhteellisen yksinkertaiset rakenteet, joissa perusvaatimusten täytyminen voidaan varmistaa kokemuksen ja kvalitatiivisten geotutkimusten avulla, eikä rakenteista aiheudu merkittävää riskiä. Luokan GL1 rakennuspaikka on tyyppillisesti kallio- tai moreenialueella tai karkearakeisten maalajien alueella. (RIL, 2017).

Geotekniseen luokkaan 2 kuuluvat tavanomaiset rakenteet, joihin ei liity tavanomaisesta poikkeavia riskejä tai epätavallisia tai erikoisen vaikeita pohjaolosuhteita tai kuormituksia. (RIL, 2016).

Geotekniseen luokkaan 3 kuuluvat erittäin suuret tai poikkeavat rakenteet tai rakenteet, joihin liittyy normaalista poikkeavia riskejä tai joissa on epätavallisia tai poikkeuksellisen vaikeita pohjaolosuhteita tai kuormituksia. (RIL, 2016).

Käytettävä geotekninen luokka määritellään projektispesifikaatiossa. Tarkempien tietojen puuttuessa, nimellisjännitteeltään enintään 45 kV johtojen perustukset kuuluvat luokkaan GL1 ja yli 45 kV johtojen perustukset luokkaan GL2 (SFS-EN 50341-2-7:2015).

Fingridin uusien voimajohtojen perustusrakenteet kuuluvat lähtökohtaisesti geotekniseen luokkaan 2. Geotekniseen luokkaan 3 kuuluvat poikkeuksellisen vaativat rakenteet määritellään erikseen projektikohtaisesti (Fingrid, S23301E1). Luokkaan GL3 määriteltäviä rakenteita voivat olla esimerkiksi vesistöihin ja kaupunkialueille perustettavat pylvää.

Taulukossa 5.7 esitetyt seuraamusluokkien CC1-CC3 kuvaukset selventävät taulukossa 5.8 esitettyjä luotettavuusluokkia RC1-RC3. Luotettavuusluokan perusteella määräytyy kuormakerroin  $K_{FI}$ . Tavallisesti voimajohtojen perustusrakenteissa käytetään luokkaa RC2.

**Taulukko 5.7.** Seuraamusluokat. (RIL, 2017).

Seuraamusluokka	Kuvaus
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia.

**Taulukko 5.8.** Luotettavuusluokat. (RIL, 2017).

Luotettavuusluokka	Kuormakerroin $K_{FI}$
RC3	1,1
RC2	1,0
RC1	0,9

Geoteknisen luokan ja seuraamusluokan perusteella määräytyy taulukossa 5.9 esitetyllä periaatteella paaluperustuksissa käytettävä paalutustyöluokka. Taulukossa esitetyt paalutustyöluokat ovat asianomaisessa seuraamusluokassa ja geoteknisessä luokassa vaadittavia alhaisimpia luokkia. Valittu paalutustyöluokka vaikuttaa paalujen rakenteeseen, mitoitukseen, sekä asennustyön vaatimukseen ottaen huomioon tavanomaiset kuormitus- ja rasiustilat. Voimajohtojen perustuksissa käytetään tyypillisesti paalutustyöluokkaa PTL2.

**Taulukko 5.9.** Paalutustyöluokat. (RIL, 2016).

Geotekninen luokka	Seuraamusluokka		
	CC1	CC2	CC3
GL1	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)
GL2	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3
GL3	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3

Voimajohtopylvään perustusrakenteen valinta ja mitoitus pohjautuu perustuskuormiin ja voimajohdon yleissuunnittelun yhteydessä suoritettujen maaperätutkimusten tuloksiin. Käytettävien perustusratkaisujen tulee olla sellaisia, että määrittely voidaan tehdä kyseisten tutkimustulosten pohjalta. Elementtiperustusten yhteydessä asennustavan vaihtaminen rakentamisvaiheessa on suhteellisen yksinkertaista. Vapaasti seisovien pylväiden muutokset vaativat lisäsuunnittelua, jolloin voi olla perusteltua laatia jo yleissuunnittelun yhteydessä vaihtoehtoiset suunnitelmat esimerkiksi maanvaraiselle valuperustukselle ja kallioperustukselle. Tämä on tarpeen, mikäli pylväspaikalla ei ole suoritettu porakonekairausta kallion laadun varmistamiseksi ja tutkimustulokset perustuvat kallion pinnan määrittämiseen paino- tai puristin-heijari-kairauksella.

Perustussuunnittelun periaatteena on osoittaa, ettei mitään kyseeseen tulevaa tarkasteltavaa rajatilaa ylitetä. Rajatilat voivat esiintyä joko maapohjassa tai rakenteessa tai yhdistettynä murtumana. Murtotilassa tarkastellaan maaperän murtuminen ja perustuksen rakenteellinen

kestävyys. Käyttötilassa tarkastellaan rakenteen painumien ja siirtymien pysyminen sallittavissa rajoissa. (RIL, 2017).

Kaikki perustusten mitoitusmenetelmät ovat herkkiä lähtötietojen tulkinnanvaraisuudelle. Huomio koskee erityisesti pohjatutkimustulosten luotettavuutta, tulkintaa ja perustusrakenteen toimivuutta maaperän todellisissa olosuhteissa. Geotekninen tietämys ja ammattitaito ovat perusvaatimusten täyttymisen kannalta merkittävämpiä kuin laskentamallin ja osavarmuuslukujen tarkkuus. Laskentamallin tulee olla tarkka tai varmallalla puolella. (RIL, 2017).

## 5.5 Maaperän ominaisuudet

Kitkamaalajien ominaisuuksia voidaan arvioida maaperätutkimuksista saatujen kairaustulosten ja seuraavien taulukoiden 5.10 ja 5.11 avulla. Keskeisiä mitoitukseen vaikuttavia parametrejä ovat tilavuuspaino ja kitkakerroin. Taulukoista voidaan havaita pohjavedenpinnan merkittävä vaikutus laskelmissa käytettäviin maalajien tilavuuspainoihin. Koheesiomaiden leikkauslujuuden määrittäminen edellyttää siipikairausta tai vaihtoehtoisesti laskelmissa käytettävä leikkauslujuuden arvo määritetään varmalle puolelle.

**Taulukko 5.10.** Karkean siltin ja hiekan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointi kairausvastuksen perusteella. (Liikennevirasto, 2017).

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjavedenpinnan		Kitkakulma (°)	Jambun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduuliluku	Jännityseksponentti $\beta$	Puristin-kairaus $q_c$ (Mpa)	Painokairaus $P_k/0,2$ m	Heijari-kairaus $L/0,2$ m
Karkea siltti	Löyhä	14...16	9...	28	30...100	0,3	<7	<40	<8
	Keski-tiivis			30	70...150	0,3	7...15	40...100	8...25
	Tiivis	16...18	11	32	100...300	0,3	>15	>100	>25
Hieno hiekka $d_{10}>0,06$	Löyhä	15...17	9...	30	50...150	0,5	<10	20...50	5...15
	Keski-tiivis			33	100...200	0,5	10...20	50...100	15...30
	Tiivis	16...18	11	36	150...300	0,5	>20	>100	>30
Hiekka $d_{10}>0,06$	Löyhä	16...18	10...	32	150...300	0,5	<6	10...30	5...12
	Keski-tiivis			35	200...400	0,5	6...14	30...60	15...25
	Tiivis	18...20	12	38	300...600	0,5	>14	>60	>25

**Taulukko 5.11.** Soran ja moreenin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointi kairausvastuksen perusteella. (Liikennevirasto, 2017).

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjaveden-pinnan		Kitka-kulma (°)	Jambun yhtälön muodonmuutosparametri		Kairausvastus		
		Yläpuolella	Alapuolella		Moduuliluku m	Jännitykseks-potentti β	Puristin-kairaus q <sub>c</sub> (Mpa)	Painokai-raus Pk/0,2 m	Heijari-kairaus L/0,2 m
Sora	Löyhä	17...19	10...	34	300...600	0,5	<5,5	10...25	5...10
	Keski-tiivis			37	400...800	0,5	5,5...12	25...50	10...20
	Tiivis	18...20	12	40	600...1200	0,5	>12	>50	>20
Moreeni	Hyvin löyhä	16...19	10...12	...34	(<100)* 300...600	0,5	<10	<40	<20
	Löyhä	17...20	10...12	...36	(100...250)* 600...	0,5	>10	40...100	20...60
	Keski-tiivis	18...21		...38	800...	0,5	-	>100	60...140
	Tiivis	19...23		...40	1200...	0,5	-	Lyömällä	>140

(\*) jos moreeni ei ole ollut jäätikön puristamana

## 5.6 Teräsputkipaalut

Paalutusohjeen 2016 mukaan paaluperustuksen mitoituksen tulee perustua johonkin seuraavista menettelyistä (RIL, 2016):

- staattisten koekuormitusten tuloksiin, joiden on laskelmin tai muulla tavoin osoitettu vastaavan muita kyseeseen tulevia kokemuksia
- dynaamisten koekuormitusten tuloksiin, joita voidaan käyttää Suomessa tuki- ja kitkapaaluilla ilman staattisia lisäkoekuormituksia
- kokemusperäisiin tai analyttisiin laskentamenetelmiin, joiden paikkansapitävyys on osoitettu staattisilla tai dynaamisilla koekuormituksilla vastaavissa olosuhteissa tai yleisesti hyväksytyllä analyttisellä menetelmällä ilman koekuormituksia
- vastaavanlaisen paaluperustuksen havaittuun käyttäytymiseen edellyttäen, että pohjatutkimusten ja muiden kokeiden tulokset tukevat tätä menettelyä

Paalujen puristuskestävyys määräytyy paalun rakenteellisen tai geoteknisen kestävyuden perusteella sen mukaan, kumpi arvoista on pienempi. Kärjellään ehjään kallioon tukeutuvan porapaalun mitoituksessa kallion kestävyys ei ole yleensä kriittinen suure, vaan puristuskestävyys määräytyy paalun rakenteellisen kestävyuden perusteella. Kantavaan maakerrokseen asennettavan lyöntipaalun puristuskestävyys osoitetaan dynaamisella tai staattisella koekuormituksella.

Paalun geoteknisen puristuskestävyuden arvioinnissa voidaan käyttää pohjatutkimustulosten perusteella arvioituihin maan lujuusparametreihin perustuvia staattisia kantavuuskaavoja. Määritettäessä paalun geotekninen puristuskestävyys murtorajatilassa käytetään kaavaa  $R_{c;cal} = R_{b;cal} + R_{s;cal}(-W)$ . Pohjatutkimustuloksista laskettujen paalun kärjen geoteknisen kestävyuden  $R_{b;cal}$  ja paalun vaipan geoteknisen kestävyuden  $R_{s;cal}$  summasta vähennetään paalun tehokas paino  $W$ . Paalun tehokas paino on tyypillisesti erittäin pieni verrattuna paaluun kohdistuviin kuormituksiin, jolloin sitä ei yleensä ole tarpeen ottaa huomioon.

Paalun kärjen geotekninen kestävyys  $R_{b;cal}$  lasketaan kaavalla  $R_{b;cal} = A_b \cdot q_b$ , jossa  $A_b$  on paalun kärjen pinta-ala ja  $q_b$  on kärkikestävyys. Kärkikestävyys  $q_b$  lasketaan kaavalla  $q_b = \sigma'_{v;b} \cdot N_q$ , jossa  $\sigma'_{v;b}$  on tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla ja  $N_q$  on paalun kärjen kantavuuskerroin. Tehokas pystysuora jännitys määräytyy yläpuolisten maakerrosten tehokkaasta painosta kärkikestävyuden kasvaessa syvemmällä, kunnes saavutetaan maksimiarvo kriittisellä syvyydellä. Paalutusohjeissa on esitetty koekuormitusten perusteella todennetut paalun kärjen kantavuuskertoimen  $N_q$  arvot maan leikkauskestävyyskulman funktiona.

Paalun vaipan geoteknisen kestävyuden ominaisarvo  $R_{s;k}$  voidaan laskea kaavalla  $R_{s;k} = \sum A_{s;i} \cdot q_{s;i;k}$ , jossa lasketaan yhteen kerroksittaiset paalun vaipan pinta-alojen  $A_{s;i}$  ja vaippakestävyyksien ominaisarvojen  $q_{s;i;k}$  tulot. Vaippakestävyuden ominaisarvo maakerroksessa  $q_{s;i;k}$  lasketaan kaavalla  $q_{s;i;k} = \sigma'_{v;i} \cdot K_s \tan \varphi_a$ , jossa  $\sigma'_{v;i}$  on tehokas pystysuora jännitys paalun vaipalla maakerroksessa ja  $K_s \tan \varphi_a$  on vaippakestävyyskerroin. Laskennassa tulisi huomioida maakerrosten vaihtelu. Paalutusohjeissa on esitetty vaippakestävyyskertoimen  $K_s \tan \varphi_a$  arvot maan sisäisen leikkauskestävyyskulman funktiona. Paalun materiaali vaikuttaa vaipan ja maan väliseen kitkaan, joten paikalla valetulle betonipaalulle, tehdasvalmistaiselle teräsbetonipaalulle ja teräspaalulle on esitetty erilliset arvot.

Paalutusohjeissa esitetään myös vaihtoehtoisia taulukoita ja kuvaajia, joiden avulla paalun kärki- ja vaippakestävyys voidaan arvioida suoraan esimerkiksi puristin-heijarikairauksen tulosten perusteella. Eurokoodin mukaan määrittäessä paalun geoteknistä puristuskestävyyttä pohjatutkimustulosten perusteella tulisi käyttää joko mallipaalumenetelmää tai vaihtoehtoista menetelmää. Mallipaalumenetelmän lähtökohtana on laskea paalun geoteknisen puristuskestävyyden ominaisarvo käyttämällä suunnittelualueella suoritettujen pohjatutkimuksien määrän perusteella valittavia korrelaatiokertoimia. Vaihtoehtoisessa menetelmässä käytettäviä osavarmuuslukuja korjataan valittavalla mallikertoimella. Eurokoodissa esitetään käytettävien mallikertoimien vähimmäisarvot, mutta suunnittelijan on valittava kohteen ja lähtötietojen perusteella riittävän varma kerroin.

Paalun vetokestävyuden kannalta tarkastellaan paalun vaipan ja maan välisestä kitkasta ja koheesiosta muodostuva vaippakestävyys, sekä mahdollinen kalliotartunta. Paalun avoimesta tai suljetusta rakenteesta ja mahdollisesta betonoinnista määräytyen otetaan huomioon myös paalun oma paino ja paaluun kohdistuva noste. Paalun vetokestävyuden ominaisarvoa  $R_{t;k}$  laskettaessa käytetään kaavaa  $R_{t;k} = \sum A_{S;i} \cdot q_{S;i;k}$  vastaavasti kuin tarkasteltaessa vaipan geoteknistä kestävyyttä puristuksen kannalta. Laskennassa otetaan huomioon maakerrosten ominaisuuksien ja tehokkaan tilavuuspainon vaihtelu kerroksittain.

Laskettaessa kallioankkuroinnin geoteknistä murtokestävyyttä tarkistetaan:

- juotoslaastin ja kallio välinen tartuntalujuus
- juotoslaastin ja ankkurin välinen tartuntalujuus
- kalliokartion leikkaantuminen

Ankkurointipituus kalliokartion leikkaantumisen kannalta määritetään kaavalla  $L_{min} = \frac{\sqrt[3]{3 \cdot F_{t;d}}}{\gamma \cdot \pi \cdot \tan^2 \varphi}$ , jossa  $F_{t;d}$  on vetokuorman mitoitusarvo,  $\gamma$  on kallion tilavuuspaino ja  $\varphi$  on valittu kalliokartion kärkikulma. Mahdollisten kalliokartion pinnalla olevien maakerrosten aiheuttamia pystykuormia ei normaalisti hyödynnetä laskennassa. Rikkonaisessa kalliossa kärkikulmaksi  $\varphi$  valitaan  $30^\circ$  ja homogeenisessa kalliossa  $45^\circ$ . Ankkurin tartuntaosan pituudeksi on valittava vähintään 3 m, jos kallion rakoiluominaisuuksia ei ole luotettavasti määritetty. (RIL, 2016).



Voimajohtopylväiden perustuksiin kohdistuu puristuksen ja vedon lisäksi myös poikittaisia kuormia ja momenteja. Teräsputkipaaluperustusten tapauksessa lyhyellä paalulla murtumis- mekanismina tulee kyseeseen paalun kiertymä tai siirtymä jäykkänä kappaleena ja pitkällä paaluilla taivutusmurto yhdistettynä maan paikalliseen myötäämiseen perustuksen yläosan lähellä. Voimajohtojen teräsperustusten käyttökohteet sijoittuvat usein pehmeisiin maaperän olosuhteisiin, jolloin poikittaisten rasi- tusten ja aiheutuvien siirtymien merkitys korostuu. Erityisesti harustetuilla pylväillä teräsputkipaalun sijainnin ja kaltevuuden mittatarkkuudella on merkittävä vaikutus poikittaisten kuormien syntymiseen, koska pylväs rakenne on nive- llinen, eikä estä perustusten yläosan siirtymiä. Vaadittu asennuksen mittatarkkuus ja suu- rimmat sallitut käyttötilan siirtymät otetaan huomioon mitoituksessa ja esitetään laskelmissa.

Poikittaisten kuormien ja siirtymien rasittamien paalujen laskentaan suositellaan käytettä- väksi rakennemallia, joka ottaa huomioon sekä paalun että maan muodonmuutosominaisuu- det esimerkiksi kuvaamalla maan ominaisuuksia paaluja tukevilla jousilla. Laskennassa on otettava huomioon jousen jäykkyydellä kuvattava maan jäykkyys, sekä sivuvastuksen ää- riarvo. Kuorman ja siirtymän välinen vuorosuhde voidaan määrittää esimerkiksi maan omi- naisuuksia mallintavilla alustaluku- tai moduulimenetelmillä. (RIL, 2016).

### 5.6.1 SSAB RRPileCalc

Suomessa merkittävä teräspaalujärjestelmien toimittaja on SSAB Europe, jonka RR- ja RD- paaluputkituotteet ovat laajalti käytössä myös kansainvälisillä markkinoilla. SSAB:n lyön- tipaalutuksella asennettavan putkijärjestelmän tuotenimi on RR ja porapaalutuksella asen- nettavan RD.

Tässä alaluvussa esitellään esimerkkinä laskentatyökaluista SSAB:n perustussuunnittelijoi- den käyttöön tarjoama RRPileCalc -mitoitusohjelma, jolla voidaan mitoittaa puristettuina tukipaaluina toimivien valmistajan omien teräsputkipaalutuotteiden geotekninen ja raken- teellinen kestävyys lähtötiedoiksi annetuissa pohjaolosuhteissa. Pora- tai lyöntipaalutuksella asennettavat teräsputkipaalut voidaan mitoittaa tyhjinä teräsputkipaaluina, betonoituina te- räsputkipaaluina ilman liittovaikutusta tai teräsbetonisina liittorakenteina. Ohjelma ei so- vellu kitka- tai koheesiopaalujen mitoitukseen.

Laskenta noudattaa teräspaalujen mitoituksessa Eurokoodi -suunnittelujärjestelmää, sekä sen kansallisia liitteitä ja ohjeita. Ohjelmassa on kirjoitushetkellä valittavissa Suomen, Ruotsin ja Norjan kansalliset ohjeet.

Mitoitustyökalu sisältää SSAB:n teräspuutkipaalujen halkaisijat 75–1200 mm. Ohjelmalla voidaan etsiä automaattisesti lähin soveltuva paalukoko tai suorittaa laskenta manuaalisesti valitulle paalutyypille. Laskennan tuloksena saadaan valitun paalun geotekninen ja rakenteellinen kestävyys. Kuvassa 5.3 on esitetty kuvakaappaus ohjelman perustoiminnosta, jolla voidaan laskea paalutyypin kestävyksiä määrittelemättä siirtymien laskennassa tarvittavia yksityiskohtaisia maaperän ja kuormitusten parametrejä.

The screenshot shows the RRPileCalc software interface. It features several input fields and sections:

- Paalutiedot (Pile data):** Paalun tyyppi (RR-putkipaalu), Koko (RR170/10), Teräslaji (S460MH), Korroosiovara (4,0 mm).
- Kuormitiedot (Load data):** Pysyvän kuorman osuus (0,50), Maaperätiedot ja paalun alkutaipuma (C<sub>uk</sub> = 3,0 kPa), Alustaluon kerroin (A = 50,0), Sivuvaistuksen ääriarvon kerroin (B = 9,0), Paalun geometrinen alkutaipuma (L<sub>cp</sub> = 400), Paalun kaarevuusaste (R = 293 m), Paalun kinnitys nurjahduspituus (L<sub>cr</sub> = 5,86 m).
- Paalun kestävyys (Pile capacity):** Nurjahdus, maan murtus: F<sub>d,s</sub> = 593 kN; Nurjahdus, paalu murtus: F<sub>d,p</sub> = 70 kN.
- Geotekninen kestävyys (Geotechnical capacity):** Paalutustyöluokka (PT12), Mitoitusperuste (Loppuyöntöohje), Onko paalutettava rakenne jäykkä (ei), Käytettävä korrelaattokerroin (ξ = 1,470).
- Geotekninen kestävyys loppuyöntöohjeen mukaan (Geotechnical capacity according to final load):** R<sub>c,max</sub> = 1647 kN, R<sub>c,d</sub> = 434 kN.

**Kuva 5.3.** Kestävyyden laskenta valitulle paalukoolle. (RRPileCalc, 2022).

Advanced FEM -toiminnon avulla voidaan määritellä maaperän parametrit kerroksittain ja ottaa huomioon toisen kertaluvun teorian mukaiset vaikutukset. Maaperän vaikutus mallinetaan epälinearisilla jousilla alustalukumenetelmän mukaisesti. Toiminto helpottaa laskentaa, jos kohteen lähtötiedot eivät vastaa yleisiä taulukkoarvoja. Voimajohtojen teräspäruksia suunniteltaessa toiminto on hyödyllinen, koska potentiaaliset kohteet sijaitsevat usein pehmeiköillä ja maaperän parametreissa saattaa olla merkittävää kerroksittaista vaihtelua.

Advanced FEM -mallinnuksen lähtötiedoiksi määritellään:

- paalun pituus
- paalutustyöluokka
- paalun alkusuoruus

- paaluun kohdistuva normaalivoima, vaakavoima ja momentti
- pysyvän kuorman osuus
- paalun päiden tuentatiedot
- maan tilavuuspaino
- koheesiomailla suljettu leikkauslujuus
- kitkamailla kitkakulma
- pohjanveden pinta

Kuvassa 5.4 on esitetty kuvakaappaus Advanced FEM -toimintoon syötettävistä maaperän parametreista. Lähtötiedot syötetään kerroksittain maanpinnalta alkaen. Syötettyjä parametrejä voidaan muokata yksinkertaisen käyttöliittymän avulla ja tarkastella vaikutus laskennan lopputulokseen.

Maaperätiedot

Pohjanveden pinta  m

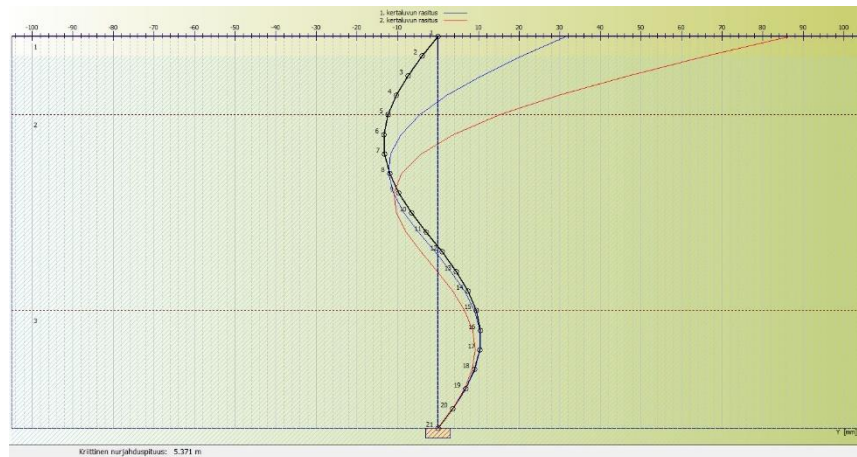
Tyyppi:

Alapinta [m]   $\gamma$  [kN/m<sup>3</sup>]   $C_{uk}$  [kPa]   $\phi'$  [°]

	Yläpinta	Alapinta	Tyyppi	Tiiveys	Paino	$C_{uk}$	$\phi'$
	m	m		-	$\gamma$	kPa	°
1	0.00	2.00	Koheesio	-	15.0	10.0	-
2	2.00	7.00	Koheesio	-	15.0	15.0	-
3	7.00	12.00	Kitka	-	15.0	-	32.0
4							

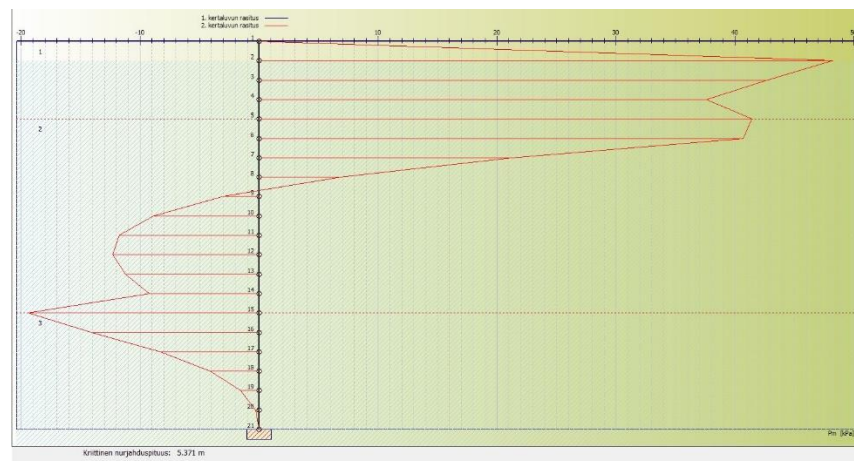
**Kuva 5.4.** Maaperän parametrien valinta. (RRPileCalc, 2022).

Kuvassa 5.5 on esitetty kuvakaappaus Advanced FEM -toiminnon laskennan jälkeen muodostuvasta siirtymäkuvaajasta. Kuvaajaan piirtyy 1. ja 2. kertaluvun rasiusten mukaiset siirtymät millimetreinä, sekä laskennassa käytettyjen solmupisteiden sijainnit ja määritettyjen maakerrosten rajat.



**Kuva 5.5.** Advanced FEM -toiminnon siirtymäkuvaaja. (RRPileCalc, 2022).

Kuvassa 5.6 on esitetty kuvakaappaus laskennan jälkeen muodostuvasta maanpainekuvaajasta. Solmukohtaisista maanpaineen arvoista (kPa) piirretty yhtenäinen kuvaaja.



**Kuva 5.6.** Advanced FEM -toiminnon maanpainekuvaaja. (RRPileCalc, 2022).

## 5.7 Läpi-injektoitavat pora-ankkurit

Läpi-injektoivia pora-ankkureita käytetään Fingridin hankkeissa vetokuormitettuina ha-rusankkureina. Ankkurit injektoidaan sementtilaastilla kallioon tai tiiviiseen moreeniin. Ankkurointikerroksen maaperän laatu tulee varmistaa esimerkiksi porakonekairauksella.

Pora-ankkureiden geotekninen murtokestävyys kalliossa mitoitetaan vastaavin periaattein kuin alaluvussa 5.6 esitetyt teräsputkipaalujen kallioankkuroinnit. Geoteknisen kestävyys kannalta tarkistetaan juotoslaastin ja kallion välinen murtokestävyys, juotoslaastin ja

ankkuritangon välinen murtokestävyys, sekä muodostuvan kalliokartion paino. Geotekninen murtokestävyys moreenissa mitoitetaan vastaavasti kuin alaluvussa 5.6 esitetty teräsputki-paalun geotekninen vetokestävyys. Fingridin tulevilla tyyppisuunnitelmissa määritellään ankkurointipituuden vähimmäisarvot ehjälle ja rikkonaiselle kalliolle, sekä tiiviille ja erittäin tiiviille moreenille.

Pora-ankkureiden rakenteellinen kestävyys tarkistetaan valmistajan tuotejärjestelmälle ilmoittamien vetokestävyysien perusteella. Fingridin tyyppirakenteissa käytettäväksi on valittu Ischebeckin TITAN-tuotejärjestelmän koko 40/16 mm, jonka vetokestävyuden ominaisarvo 490 kN riittää kaikille nykyisille Fingridin pylväskerheen harustetuille pylväille.

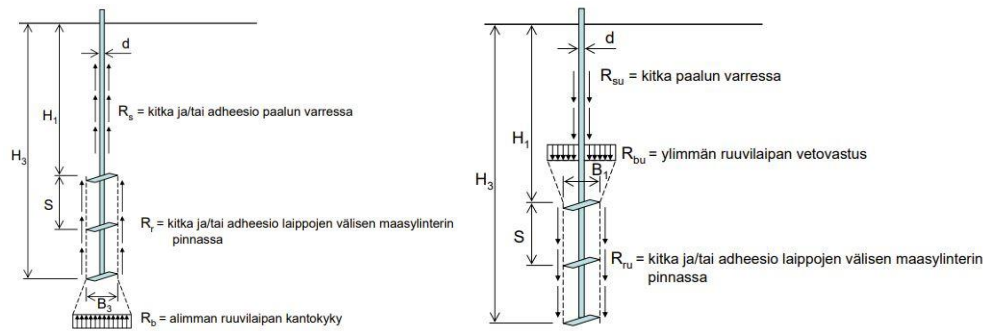
## 5.8 Ruuvipaalut

Ruuvipaaluja ei ole käsitelty yksityiskohtaisesti suomalaisissa paalutusohjeissa. Ruuvipaaluja koskevan ohjeistuksen puuttuminen on osaltaan rajoittanut paalutyyppien käyttöä ja yleistymistä Suomessa. Mitoituksessa on tarvittaessa hyödynnettävä soveltuvien yleisten kantavuuskaavojen lisäksi kansainvälisesti julkaistuja tutkimuksia ja muissa maissa voimassa olevia mitoituskäytäntöjä. (Paalupiste, 2018).

Ruuvipaalun puristus- tai vetokestävyys voidaan määrittää sylinterimurtona tai yksittäisen ruuvilaipan puristus- tai vetomurtona. Yhdellä ruuvilaipalla varustetun paalun tapauksessa tarkastellaan yksittäisen levyn murtona. Usealla ruuvilaipalla varustetun paalun tapauksessa tarkastellaan joko lieriömurtoa tai usean yksittäisen levyn murtoa. Sovellettava laskentamalli valitaan ruuvilaippojen keskinäisen etäisyyden ja halkaisijan suhteen sekä maaperän ominaisuuksien perusteella. (Paalupiste, 2018).

Yhdellä ruuvilaipalla varustetun paalun geotekninen puristuskestävyys muodostuu kärjen ja vaipan geoteknisestä kestävyydestä. Mitoitus lasketaan vastaavasti kuin teräsputkipaaluilla ja kärjen pinta-ala lasketaan ruuvilaipan halkaisijan perusteella.

Usealla ruuvilaipalla varustetun paalun geotekninen puristus- tai vetokestävyys muodostuu ylimmän tai alimman laipan kestävyuden ja paalun vaipan geoteknisen kestävyuden lisäksi kaikkien ruuvikierteiden välille muodostuvan maasynterinin leikkauskestävyydestä. Kuvassa 5.7 on esitetty monilaippaisen ruuvipaalun puristus- ja vetokuormitustilanteet.



**Kuva 5.7.** Monilaippaisen ruuvipaalun puristus- ja vetokuormitus. (Paalupiste, 2018).

### 5.9 Suunnitteluprosessin nykytila ja kehityskohteet

Viimeisimmissä toteutetuissa Fingridin hankkeissa teräspierustuksia on hyödynnetty betoni-perustusten rinnalla rakentamisen kannalta haastavilla pehmeikköpaikoilla. Pylväspaikat on yleissuunnitteluvaiheessa suunniteltu elementti- tai valuperustuksille ja urakoitsijat ovat toteutusvaiheessa laatineet vaihtoehtoisille teräspierustuksille tarvittavat suunnitelmat ja laskelmat. Suunnitellut rakenteet ja toteutustavat ovat vaihdelleet määräytyen erilaisista projektien maasto-olosuhteista ja työmaan tarpeista, suunnittelijoista, sekä aiemmasta teräspierustuksiin liittyvästä kokemustaustasta.

Diplomityön kirjoitushetkellä Fingridissä on käynnissä kehityshanke, jossa yhtenäistetään teräspierustusten toteutustapojen määrittelyjä, sekä laaditaan tyyppirakenteiksi soveltuvat suunnitelmat tukipaaluna moreeni- ja kalliopohjalla toimiville teräspierustuksille, sekä haruspierustuksina käytettäville läpi-injektoitaville pora-ankkureille. Tyyppiratkaisuja kehitetään ensimmäisessä vaiheessa harustetuille pylväille, jolloin suunnitelmat tulevat kattamaan valtaosan projekteissa käytettävistä pylväsrakenteista. Kehitystyötä voidaan laajentaa tulevaisuudessa muille pylväslajeille ja rakenneratkaisuille hankkeista saatavien kokemusten ja tunnistettavien kehityskohteiden pohjalta.

Usean vuoden ajan teräspierustusten kehitystä ja ensimmäisten koerakenteiden toteutusta ohjannut Fingridin vanhempi projektipäällikkö Antti Linna toteaa tyyppirakenteiden helpottavan uusien pierustratkaisujen laajempaa käyttöä. Tyyppirakenteiden ansiosta tilaajan ei tarvitse samassa laajuudessa tarkastaa eri urakoitsijoiden rakentamisvaiheessa yksilöllisesti

laatimia suunnitelmia, vaan yhtenäisillä periaatteilla mitoitettut rakenteet ovat kaikkien urakoitsijoiden käytettävissä. (Linna, 2022).

Fingridin vanhemman projektipäällikön Hannu Kuikan mukaan tulevaisuudessa teräsperustusten pylväskohtainen suunnittelu on mahdollista toteuttaa yleissuunnittelun yhteydessä hyödyntäen määriteltyjä tyyppirakenteita ja maaperätutkimusten tuloksia. Yleissuunnitteluun voidaan tarvittaessa ottaa mukaan kyseisiin rakenteisiin erikoistunut konsultti. Teräsperustus voidaan suunnitella soveltuville pylväspaikoille vaihtoehtoiseksi toteutustavaksi elementti- tai valuperustukselle ja urakoitsija voi tarjousvaiheessa valita kumman vaihtoehdon mukaisesti hinnoittelea ja toteuttaa rakentamisen. Toimintamalli tekisi toteutuksesta suoraviivaisempaa edistäen rakentamisen aikatauluja. (Kuikka, 2022).

Suurin osa haastatelluista urakoitsijoiden projektipäälliköistä näkee parhaana kehityssuuntana valmiit tilaajan laatimat tyyppisuunnitelmat ja yhtenäisesti määritellyt rakenteet. Valmiiden ratkaisujen koetaan säästävän resursseja ja helpottavan urakoitsijan keskittymistä olennaisimpiin tehtäviin kiireisessä toimintaympäristössä. Samalla todetaan tilaajalla olevan parhaiten resursseja toteuttaa uusien rakenteiden kehitystyötä riittävässä mittakaavassa. Toisena näkökulmana nähdään, että tilaajan määrittelemät rakenteet ja valmiit suunnitelmat voivat jossain määrin hidastaa urakoitsijoiden suorittamaa kehitystyötä ja vähentää innovatiivisuutta.

Teräsperustusten suunnittelu ja toteutus Fingridin voimajohtohankkeissa on tällä hetkellä vaiheessa, jossa siirrytään koerakenteista ja ensimmäisistä toteutetuista hankkeista kohti yhtenäisiä tyyppirakenteita ja laajempaa käyttöä. Kirjoitushetkellä laadittavia ensimmäisiä tyyppirakenteiden suunnitelmia ei ole vielä hyödynnetty projekteissa. Suunnitelmien käyttöönoton jälkeen on tarpeen kerätä ja vetää yhteen projekteista saatavat ensimmäiset kokemukset ja määrittää jatkokehitystarpeet.

Ruuvipaaluperustusten suunnittelusta ja toteutuksesta ei ole toistaiseksi kokemusta Fingridin hankkeissa. Saatavilla olevan tiedon perusteella ratkaisu täydentäisi käytettävissä olevien vaihtoehtojen valikoimaa erityisesti harustettujen pylväiden perusrakenteena pehmeillä. Ruuvipaaluja tulisi pilotoida soveltuvissa hankkeissa muutamien koerakenteiden avulla ja määrittää saavutetut hyödyt ja kehitystarpeet saatujen kokemusten perusteella. Koerakenteista saatavien kokemusten osoittautuessa positiivisiksi, tulisi ruuvipaaluperustusten kehitystä jatkaa osana tyyppirakenteiden suunnittelua.

## 6 Rakentaminen

Luvussa käsitellään voimajohtojen teräspäristysten asennuksessa käytettävä kalusto, sekä rakentamisvaiheeseen liittyvät mittatarkkuutta, laadunvarmistusta, koekuormituksia ja dokumentointia koskevat vaatimukset. Luvun loppuosassa vertaillaan teräspäristysten ympäristövaikutuksia vastaavissa maaperän olosuhteissa käytettäviin betonipäristyksiin.

### 6.1 Asennuksessa käytettävä kalusto

Teräspäristysten asennuksessa käytettävän kaluston kokoluokkaan vaikuttaa erityisesti suunnitteluvaiheessa valittu päristyskoko ja maaperän olosuhteiden mukaisesti määritelty asennustapa pora- tai lyöntipäristyksenä. Kuvassa 6.1 on esitetty 170 mm porapäristyksen asennus kevyellä päristyskalustolla, joka soveltuu pienimmille voimajohtokohteissa käytettäville päristyksille. SSAB:n suunnittelu- ja asennusohjeiden mukaan kevyillä peruskoneilla (<25 tn) pystytään asentamaan lyöntipäristykset kokoluokkaan ~ 170 mm saakka ja porapäristykset kokoluokkaan ~ 270–320 mm saakka (SSAB, 2022). Porapäristyksessä tarvitaan lisäksi käyttövoimaksi ja porareian huuhtelemiseksi erillinen tehokas paineilmakompressori ja materiaalien työkohteeseen kuljetukseen soveltuvaa kalustoa.



**Kuva 6.1.** Porapäristyksen asennus harustetulle pylväälle. (Risto Uusitalo, 2015).



Kuvassa 6.2 on esitetty halkaisijaltaan 406 mm teräsputkipaalujen asennukseen käytetty paalutuskone. Raskaiden paalutuskoneiden massat sijoittuvat tyypillisesti kokoluokkaan 40–70 tn ja edellyttävät pylväspaikoille valmisteltavilta kulkureiteiltä riittävää kantavuutta. Kalusto on toisaalta tela-alustaista ja pintapaineet säilyvät kohtuullisina, jolloin esimerkiksi kanta-villa pelloilla on pyöräalustaiseen kalustoon nähden helpompaa liikkua sulanakin aikana. Kyseissä tilanteissa teräsperusratkaisun avulla voidaan välttyä valuperustusten murske-kuljetuksia ja betoniautoja varten rakennettavilta työmaateiltä, mikäli teräsputkipaaluja ei betonoida. Vaihtoehtojen kannattavuutta arvioitaessa on kuitenkin otettava huomioon pylvään rakenteesta, korkeudesta ja massasta määräytyen pylväsnostossa tarvittava kalusto ja sen edellyttävät kulkureiitit. Tilanteeseen vaikuttaa merkittävästi työvaiheiden aikataulutus vuodenaikoihin ja sääolosuhteisiin nähden.



**Kuva 6.2.** Paalutuskone. (Risto Uusitalo, 2015).

Fingridin voimajohtohankkeiden harusperustuksissa vaihtoehtoisena ratkaisuna käytettyjen läpi-injektoitavien pora-ankkurien asennus voidaan toteuttaa huomattavasti kevyemmällä kalustolla. Kuvassa 6.3 on esitetty tyypillinen kevyt poravaunu, jolla ankkuritanko porakruunuineen porataan tiiviiseen moreeniin tai kallioon. Kevyellä poravaunulla pystytään liikkumaan pehmeikkökohteissa suhteellisen ohuenkin jääkannen päällä, jolloin työmaateiltä vaadittavan kantavuuden määrittää käytännössä pylväsalkojen teräsputkipaaluperustusten asennuksessa tarvittava raskaampi kalusto ja toisaalta materiaalien siirtojen ja muiden työvaiheiden, kuten pylväsnostojen aiheuttamat vaatimukset.



**Kuva 6.3.** Injektoitavan pora-ankkurin asennus poravaunulla. (Risto Uusitalo, 2015).

Läpi-injektoitavien pora-ankkurien käyttö edellyttää poravaunun lisäksi kalustoa materiaalien kuljetukseen ja valmisteluun, sekä sementtilaastin injektointiin. Kuvassa 6.4 on esitetty laastin valmistuksessa ja pumppaamisessa käytettävää kalustoa. Ankkureiden injektoinnissa tarvittava laasti sekoitetaan työkohteessa ja injektoidaan porauksen yhteydessä. Mahdollisessa teräsputkipaalujen betonoinnissa tarvittava betonimassa kuljetetaan työkohteeseen betoniasemalta valmisbetonina, joka edellyttää kantavia työmaateitä.



**Kuva 6.4.** Injektoinnissa käytettävän laastin valmistelu. (Risto Uusitalo, 2015).

Ruuvipaalujen voimajohtoperustuksiin soveltuvat kokoluokat ovat koneellisesti asennettavia. Asennus suoritetaan kaivinkoneeseen, etukuormaajaan tai muuhun työkoneeseen kiinnitetyn hydraulisen pyöritysmoottorin avulla, jolloin tarvittava kalusto säilyy suhteellisen kevyenä ja maastokelpoisena. Kuvassa 6.5 on esitetty kaivinkoneen puumiin kiinnitetty asennuskalusto. Ruuvipaaluja ei ole toistaiseksi pilotoitu Fingridin hankkeissa, mutta kirjallisuudesta saatavan tiedon perusteella menetelmää voidaan pitää asennuksessa tarvittavan

kaluston osalta yksinkertaisimpina ja soveltuvissa maaperissä kilpailukykyisenä vaihtoehtona. Ruuvipaalujen korroosiosuojaus perustuu tyypillisesti seinämävahvuuden ylimitoitukseen, mutta rakenne voidaan tarvittaessa suojata haastavissa maaperän olosuhteissa betoni-  
peitteellä. Mahdollinen betonointi heikentää asennuskaluston yksinkertaisuuteen ja maastokelpoisuuteen liittyviä etuja.



**Kuva 6.5.** Ruuvipaalun asennus kaivinkoneella. (Paalupiste, 2022).

Haastatellut Fingridin ja pääurakoitsijoiden edustajat eivät nähneet tällä hetkellä saatavissa olevassa kalustossa merkittäviä kehityskohteita tai toteutetuissa hankkeissa kohdattuja erityisiä haasteita. Tela-alustaisen kaluston maastokelpoisuutta voidaan parantaa esimerkiksi leveämmillä teloilla, mutta se ei poista tarvittavan kaluston ja materiaalien siirtoon vaadittavien kulkureittien ja työmaateiden tarvetta. Keskeisin käytettävän kaluston kokoluokkaan ja maastokelpoisuuteen vaikuttava tekijä on rakenteiden suunnittelu ja erityisesti mitoituksessa valittu teräsputkipaalujen koko. Teräspäälustuksilla saavutettavat hyödyt ja käytännön toteutettavuus heikkenevät merkittävästi paalukokojen kasvaessa. Ylimitoitusta tulisi välttää suorittamalla riittävät maaperätutkimukset ja optimoimalla rakenteet suunnitteluvaiheessa.

Rakennettavien voimajohtojen perustustöitä tehdään usein jännitteisen ja vasta myöhemmässä työvaiheessa purettavan voimajohdon alla, josta aiheutuu rajoituksia paalutuskaluston työskentelykorkeudelle. Käytettävästä kalustosta saatavilla olevan kirjallisuustiedon ja haastattelujen perusteella työskentelykorkeuksissa ei saavuteta etua perinteisiin ratkaisuihin verrattuna, vaan tarvittava työskentelykorkeus saattaa lisätä perustustöiden aikana tarvittavien

käyttökeskeytysten tarvetta tai työvaihe joudutaan ajoittamaan purkutöiden yhteyteen. Tilaanne on haastavampi teräsputkipaaluille kuin betoniperustuksille kohteissa, joissa elementti- tai valuperustus voitaisiin rakentaa ilman paalutusta käyttämällä pohjanvahvistuksena esimerkiksi massanvaihtoa.

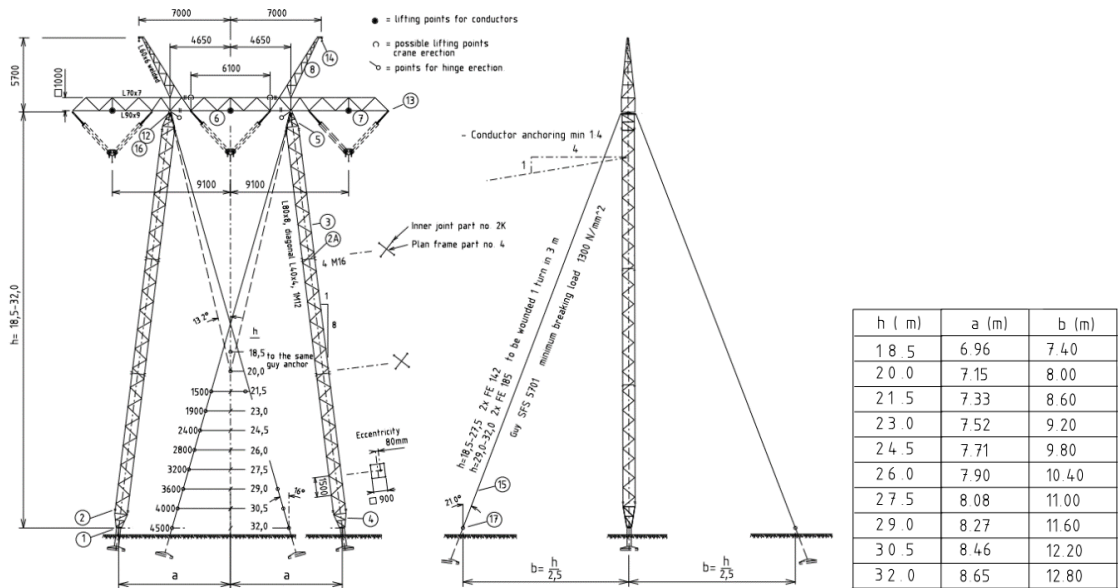
## 6.2 Rakentamisvaiheen vaatimukset

Rakentamisvaiheeseen liittyen käsitellään erillisissä alaluvuissa teräsperustusten mittatarkkuuteen, laadunvarmistukseen, koekuormituksiin, sekä dokumentointiin liittyvät vaatimukset ja erityispiirteet. Luvussa hyödynnetään kirjallisuustiedon lisäksi haastatteluissa esiin tulleita näkökulmia ja kokemuksia toteutuneista hankkeista.

### 6.2.1 Mittatarkkuus

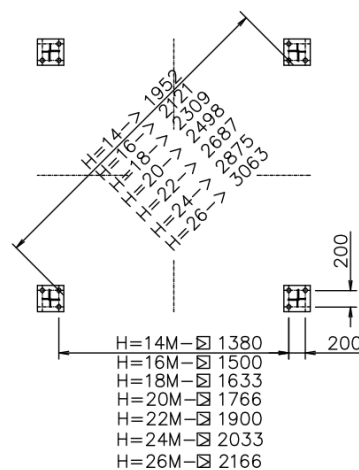
Harustetuille pylväille on määritetty pylväskorkeuksittain A-, B-, ja C- mitat, jotka esitetään pylvään yleispiirustuksessa ja mahdollisessa pylväskohtaisessa perustussuunnitelmassa. A-mitalla ilmoitetaan pylväsjalan perustuksen tyvitapin etäisyys juuripaalusta. B-mitalla ilmoitetaan harusperustusten kohtisuora etäisyys pylväslinjasta. C-mitalla ilmoitetaan harusperustuksen sivuttaispoikkeama juuripaalusta määritettävään keskilinjaan nähden. Pylväspiirustuksesta ilmenee myös pylväsalkojen kaltevuus, joka on 110 kV pylväillä yleisesti 1/9 ja 400 kV pylväillä 1/8. Lisäksi ilmoitetaan haruskulma asteina. Kuvassa 6.6 on esitetty esimerkki Fingridin pylväsperheen 400 kV 1H-ylvään yleispiirustuksessa esitetyistä perustumitoista.

Harustettujen pylväiden jalkojen betonielementti- tai teräsputkipaaluperustukset asennetaan samaan kaltevuuteen pylväsjalan kanssa noudattaen suunnitelmissa esitettyä korkoa ja A-mittaa. Harusperustukset asennetaan pylvään yleispiirustuksessa ilmoitettujen mittojen ja haruskulmien mukaisesti. Valmiiksi lasketut mitat perustuvat oletukseen, jossa pylväsapaikka on tasainen, eikä perustusten välillä ole korkoeroja. Asennettaessa perustuksia esimerkiksi rinteeseen on noudatettava ilmoitettua haruskulmaa ja laskettava mitat todellisten toteutuvien korkojen mukaisesti. Ehdottoman tärkeää on kiinnittää huomiota harusperustuksen suuntaukseen yläharuksen mukaisesti sekä pysty- että sivuttaissuunnassa.



**Kuva 6.6.** 400 kV 1H-pylvään perustusmitat. (Fingrid, 2021).

Vapaasti seisovien pylvaiden perustusten mitat ilmoitetaan pylvään yleiskuvassa. Kuvassa 6.7 on esitetty Fingridin 110 kV 1Y-tyyppipylvään perustusmitat pylväskorkeuksittain. Ilmoitettuja mittoja ovat jalkojen ankkuripulttiryhmien keskinäiset etäisyydet, sekä pylväsjalkojen sisimpien ankkuripulttien etäisyydet ja ristimitat. Ankkuripulttien ja pylvään pohjalevyjen reikien koko määritellään projektikohtaisesti.



**Kuva 6.7.** 110 kV 1Y-pylvään perustusmitat. (Fingrid, 2020).

Fingridin voimajohtohankkeiden perustusten yleiset toleranssit esitetään teknisissä eritelmissä. Taulukossa 6.1 esitetyissä yleisissä toleransseissa ei ole eritelty perustusten rakennetta tai toteutustapaa. Perustussuunnitelmissa ja tarkentavissa määrittelyissä voidaan lisäksi esittää rakennekohtaisia erityistoleransseja ja vaatimuksia.

**Taulukko 6.1.** Voimajohtojen perustusten toleranssit. (Fingrid, 2017).

	<b>Sallittu toleranssi mm</b>
<b>Vapaasti seisovat pylväät ja portaalit</b>	
<b>Ankkuripulttien keskinäiset etäisyydet</b>	
Pulttien keskinäinen etäisyys jalan pulttiryhmässä	±2
Pulttien keskinäinen etäisyys jalan pulttiryhmässä (ristimitta)	±3
Pulttiryhmien keskinäinen etäisyys pylvään eri jaloissa (välimitta)	±2 mm/m, max. ±5
Pulttiryhmien keskinäinen etäisyys pylvään eri jaloissa (ristimitta)	±3 mm/m, max. ±7
<b>Perustustoleranssit</b>	
Pultin etäisyyspoikkeama perustuksen pilarin reunasta	±5
Pultin yläpään korkeusaseman poikkeama perustuksen pilarien betonipinnan tasosta	+10, -0
Pultin suoruus (kallistuma) teoreettisesta asemasta (L=pultin pituus)	±L/50 (=1,1°)
Kahden vierekkäisen perustuksen pilarin betoniyläpinnan korkeusaseman poikkeama	±3
Perustuksen pilarin betonin yläpinnan kaltevuus ja suoruus 800 mm mittauspituudella	±2/800
<b>Harustetut pylväät</b>	
Perustuselementin (jalka) betoniyläpinnan korkeusaseman poikkeama viereisen jalan yläpinnasta	±20
Perustuselementin (jalka) etäisyys pylvään keskilinjasta	±20
Perustuselementin (jalka) maksimipoikkeama viereisestä jalasta linjan suunnassa	100
Pilariharuselementin poikkeama linjan suunnassa	±300
Kaksoissilmukan poikkeama linjan suunnassa keskilinjasta	±500
Pilariharuselementin ja kaksoissilmukan poikkeama pylvään keskilinjasta	200

Paalutusohje 2016 mukaan paalutyypin valinnalla ja asennusmenetelmällä on merkitystä odotettavissa oleviin ja suunnitteluvaiheessa huomioon otettaviin sijainti- ja kaltevuuspoikkeamiin. Keskeisellä porausmenetelmällä asennettavalla porapaalulla poikkeamat ovat pääsääntöisesti vähäisiä, kun taas esimerkiksi kiviseen maahan asennettavalla lyöntipaalulla on varauduttava jo suunnittelussa suurempiin poikkeamiin. Yleisenä sijaintipoikkeaman rakentamistoleranssina lyötäville  $d \leq 1,0$  m teräsputkipaaluille pidetään 0,10 m. Tarkemmasta asennusmenetelmästä johtuen porapaaluille suositetaan käytettäväksi tiukempia

toleransseja. Työn suorituksen kannalta ilman perusteltua syytä ei tulisi kuitenkaan käyttää tiukempaa sijaintitoleranssia kuin 0,025 m. (RIL, 2016).

TMV Linen projektipäällikkö Toma Karkkulaisen mukaan paalutusurakoitsijoiden kanssa käydyissä keskusteluissa on tullut esiin teräsputkipaalutusten yleisten vaatimusten suuret toleranssit verrattuna voimajohtoperustuksissa vaadittuun mittatarkkuuteen. Riittävä mittatarkkuus on kuitenkin saavutettavissa erityisesti porapaalutuksessa, kun asia otetaan huomioon toteutuksen alusta alkaen. Erityisesti vapaasti seisovien pylväiden teräsputkipaaluperustuksissa tulee seuraavien paalujen sijainnit määrittää ja mitata tarkasti ensimmäisen asennetun paalun mukaan, eikä asentaa kaikkia paaluja ennalta tehtyjen mittausten perusteella. Samat kokeneet työryhmät osaavat huomioida mittatarkkuuden erityisvaatimukset paremmin. Tarvittaessa pieniä mittapoikkeamia olisi mahdollista korjata epäkeskeisten paaluhattujen avulla, mutta toistaiseksi tähän ei ole ollut tarvetta. (Karkkulainen, 2022).

Useiden teräsperustusten toteutusta valvonut Fingridin vanhempi asiantuntija Risto Uusitalo toteaa pora-ankkureiden suuntauksen olevan vaativampaa kuin käytettäessä harusperustuksena betonielementtejä. Asia havaittiin ensimmäisten koerakenteiden toteutuksen yhteydessä, jolloin ankkureissa ilmeni lieviä mittapoikkeamia. Uusimmissa hankkeissa mittatarkkuuteen on kiinnitetty huomiota ja asennus on onnistunut ongelmitta. (Uusitalo, 2022).

Vapaasti seisovan pylvään tapauksessa mittapoikkeamat voivat vaikeuttaa suhteellisen mittatarkan ja jäykän pylväsrakenteen asentamista perustukselle. Harustetut pylväät saadaan asennettua perustuksille, vaikka mittatarkkuudessa olisi merkittäviäkin poikkeamia. Suunnitteluvaiheessa määriteltyjä toleransseja suurempien mittapoikkeamien suurin ongelma on kuitenkin vaikutus rakenteen mitoitukseen ja kestävyYTEEN. Harustetun pylvään jalkojen perustuksille kohdistuu oikein asennettuna ainoastaan puristava kuormitus, ja perustuksen sijainnin tai kaltevuuden poikkeamat aiheuttavat merkittäviä mitoituksessa huomioimattomia vaakasuuntaisia kuormituksia. Erityisesti leikkauslujuudeltaan heikoilla maakerroksilla kasvavat vaakasuuntaiset kuormitukset voivat aiheuttaa paalun siirtymiä ja heikentää paalun aksiaalista kuormitettavuutta. Sama tilanne koskee harusperustuksia, joiden suuntauksen poikkeamat aiheuttavat ankkuritankoa kuormittavia poikittaisia voimia. Ankkuritankojen kuormitettavuudessa on tyypillisesti varaa, mutta ankkuritankoihin voi aiheutua suhteellisen pienestä harusten kiristyksen aikaisesta kuormituksesta johtuen vasta myöhemmin käyttötilan kuormituksissa ilmeneviä pysyviä muodonmuutoksia. Tilanne voi aiheuttaa myöhemmin ilmenevää harusten löystymistä ja tarpeen jälkikiristykselle.

## 6.2.2 Laadunvarmistus ja koekuormitukset

Diplomityössä esitettyjen teräsuperustusten mitoitus ja laadunvarmistus perustuu maaperätutkimusten tuloksiin, sekä asennusvaiheen havaintoihin ja mahdollisiin koekuormituksiin. Asennustyön eri työvaiheita tulee tarkkailla etukäteen laadittavan paalutustyön toteutus suunnitelman mukaisesti.

Lyöntipaalutuksena asennettavien teräsputkipaalujen tunkeutumista suunnitelmien mukaiseen kantavaan kerrokseen sekä paalujen geoteknistä murtokestävyyttä arvioidaan paalujen asennuksen loppuvaiheen loppulyöntisarjojen painumien perusteella. Loppulyönnit dokumentoidaan siten, että suunnitelmien mukainen asennuksen lopettamiseksi voidaan todeta saavutetuksi. Lyöntipaalujen suoruus tulee tarkastaa ja dokumentoida asennuksen jälkeen. Tarkastus tehdään yleensä paaluputkeen mittanauhan varassa laskettavan taskulampun avulla, jolloin valon katoamissyvyyden perusteella voidaan arvioida paalun suoruutta. Tarkempi mittaus voidaan tehdä esimerkiksi inklinometrilaitteiston avulla. Suoruuksivaatimuksen alittavista paaluista tulee ilmoittaa suunnittelijalle, joka päättää jatkotoimenpiteistä. (RIL, 2016).

Porakonekairauksella varmistettuun ehjään kallioon tukeutuvia porapaaluja ei yleensä tarvitse koekuormittaa geoteknisen kestävyuden selvittämiseksi. Kallion ehjyydestä varmistetaan maaperätutkimuksen lisäksi tarkkailemalla kallioporausvaiheen aikana porauksen syöttö- ja pyörityspaineita. Kokenut poraaja voi porauksen aikaisten havaintojen perusteella arvostella kallion ehjyyttä ja tätä kautta suunnittelija voi arvioida geoteknisen kestävyuden riittävyyden. (RIL, 2016).

Ruuvipaalujen asennuksen aikainen momentti on voitava mitata luotettavasti asennuspyörittimeen liittyvän vääntövoiman tai asennuspaineen mittauslaitteen avulla. Suunnittelija määrittelee ruuvipaalun geoteknisen kestävyuden saavuttamiseksi vaaditun asennusmomentin, asennussyvyyden ja/tai minimi-tunkeuman kantavaan maakerrokseen. Ruuvipaalun asennus lopetetaan, kun suunnittelijan määrittelemät lopettamiseksi täyttyvät. (RIL, 2016).

Vetokuormitettavien paalujen mitoitus perustuu korrelaatiokertoimiin ja edellyttää suunnitelman mukaisia koekuormituksia. Tämä tulee kyseeseen esimerkiksi vapaasti seisovien pylväiden teräsputkipaaluperustusten tapauksessa. Harustettujen pylväiden harusperustuksina



käytettävien läpi-injektoitavien pora-ankkureiden käyttö edellyttää standardeissa määriteltyjä hyväksyntäkokeita. (RIL, 2016).

Paalutusohje 2016 mukaan koekuormituksia tulee tehdä myös seuraavissa tilanteissa (RIL, 2016):

- käytettäessä paalutyyppejä tai asennusmenetelmää, josta ei ole vertailukelpoista kokemusta
- aiempien koekuormitusten puuttuessa vastaavissa pohja- ja kuormitusolosuhteissa
- jos perustukseen kohdistuvasta kuormituksesta ei ole teorian ja kokemuksen perusteella riittävää varmuutta mitoituslaitteeseen
- jos paalun asennuksen aikana havaitaan poikkeamia pohjatutkimusten tai kokemuksen perusteella odotettuun käyttäytymiseen nähden

Kuvassa 6.8 on esitetty vaipalla kantavan paalun vetokuormitukseen käytetty koejärjestely. Vaipalla kantavien paalujen geotekninen kestävyys kehittyy asennuksen jälkeen jopa yli puolen vuoden ajan (Kinnunen, 2015). Koejärjestelyjen helpottamiseksi on usein perusteltua asentaa koekuormitettaviin kohteisiin erilliset koepaalut tarvittaessa suoritettavan pitkäaikaisemman seurannan mahdollistamiseksi.



**Kuva 6.8.** Koheesiopaalun koekuormitus. (Fingrid, 2018).

### 6.2.3 Dokumentointi

Paalutusohje 2016 mukaisesti toteutuneet rakenteet tulee dokumentoida pitämällä jokaisesta asennettavasta paalusta paalutuspöytäkirjaa, johon sisältyvät soveltuvin osin muun muassa (RIL, 2016):

- paalun numero, poikkileikkaus ja pituus
- asennuslaitteisto
- asennuspäivä ja kellonaika
- injektoidavilla paaluilla ja ankkureilla betonin tai injektointiaineen tilavuudet ja pumppauspaineet
- mitatut loppulyöntipainumat ja pudotuskorkeus tai lyöntienergia
- täryjuntan energia
- porakoneen vääntövoima
- paalutuksen aikana havaitut esteet
- sijainti- ja suunta-poikkeamat ja toteutuneet tasot

Jokaisen voimajohtopylvään perustuksen osalta dokumentoidaan ja toimitetaan tilaajalle osana projektin loppudokumentointia maaperätutkimusten tulokset, asennuspiirustukset, materiaalilistat, perustuslaskelmat, työohjeet, sekä laadunvarmistuksen ja mahdollisten koe-kuormitusten dokumentit. Perustusrakenteen tiedot, sekä suunnitellut ja asennuksen jälkeiset tarkemmit koostetaan perustusraportille.

### 6.3 Vaikutukset rakentamisvaiheen aikatauluihin

Haastattelujen avulla kartoitettujen toteutuneista hankkeista saatujen kokemusten perusteella teräspäälustusten avulla voidaan parhaimmillaan nopeuttaa huomattavasti perustustöiden aikatauluja verrattuna elementti- ja valuperustuksiin. Perustustyön kestoon vaikuttaa huomattavasti maaperän olosuhteista ja toteutettavista rakenteista riippuvien työvaiheiden määrä.

Harustetun pylvään elementtiperustusten rakentaminen tavanomaiselle maaperälle ilman pohjanvahvistusta kestää tyypillisesti yhden työpäivän sisältäen elementtien siirron pylväspaikalle. Kyseisessä tapauksessa teräsuperustuksilla ei saavuteta aikataulullista hyötyä, vaan elementtiperustusta voidaan pitää edelleen kilpailukykyisenä ja yksinkertaisena ratkaisuna.

Vapaasti seisovan pylvään valuperustuksen rakentaminen tavanomaiselle maaperälle ilman pohjanvahvistusta kestää tyypillisesti yhdestä kahteen työviikkoa. Usein valuperustusten tapauksessa rakennetaan kuitenkin useampia perustuspaikkoja rinnakkain. Vapaasti seisovan pylvään perustuksen toteutus pora- tai lyöntipaalutuksena on huomattavasti nopeampaa, koska työvaiheista jää pois kaivannot, muottityöt ja raudoitukset, valutyöt, sekä muottien purku ja perustuksen täyttö. Paaluputkien asennus onnistuu paalupituuksista ja maaperästä riippuen tyypillisesti yhdessä työpäivässä ja paaluhattujen asennus saadaan valmiiksi viimeistään toisena työpäivänä. Paalupituuksien kasvaessa työaika kasvattaa paalutustyön lisäksi erityisesti porapaalujen jatkosten hitsaaminen. Työvaiheita lisäävät myös mahdollinen paalujen betonointi ja suunnitteluvaiheessa määritellyt koekuormitukset.

Perustustöiden keston kannalta merkittävimmät hyödyt saavutetaan perustuspaikoilla, jotka vaativat elementti- tai valuperustusten yhteydessä erillistä pohjanvahvistusta. Betoniperustusten yhteydessä käytettävät teräsbetoni- tai teräspaalut vaativat varsinaisen perustustyöryhmän lisäksi usein erillisen paalutusurakoitsijan suorittamaan tarvittavat paalutustyöt. Harustetun pylvään elementtiperustusten rakentaminen paalutettavalle pehmeikköpaikalle kestää tyypillisessä tapauksessa noin viikon. Käyttämällä teräsuperustuksia on mahdollista säästää kaivantoihin, paalujen katkaisuun, paaluhattujen ja elementtien asennuksiin, sekä suojaseinien rakennukseen ja mursketäyttöihin kuluva työaika. Lähes yhtä paljon työaika säästetään verrattuna massanvaihdolla toteutettavaan perustuspaikkaan. Harustetun pylvään perustuksen rakentaminen teräspuikipaaluilla ja läpi-injektoitavilla pora-ankkureilla onnistuu parhaimmillaan yhdessä työpäivässä lukuun ottamatta mahdollisia jälkikäteen suoritettavia koekuormituksia.

TMV Linen projektipäällikkö Toma Karkkulaisen mukaan hyödyntämällä useita perustustapoja rinnakkain voidaan nopeuttaa perustustöiden aikatauluja ja hallita etenkin routa-aikaan ajoitettujen työvaiheisiin liittyvää sääriskiä. Vaihtoehtoiset perustustavat lisäävät myös käytettävissä olevien urakoitsijaresurssien määrää. (Karkkulainen, 2022).

Harustettujen pylväiden pystytys suoritetaan yleisimmin nosturilla, jolloin perustuksiin ei kohdistu ylimääräistä asennuksesta johtuvaa räsitusta. Vaihtoehtoisia menetelmiä ovat ns. saksi- ja puominosto, joissa pylväsjalat kiinnitetään erikoisvalmisteisten nivelten avulla perustuspilareihin ja pylväs vedetään pystyyn vinssin avulla. Kyseinen menetelmä aiheuttaa perustuspilareille merkittäviä asennuksen aikaisia poikittaisvoimia, jotka pahimmillaan vaurioittavat perustusta. Menetelmä edellyttää erityistä huolellisuutta ja perustuspilareiden riittävää ankkuroimista haruspilareihin, erillisiin maa-ankkureihin tai työkoneeseen. Teräsperustukset saattavat vaikeuttaa menetelmän käyttöä pehmeiköillä ja lisätä pylväsoston työvaiheita, koska teräsputkipaaluperustukset eivät tarjoa tukea perustukseen kohdistuvia leikkausvoimia vastaan ja toisaalta injektoituja pora-ankkureita tai ruuvipaaluja ei voida hyödyntää pylväsalkojen perustusten ankkurointiin pilariharusanakkurien tapaan.

#### 6.4 Ympäristövaikutukset

Rakentamisen vaiheet vaikuttavat ympäristöön monin tavoin. Ympäristövaikutuksia aiheutuu raaka-aineiden hankinnasta, tuotteiden valmistuksesta, kuljetuksesta, sekä varsinaisesta rakentamisesta. Elinkaaren lopussa vaikutuksia aiheutuu myös rakenteiden purkamisesta ja jätteiden hyödyntämisestä tai loppusijoituksesta. (Ympäristöministeriö, 2013).

Fingridin tavoitteena on minimoida haittavaikutukset yleisen edun ja teknistaloudellisten reunaehtojen rajoissa. Voimajohdon rakentamisessa tavoitteena on aiheuttaa mahdollisimman vähän haittaa ympäristölle, maanomistajille ja lähialueen asukkaille. (Fingrid, 2022e).

Luvussa arvioidaan perustusrakenteen merkitystä aiheutuvien ympäristövaikutusten kannalta. Seuraavissa alaluvuissa käsiteltäviä näkökulmia ovat rakennusmateriaaleista aiheutuvat ympäristövaikutukset, sekä rakentamistyön vaikutukset pylväspaikan lähiympäristöön. Vertailtavaksi on valittu maaperän olosuhteita, joissa teräsperustukset ovat teknistaloudellisesti kannattava ja toteutuneissa hankkeissa käytetty vaihtoehto betonirakenteiden rinnalle.

Materiaalien osalta on laadittu hiilijalanjälkeä kuvaavat laskelmat yleisimpien pylvästyyp-  
pien betoni- ja teräsperustusten vertailemiseksi. Laskelmat ovat likimääräisiä arvioita, koska todelliset materiaalimenekit vaihtelevat huomattavasti pylväspaikan maaperän ominaisuuksista ja perustuskuormista riippuvasta mitoituksesta johtuen.

Rakentamistyön osalta on vertailtu perustustavasta johtoaukealle ja pylväspaikkojen läheisyyteen aiheutuvia ympäristövaikutuksia. Rakentamisvaihetta koskevien havaintojen lähteenä on käytetty haastattelujen avulla kerättyjä kokemuksia toteutuneista hankkeista.

#### 6.4.1 Materiaalien hiilijalanjälki

Rakennusmateriaaleilla on entistä näkyvämpi rooli keskustelussa ilmastotoimista ja rakentamisen ympäristövaikutuksista. (Ympäristöministeriö, 2013).

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, jonka pääraaka-aineita ovat sementti, vesi ja kiviaines. Tarvittaessa käytetään lisäaineita, joilla säädellään esimerkiksi notkeutta, ilmapitoisuutta tai kovettumisnopeutta. (Betoniteollisuus ry, 2022).

Betonin tärkein ainesosa on sideaine eli sementti. Sementti muodostaa veden kanssa reagoiessaan ns. sementtikiven, joka sitoo kiviaineksen ja raudoituksen yhdeksi lujaksi pakeiksi. Sementin raaka-aineita ovat luonnonmineraalit, lähinnä kalkkikivi, joka on maankuoren yleisin kivilaji. Sementin raaka-aineet jauhetaan ja kuumennetaan uunissa korkeaan lämpötilaan, jolloin mineraalit sulavat ja reagoivat keskenään. Samalla kalkkikivestä vapautuu hiilidioksidia. (Betoniteollisuus ry, 2022).

Betoniin käytettävää kiviainesta on betonin tilavuudesta noin 70 %. Karkein osa käytetystä kiviaineksesta on mursketta tai luonnonsoraa ja hienempi osa luonnonhiekkaa. Valmistuksessa käytetty kiviaines on uusiutumaton, mutta käytännössä ehtymätön luonnonvara. Suomessa vuosittain käytettävistä kiviaineksista vajaa 10 % eli 8–10 miljoonaa tonnia käytetään betonin valmistukseen. (Betoniteollisuus, 2022).

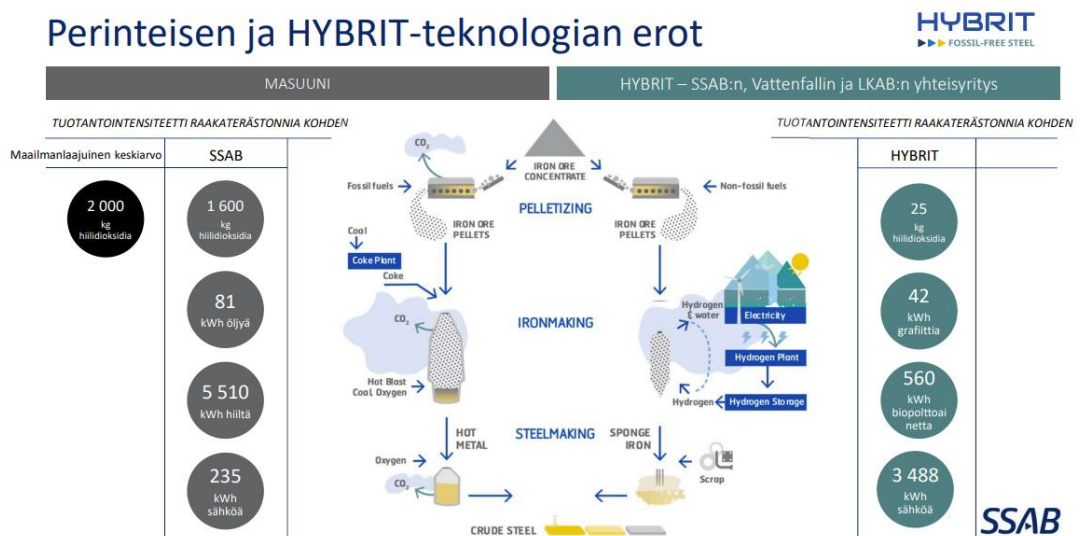
Betonin valmistuksessa voidaan käyttää tavallista juomavettä. Humuspitoinen suovesi tai järvivesi ei kuitenkaan sovellu betonin valmistukseen, koska se häiritsee sementin kovettumisreaktiota. Valmistuksessa käytettävä vesi ei saa sisältää sokereita, jotka voivat hidastaa tai estää betonin kovettumisen. (Betoniteollisuus, 2022).

Sementti on betonin keskeisin osa energiankulutuksen ja päästöjen kannalta. Vähähiilistä betonia kehitetään tällä hetkellä aktiivisesti ja käyttöön on otettu uusi vähähiilisyysluokitus. Vähähiilisen betonin sideaineena käytetään sementin sijaan esimerkiksi masuunikuonaa tai lentotuhkaa. Tällä hetkellä tyypillisiä käyttökohteita ovat muun muassa rakentamisessa

käytettävät seinäelementit ja ontelolaatat. Kehitystyön haasteina pidetään erityisesti hidasta lujuudenkehitystä ja lämmöntuotantoa. Voimajohtojen perustuksia valetaan erittäin vaihtelevissa olosuhteissa ja erityisesti talviaikaan riittävän nopea lujuudenkehitys ja lämmöntuotanto ovat keskeisiä betonimassalta vaadittavia ominaisuuksia. Masuunikuonan ja lentotuhkan käyttö sideaineena ei toistaiseksi ole sallittua. Toinen keskeinen tulevaisuuden kehityspolku on sementin valmistuksessa vapautuvan hiilidioksidin talteenotto, jonka myötä tavanomaista lujuusominaisuuksiltaan erinomaisesti havaittua portland-sementtiä voitaisiin valmistaa hyvin vähäpäästöisesti.

Teräs valmistetaan perinteisesti rautamalmita masuunissa koksien avulla pelkistämällä. Prosessin eri vaiheissa vapautuu merkittävästi hiilidioksidia ja terästeollisuus tuottaakin nykyisin merkittävän osan maailman hiilidioksidipäästöistä. Hyvänä puolena valmistuksessa runsaasti energiaa sitonutta terästä voidaan kierrättää tehokkaasti ja vähentää merkittävästi hiilidioksidipäästöjä verrattuna uuteen rautamalmita valmistettavaan teräkseen.

Teräsvalmistaja SSAB kehittää yhdessä rautamalmituottaja LKAB:n ja energiayhtiö Vattenfallin kanssa HYBRIT-hanketta, jonka tavoitteena on korvata rautamalmitpohjaisessa teräksenvalmistuksessa pelkistykseen perinteisesti käytetty koksi fossiilivapaalla sähköllä ja vedyllä. Kehitystyöllä on toteutuessaan merkittävä rooli osana vihreää siirtymää. Tuotannon on tarkoitus alkaa kaupallisessa mittakaavassa vuonna 2026. Kuvassa 6.9 on esitetty perinteisen pelkistysprosessin ja kehitettävän teknologian keskeisimmät erot.



**Kuva 6.9.** Perinteinen ja HYBRIT-tuotantoprosessi. (Ruukki, 2021).

Materiaalien hiilijalanjäljen laskennassa käytettiin taulukossa 6.2 esitettyjä CO2Data -palvelusta haettuja keskimääräisiä rakennustuotteiden päästötietoja. Valitut arvot ovat konservatiivisia arvoja rakennusluvan hakemiseen, GWP (A1-A3), eivätkä edusta yksittäisten valmistajien tuotteilleen esittämiä arvoja. Palvelua ylläpitää ja kehittää Suomen ympäristökeskus (SYKE) ympäristöministeriön toimeksiannosta. Tietokannan tiedot on laadittu yhteistyössä ympäristöasiantuntijoiden ja rakennusalan ammattilaisten kanssa. Tiedot perustuvat eri lähteistä koottuun julkiseen tietoon, pääasiassa ympäristöselosteisiin. (CO2data, 2022).

**Taulukko 6.2.** Hiilijalanjäljen laskennassa käytetyt arvot. (CO2data, 2022).

Materiaali	kg CO <sub>2e</sub> /kg
Ankkuritangot, paalukärjet- ja hatut	3,600
Kalliomurske	0,007
Sahatavara (suojaseinät)	0,083
Suodatinkangas	1,900
Teräsbetonipaalu	0,200
Teräsputkipaalu	3,000
Teräsraudoite	0,670
Valmisbetoni C35/45, huokostamaton	0,140
Valmisbetoni C35/45, huokostettu	0,180

Tarkasteltaviksi rakenteiksi valittiin 110 kV vapaasti seisova 1T-pylväs ja 400 kV harustettu 1H-pylväs. Fingridin toteutuneissa hankkeissa on rakennettu teräsperustuksia molemmille pylväslajeille. 110 kV 1T-pylväs ei ole yleisin pylväslaji, mutta perusrakenne edustaa tyypillistä vapaasti seisovaa pylvästä. 1T-pylväille on saatavissa vertailukelpoista tietoa hankkeista, joissa perustuksia on rakennettu sekä valu- että teräsputkipaaluperustuksina. 400 kV 1H-pylväs on yleisin pylväslaji kyseisen jännitetason voimajohdoilla ja edustaa keskimääräisiä perustuskuormia verrattuna kaikkiin pylväsperheen harustettuihin pylväisiin.

Laskennassa käytettäväksi maaperän olosuhteiksi valittiin kolme erilaista taulukossa 6.3 esitettyä tapausta. Kaksi ensimmäistä maaperää kuvaavat tyypillisiä suoalueiden olosuhteita. Kolmas laskennassa käytetty maaperä on syvempi 20 m pehmeä savi-/silttikerros, jonka alla on ehjä kallio. Laskennallisen materiaalimenekin ja hiilijalanjäljen kannalta ei ole olennaista merkitystä onko kantavana maapohjana tiivis moreeni vai kallio, vaikka tilanne vaikuttaa merkittävästi toteutukseen ja paalutustapaan. Hiilijalanjäljen laskentaan ei ole sisällytetty ruuvipaaluja mitoitukseen ja soveltuvuuteen liittyvien epävarmuuksien vuoksi, jolloin

kantavaksi pohjaksi on voitu määrittää kaikissa tapauksissa kallio. Ruuvipaalujen hiilijalanjäljen voidaan kuitenkin olettaa olevan samaa suuruusluokkaa esitettyjen teräsputkipaalujen kanssa, koska pehmeiden maakerrosten leikkauslujuus vaikuttaa paalujen mitoitukseen enemmän kuin paalujen rakenteellinen puristus- tai vetokestävyys.

**Taulukko 6.3.** Laskennassa käytetyt maaperän olosuhteet.

Maaperä 1	Turvekerros 4 m + kallio
Maaperä 2	Turvekerros 10 m + kallio
Maaperä 3	Savi/siltti 20 m + kallio

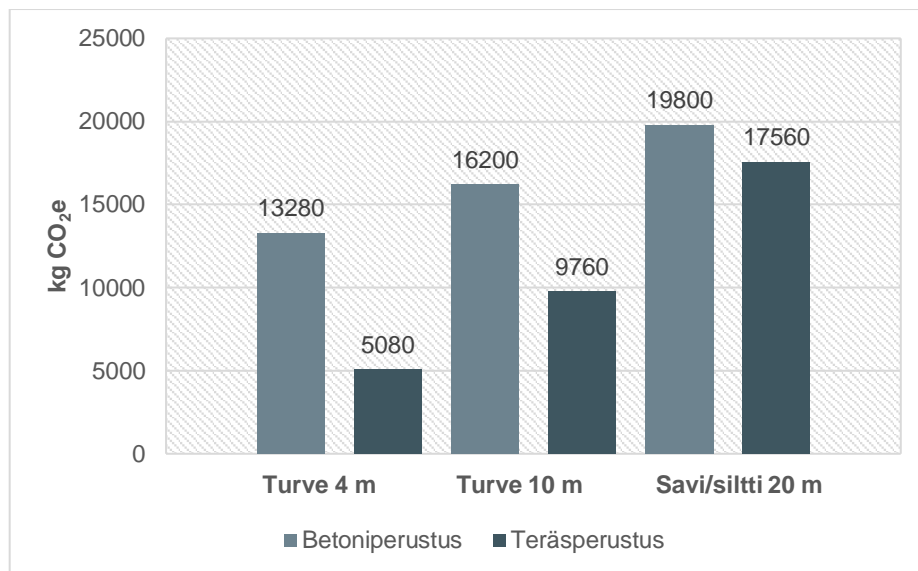
Laskennassa käytetyt perustusrakenteet on esitetty taulukossa 6.4. Materiaalimenekit on arvioitu keskimääräisten toteutettujen perustusrakenteiden perusteella. Tarkat materiaalimenekit määräytyvät maaperän olosuhteiden, perustuskuormien ja rakenteen mitoituksen perusteella, joten laskennallista materiaalien hiilijalanjälkeä on pidettävä likimääräisenä arviona. 1H-pylvään elementtiperustuksessa on oletettu käytettävän Fingridin tyyppirakenteiden mukaisia pilariharusankkureita. Teräsputki- ja ruuvipaaluja ei ole oletettu betonoitavan lukuun ottamatta 1T-pylväille laskettua kallioankkurointia ja paaluputken täyttöä 1,5 m pohjalta. TITAN-ankkureille on laskettu käytettävän D140/4 teräksistä suojaputkea turvekerroksessa ja 1 m osuudella savimaassa.

**Taulukko 6.4.** Laskennassa käytetyt perustusrakenteet.

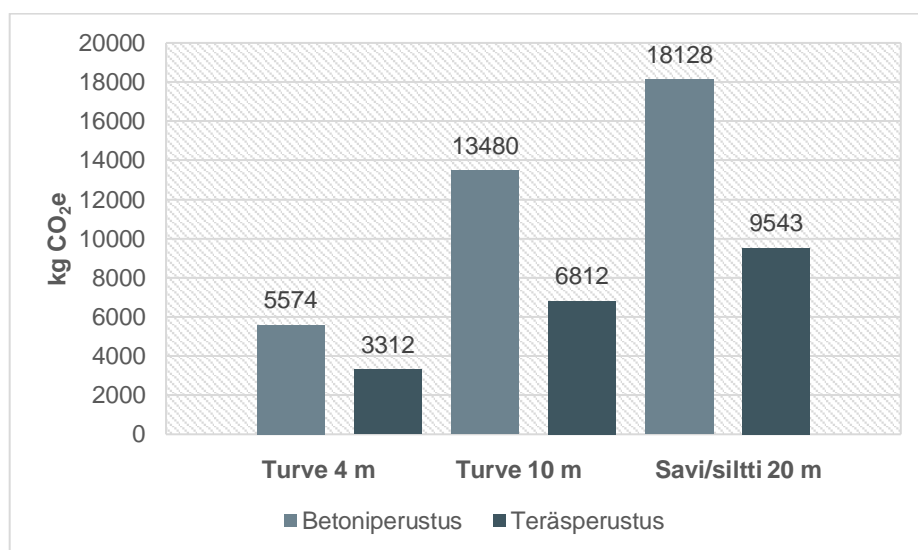
Pylväslaji	Maaperä	Betoniperustus	Teräsputkipaalut (+pora-ankkurit)
110 kV 1T	1	Massanvaihto + valuperustus + mursketäyttö	RD270/10 teräsputkipaalut
	2	TB300 paalutus + valuperustus + mursketäyttö	RD270/10 teräsputkipaalut
	3	TB300 paalutus + valuperustus + mursketäyttö	RD270/10 teräsputkipaalut
400 kV 1H	1	Massanvaihto + elementtiperustus + suojaseinät + mursketäyttö	RD220/10 teräsputkipaalut + TITAN-ankkurit
	2	TB180 paalutus + elementtiperustus + suojaseinät + mursketäyttö	RD220/10 teräsputkipaalut + TITAN-ankkurit
	3	TB180 paalutus + elementtiperustus + mursketäyttö	RD220/10 teräsputkipaalut + TITAN-ankkurit



Kuvissa 6.10 ja 6.11 on esitetty pylväslajeittain koostetut materiaalien hiilijalanjäljen vertailut. Teräsperustusten käytön voidaan todeta vähentävän materiaalien osalta aiheutuvaa hiilijalanjälkeä kaikissa tarkastelluissa tapauksissa. Teräsperustusten tapauksessa hiilijalanjälki kasvaa suhteellisen suoraviivaisesti paalu- ja ankkuripituuksien kasvaessa eri maaperissä. Vapaasti seisovan 1T-pylvään betoninen valuperustus muodostaa kaikissa tapauksissa merkittävän osan hiilijalanjäljestä ja paalupituuksien vaikutus hiilijalanjälkeen on vähäisempi. Harustetulla 1H-pylväällä hiilijalanjälki kasvaa merkittävästi ensimmäisen ja toisen maaperän välillä johtuen rakenteeseen paalutuksen yhteydessä lisättävistä betonisista paaluhaatuista. Paaluhattujen massat ovat varsinaisia perustuselementtejä suuremmat.

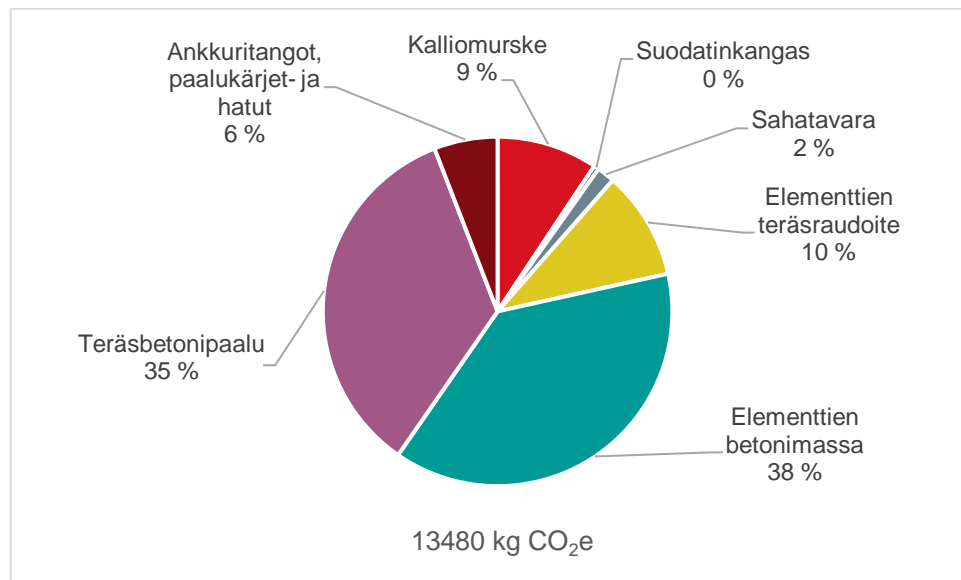


**Kuva 6.10.** 110 kV 1T-pylvään perustuksen materiaalien hiilijalanjäljen vertailu.

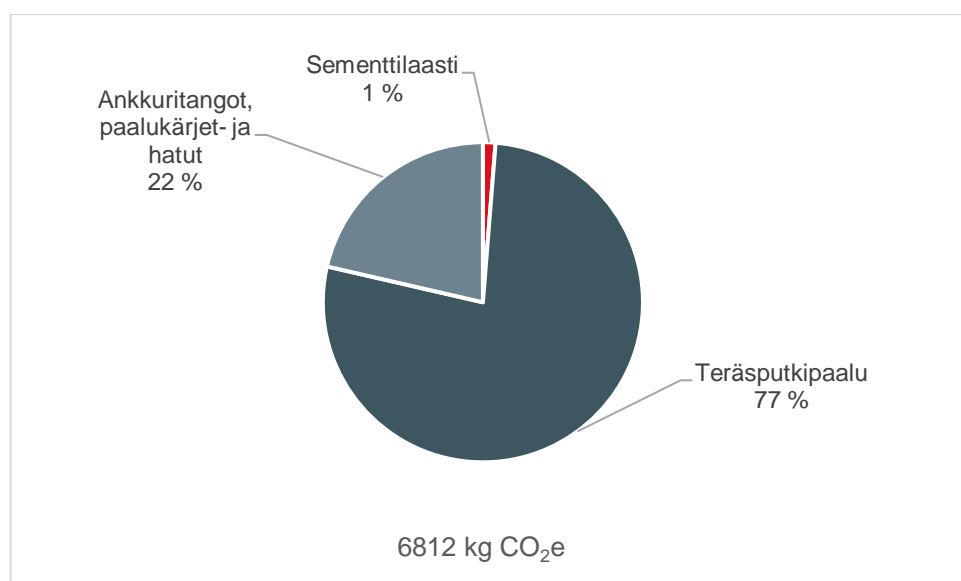


**Kuva 6.11.** 400 kV 1H-pylvään perustuksen materiaalien hiilijalanjäljen vertailu.

Kuvien 6.12 ja 6.13 kaavioissa on havainnollistettu eri rakennusmateriaalien osuutta perustuksen hiilijalanjäljessä käytettäessä esimerkkinä kymmenen metrin turvekerrokseen toteutettua rakennetta. Betoniperustuksen tapauksessa valtaosan hiilijalanjäljestä muodostavat perustuselementit, paaluhatut, ja teräsbetonipaalu. Puisten suojaseiniä, suodatinkankaan ja mursketäytön osuus on noin 10 % kokonaiskuormituksesta. Teräsperustukset tapauksessa valtaosa hiilijalanjäljestä muodostuu pylväsalkojen teräsputkipaaluista. Haruksilla käytetyt läpi-injektoitavat pora-ankkurit muodostuvat noin neljänneksen kokonaiskuormituksesta.



**Kuva 6.12.** 400 kV 1H-pylvään betoniperustuksen hiilijalanjälki (10 m perustamissyvyys).



**Kuva 6.13.** 400 kV 1H-pylvään teräsperustuksen hiilijalanjälki (10 m perustamissyvyys).

Tällä hetkellä teräsperustusten materiaaleista aiheutuva vähäisempi hiilijalanjälki puoltaa rakenteiden käytön lisäämistä soveltuviissa olosuhteissa. Teräsputkipaaluperustusten hiilijalanjälkeen vaikuttaa merkittävästi valittu paalukoko. Erityisesti halkaisijaltaan suurten ja pitkien vaipalla kantavien paalujen tapauksessa tilanne saattaa kääntyä betoniperustusten eduksi tai ohjata kevyemmällä paalulla syvemmällä sijaitsevaan kantavaan kerrokseen asti tehtävään paalutukseen. Mitoitus vaikuttaa keskeisesti myös rakenteen kustannuksiin ja yleiseen toteutuskelpoisuuteen, joten useat näkökulmat ohjaavat suunnittelua ja mitoitus ympäristön kannalta positiiviseen suuntaan.

Rakennusmateriaalien aiheuttamassa hiilijalanjäljessä voidaan odottaa tapahtuvan lähitulevaisuudessa merkittävää kehitystä entistä ympäristöystävällisempien tuotteiden tullessa markkinoille kaupallisessa laajuudessa. Kehitystä on odotettavissa sekä betonituotteiden että teräsmateriaalien osalta. Rakennusmateriaalien ja vaihtoehtoisten rakenneratkaisujen ympäristövaikutukset tulisi kartoittaa tilanteen kehittyessä tulevaisuudessa ja tarkastella niitä yhdessä teknistaloudellisten näkökulmien kanssa.

#### 6.4.2 Rakentamisvaiheen ympäristövaikutukset

Haastatellut Fingridin ja pääurakoitsijoiden edustajat korostivat teräsperustusten merkittävänä etuna perinteisiin rakenteisiin verrattuna vähäisempiä rakentamisen aikaisia ympäristövaikutuksia. Elementti- ja valuperustusten rakentaminen vaatii hyvissäkin maaperän olosuhteissa kaivantojen avaamista, mutta työmenetelmien ja tarvittavien materiaalien ero korostuu erityisesti haastavilla pehmeikköalueilla. Teräsperustusten tapauksessa säästettäviä työvaiheita ovat erilliset pohjanvahvistukset, elementtien asennukset, sekä perustuksen täyttöön soveltumattomien maa-ainesten korvaaminen murskeella.

Kuvissa 6.14 ja 6.15 on esitetty lentokuvausaineistosta otetut kuvakaappaukset muutamia vuosia aiemmin pehmeälle suoalueelle toteutetuista 400 kV harustettujen pylväiden perustuksista. Ensimmäisen kuvan perustus on toteutettu perinteisellä ratkaisulla paalutettuna elementtiperustuksena. Perustusten mursketäyttöjen sitoutuminen ympäröivään maaperään on varmistettu puisilla suojaseinillä. Toisessa kuvassa rakenteena on käytetty pylväsjaloilla teräsputkipaaluja ja harusperustuksina läpi-injektoitavia pora-ankkureita. Perustusrakenteen ansiosta on välttytty kaivantojen avaamiselta. Molemmat perustukset on

toteutettu talviaikaan jäädytettyjen pylväspaikkojen ja työmaateiden avulla, jolloin on välttytty materiaalien kuljetuksen ja työmaaliikenteen aiheuttamilta vaurioilta ja saatu perustuskaivannot toteutettua asianmukaisesti. Mahdolliset tulevaisuuden lauhat talvet vaikeuttavat rakentamisessa tarvittavien kulkureittien jäädyttämistä, jolloin erityisesti perinteisillä menetelmillä rakennettavien perustusten toteutus on entistä haastavampaa. Teräspierustusten rakentaminen on elementti- ja valuperustuksia nopeampaa, jolloin parhaat sääolosuhteet voidaan hyödyntää tehokkaammin ja vähentää upottavissa olosuhteissa liikkumista. Kevyellä kaivinkonealustaisella kalustolla asennettavat ruuvipaalut voivat osaltaan tarjota kulkureittien kannalta hyödyllisen vaihtoehtoisen menetelmän erityisesti harustettujen pylväiden perustamiseen heikosti kantavissa olosuhteissa, mikäli pehmeän turvekerroksen alla on asennukseen soveltuva maaperä.



**Kuva 6.14.** Suoalueelle toteutettu harustetun pylvään elementtipierustus. (Fingrid, 2020).



**Kuva 6.15.** Suoalueelle toteutettu harustetun pylvään teräspierustus. (Fingrid, 2020).

Teräsputkipaaluperustukset soveltuvat hyvin myös kaupunkiolosuhteisiin ja muille ahtaille pylväspaikoille esimerkiksi teiden läheisyydessä. Vapaasti seisovien pylväiden valuperustukset edellyttävät usein laajoja perustuskaivantoja, jotka saattavat ulottua läheisten katujen tai muiden rakenteiden alle. Teräsputkipaaluilla toteutettava perustus ei ulotu pylvään ulkomittojen ulkopuolelle, jolloin voidaan parhaimmillaan välttyä muiden rakenteiden muutostöiltä ja pitkäaikaisilta liikennejärjestelyiltä.

Erityisesti asutussa ympäristössä ja liikenteen läheisyydessä parannetaan samalla ulkopuolisten turvallisuutta, koska perustustöitä varten ei tarvitse avata kaivantoja. Halkaisijaltaan suuret teräsputkipaalut suljetaan välittömästi asennuksen jälkeen väliaikaisella suojauksella tai paaluhatuilla. Lyhyempi työaika mahdollisen liikenteen läheisyydessä lisää myös työryhmien turvallisuutta.

Kuvassa 6.16 on esitetty lentokuvausaineistosta otettu kuvakaappaus kaupunkiympäristöön toteutetusta 3T-kiristyspylvään porapaaluperuksesta. Työmaa ja pylväspaikan viimeistely on kuvaushetkellä keskeneräinen. Vapaasti seisovan kiristyspylvään perustuksen toteuttaminen valuperustuksena olisi edellyttänyt laajaa kaivantoa ja siihen liittyviä muutoksia olemassa oleviin tie- ja aitarakenteisiin, sekä muutosten vaatimia liikennejärjestelyjä. Perusratkaisun avulla on pystytty yksinkertaisemman toteutuksen lisäksi samalla parantamaan työmaan aikaista ulkopuolisten henkilöiden ja liikenteen turvallisuutta.



**Kuva 6.16.** Kaupunkiympäristöön toteutettu porapaaluperustus. (Fingrid, 2020).

## 7 Korroosio ja elinkaari

Luvussa käsitellään voimajohtojen teräsperustusten rakenteita korroosioon ja elinkaareen liittyvistä näkökulmista. Ensin esitellään korroosion yleisimmät esiintymismuodot ja esiintymiseen vaikuttavat tekijät, joiden jälkeen käsitellään teräsperustusten korroosiosuojaukseen soveltuvat menetelmät ja elinkaaren aikana suoritettavan kunnonhallinnan näkökulmat. Korroosioilmiön huomioinnilla on keskeinen merkitys suunniteltaessa ja rakennettaessa voimajohtojen teräsperustuksia. Voimajohtojen rakenteiden tulee kestää pitkän elinkaaren ajan ilman merkittävää kunnossapitotarvetta. Maanalaisten rakenteiden kunnon tarkkailu on haasteellista ja mahdolliset elinkaaren aikana suoritettavat erikoistarkastukset lisäävät kunnonhallinnan kustannuksia. Mahdollisten vaurioiden korjaaminen tarkoittaa teräsperustusten tapauksessa pääsääntöisesti perustusrakenteen uusimista kokonaisuudessaan.

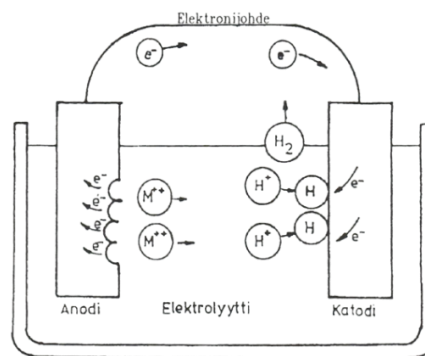
Korroosioon vaikuttavat tekijät, niiden vaikutus ja maaperän ominaisuuksien kannalta mahdollisesti haasteelliset alueet tulee tunnistaa ja huomioida jo suunniteltaessa teräsperustusten käyttöä voimajohtohankkeissa. Korroosioriskiin tulee kiinnittää erityistä huomiota ongelmallisten rakenteiden välttämiseksi teräsperustusten mahdollisesti yleistyessä tulevaisuudessa. Useat näkökulmat puoltavat teräsperustusten laajamittaisempaa käyttöä ja korroosiosuojauksen toteuttamiseen on olemassa soveltuvat menetelmät, joten rakenteiden kehitystä ja jalkauttamista hankkeisiin ei ole syytä rajoittaa riskin perusteella, vaan se tulee hallita järjestelmällisesti. Perustusrakenteen korroosiosuojaus määritellään suunnittelu- ja mitoitusvaiheessa ottaen huomioon erityisesti yleisesti tunnetut aggressiivisen maaperän esiintymisalueet ja niiden perusteella suoritettujen lisätutkimusten tulokset.

Korroosiolla tarkoitetaan usein yleisesti ympäristön vaikutusten aiheuttamaa rakennemateriaalien kemiallista tai sähkökemiallista tuhoutumista. Kemiallisessa korroosiossa metallit reagoivat suoraan ympäristön kanssa muodostamatta pinnalle korroosiotuotetta ja aiheuttamatta sähkövarausten liikettä. Käytännön kannalta tärkeät korroosioprosessit ovat sähkökemiallisia, jolloin niihin liittyy aina sähkövarausten siirtymistä. Metalleihin on valmistusprosessin aikana sitoutunut runsaasti energiaa, joka vapautuu korroosion aikana muuttaen metallisen olomuodon takaisin hapettuneeksi ja vähän energiaa sisältäväksi. Korroosioilmiön taustalla on luonnonlakien mukainen pyrkimys energiatilan alentamiseen. (Kunnossapitoyhdistys, 2004).

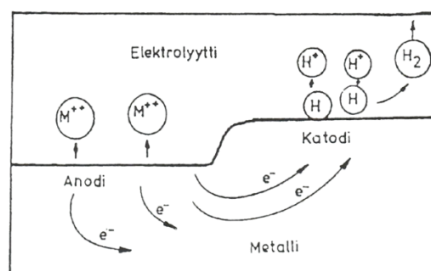
## 7.1 Sähkökemiallinen korroosio

Sähkökemiallinen korroosio edellyttää ns. korroosioparin muodostumista. Korroosiopari muodostuu kahdesta elektrodista, joilla on elektrolyyttiyhteyden lisäksi sähköinen yhteys (Kunnossapitoyhdistys, 2004). Katodiksi kutsutaan sähkökemiallisesti jalompaa tai korkeamman potentiaalin omaavaa elektrodia ja anodiksi epäjalompaa tai matalamman potentiaalin omaavaa elektrodia. Korroosiona ilmeneviä hapettumisreaktioita tapahtuu anodilla ja pelkistymistä katodilla.

Kuvassa 7.1 on esitetty galvaaninen pari, joka on kyseessä anodin ja katodin ollessa eri metalleja. Galvaaninen pari muodostuu voimajohtoilla tyypillisesti teräsrakenteen ja kuparisen maadoituselektrodin välille. Kuvassa 7.2 on esitetty tilanne, jossa anodinen ja katodinen alue sijaitsevat saman metallikappaleen eri alueilla. Tarvittava potentiaaliero voi syntyä saman kappaleen pinnan kerrosten tai koostumuksen eroista tai ympäröivän elektrolyytin paikallisista eroista. Elektrolyytin paikalliset erot voivat voimajohtojen perustusten tapauksessa muodostua esimerkiksi vaihtelevista maakerroksista, happamuudesta tai happipitoisuudesta. Tarkemmat korroosion esiintymismuodot ja niihin vaikuttavat rakenteelliset ja olosuhteista riippuvat tekijät käsitellään erillisissä alaluvuissa.



**Kuva 7.1.** Galvaaninen pari. (Kunnossapitoyhdistys, 2004).



**Kuva 7.2.** Anodi ja katodi samalla metallipinnalla. (Kunnossapitoyhdistys, 2004).

Anodisen ja katodisen alueen keskinäiset kokoerot vaikuttavat syöpymisnopeuteen. Ongelmallisin tilanne muodostuu, jos syöpyvän anodin pinta-ala on pieni verrattuna katodin pinta-alaan. Olosuhteista riippuen seurauksena saattaa olla nopeasti etenevä paikallinen korrosio. Voimajohtojen tapauksessa korroosiolle altistuvien teräsperustusten kokoluokka ja maaperän kanssa kosketuksissa oleva pinta-ala vaihtelee merkittävästi aiemmin käytetyistä harusperustusten kaksoissilmukoista aina suurikokoisiin teräsputkipaaluihin asti. Merkittävää vaihtelua esiintyy myös maadoituselektrodeina käytettyjen kupariköysien pylväskohtaisissa määrissä.

## 7.2 Korroosion esiintymismuodot

Sähkökemiallinen korrosio voidaan jakaa useaan erilaiseen esiintymismuotoon. Käsiteltävien esiintymismuotojen ulkopuolelle on rajattu muun muassa korkean lämpötilan korrosio, mekaanisen rasituksen ja jännitystilojen aiheuttamat vaikutukset, sekä pääosin muilla metalliseoksilla kuin teräksellä esiintyvät raerajakorrosio ja valikoiva liukeneminen. Voimajohtopylväiden perustuksia ei rakenneta suoraan virtaavaan veteen, joten myös eroosiokorrosio voidaan jättää huomioimatta.

Yleisessä syöymisessä korroosiolle altistunut pinta syöpyy kauttaaltaan tasaisella nopeudella. Korrosio on tasaista anodi- ja katodialueiden sijainnin vaihtuessa jatkuvasti. Esiintymismuoto on tyypillinen suojaamattomille metallipinnoille ilmasto-olosuhteissa, sekä usein myös kemikaaleille altistetuissa metallipinnoissa. Tasaisen syöymisen seuraaminen on muita esiintymismuotoja yksinkertaisempaa ja voidaan toteuttaa esimerkiksi painohäviö- tai seinämäpaksuusmittausten avulla. (Kunnossapitoyhdistys, 2004).

Paikallinen syöyminen jaetaan pistesyöymiseen ja rako- eli piilokorroosioon. Pistesyöyminen aiheuttaa metallipinnalle paikallisia kuoppamaisia syvänteitä. Tyypillisesti pistesyöymä pysähtyy saavutettuaan tietyn syvyyden. Korroosiomuoto on yleinen perusmetallia jalomman pinnoitteen ja passiivikerroksen suojaamilla metalleilla, kuten alumiini. Syöyminen saa alkunsa pintakalvon virheistä tai urista, pinnalla olevista elektrolyyttipisaroista tai liuoksen voimakkaasta törmäyksestä metallin pinnalle. Rakokorroosiota esiintyy ahtaissa raoissa, kuten niitti-, pultti- ja hitsausliitoksissa, sekä metallin pinnalla ollessa kiinteitä partikkeleita, kuten hiekkaa tai esimerkiksi pinnalle muodostuneita korroosiotuotesaostumia.



Korroosiomuotoa esiintyy useimmilla metalleilla. Liuos ei pääse vaihtumaan raoissa samalla nopeudella kuin metallin muilla pinnoilla, jolloin liuoksen koostumus muuttuu erilaiseksi. Yleisin syy korroosioparin muodostumiseen on erot liuoksen happipitoisuudessa, jolloin raossa sijaitseva happiköyhempi alue muuttuu anodiksi ja käynnistää rakokorroosion. (Kunnossapitoyhdistys, 2004).

Galvaanista korroosiota esiintyy kahden erilaisen metallin ollessa samassa elektrolyytissä, sekä sähköisessä yhteydessä toisiinsa. Epäjalommasta metallista muodostuu anodi, joka syöpyy ja samalla jalomman metallin syöpyminen pysähtyy lähes täysin. (Kunnossapitoyhdistys, 2004). Galvaanista korroosiota esiintyy voimajohdoilla maanalaisten pylväsrakenteesta eristämättömien teräsrakenteiden ja kuparisten maadoituselektrodien välillä.

### 7.3 Maaperän ominaisuuksien vaikutus

Kosteaa maaperää toimii elektrolyytinä maanalaisten metallirakenteiden sähkökemiallisessa korroosiossa. Korroosioparit muodostuvat saman metallipinnan anodi- ja katodialueista tai sähköisessä yhteydessä olevista eri metalleista. Korroosioreaktiot aiheuttavat galvaanisen tasavirran, joka kulkee maaperässä anodi- ja katodialueiden välillä. Syntyvän virran suuruuteen ja korroosionopeuteen vaikuttavat merkittävästi maa-aineksen tyyppi, pohjaveden pinnan vaihtelu, sekä hapen ja epäpuhtauksien esiintyminen.

Korroosion kannalta riskialttiina pidetään hienorakeisia maalajeja, kuten savet ja siltit, sekä muut vastaavat orgaanista ainesta sisältävät maalajit. Useat tutkimukset osoittavat, että moreenit ja karkearakeiset maalajit eivät ole korroosion kannalta merkittävä riskiryhmä. Eloperäisten maalajien, kuten turpeen ja liejun osalta korroosioriskiä pidetään jossain määrin epäselvänä ja se sijoittunee hienorakeisten maalajien alueelle. (Kunnossapitoyhdistys, 2004).

Galvaaniseen tasavirtaan vaikuttava maaperän resistiivisyys vaihtelee maaperän tyyppin, rae-koon, tiheyden ja kosteuden mukaan. Kosteuden muutokset voivat aiheuttaa vaihteluja muutamaman metrin syvyyteen saakka. Lisäksi on huomioitava, että maaperän resistiivisyys voi vaihdella huomattavasti syvyyden mukaan, koska maaperä koostuu yleensä erityyppisistä kerroksista. Taulukossa 7.1 on esitetty erilaisten maaperien, betonin ja veden likimääräisiä resistiivisyyksiä. (SFS 6001:2018).

**Taulukko 7.1.** Maaperän, betonin ja veden resistiivisyydet. (SFS 6001:2018 NA. Liite J).

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

Hienorakeisen maalajien resistiivisyys vaihtelee merkittävästi riippuen kerrostuman geologisesta syntymekanismista. Vesistöihin kerrostuneiden maalajien huokosveden elektrolyyttipitoisuus vaihtelee altaan veden suolapitoisuudesta riippuen. Nuoret ja orgaaniset litorinasedimentit, joita esiintyy rannikkoalueilla poikkeavat huomattavasti muista elektrolyyttipitoisuuden ollessa suuri ja ominaisvastusarvojen pieniä. Hienorakeisten maalajien pintaosassa esiintyy usein 1–2 m kuivakuorikerros, jolla on pienempi merkitys kuin sen alapuolella olevalla elektrolyyttipitoisemmalla ja suuremman vesipitoisuuden omaavalla maakerroksella. Korroosioon vaikuttavista maaperän kemiallisista ominaisuuksista merkittävimmät ovat pH-arvo, elektrolyyttipitoisuus, happipitoisuus, sekä rikin eri yhdisteet, kuten sulfidionit. (Kunnossapitoyhdistys, 2004).

Taulukossa 7.2 on esitetty standardissa SFS-EN 1993-5:2007 suunnittelutarkoitukseen annetut ohjeelliset korroosionopeudet. Arvot kuvaavat maahan asennetun suojaamattoman teräspaalin keskimääräistä syöpymää pohjavedenpinnan ylä- tai alapuolella. Ilmassa sadan vuoden aikana aiheutuvan korroosion nopeudeksi voidaan valita 1 mm normaali-ilmastossa ja 2 mm lähellä merta. Voimajohtojen teräspäristusten potentiaaliset käyttökohteet sijoittuvat usein pehmeiköille, jotka luokitellaan keskimääräisten syöpymisnopeuksien kannalta aggressiivisiksi luonnonmaiksi. Keskimääräiset syöpymät ovat yli kaksinkertaisia verrattuna häiriintymättömiin luonnonmaihiin.

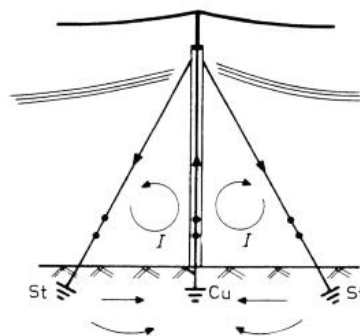
**Taulukko 7.2.** Keskimääräiset teräspinnan syöpyvät millimetreissä. (SFS-EN 1993-5:2007).

Käyttöikä (v)	5	25	50	75	100
Tavanomaiset olosuhteet					
Häiriintymättömät luonnonmaat (hiekkä, siltti, savi...)	0,00	0,30	0,60	0,90	1,20
Tiivistämättömät ei-aggressiiviset kivennäismaatäytöt (savi, hiekkä, siltti...)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Tavanomaisesta poikkeavat tai aggressiiviset olosuhteet					
Saastuneet luonnonmaat ja teollisuusalueiden maa-alueet	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiiviset luonnonmaat (suo, räme, turve...)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Tiivistämättömät, aggressiiviset täytöt (tuhka, kuona...)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75
Huom. Tiivistetyissä täytöissä korroosionopeudet ovat hitaampia ja taulukon arvot jaetaan kahdella. 5 ja 25 vuoden käyttöikää vastaavat arvot perustuvat mittauksiin ja korkeamman käyttöiän arvot on ekstrapoloitu.					

#### 7.4 Haruskorroosio

Haruskorroosiolla tarkoitetaan voimajohtopylväiden harusperustusten teräsosiin, eli kaksoissilmukoihin ja haruslaattojen u-pultteihin kohdistuvaa korroosiota. Harusperustuksen korroosio voi pahimmillaan johtaa maanalaisen teräsosan katkeamiseen ja pylvään kaatumiseen. Ilmiö tunnistettiin varhain Suomen voimajohtojen historiassa ja ensimmäisiä haruskorroosiota koskevia tutkimuksia suoritettiin Imatran Voimassa jo 1940-luvulla (Ylönen, 2015). Havainnot tukevat maaperän vaikutuksiin liittyvän yleisen teorian oikeellisuutta.

Haruskorroosion aiheuttajaksi on tunnistettu kaksi keskeistä tekijää. Ensimmäinen on kuvassa 7.3 esitetty pylvään kuparisten maadoituselektrodien ja teräsrakenteen välille muodostuva galvaaninen pari, jonka virtapiiri muodostuu pylväsrakenteen ja harusten kautta.



**Kuva 7.3.** Haruskorroosiota aiheuttava galvaaninen pari. (Elovaara & Haarla, 2011).

Voimajohtopylväiden maadoituksiin on käytetty Suomessa jo vuosikymmenten ajan kuparisia maadoituselektrodeja. Voimajohtorakentamisen historian alkuvaiheessa käytettiin kustannussyistä heikosti johtavilla mailla sinkittyä teräsvaijeria aina 1970-luvulle saakka (Ylönen, 2015). Teräselektrodeja käytetään jossain määrin edelleen tarkasteltaessa tilannetta kansainvälisellä tasolla. Pylväsmaadoitukset muodostuvat tapauskohtaisesti perusmaadoituksesta, säteittäisesti tai pystyyn asennetuista lisäelektrodeista, potentiaalinohjauselektrodeista ja mahdollisista pylväät yhdistävistä elektrodeista. Maadoituselektrodit kiinnitetään teräksisen pylväsjalan alaosaan tinatuilla kaapelikengillä ja pulttiliitoksilla. Puupylväillä on käytetty erillisiä, usein teräksisiä, alastuontijohtimia.

Teräsosien ja kuparisten maadoituselektrodien muodostamassa galvaanisessa parissa kiertävän tasavirran katkaisemiseksi voimajohtopylväiden harukset eristetään alaosaan. Vanhoihin rakenteisiin haruseristykset on toteutettu lisäämällä kuvassa 7.4 esitetyt eristyspalat kaksoissilmukoiden ja kiilakiristimien väliin tai vaihtamalla uudet kiilakiristimet. Kuvassa 7.5 on esitetty nykyaikaisilla kiilakiristimillä toteutettu rakenne, jossa eristyspalat ovat osana kiilakiristimen rakennetta. Haruseristysten kunto tarkastetaan voimajohtojen säännöllisissä maastotarkastuksissa ja havaitut viat korjataan osana normaalia kunnossapitoa.



**Kuva 7.4.** Harukseen lisätty eristyspala. (Fingrid Oyj, 2006).



**Kuva 7.5.** Eristetyt harusten kiilakiristimet. (Fingrid Oyj, 2020).

Toinen tunnistettu riskitekijä on erityisesti rannikolta 50–100 km alueella esiintyvä sulfidisavi, joka happea saadessaan muodostaa rikkihappoa ja kiihdyttää syöpymistä. Kuvassa 7.6 on esitetty sulfidisaven aiheuttama kaksoissilmukan syöpymä. Hapettomassa tilassa oleva sulfidisavi on väriltään mustaa ja pH-arvoltaan lähellä neutraalia. Hapettuneen, väriltään harmaan sulfidisaven pH-arvo voi olla alle 4,0. Sulfidisaven aiheuttamaan korroosioon vaikuttaa maa-ainesten käsittely ja haruskaivantojen pohjanvahvistuksissa ja täytöissä käytettyjen maa-ainesten laatu. Joissain tapauksissa huonolaatuisia maamassoja ei ole perustustöiden yhteydessä vaihdettu, vaan hapettuva sulfidisavi on päässyt suoraan kosketukseen teräsosien kanssa aiheuttaen suhteellisen nopeasti etenevän korroosioilmion.



**Kuva 7.6.** Sulfidisaven syövyttämä kaksoissilmukka. (Fingrid, 2015).

Haruskorroosion estämiseksi on kehitetty teräsbetonirakenteiset pilariharusankkurit, joissa maanalaiset teräsosat ovat täysin betonilla suojattuna. Pilariharusankkureita käytetään valtaosassa Fingridin uusia ja korjattavia harusperustuksia. Fingrid on teettänyt noin 7,5 vuoden ajan käytössä olleille pilariharusankkureille raudoituksen kuntotutkimuksen, jonka perusteella betonipeitteen on todettu suojaavan maanalaisia teräsosia korroosion vaikutukselta ilman havaittavia muutoksia. Haruskorroosioon liittyvien ongelmien ja kunnossapitotarpeiden voidaankin olettaa poistuvan vähitellen vanhojen voimajohtojen uusimisen yhteydessä.

Haruskorroosiosta vuosien mittaan kertyneet havainnot ja yhteiset tekijät tulee huomioida uusien harusperustusten suunnittelussa ja korroosiosuojauksessa. Kuparisten maadoituselektrodien ja teräsrakenteiden välinen galvaaninen tasavirta voidaan jatkossakin katkaista harusperustuksissa eristyspalojen avulla. Pylväsalkojen harusperustuksia ei ole toistaiseksi eristetty pylväsrakenteesta, mutta eristyslevyjen käytön mahdollisuutta tulisi tarkastella. Maadoitusten ja harusperustusten keskinäisiä vaikutuksia tulisi tarkastella tarkemmin ja selvittää voidaanko teräsputkipaaluja käyttää osana maadoitusta ilman erillisiä kuparielektrodeja, jolloin eri metalleista muodostuva galvaaninen pari voidaan välttää. Tässä tapauksessa myös pylvään läheisyyteen toteutettavat potentiaalinhjaukset tulisi toteuttaa teräselektrodeilla.

Erityistä huomiota tulee kiinnittää myös happamien sulfaattimaiden esiintymisalueilla tai muuten aggressiiviseksi oletetuissa maaperissä tehtäviin maaperätutkimuksiin ja niiden yhteydessä suoritettaviin näytteenottoihin. Perustustavan valinnan ja riittävän korroosiosuojauksen suunnittelun edellytyksenä on tunnistaa tavanomaisesta poikkeavat olosuhteet.

## 7.5 Teräspäristusten korroosiosuojaus

Teräspäristusten korroosiosuojauksen yleisiä menetelmiä ovat:

- injektointiaineesta, juotoslaastista tai betonista muodostettu suojapeite
- korroosiovaran huomiointi mitoituksessa
- muut pinnoitteet
- muut varotoimenpiteet

Kaikkia edellä mainittuja korroosiosuojauksen menetelmiä on hyödynnetty Suomessa toteutetuissa voimajohtojen teräspäristyksissä riippuen rakenteiden erityispiirteistä. Kansainvälisesti voimajohtojen erityiskohteiden korroosiosuojaukseen on kehitettyjä konsepteja, kuten virtajohtimista indusoituvalla virralla tai aurinkopaneeleilla toteutettava tasavirtaa syöttävä katodinen suojaus, jota käytetään yleisimmin maanalaisten metallisten putkistojen yhteydessä. Uhrimetallina toimivia rakenteeseen kiinnitettäviä anodeita on käytetty laivojen ja putkistojen lisäksi voimajohdoilla myös Suomessa. Tässä alaluvussa keskitytään käsittelemään huoltovapaita ja laajamittaiseen käyttöön soveltuvia menetelmiä.

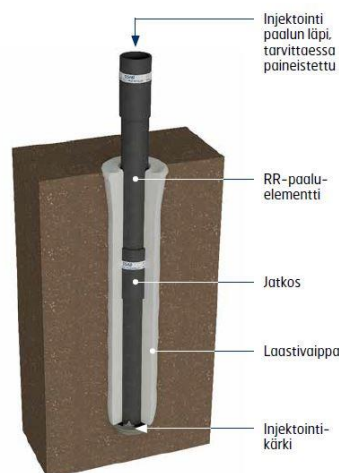
Suojapeitettä käytettäessä voidaan tarvittavan kerroksen muodostamiseen käyttää tapauskohtaisesti injektointiainetta, juotoslaastia tai betonia. Kyseistä menetelmää käytetään perinteisten betonipäristusten lisäksi läpi-injektoitavilla pora-ankkureilla, joissa rakenne päristuu korroosiosuojauksen lisäksi myös mekaanisilta ominaisuuksiltaan porareikään injektointivaan laastiin. Menetelmä soveltuu kuitenkin myös teräspäristkipaalujen ja ruuvipaalujen korroosiosuojaukseen olosuhteiden edellyttäessä lisäsuojauksia. Kyseisillä rakenteilla menetelmä ei kuitenkaan sovellu tavanomaisten maaperien ensisijaiseksi korroosiosuojaukseksi rakenteilla saavutettavien hyötyjen vähentyessä ylimääräisten työvaiheiden seurauksena. Paalutusohje 2016 mukaan taulukon 7.3 mukaisilla suojakerroksen paksuuksilla voidaan

olettaa saavutettavan teräspaalulle täydellinen suojaus 100 vuoden käyttöiälle tavanomaisissa maaperäolosuhteissa (RIL, 2016).

**Taulukko 7.3.** Ulkopuolisen suojakerroksen vähimmäispaksuudet tavanomaisessa maaperässä. (RIL, 2016).

Paaluun kohdistuva rasitus	Puristusrasitus	Vetorasitus
Sementtipohjainen injektointiaine	20 mm	30 mm
Juotoslaasti	35 mm	40 mm
Betoni	50 mm	50 mm

Teräsputkipaalut voidaan täyttää sisäpuolelta betonilla korroosiosuojauksen lisäksi lisäjäykkyyden saavuttamiseksi. Tarvittaessa paalujen sisäosa voidaan raudoittaa ja toteuttaa betonoituna liittorakenteena. Kuvassa 7.7 on esitetty korroosiosuojauksen ja lisäjäykkyyden parantamiseksi toteutetun paalun ulkopuolisen laastivaipan periaate. Konsepti on mahdollinen vaihtoehto teräsputkipaaluperustusten lisäsuojaukseen happamilla sulfaattimailla. Kyseisissä tapauksissa korroosiosuojauksen tarve ulottuu tyypillisesti muutaman metrin syvyydelle maanpinnasta, jolloin voidaan yksinkertaisempaan vaihtoehtona asentaa teräsputkipaalun ulkopuolelle teräksinen suojaputki ja betonoida ainoastaan muutaman metrin mittainen osuus.



**Kuva. 7.7.** Teräsputkipaalun ulkopuolinen laastipeite. (SSAB, 2022).

Kuvassa 7.8 on esitetty ruuvipaalulle sementtilaastilla toteutettava lisäsuojaus. Ruuvipaalun siipeen on hitsattu porareikää laajentava lisäkappale. Laajentunut porareikä täyttyy ruuvipaalun asennuksen yhteydessä sementtilaastilla maanpinnalle asennetusta laastiastiasta.



**Kuva 7.8.** Ruuvipaalun korroosiosuojaus laastipeitteellä. (Magnum Piering, 2022).

Rakentamisvaiheen kannalta yksinkertaisin teräsperustusten korroosiosuojauksen menetelmä on materiaalivahvuuksien ylimitoitus huomioimalla riittävä korroosiovara. Ohjeellina arvoina voidaan hyödyntää tavanomaisilla maaperillä aiemmin taulukossa 7.2 esitettyjä keskimääräisiä syöpymiä. Poikkeavissa olosuhteissa, kuten happamilla sulfaattimailla korroosiosuojauksen tarve ja menetelmät tulee suunnitella aina yksilöllisesti. Fingridin hankkeissa teräsputkipaaluperustuksissa käytettäväksi korroosiovaraksi on määritelty vähintään 4,0 mm ylimitoitus. Ylimitoitus voidaan seinämävahvuuksien kasvattamisen lisäksi toteuttaa käyttämällä lujempia teräslaatuja, jolloin rakenteellinen kestävyys saavutetaan ohuemalla seinämällä ja laskennallinen korroosiovara kasvaa.

Muiden pinnoitteiden osalta tyypillisiä ratkaisuja ovat maanalaisten osien kuumasinkitys tai erilaiset epoksipohjaiset tai vastaavat pinnoitteet. Kuumasinkitystä käytetään perinteisesti esimerkiksi harusperustuksien kaksoissilmukoissa ja epoksipinnoitteita TITAN-ankkureiden tangoissa. Lyömällä tai poraamalla asennettavissa tuotejärjestelmissä pinnoitteet kuitenkin usein vaurioituvat asennuksen aikana ja saattavat johtaa vauriokohtien pistesyöpymiin.

Muihin tyypillisiin varoimenpiteisiin kuuluvat perustuksen ympärille suoritettavat massanvaihdot. Esimerkiksi teräsputkipaalun ympäriltä voidaan poistaa aggressiiviseksi epäilty savimaa ja korvata täyttö murskeella tai moreenilla. Happamien sulfaattimaiden kerros ei tyypillisesti ulotu muutamaa metriä syvemmälle, jolloin massanvaihto on toteutettavissa kohtuullisen helposti. Menetelmän toimivuudesta ei kuitenkaan ole yksiselitteistä näyttöä ja riskinä voidaan pitää mahdollisen happaman huokosveden siirtymistä vaihdettuun maa-



ainekseen. Näissä tilanteissa varmempi vaihtoehto on asentaa erillinen suojaputki ja betonoida maaperän vaikutuksesta korroosiolle altistuva teräsrakenteen yläosa.

## 7.6 Kunnonhallinta

Fingridin voimajohdoille suoritetaan säännöllisen tarkastuskierron mukaiset maastotarkastukset. Tarkastusten tavoitteena on tuottaa kunnossapidon suunnittelua varten tarvittavat tiedot voimajohdon rakenteiden kunnosta, johtoauekan kasvustosta, rakennustoiminnasta voimajohtojen lähellä, sekä muista käyttövarmuuteen ja ulkopuolisten turvallisuuteen vaikuttavista tekijöistä. Voimajohtojen maastotarkastus suoritetaan voimajohdosta riippuen yleisimmin 2–3 vuoden tarkastusvälillä. Perustusten osalta havainnoidaan pilarien ja harusankkureiden asento ja painumat, betoni- ja teräsosien kunto, puisten tukirakenteiden kunto, täytemaat, sekä mahdollisten mekaanisten suojausten tarve. Maastotarkastus suoritetaan kävelen, eikä sen yhteydessä tutkita perustusrakenteita maanrajaa syvemmältä.

Voimajohdoille suoritetaan yleistarkastusten lisäksi tarvittaessa kuntokartoituksia ja erikoistarkastuksia, kuten haruskorroosiotarkastus. Haruskorroosiotarkastuksessa mitataan harusvartaiden ja kuparimaadoitusten muodostaman galvaanisen piirin tasavirta ja kaivetaan haruslaatta esiin harusvartaiden ja haruslaatan u-pulttien kunnan tarkastamiseksi. Haruskorroosiotarkastuksia suoritetaan voimajohdoilla epäiltäessä teräsosien syöpymistä kuntotietojen perusteella tai aiemmin tutkimattomien pylväspaikkojen sijaitessa syövyttäväksi oletetulla maaperällä. Tutkimuksia suoritetaan erityisesti oletetuilla happamilla sulfaattimailla.

Diplomityössä käsiteltävistä uusien teräsperustusten rakenteista on Fingridin voimajohdoilla kirjoitushetkellä käytössä teräsputkipaaluja, sekä harusperustuksina läpi-injektoituja poraankkureita. Kyseiset rakenteet ovat 2010- ja 2020-luvuilla rakennettuja, eikä niiden kunnonhallinnasta ole vielä muodostunut pitkäaikaista kokemuseräistä tietoa.

Pora- tai lyöntipaalutuksella asennettujen teräsputkipaalujen yläosan kunto voidaan tarkastaa kaivamalla perustus auki riittävältä syvyydeltä. Teräsputkipaalurakenteiden erikoistarkastukset ovat suositeltavia ensimmäisten rakenteiden ikääntyessä. Tutkittavaksi tulisi valita maaperän olosuhteiden kannalta haasteellisimpia pylväspaikkoja, kuten oletettuja tai näytteenotoilla todettuja sulfidimaita. Kuvassa 7.9 on esitetty Väyläviraston kohteessa ultraäänellä toteutettu seinämävahvuuden mittaus. Menetelmä on todettu korroosion määrittämisen

kannalta riittävän tarkaksi verrattaessa irrotettuihin koekappaleisiin. Menetelmä soveltuisi hyvin myös voimajohtokohteisen teräsputkipaalujen erikoistarkastuksiin. Kaivannosta tulisi ottaa maaperänäytteet ja teräsputkesta näytepala, mikäli havaitaan odotetusta taulukkoarvojen mukaisesta syöpmästä poikkeavia muutoksia. Näin voidaan selvittää tarkemmin korroosioon vaikuttaneet tekijät ja arvioida muille pylväspaikoille suoritettavien tarkastusten ja mahdollisten jatkotoimenpiteiden tarvetta.



**Kuva 7.9.** Teräsputkipaalun seinämävahvuuden mittaaminen. (Väylävirasto, 2020).

Läpi-injektoidut pora-ankkurit ovat oikein toteutettuna kauttaaltaan sementtilaastin suojaamia, jolloin korroosion riski voidaan olettaa vähäiseksi. Ensimmäisten asennettujen rakenteiden ikääntyessä on mahdollista suorittaa kuntotutkimus, jossa uudella harusperustuksella korvattava ankuri kaivetaan riittävältä syvyydeltä esiin ja tutkitaan laboratorio-olosuhteissa mahdollisen teräsmateriaalin väsymisen ja syöpmien selvittämiseksi. Kuntotutkimukseen tulisi valita maaperän olosuhteiden kannalta haasteellisimpia pylväspaikkoja, kuten oletettuja sulfidimaita, sekä erilaisille kuormitusolosuhteille altistuneita harusankkureita. Vastaava kuntotutkimus soveltuu harustettujen pylväiden ruuvipaaluperustuksille, joita ei toistaiseksi ole käytetty Fingridin voimajohdoilla. Harustettujen pylväiden perustusten vaihto näytekappaleiden ottamiseksi on kustannuksiltaan kohtuullista, eikä lähtökohtaisesti edellytä käyttökeskeytystä.

Ensimmäiset nykyisen kaltaisella rakenteella toteutetut koerakenteet lähestyvät pian kymmenen vuoden ikää, jolloin ensimmäisten erikoistarkastusten suorittaminen on perusteltua tulevana vuosina. Havaintojen perusteella voidaan arvioida lisätarkastusten tarvetta ja toisaalta vaikuttaa jatkossa käytettävien tyyppirakenteiden korroosiosuojauksen määrittelyyn.

## 8 Kustannukset

Luvussa käsitellään voimajohtojen perustusten kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ja niiden vaikutusta rakentamis- ja elinkaarikustannuksiin. Teräsperustusten kustannuksista voimajohtohankkeissa ei ollut diplomityön aikana käytettävissä riittävän vertailukelpoista aineistoa rakenne- tai maaperäkohtaisten kustannuslaskelmien laatimiseksi. Fingridin hankkeissa tähän mennessä toteutetut teräsperustukset ovat olleet voimajohtourakasta erillään tilattuja koerakenteita tai urakoitsijan rakentamisvaiheessa yksittäisten pylväspaikkojen erityisolosuhteisiin vaihtamia toteutustapoja. Rakennusmateriaalien kustannusten vaihtelu on ollut kirjoitushetkellä merkittävää ja aiemmat kustannustiedot ovat todennäköisesti osin vanhentuneita. Kustannuksia tulisi tarkastella tyyppirakenteiksi valittavien lopullisten ratkaisujen tarkentuessa ja otettaessa rakenteet mukaan voimajohtohankkeiden tarjouskyselyihin. Urakoitsijoiden laatimien tarjousten myötä on mahdollista saada vertailukelpoista ja ajantasaista tietoa eri rakennevaihtoehtojen rakentamiskustannuksista.

Luvussa esitetyt likimääräiset arviot teräsperustusten taloudellisesta kannattavuudesta erilaisissa maaperän olosuhteissa perustuvat toteutuneiden voimajohtohankkeiden aineistoihin ja raportteihin, sekä erityisesti haastatteluilla kerättyihin havaintoihin ja näkökulmiin. Haastattelujen perusteella perustustavalla ja sen yleisellä toteutettavuudella voi olla merkittävä vaikutus työmaan sujuvaan etenemiseen ja sen myötä rakentamisvaiheen kokonaiskustannuksiin, jolloin perustuksen suorat rakentamiskustannukset eivät aina määritä projektin kokonaisuuden kannalta urakoitsijalle edullisinta vaihtoehtoa. Teräsperustusten kehitystyön voidaan todeta olevan vielä kesken, eikä rakenteita ole hyödynnetty Suomessa merkittävässä mittakaavassa, jolloin kustannustehokkaimman perustustavan valintaan vaikuttavista tekijöistä voidaan olettaa saatavan aiempaa tarkempaa tietoa tulevina vuosina.

Rakentamiskustannuksiltaan edullisimman perustustavan valintaan vaikuttavat:

- perustuskuormat (rakenteiden mitoitus)
- maalaji (kerrosten leikkauslujuuden tai kitkakulman vaikutus mitoitukseen)
- kantavan kerroksen sijainti (paalupituudet)
- korroosiosuojauksen tarve (aggressiivinen maaperä)

- tarvittavat koekuormitukset
- samalla perustustavalla toteutettavien pylväspaikkojen kokonaismäärä
- samalla perustustavalla toteutettavien pylväspaikkojen keskinäinen etäisyys
- vaikutus muihin työvaiheisiin ja sää- tai aikatauluriskeihin

Taulukossa 8.1 on esitetty likimääräinen arvio teräsperustusten rakentamiskustannuksista erilaisissa maaperän olosuhteissa verrattuna betoniperustukseen.

**Taulukko 8.1.** Teräsperustuksen kustannus verrattuna vastaavaan betoniperustukseen.

Maaperä	Harustetut pylväät	Vapaasti seisovat pylväät
Normaali	Poikkeuksetta kalliimpi.	Edullisempi, jos kallio lähellä.
Turvekerros 4 m	Hieman kalliimpi.	Edullisempi, jos kallio lähellä.
Turvekerros 10 m	Hieman edullisempi.	Edullisempi, jos kallio lähellä.
Savi/siltti 20 m	Hieman edullisempi.	Hieman edullisempi. Paalupituu- den kasvaessa edelleen kalliimpi.

Harustetuilla pylväillä betonielementeillä toteutettu perustus on edelleen kilpailukykyinen vaihtoehto normaaleissa maaperän olosuhteissa. Harustettujen pylväiden betonielementtien massat ja kustannukset ovat kohtuullisia, sekä asennustyö hyvään maaperään nopeaa ja yksinkertaista. Asennustyö on toteutettavissa haastavassakin maastossa kaivinkoneella, eikä pylväspaikalle ole kantavissa olosuhteissa muidenkaan työvaiheiden kannalta tarvetta rakentaa työmaatietä. Käytettäessä teräsperustusta siirrettävän kaluston ja tarvikkeiden määrä kasvaa porakaluston lisäksi ankkurien injektoinnissa tarvittavan laastin sekoitus- ja pumppauskaluston myötä. Injektoitavat pora-ankkurit edellyttävät myös jälkikäteen suoritettavaa koekuormitusta. Teräsperustusten hyödyt tulevat esiin merkittäviä massanvaihtoja ja paalutusta edellyttävillä pylväspaikoilla, jolloin säästytään elementtiperustuksilla tarvittavilta ja kustannusten kannalta merkittävilta mursketäytöiltä ja erillisiltä paalutuksilta. Kyseisten pylväspaikkojen perustustyöt suoritetaan lähtökohtaisesti talviaikaan, jolloin vaikeakulkuisille pehmeiköille voidaan rakentaa samalla muidenkin työvaiheiden kannalta tarvittavat talvitiet. Varsinaisten perustusmateriaalien ja asennustyön kustannusten lisäksi rakenteen kannattavuuteen vaikuttaa projektin aikataulu ja teräsperustusten nopeammalla rakentamisella saavutettavat kustannushyödyt esimerkiksi käytettäessä samoja talviteitä pylväsnostoihin ja johdintöihin.

Teräsuperustusten kannalta edullinen ratkaisu olisi myös harusankkureiden toteutus läpi-injektoitavilla pora-ankkureilla rikkonaisessa kalliiossa. Perinteisesti maanpinnan läheisyydessä esiintyvällä ehjällä kalliolla käytetään kevyellä kalustolla porattavia ja suhteellisen lyhyellä tartuntapituudella juotettavia kalliolenkkejä ja kaksoissilmukoita. Kallion osoittautuessa porauksen aikana huonolaatuiseksi joudutaan perustuspaikka louhimaan ja asentamaan elementtiperustus. Kyseisissä kohteissa läpi-injektoitava pora-ankkuri voidaan asentaa myös huonolaatuiseen kallioon pidemmän tartuntapituuden ansiosta ja säästyä kalliilta louhinnalta ja elementin asennukselta. Haasteena on, ettei kallion laadusta ole yleensä tarkkaa tietoa ennen kaivannon avaamista ja porauksen suorittamista. Kaluston siirtokustannukset nousevat suuriksi toteutettaessa yksittäisiä perustuksia, jolloin menetelmä soveltuisi parhaiten huonolaatuisen kallion esiintyessä usealla pylväspaikalla. Kallion laadun varmistaminen etukäteen porakonekairauksella jokaisella pylväspaikalla muodostaisi kuitenkin maaperätutkimuksiin ylimääräisen työvaihteen ja lisäisi tutkimusten kustannuksia.

Vapaasti seisovien pylväiden valuperustukset ovat huomattavasti harustettujen pylväiden elementtiperustuksia massiivisempia. Tyypillisesti betonoitavat tilavuudet vaihtelevat pylväsrakenteesta, maaperästä ja perustuskuormista riippuen välillä 20–70 m<sup>3</sup>. Haastattelujen perusteella teräspalkkipaaluperustukset ovat lähtökohtaisesti taloudellisesti kannattavia paa-lutusta vaativilla pylväspaikoilla ja kannattavuus paranee suuremmilla perustuskuormilla, jolloin vastaavien valuperustusten koko ja paalumäärä kasvaa. Vapaasti seisovien pylväiden kannalta erityisen edullinen on tilanne, jossa ehjä kallio esiintyy kohtuullisella syvyydellä ja porapaalut saadaan injektoitua kallioon materiaalimenekin säilyessä vähäisenä. Kasvavat paalupituudet heikentävät teräsuperustusten kannattavuutta ja yli 20 m paalupituuksilla voi olla kannattavaa tarkastella koheesiopaalujen soveltuvuutta kohteeseen.

Erityisesti teräspalkkipaalujen tapauksessa suunnitteluvaiheessa valitulla mitoituksella on merkittävä vaikutus toteutuksessa tarvittavaan kalustoon, sekä materiaalimenekkiin. Perustusten geoteknistä kestävyyttä mitoitettaessa lähtötietoina käytettävien maaperätutkimuksien laadulla ja luotettavuudella on keskeinen merkitys, jotta voidaan välttää liiallinen ylimitoitus. Korroosion kannalta tulisi tunnistaa riittävän luotettavasti lisäsuojauksia vaativat erityiskohteet ja välttää ylimitoittamasta tavanomaisiin olosuhteisiin suunniteltavia rakenteita. Taulukossa 8.2 on havainnollistettu porapaalun halkaisijan ja seinämävahvuuden vaikutusta porapaalun massaan. Pienellä paalukoolla valitulla korroosiovaralla ja

seinämävahvuudella on vähäinen merkitys teräksen kokonaismassaan, mutta erityisesti suurilla koheesiopaaluilla valitun paalukoon vaikutus kokonaiskustannuksiin kasvaa.

**Taulukko 8.2.** Halkaisijan ja seinämävahvuuden vaikutus porapaalun massaan.

Tyyppi	RD170/ 10	RD170/ 12,5	RD220/ 10	RD220/ 12,5	RD320/ 10	RD320/ 12,5	RD600/ 8	RD600/ 10	RD600/ 12,5
kg/m	39	48	52	64	77	96	119	148	184

Haastattelujen perusteella teräspäristysten käyttö haastavissa maaperän olosuhteissa saattaa vähentää urakoitsijoiden tarjousvaiheessa hinnoittelemaa säähän ja rakentamisen aikatauluihin liittyviä riskejä. Teräspäristuksia pystytään toteuttamaan lyhyenkin talven aikana suurempia määriä kuin perinteisiä valu- tai elementtipäristuksia. Riskien väheneminen edellyttää kuitenkin riittävässä laajuudessa suoritettavia maaperätutkimuksia ja laadukkaita suunnitelmia, jolloin vältytään esimerkiksi rakentamisvaiheessa yllättäen kasvavilta paalupituuksilta. Laadukkaiden suunnitelmien ja helpommin toteutettavien rakenteiden koettiin lisäävän halukkuutta tarjota olosuhteiltaan haastaviakin hankkeita toimialan ja tarjolla olevien projektien määrän kasvaessa merkittävästi lähivuosina.

Muiden elinkaarikustannuksiin vaikuttavien tekijöiden kannalta betoni- ja teräspäristyksillä ei ole merkittävää eroa käytettäessä samaa suunnitteluaikaa ja siihen perustuvaa mitoitusta. Korroosiota käsittelevässä luvussa on suositeltu teräspäristysten erikoistarkastusten suorittamista ensimmäisten rakenteiden ikääntyessä. Tulevissa voimajohtohankkeissa riskialueilta otetaan maaperänäytteet osana maaperätutkimuksia, jolloin todelliset riskikohteet saadaan määritettyä jo suunnitteluvaiheessa ja rakenteen toimivuuden varmistamiseksi tehtävät erikoistarkastukset voidaan kohdistaa näihin olosuhteisiin. Yksittäisten ikääntyvien rakenteiden tarkastusten kustannukset ovat nykyarvoon diskontattuna vähäisiä, eivätkä tässä tapauksessa vaikuta merkittävästi voimajohdon elinkaarikustannuksiin. Toisena näkökulmana voidaan todeta, että teräspäristysten tapauksessa vältetään yksittäisten virheellisesti toteutettujen betonipäristysten rapautumisesta johtuvat kunnossapitokustannukset. Elinkaaren päässä syntyvien voimajohdon purkukustannuksien kannalta teräspäristykset ovat todennäköisesti hieman edullisempia sekä purkutöön että syntyvien jättemateriaalien osalta, mutta kyseiselle ajanjaksolle diskontattuna kustannuserot ovat merkityksettömiä.

## 9 Johtopäätökset

Diplomityötä varten haastateltiin Fingridin projektipäälliköitä ja voimajohtoasiantuntijoita, sekä kolmen eri pääurakoitsijan projektipäälliköitä. Haastateltujen henkilöiden kokemus voimajohtojen teräsperustuksista vaihteli määrällisesti ja keskittyi osittain erilaisiin rakenneratkaisuihin. Haastatteluissa esiin tulleet kokemukset toteutetuista hankkeista olivat varsin yhtenäisiä, eikä näkemyksissä esiintynyt merkittäviä poikkeamia. Keskusteluissa esiin tulleet näkökulmat tukivat kirjallisuuteen pohjautuvaa teoretietoa tuoden samalla esiin voimajohtorakentamiseen liittyviä ja muusta infrarakentamisesta poikkeavia erityispiirteitä.

Ensimmäinen voimajohtopylvään perusratkaisun valintaan vaikuttava tekijä on yleissuunnittelun aikana valittava pylväslaji. Pääasiallisesti käytettävät rakenteet valitaan jo voimajohtojen esisuunnittelun aikana ja yleissuunnittelussa tarkastellaan pylväslajin kannalta muun muassa pelto- ja kirstuspylväiden tarvetta ja sijoittelua. Pylväslajin ja pylvääseen kohdistuvien kuormitusten perusteella määräytyvät joko käytönrajojen perusteella määriteltävät tai pylväskohtaisesti laskettavat perustuskuormat. Taulukossa 9.1 on esitetty perusratkaisujen soveltuvuus eri pylväslajeille ja perustuskuormille, sekä mahdolliset rajoitteet.

**Taulukko 9.1.** Pylväslajin ja perustuskuormien vaikutus perusrakenteen valintaan.

	<b>Betoniperustus</b>	<b>Teräsputkipaalut (+pora-ankkurit)</b>	<b>Ruuvipaalut</b>
<b>Pylväslaji</b>			
Harustettu	Yleisin rakenne	Soveltuu (toteutettu)	Soveltuu pilotoitavaksi (Fingridillä ei toistaiseksi kokemusta)
Peltopylväs	Yleisin rakenne	Soveltuu (toteutettu)	Vaatii koerakenteita
Vapaasti seisova	Yleisin rakenne	Soveltuu (toteutettu)	Vaatii koerakenteita
<b>Perustuskuormat</b>			
Tavanomaiset kuormat	Yleisin rakenne	Soveltuu (toteutettu)	Soveltuu pilotoivaksi (koerakenteet)
Suuret kuormat (400 kV kirstuspylväät)	Yleisin / ensisijainen rakenne	Edellyttää lisää koke- musta. Liian suureksi kasvavat paalukoot mahdollinen rajoite.	Ei sovellu ennen tavan- omaisille kuormille teh- tyjä koerakenteita ja pit- käaikaista kokemusta.

Teräsuperustukset soveltuvat oikein mitoitettuna lähtökohtaisesti kaikille 110–400 kV voimajohtojen pylväslajeille. 400 kV kiristyspylväillä perustuskuormat kasvavat kuitenkin huomattavan suureksi ja teräsputkipaaluperustuksen mitoitus voi vaatia huomattavan suuria ja asennuksen kannalta haastavia paalukokoja. 400 kV kiristyspylväät ovat myös voimajohdon viankorjauksen kannalta vaikeasti korjattavia rakenteita, joten uusia perustusratkaisuja pyritään kehittämään ja pilotoimaan ensin muille rakenteille. Tulevia teräsputkipaalujen ja pora-ankkureiden tyyppirakenteita kehitetään ensimmäisessä vaiheessa yleisimmille harustetuille pylväsrakenteille, joita pyritään käyttämään yleissuunnittelussa valtaosalla pylväspaikoista. Ruuvipaaluista ei ole toistaiseksi kokemusta Fingridin hankkeissa, joten ensimmäisten koe-rakenteiden toteutus on suositeltavaa esimerkiksi 110 kV harustetuille pylväille. Riittävän kokemuksen myötä on mahdollista siirtyä vaativampiin käyttökohteisiin. Kansainvälisellä tasolla ruuvipaaluilla on toteutettu erittäin vaativiakin voimajohtopylväiden perustuksia, joten rakenteet todennäköisesti soveltuvat oikealla mitoituksella kaikille pylväslajeille.

Pylväslajin ja perustuskuormien asettamien reunaehtoien jälkeen seuraavana ja merkittävimpänä tekijänä perustusrakenteen valintaan vaikuttaa maaperätutkimusten perusteella määritetyt maaperän ominaisuudet. Taulukossa 9.2 on esitetty maaperän ominaisuuksien vaikutus perustusrakenteen valintaan yleisimmissä olosuhteissa.

**Taulukko 9.2.** Maaperän ominaisuuksien vaikutus perustusrakenteen valintaan.

Maaperä	Betoniperustus	Teräsputkipaalut (+pora-ankkurit)	Ruuvipaalut
Normaali	Soveltuu / yleensä edullisin	Soveltuu / harvoin kustannustehokas	Soveltuu / kivinen maaperä rajoitteena
Hienojakoinen	Mahdollinen pohjanvahvistus	Tukipaalut vaativat kantavan kerroksen	Soveltuu hyvin
Ehjä kallio	Soveltuu (kalliotartunnat)	Soveltuu	Ei sovellu
Rikkinainen kallio	Ei sovellu (louhinta)	Soveltuu (riittävä ankkurointipituus)	Ei sovellu
Matala pehmeikkö	Soveltuu / vaatii massanvaihdon	Soveltuu / merkittävä etu	Edellyttää soveltuvan kantavan kerroksen
Syvä pehmeikkö	Soveltuu / vaatii paalutuksen	Soveltuu / merkittävä etu	Edellyttää soveltuvan kantavan kerroksen
Aggressiivinen maaperä	Soveltuu (riittävä XA-luokka)	Haasteellinen (korroosiosuojaus)	Haasteellinen (korroosiosuojaus)



Taulukossa esitetyn mukaisesti teräsperustusten merkittävimmät hyödyt saavutetaan tämänhetkisen tiedon ja kokemusten perusteella pohjanvahvistusta vaativilla pehmeiköillä tai savimailloilla ja vapaasti seisovien pylväiden tapauksessa myös normaalilla maaperällä kallion esiintyessä kohtuullisella syvyydellä. Perustustöiden työvaiheista jäävät betoniperustuksiin verrattuna pois kaivuutyöt, erillinen paalutus ja massanvaihto, sekä elementtien asennus tai raudoitus- ja betonointityö. Käyttämällä teräsperustuksia on mahdollista vähentää samalla kaivantoihin ja pohjaveteen liittyviä turvallisuus- ja laaturiskejä. Hyvälaatuisessa maaperässä harustettujen pylväiden betoniset elementtiperustukset ovat edelleen toteutuksen kannalta yksinkertainen ja teknistaloudellisesti järkevä vaihtoehto. Vapaasti seisovilla pylväillä kannattavuus riippuu vastaavan valuperustuksen koosta ja kalliopinnan sijainnista. Vaihtoehdoisen teräsperustuksen kannattavuus paranee valuperustuksen kokoluokan kasvaessa ja teräsputkipaalujen pituuksien säilyessä kohtuullisina.

Pehmeikköjen perustustyöt suoritetaan tyypillisesti talviaikaan, eivätkä teräsperustukset pääsääntöisesti ratkaise pehmeikköihin liittyviä haasteita kulkureittien suhteen, vaan ensisijainen ja kustannustehokkain ratkaisu on edelleen jäädyttää kantava talvitie. Toisaalta kantavia kulkureittejä tarvitaan joka tapauksessa myös seuraavien työvaiheiden, kuten pylväs-kasausten- ja nostojen kannalta. Kevyimmällä kalustolla asennettava vaihtoehto on ruuvi-paaluperustus ja useille pehmeiköille päästään sulanakin aikana asennuksen mahdollistavalla leveätelaisella kaivinkoneella. Rakenteesta ei kuitenkaan toistaiseksi ole johtopäätösten tekemiseksi riittävää kokemusta Suomessa rakennetuilla voimajohdoilla, vaan ratkaisua tulisi pilotoida soveltuvissa tulevilla hankkeissa. Ruuvipaalujen käyttökohteiden rajoitteena on soveltuva riittävän hienojakoinen maaperä, jolloin rakennetta ei voida käyttää kallion esiintyessä pian pehmeän maakerroksen alla.

Merkittävässä osassa voimajohtohankkeita korvataan käyttöikänsä päähän tulevia tai siirtokapasiteetiltaan tulevaisuuden tarpeisiin riittämättömiä voimajohtoja. Perustustyöt suoritetaan näissä hankkeissa usein ensimmäisenä työvaiheena ennen olemassa olevan voimajohdon purkua. Teräsputkipaalujen asennuksessa käytettävä kalusto ei lähtökohtaisesti tarjoa etua teräsbetonipaaluihin nähden, vaan paalutuksen ajaksi joudutaan usein järjestämään siirtokeskeytys jännitteisten johtimien etäisyydestä johtuen. Keskeytyksen aikana suoritettavien töiden aikana korostuu työn huolellinen suunnittelu ja materiaalien valmistelu, joka edellyttää yllättävien muutostilanteiden välttämiseksi laadukkaita maaperätutkimuksia ja niihin perustuvia suunnitelmia. Toisaalta ruuvipaalujen ja injektoitavien ankkurien käyttö saattaa

tulevaisuudessa tarjota hyödyllisiä ratkaisuja näihin kohteisiin ja mahdollistaa matalammat työskentelykorkeudet.

Teräsperustusten potentiaaliset käyttökohteet sijoittuvat pääsääntöisesti haastaviin maaperän olosuhteisiin ja niiden suunnittelu edellyttää aiempaa laajempia ja tarkempia maaperätutkimuksia. Luotettavat maaperätutkimukset vähentävät samalla hankkeiden riskejä ja rakentamisvaiheessa vastaan tulevia muutostilanteita. Aiemmin suoritettujen paino- tai puristin-heijarikairausten lisäksi teräsperustusten suunnittelua varten tehdään tarvittaessa lisätutkimuksina siipikairaukset pehmeiden maakerrosten leikkauslujuuden määrittämiseksi, sekä porakonekairaukset kalliopinnan sijainnin ja laadun varmistamiseksi. Happamien sulfaattimaiden esiintymisalueella ja muiden mahdollisesti aggressiivisten maaperien tapauksessa otetaan maaperänäytteet korroosioriskin kartoittamiseksi ja tarvittavan lisäsuojauksen suunnittelemiseksi.

Voimajohtojen teräsperustusten suunnittelua ja rakentamista tulisi kehittää Fingridin voimajohtohankkeissa ottamalla käyttöön kirjoitushetkellä suunnitteluvaiheessa olevat ensimmäiset tyyppirakenteiden suunnitelmat ja kehittämällä rakenteet lopulliseen muotoon ensimmäisistä hankkeista saatavien havaintojen ja kokemusten perusteella. Valmiiksi suunniteltujen tyyppirakenteiden valikoimaa tulisi laajentaa tämän jälkeen kattamaan harustettujen pylväiden lisäksi kattamaan yleisimmät vapaasti seisovat pylväät. Yhtenäisten mitoitusperiaatteiden määrittely ja tarvittavien liitososien, kuten paaluhattujen detaljien suunnittelu vähentää urakoitsijoiden suorittaman suunnittelutyön tarvetta.

Ympäristövaikutusten näkökulmasta teräsperustukset vähentävät materiaaleista muodostuvaa hiilijalanjälkeä kaikissa teknistaloudellisesta näkökulmasta kannattavissa käyttökohteissa, jolloin näkökulmat ajavat kehitystä samaan suuntaan. Rakennusmateriaalien hiilijalanjäljessä on odotettavissa merkittäviä kehitysaskelia lähitulevaisuudessa, jolloin tilannetta tulisi tarkastella uudestaan uusien ympäristöystävällisten vaihtoehtojen tullessa laajemmin kaupallisille markkinoille. Maaston muokkausta ja pylväspaikan lähiympäristölle aiheutuvia tilapäisiä ympäristövaikutuksia voidaan vähentää teräsperustusten avulla kaikissa kohteissa ja erityisesti haastavilla pehmeiköillä, jota voidaan pitää itsessään keskeisenä tulevaisuuden ajurina rakenteiden laajamittaisempaan hyödyntämiseen.

Perustusrakenteiden elinkaaren kannalta teräsperustusten riskitekijänä betoniperustuksiin verrattuna voidaan pitää korroosiota. Korroosioriski voidaan kuitenkin hallita

järjestelmällisesti käytettävissä olevilla suojausmenetelmillä. Keskeisenä välineenä elinkaareen liittyvien riskien hallinnassa on pylväspaikan maaperän ominaisuuksien selvittäminen maaperätutkimusten yhteydessä erityisesti tunnetuilla happamien sulfaattimaiden esiintymisalueilla ja muilla mahdollisesti aggressiivisilla maaperillä, jolloin erityiskohteiden vaatima korroosiosuojaus voidaan suunnitella tapauskohtaisesti. Viime vuosikymmenellä rakennetuille ensimmäisille koerakenteille tulisi suorittaa pistokokeena maanalaisten teräsosien erikoistarkastuksia oletettavasti haasteellisilla pylväspaikoilla, jolloin havaintoja voitaisiin hyödyntää jo varhaisessa vaiheessa teorian tiedon tukena kunnonhallinnan ja tulevien tyyppirakenteiden jatkokehityksessä. Lisäksi teräsputkipaalujen käyttöä osana voimajohtojen maadoitusjärjestelmää tulisi selvittää tarkemmin ja tarkastella kuparisista maadoituselektrodeista luopumisen mahdollisuutta galvaanisen korroosioparin välttämiseksi.

Voimajohtorakentamisen volyyymi kasvaa tulevina vuosina merkittävän korkealle tasolle etenkin uusien 400 kV voimajohtojen osalta, jolloin uusien rakentamisvaihetta suoraviivais- tavien rakenteiden ja työmenetelmien kehitystyö ja käyttöönotto on osaltaan merkittävässä roolissa edistämässä haastavien hankkeiden toteutusta ja siirtymistä puhtaaseen energiajärjestelmään. Voimajohtojen historiassa rakentamismenetelmien uudistuminen on tapahtunut suhteellisen hitaasti, jolloin uusia vaihtoehtoisia perusrakenteita voidaan pitää merkittävänä ja otolliseen ajankohtaan tapahtuvana kehitysaskelena.

## 10 Yhteenveto

Diplomityössä tarkasteltiin voimajohtojen teräsperustusten suunnitteluun ja rakentamiseen liittyviä teknisiä reunaehtoja ja näkökulmia. Tarkastelussa hyödynnettiin yleisiin julkaisuihin, standardeihin ja suunnitteluohjeisiin pohjautuvan teorian lisäksi haastattelujen avulla kartoitettuja kokemuksia Fingridin toteutuneista voimajohtohankkeista.

Käytännössä kaikki näkökulmat tietyissä olosuhteissa esiintyvää korroosioriskiä lukuun ottamatta puoltavat teräsperustusten nykyistä laajamittaisempaa käyttöä erityisesti perinteisillä perusratkaisuilla haasteellisiksi osoittautuneissa kohteissa. Haittapuoleksi laskettava korroosioriski on hallittavissa huomioimalla asia jo suunnitteluvaiheessa. Fingridin uusien voimajohtojen rakentamiseksi tekemät investoinnit kasvavat merkittävästi tulevana vuosina, jolloin uusille rakentamista helpottaville ratkaisuille on entistä enemmän tarvetta ja ne voivat osaltaan vähentää toteutusvaiheeseen liittyviä riskejä. Keskeisimmät lähitulevaisuuden kehitystarpeet rakenteiden jalkauttamiseen laajempaan käyttöön liittyvät maaperätutkimusten toteuttamiseen teräsperustusten suunnittelun kannalta tarvittavien lähtötietojen saamiseksi ja suunnittelun osalta yhtenäisten tyyppirakenteiden kehittämiseen yleisimmille pylväslajeille. Suunnittelu- ja rakentamisprosessia tulee kehittää edelleen hankkeista saatavien kokemusten karttuessa ja ratkaisujen tullessa tutuksi useammille suunnittelijoille ja urakoitsijoille.

Diplomityön tavoitteena oli tarkastella perustusrakeisiin liittyviä näkökulmia laaja-alaisesti ja muodostaa kokonaiskuva teräsperustusten potentiaalisista käyttökohteista ja niihin liittyvistä erityispiirteistä. Työn aikana saatiin muodostettua kokonaiskuva Fingridin voimajohtohankkeiden tarpeisiin kehitettävien teräsperustusten nykytilasta ja lähitulevaisuuden kehitystarpeista. Aiheen laajasta rajauksesta johtuen näkökulmia ei käsitelty yksityiskohtaisesti ja käsitellyistä yksittäisistä osa-alueista onkin saatavilla olemassa olevaa tutkimustietoa erityisesti muissa käyttökohteissa. Voimajohdoille rakennetuista teräsperustuksista pitkän aikavälin kokonaiskuva vahvistavaa tutkimustietoa on sen sijaan saatavilla huomattavasti rajoitetummin. Teräsperustuksia on käytetty kansainvälisellä tasolla huomattavasti Suomea laajemmin, jolloin tulevaisuuden jatkokehitystä ajatellen olisi hyödyllistä käydä keskustelua ja tutustua tarkemmin teräsperustuksia vastaavissa maaperän olosuhteissa hyödyntävien ulkomaisten kantaverkkoyhtiöiden kokemuksiin ja kehitystyön nykytilaan.

## Lähteet

Betoniteollisuus ry. 2022. Tietoa betonista. [Verkkosivusto]. [Viitattu 19.8.2022]. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/tietoa-alasta/>

CENELEC. About CENELEC. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.10.2022]. Saatavissa: <https://www.cenelec.eu/about-cenelec/>

CO2data. 2022. Rakentamisen päästötietokanta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.10.2022]. Saatavissa: <https://co2data.fi/>

Elovaara J., Haarla L. 2011. Sähköverkot II. Otatieto. ISBN 978-951-672-363-4.

Fingrid Oyj. 2020. Voimajohtojen lentokuvausaineistot.

Fingrid Oyj. 2022a. Kaksi vuosikymmentä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.6.2022]. Saatavissa: [https://www.fingrid.fi/contentassets/b6f25b051ac34113b037da71daa0666b/fingrid\\_historiikki.pdf](https://www.fingrid.fi/contentassets/b6f25b051ac34113b037da71daa0666b/fingrid_historiikki.pdf)

Fingrid Oyj. 2022b. Suomen sähköjärjestelmä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.6.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>

Fingrid Oyj. 2022c. Kuluttajatietoa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.6.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/kuluttajatietoa/>

Fingrid Oyj. 2022d. Pylvään osat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.7.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kunnossapito/voimajohdot/pylvaan-osat/>

Fingrid Oyj. 2022e. Maankäyttö- ja ympäristöpolitiikka. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.8.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/maankaytto-ja-ymparisto/maankaytto--ja-ymparistopolitiikka-2022---nettisivuversio.pdf>

Fingrid Oyj. 2019. Technical specification. Foundation design – S23301E1.

Fingrid Oyj. 2017. Tekninen eritelmä. Perustusten toleranssit – S23303E1.

Geomachine Oy. 2022. Geotekniset kairavaunut. [Verkkosivusto]. [Viitattu 25.10.2022]. Saatavissa: <https://geomachine.fi/tuotteet/geotekniset-kairavaunut/>

- Ischebeck. 2022. Foundations and underpinning using TITAN micropiles. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.10.2022]. Saatavissa: <https://www.ischebeck.de/en/applications/foundations-and-underpinning/>
- Karkkulainen, Toma. 2022. TMV Line Oy, projektipäällikkö. Haastattelu 21.10.2022.
- Kinnunen, Jussi. 2015. Ajan vaikutus kitkapaalujen geotekniseen kestävyYTEEN. Diplomityö. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201507291481>
- Kuikka, Hannu. 2022. Fingrid Oyj, vanhempi projektipäällikkö. Haastattelu 6.10.2022.
- Kunnossapitoyhdistys ry. 2004. Korroosiokäsikirja. ISBN 978-951-97101-7-4.
- Laine, Ritva. 2022. Fingrid Oyj, vanhempi projektipäällikkö. Haastattelu 25.11.2022.
- Liikennevirasto. 2017. Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.10.2022]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-387-3>
- Linna, Antti. 2022. Fingrid Oyj, vanhempi projektipäällikkö. Haastattelu 17.10.2022.
- Maasalo, Hannes. 2022. Fingrid Oyj, vanhempi asiantuntija. Haastattelu 27.9.2022.
- Magnum Piering. 2022. Power Transmission Industry. Magnum Helical Foundations for Transmission Towers. [Verkkosivusto]. [Viitattu 25.10.2022]. Saatavissa: <https://www.magnumpiering.com/power-transmission-industry/>
- Marttila, Tapio. 2022. Skarta Finland Oy, rakentamispäällikkö. Haastattelu 19.10.2022.
- Paalupiste Oy. 2018. Ruuvipaalujen geotekninen mitoittaminen. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.10.2022]. Saatavissa: [https://paalupiste.com/wp-content/uploads/2018/01/ruuvipaalujen\\_geotekninen\\_mitoittaminen\\_paalupiste\\_oy.pdf](https://paalupiste.com/wp-content/uploads/2018/01/ruuvipaalujen_geotekninen_mitoittaminen_paalupiste_oy.pdf)
- Paalupiste Oy. 2022. Kuva- ja videogalleria. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.10.2022]. Saatavissa: <https://paalupiste.com/screw-piles-gallery>
- Power Line Systems. 2020. [Verkkosivusto]. [Viitattu 1.11.2022]. Saatavissa: <https://www.powerlinesystems.com/tower>
- Ruukki. 2021. Terästuotteiden hiilijalanjälki. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 4.11.2022]. Saatavissa: [https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/1043/59c7ab2/Teraksen\\_hiilijalanjalki.pdf](https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/1043/59c7ab2/Teraksen_hiilijalanjalki.pdf)

SFS-EN 50341-1:2014. Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt.

SFS-EN 50341-2-7:2015. Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteellä. Osa 2–7 Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt.

SFS-EN 50341-2-7/AC:2016. Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteellä. Osa 2–7 Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt. Korjaus standardiin SFS-EN 50341-2-7:2015.

SFS-EN 1993-5:2007. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 5: Paalut.

SFS 6001:2018. Suurjännitesähköasennukset.

SFS ry. 2019. Eurokoodit: Eurooppalaiset kantavien rakenteiden suunnittelustandardit. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.10.2022]. Saatavissa: <https://sfs.fi/wp-content/uploads/2020/10/Eurokoodit-Eurooppalaiset-kantavien-rakenteiden-suunnittelustandardit.pdf>

SSAB Europe Oy. 2022. RR- ja RD-paalut. Suunnittelu- ja asennusohjeet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 4.11.2022]. Saatavissa: [https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/fi/infra/ssab\\_rr\\_ja\\_rd\\_paalut\\_suunnittelu\\_ja\\_asennusohjeet.pdf?m=20220826065256](https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/fi/infra/ssab_rr_ja_rd_paalut_suunnittelu_ja_asennusohjeet.pdf?m=20220826065256)

Suomen Geoteknillinen yhdistys ry. SGY. 1980. Kairausopas I, Painokairaus, tärykairaus, heijarikairaus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.8.2022]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2017/04/kairausopas-1-painokairaus-taerykairaus-heijarikairaus.pdf>

Suomen Geoteknillinen yhdistys ry. SGY. 1995. Kairausopas II, Siipikairaus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.8.2022]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2017/04/kairausopas-2.pdf>

Suomen Geoteknillinen yhdistys ry. SGY. 1979. Kairausopas III, Maanäytteiden ottaminen geoteknillisiä tutkimuksia varten. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.8.2022]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2017/04/kairausopas-3-maanaeytteiden-ottaminen-geoteknillisiae-tutkimuksia-varten.pdf>

Suomen Geoteknillinen yhdistys ry. SGY. 1987. Kairausopas IV, Pohjavedenpinnan ja huokosvedenpaineen mittaaminen. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.8.2022]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2017/04/kairausopas-4.pdf>

Suomen Geoteknillinen yhdistys ry. SGY. 1986. Kairausopas V, Porakonekairaus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.8.2022]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2017/04/kairausopas-5.pdf>

Suomen Geoteknillinen yhdistys ry. SGY. 2001. Kairausopas VI, CPTU / Puristinkairaus ja Puristin-heijarikairaus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.8.2022]. Saatavissa: <https://sgy.fi/content/uploads/2017/04/kairausopas-6-cptu-puristinkairaus-puristin-heijarikairaus.pdf>

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2016. RIL 254-2016. Paalutusohje 2016 PO-2016. ISBN 978-951-758-615-3.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2017. RIL 207-2017. Geotekninen suunnittelu. ISBN 978-951-758-619-1.

Tuomela, Markku. 2022. Eltel Networks Oy, projektipäällikkö. Haastattelu 20.10.2022.

Uusitalo, Risto. 2022. Fingrid Oyj, vanhempi asiantuntija. Haastattelu 17.10.2022.

Väljä, Jukka. 2022. Eltel Networks Oy, projektipäällikkö. Haastattelu 21.10.2022.

Väylävirasto. 2020. Kallioperän merkitys porapaalutuksen suunnitteluun. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.10.2022]. Saatavissa: [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/opas\\_2020-02\\_kallioperan\\_merkitys\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/opas_2020-02_kallioperan_merkitys_web.pdf)

Väylävirasto. 2020. Tiesuolauksen vaikutuksesta siltapaalujen korroosioon. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.10.2022]. Saatavissa: [http://www.betoniyhdistys.fi/media/siltateknikan-paivat/2020/uotinen\\_tiesuolauksen-vaikutuksesta-siltapaalujen-korroosioon.pdf](http://www.betoniyhdistys.fi/media/siltateknikan-paivat/2020/uotinen_tiesuolauksen-vaikutuksesta-siltapaalujen-korroosioon.pdf)

Ylönen, Hannu. 2015. Ammattina voimajohdot. Fingrid Oyj. ISBN 978-952-93-5403-0.

Ympäristöministeriö. 2013. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset. Selvitys rakennusmateriaalien vaikutuksesta rakentamisen kasvihuonekaasupäästöihin, tiivistelmäraportti. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.8.2022]. Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/download/no-name/%7B1FAF46B2-2649-41ED-B3AA-5EA789C9512F%7D/37571>

Ympäristöministeriö. 2022. Happamien sulfaattimaiden kansallinen opas rakennushankkeisiin. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.11.2022]. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163782>