



Iivo Kriikkula

TUULIVOIMALOIDEN GEOTEKNINEN SUUNNITTELU

TUULIVOIMALOIDEN GEOTEKNINEN SUUNNITTELU

livo Kriikkula
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, yhdyskuntatekniikka

Tekijä: Iivo Kriikkula
Opinnäytetyön nimi: Tuulivoimaloiden geotekninen suunnittelu
Työn ohjaajat: Vesa Kallio (Oamk), Marko Olli (Ramboll Finland Oy)
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2013
Sivumäärä: 62 + 6 liitettä

Työn tarkoituksena oli kartoittaa suuren, maalle sijoitettavan tuulivoimapuiston rakennusprojektin aikaiset geotekniseen suunnitteluun liittyvät tehtävät. Työssä käsiteltiin tuulivoimaloiden perustusten, tuulivoimaloille rakennettavien teiden sekä nostoalueiden geoteknistä suunnittelua. Tarkastelun ulkopuolelle jätettiin sähköasemien sekä voimajohtolinjojen ja maakaapeleiden vaatima pohjasuunnittelu. Opinnäytetyö kirjoitettiin Ramboll Finland Oy:n Seinäjoen toimipisteessä.

Teorialuvuissa aineistona käytettiin muun muassa geo- ja pohjarakennesuunnitteluun liittyvää kirjallisuutta, tuulivoima-alalla vaikuttavien toimijoiden verkkosivuja sekä viranomaisten, kuten ympäristöministeriön asettamia ohjeistuksia ja valtakunnallisia asetuksia. Tutkimusosuudessa käytettiin materiaalina muun muassa Kristiinankaupungin alueella sijaitsevan Metsälän tuulivoimaprojektin ympäristövaikutusten arviointiselostusta sekä aiempien tuulivoimalaprojektien suunnitteludokumentteja.

Työn tutkimusosuudessa käytiin läpi Metsälän tuulivoimapuiston rakennusprojektin aikana suoritettuja, eri suunnitteluvaiheisiin liittyviä geoteknisiä suunnittelu-tehtäviä. Lisäksi aiemmista projekteista saatujen tietojen avulla laadittiin prosessikaavio, josta ilmenee koko tuulivoimapuistoprojektin aikaiset geotekniset suunnittelutehtävät. Näitä tietoja voidaan käyttää apuna myös tulevaisuuden tuulivoimapuistojen suunnitteluprojekteissa.

Asiasanat: tuulivoimalat, tuulipuistot, geotekniikka, perustukset, pohjarakennus, suunnittelu, pohjatutkimus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, Municipal Engineering

Author: Iivo Kriikkula
Title of thesis: Geotechnical Design of Wind Turbines
Supervisors: Vesa Kallio, Marko Olli
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2013
Pages: 62 + 6 appendices

The purpose of this thesis was to find out the tasks that have to be carried out during the geotechnical and foundation planning of a large on-shore wind power farm. This thesis deals with geotechnical and foundation engineering of wind turbine foundations, maintenance roads and lifting areas. Geotechnical engineering of power stations, power lines and underground power cables that are also built during the project are excluded. This thesis was written with Ramboll Finland Oy in Seinäjoki.

Literature concerning geotechnical and foundation engineering, websites from companies who operate in the line of wind power industry as well as instructions and regulations of different authorities, for example the Ministry of the Environment was used in the theoretical section of this thesis. In the research part the environmental impact assessment of Metsälä wind farm in Kristiinankaupunki was used as reference material. Design plans from previous wind farm projects were also used.

The research part of this thesis contains a description of the different stages of geotechnical and foundation planning in Metsälä wind power farm project. A process chart about the tasks that has to be made during the geotechnical and foundation planning process was also made. This information can be used in other wind farm projects in the future.

Keywords: Wind power plants, Wind farms, Geotechnics, Foundations

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
MERKKIEN SELITYKSET JA SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 TUULIVOIMALAT SUOMESSA	9
2.1 Tuulivoimaloiden sijainti	11
2.2 Tuulivoimalaprojektin vaiheet	13
2.3 Tuulivoimarakentamisen tulevaisuuden näkymät	16
3 GEOTEKNINEN SUUNNITTELU	19
3.1 Pohjatutkimusmenetelmät	19
3.1.1 Painokairaus	20
3.1.2 Heijarikairaus	21
3.1.3 Siipikairaus	22
3.1.4 Puristinkairaus	23
3.1.5 Puristin-heijarikairaus	25
3.1.6 Tärykairaus	25
3.1.7 Porakonekairaus	26
3.1.8 Näytteenotto	27
3.1.9 Pohjavesipinnan määrittäminen	29
3.1.10 Muut tutkimusmenetelmät	30
3.2 Perustusten mitoituskriteerit	32
3.2.1 Mitoituskuormat	33
3.2.2 Maaperän kantokestävyys	34
3.2.3 Painuminen	37
3.2.4 Kaatuminen ja liukuminen	39
3.2.5 Värähtely	40
3.3 Tuulivoimalan perustamistapoja	41
3.3.1 Kallioperustus	41
3.3.2 Maanvarainen perustus	42
3.3.3 Lyöntipaaluperustus	43

3.3.4 Porapaaluperustus	44
4 TUULIVOIMAPIUSTON GEOTEKNINEN SUUNNITTELUPROSESSI	45
4.1 Esimerkkikohteen kuvaus	46
4.2 Esisuunnittelu	48
4.3 Pohjatutkimukset	49
4.3.1 Tuulivoimaloiden perustusten pohjatutkimukset	49
4.3.2 Tutkimukset nosto- ja tiealueilla	50
4.3.3 Haasteita aiemmissa kohteissa	52
4.4 Rakentamissuunnittelu	52
4.4.1 Tuulivoimaloiden geotekninen suunnittelu	53
4.4.2 Teiden ja nostoalueiden geotekninen suunnittelu	55
5 YHTEENVETO	56
LÄHTEET	57
LIITTEET	62

MERKKIEN SELITYKSET JA SANASTO

B	perustuksen leveys [m]
F_d	kuorman mitoitusarvo [kN]
F_k	kuorman ominaisarvo [kN]
H	vaakasuuntainen kuorma [kN]
H_d	vaakasuuntaisen kuorman mitoitusarvo [kN]
H_k	vaakasuuntaisen kuorman ominaisarvo [kN]
L	perustuksen pituus [m]
M	kokoonpuristuvuusmoduuli eli jännityksen muutoksen suhde suhteelliseen muodonmuutokseen
q'	tehokas tilavuuspaino perustustason yläpuolella [kN/m ³]
R	mitoituskuorma [kN]
R_d	kestävyyden mitoitusarvo [kN]
V_d	pystysuuntaisen kuorman mitoitusarvo [kN]
Konsolidaatio	Maaperän tiivistyminen kuormituksen vaikutuksesta
Poisson-vakio	Kuvaa materiaalin palautuvien säteensuuntaisen ja aksiaalisen muodonmuutoksen suhdetta, käytetään elastisuuden määrittämiseen
Sensitiivisyys	Luonnontilaisen maakerroksen ja häirityn maakerroksen suljettujen leikkauslujuuksien suhde
SPT	Standard Penetration Test
Ylikonsolidaatio	Tila, jossa maaperä on tiiviimmässä tilassa kuin sen yläpuolella olevien maakerrosten painon perusteella voisi olettaa
YVA	Ympäristövaikutusten arviointi

1 JOHDANTO

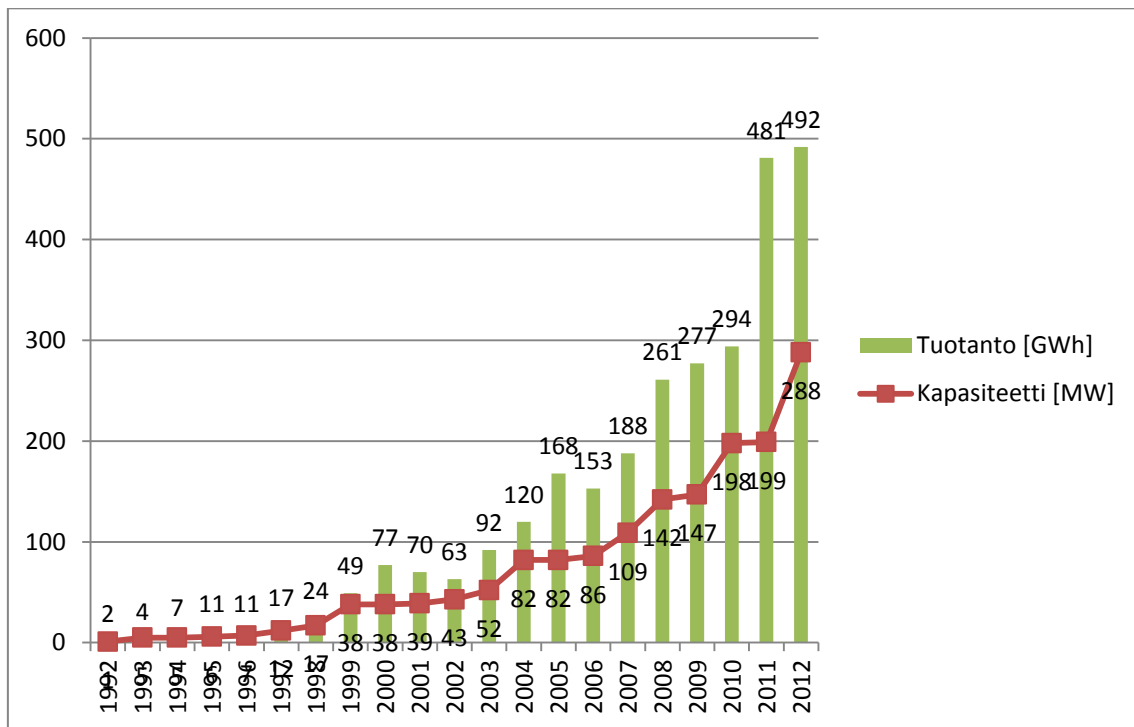
Tuulivoiman rakentaminen on lisääntynyt Suomessa viime aikoina, kun pyritään lisäämään uusiutuvan energian käyttöä. Rakentamista ovat vauhdittaneet niin hallituksen asettamat ilmastotavoitteet kuin tuulivoimasähkölle annettava taloudellinen tuki. Tavoitteena onkin lisätä Suomessa tuulivoimalla tuotettavan sähkön määrää ja samalla tuotantokapasiteettia yli kymmenkertaiseksi vuoteen 2020 mennessä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on aluksi tutustua tuulivoimalarakentamisen tämänhetkiseen tilaan Suomessa. Lisäksi käydään läpi tuulivoimaloiden rakentamiseen liittyviä prosesseja, ja tehdään katsaus tuulivoimalarakentamisen tulevaisuuden näkymiin. Teoriaosuudessa käydään läpi erilaisia pohjatutkimusmenetelmiä ja perehdytään rakennusten suunnittelun vaatimiin ennakkotietoihin ja -valmisteluihin yleisellä tasolla. Lisäksi kuvataan pohjarakennesuunnitteluun vaikuttavia mitoituskijöitä sekä yleisimmät mitoituskriteerit ja käydään läpi tuulivoimaloiden yleisimmät perustustavat. Teoriaosuuden ulkopuolelle on jätetty työn laajuuden rajoittamiseksi tealueiden ja nostoalueiden mitoituskriteerit, vaikka aiheita käsitellään tutkimusosuudessa.

Tutkimusosiossa pyritään kuvaamaan suuren, maalle rakennettavan tuulivoimapuiston rakennusprojektin eri vaiheissa suoritettavat geotekniseen suunnitteluun liittyvät tehtävät. Työssä käsitellään tuulivoimaloiden perustusten, tuulivoimaloille rakennettavien teiden sekä nostoalueiden geoteknistä suunnittelua. Tuulivoimapuiston rakennusprojektin aikaisista pohjarakennesuunnittelukohteista aiheen ulkopuolelle on rajattu sähköasemien sekä voimajohtolinjojen ja maakaapeleiden vaatima suunnittelu.

2 TUULIVOIMALAT SUOMESSA

Vuonna 2011 Suomessa tuotettiin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen mukaan 481 GWh sähköä tuulivoimalla. Tämä on noin 0,6 % Suomen kokonais-sähkönkulutuksesta. Tuotantoluvuissa on otettu huomioon 131 verkkoon kytkettyä tuulivoimalaitosta, joiden yksittäisteho on yli 70 kW. Näiden voimaloiden yhteenlaskettu tuulivoimakapasiteetti oli vuoden 2011 lopussa 199 MW. Vuoden 2012 aikana tuotantokapasiteetti kasvoi 288 MW:iin, mutta tuotanto kasvoi vain 492 GWh:iin. Kuvassa 1 on esitetty tuulivoimakapasiteetti ja tuotantomäärät vuosilta 1992 - 2012. (1, s. 3 - 12; 2.)

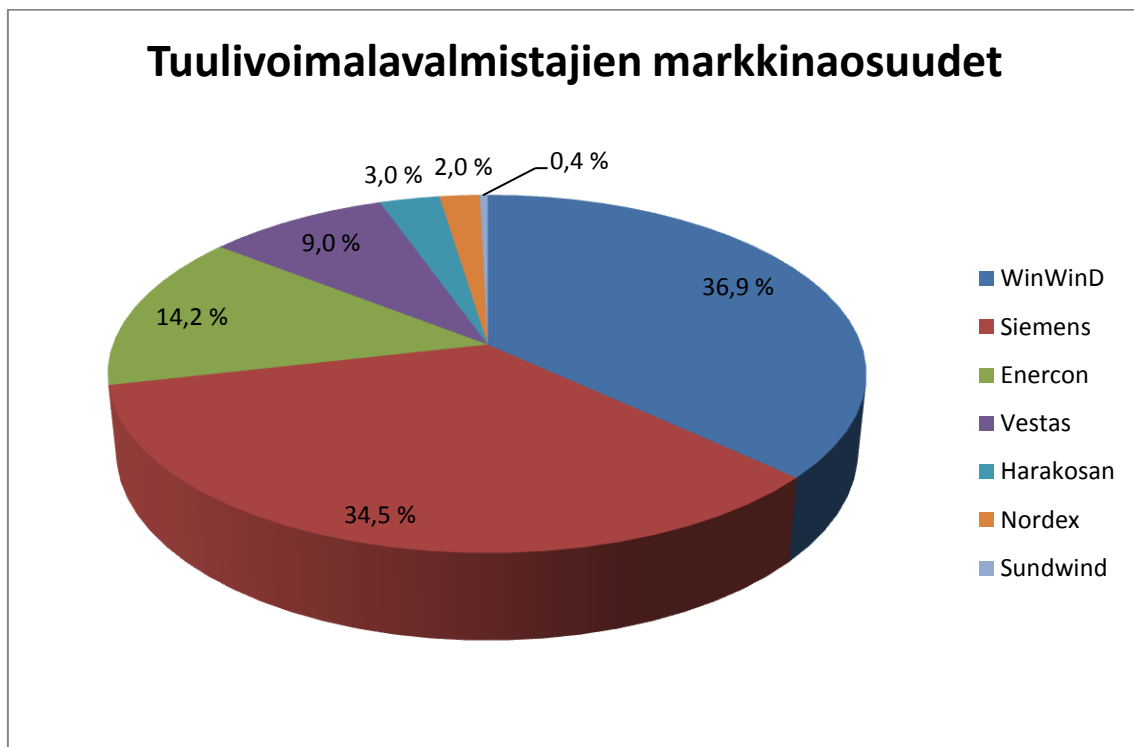


KUVA 1. Suomen tuulivoimakapasiteetti ja sähköntuotannon kokonaismäärä vuosina 1992 - 2012 (1, s. 13; 2)

Suomessa tuulivoiman tuotannon ja tuulivoimakapasiteetin lisäys on ollut 2000-luvulla melko tasaista verrattuna esimerkiksi Ruotsiin, jossa tuulivoimakapasiteetti on kasvanut kiihtyvällä tahdilla vuoden 2006 jälkeen. Maakunnittain tarkasteltuna eniten tuulisähköä tuotettiin Lapissa (38 %) ja Pohjois-Pohjanmaalla (22 %). Myös Ahvenanmaalla (14 %) ja Satakunnassa (11 %) yllettiin yli 10 pro-

sentin tuotanto-osuuteen. Lapin tuulivoimatuotannosta suurin osa tuotetaan Kemissä ja Torniossa. (1, s. 13 - 40.)

Suomen markkinoilla toimii useita tuulivoimalavalmistajia, joista tämänhetkisen tuulivoiman tuotantokapasiteetin mukaan mitattuna suurimmat ovat suomalainen WinWinD ja saksalainen Siemens. Kuvassa 2 esitetään tuulivoimalavalmistajien markkinaosuudet rakennetun tuulivoimakapasiteetin perusteella. (1, s. 19 - 20.)

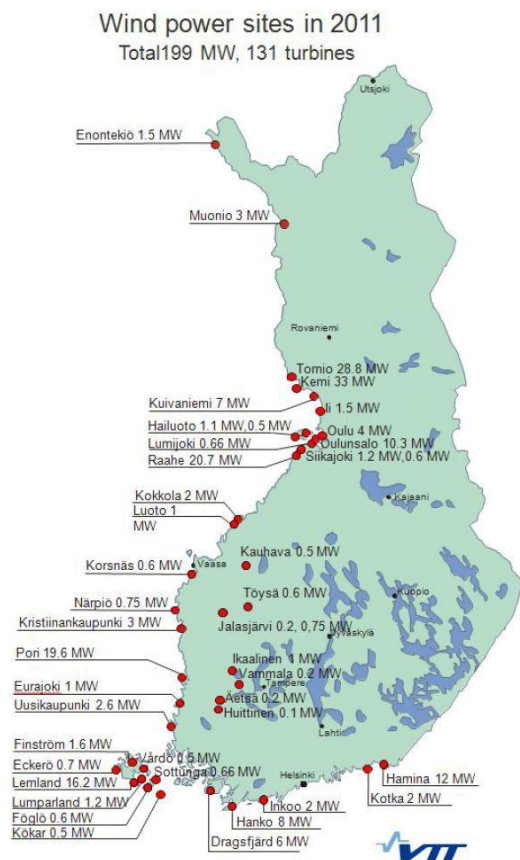


KUVA 2. Eri tuulivoimalavalmistajien markkinaosuudet Suomeen rakennetusta tuulivoimakapasiteetista vuoden 2011 lopussa (1, s. 19 - 20)

Tuulivoimalaitosten koko on kasvanut jatkuvasti. Nykyään Suomeen rakennettavien suurien tuulivoimalaitosten napakorkeus sijaitsee yleensä 80 - 100 metrinä, ja niiden kokonaiskorkeus on suurimmillaan noin 150 metriä. Uusien, suunnitteluvaiheessa olevien tuulivoimalaitosten napakorkeus voi olla jopa 150 metriä ja voimalan lavat yltävät korkeimmillaan yli 200 metriin. (3; 4.)

2.1 Tuulivoimaloiden sijainti

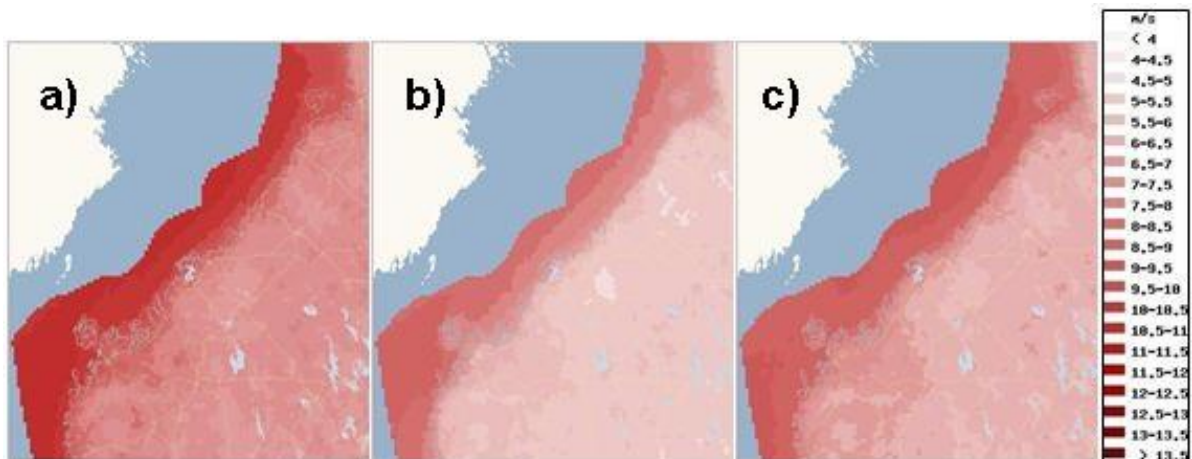
Suurin osa Suomeen rakennetuista tuulivoimaloista sijaitsee rannikon läheisyydessä, mutta nykyään potentiaalisia tuulivoimaloiden sijoituspaikkoja on alettu etsiä yhä useammin myös sisämaasta. Erityisesti Lapin tunturialueet ovat monesti houkutteleva vaihtoehto tuulivoimaloiden sijoittamiseksi. Kuvassa 3 on esitetty tarkemmin tuulivoimaloiden sijainti sekä niiden tuotantokapasiteetit. (1, s. 13; 5, s. 26 - 27.)



KUVA 3. Suomen tuulivoimalat vuonna 2011 (1, s. 13)

Rannikkoalueet soveltuvatkin parhaiten tuulivoiman tuotantoon, sillä tuuli pääsee puhaltamaan vapaasti ilman kasvillisuuden tai maanpinnan muotojen aiheuttamaa tuulen nopeuden hidastumista. Parhaat olosuhteet tuulienergian tuottamisen kannalta ovat avomerellä, mutta sisämaassa myös korkeiden mäkien laet soveltuvat hyvin tuulivoiman tuotantoon. (6, s. 11 - 14.)

Tuulimittausten perusteella on havaittu eroja keskituulen nopeuksissa vuodenaikojen vaihtelun mukaisesti. Talvisin keskituulennopeus on suurempi kuin keuhäisin tai syksyisin, ja kesällä tuulennopeus on pienimmillään. Kuvasta 4 saa hyvän käsityksen tuulennopeuden vaihteluista. Jos halutaan tuottaa tuulisähköä taloudellisesti kannattavasti, tuulen vuotuisen keskinopeuden tulisi olla 100 metrin korkeudella maasta vähintään 6,5 m/s. (6, s. 12 – 15; 7, s. 4.)



KUVA 4. Tuulen keskinopeus Pohjanlahden rannikolla 100 metrin korkeudessa a) helmikuussa, b) kesäkuussa, c) syyskuussa (8)

Tuuliatlas-karttaliittymästä on otettu kolme erillistä kuvaa, joista ilmenee tuulen keskinopeuden voimakkuus Pohjanlahden rannikolla eri vuodenaikoina. Punaisen värin tummuus kuvaa tuulen intensiteettiä. Kuvista näkyy hyvin myös maantieteellisen sijainnin vaikutus tuulen voimakkuuteen. Avomerellä ja rannikon läheisyydessä tuulee kovempaa kuin sisämaassa. (6, s. 12 - 15.)

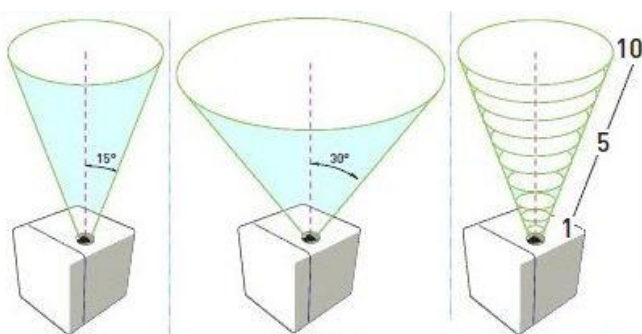
Tuulivoimalan sijoittamispaikkaa valittaessa tulee huomioida myös projektin taloudelliset edellytykset. Suurin osa, yleensä noin 65 - 80 prosenttia, projektin kustannuksista kuluu itse tuulivoimalan osien hankintaan, mutta tärkeässä osassa on myös muun infrastruktuurin sijainti suunnitellun tuulivoimalan tai tuulivoimapuiston sijaintiin nähden. Uuden tien rakentaminen tuulivoimalalle maksaa hyvissä olosuhteissa noin 200 000 euroa kilometriltä ja sähkönsiirtoverkon rakentaminen noin 200 000 euroa kilometriltä, jos voimalan tai voimaloiden sähköntuotantokapasiteetti on pieni. Suurien tuulivoimapuistojen liittäminen

olemassa olevaan sähköverkkoon voi maksaa yli 400 000 euroa kilometriltä. Tarkemmat taloudelliset selvitykset pitää tehdä hankekohtaisesti. (7, s. 4 - 5; 9.)

2.2 Tuulivoimalaprojektin vaiheet

Tuulivoimalan tai tuulivoimapuiston rakentaminen alkaa yleensä sijoituspaikan valinnalla. Tärkeimmät tekijät tuulivoimalan sijoituspaikkaa valittaessa ovat tuulisuus ja valmiiden liikenneyhteyksien sekä riittävän siirtokapasiteetin takaavan sähkönjakeluverkoston läheisyys. Optimaaliseen sijaintiin vaikuttavat myös alueen maanomistusolosuhteet, rakenteiden perustamisolosuhteet sekä esimerkiksi kaavoitustilanne. Yksi tärkeä tekijä on lisäksi tuulivoimaloiden aiheuttamien ympäristövaikutusten minimoiminen. (4; 10, s. 31 - 38; 11, s. 11.)

Alueen tuulisuuden arvioimiseksi tehdään tuulimittauksia, joiden kesto on yleensä vähintään vuosi. Tämä johtuu siitä, että tuuliolosuhteet vaihtelevat paitsi vuorokaudenajan niin myös vuodenajan mukaan. Mittaukset tulisi suorittaa tuulivoimalan suunnitellulta napakorkeudelta, jotta saadaan mahdollisimman edustavat mittaustiedot. Kuvassa 5 esitetään tuulennopeuksien mittaamiseen käytettävän laitteen toimintaperiaate. Laite käyttää mittauksessa laserpulsseja, joiden heijastumista tarkkaillaan optisilla antureilla. Sen avulla voidaan mitata tuulennopeuksia kymmeneltä eri korkeudelta samanaikaisesti. (4; 6, s. 7; 10, s. 9; 12.)



KUVA 5. Modernin tuulennopeusmittauslaitteiston toimintaperiaate (12)

Tuuliolosuhteiden arvioinnissa voidaan käyttää apuna myös Suomen tuuliatlas-ta, joka on säätilastojen perusteella luotu tietokonemalli Suomen tuuliolosuhteista. Sen avulla voidaan arvioida tietyn paikan tuulisuutta 50 metrin korkeudelta

aina 400 metriin asti. Mallin resoluutio on koko Suomen alueella 2,5 x 2,5 neliökilometriä, mutta rannikon läheisyydessä, tuntureilla ja joillakin sisämaa-alueilla tuulitiedot ovat saatavilla tarkemmalla, 250 x 250 neliömetrin tarkkuudella. (4; 6, s. 7; 10, s. 9.)

Tuulivoimalan rakentamisen edellytyksenä on joko toimenpide- tai yleisemmin rakennusluvan saaminen. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että suunnittelualue tulee olla kaavoitettu tuulivoimarakentamista varten. Tämän lisäksi tuulivoimalan rakentamiseksi tarvitaan usein ympäristölupa. Jos tuulivoimala rakennetaan vesistöön tai sen vaikutukset ulottuvat vesiympäristöön, tarvitaan tuulivoimalan rakentamiseen myös vesilain mukainen lupa. (11, s. 9.)

Vuonna 2011 tuli voimaan laki maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta. Sen mukaan yleiskaavaa voidaan käyttää tuulivoimarakentamisen perusteena, jos yleiskaava on riittävän ohjaava, rakentaminen sopii maisemaan sekä ympäristöön ja tuulivoimalan huolto sekä sähkönsiirto on mahdollista järjestää (11, s. 7; 13). Luvan saamiseksi tarvitaan selvitys hankkeen aiheuttamista vaikutuksista maisemaan ja naapureihin sekä tiedot alueelle suunnitelluista muista mastoista tai tuulivoimaloista (14). Aiemmin esimerkiksi tuulipuiston rakentamista varten on jouduttu tekemään jopa kolme päällekkäistä kaavaa: maakunta-, yleis- ja asemakaava (4).

Tuulivoimarakentamisen lupakäytäntöihin otettiin kantaa myös vuonna 2011, kun valtioneuvoston asetus ympäristövaikutusten arviointimenettelystä annetun valtioneuvoston asetuksen 6 §:n muuttamisesta tuli voimaan. Sen mukaan kaikki tuulivoimalahankkeet, joiden kokonaisteho on vähintään 30 megawattia tai yksittäisten tuulivoimalaitosten lukumäärä on vähintään kymmenen kappaletta, kuuluvat ympäristövaikutusten arviointimenettelyn piiriin. (15.)

Ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä tulee esittää muun muassa hankkeen tiedot, sijainti ja vaihtoehtoiset toteuttamistavat sekä ympäristövaikutusten arvioimiseksi laadittavat selvitykset ja vaikutusalueen rajaus. Varsinaisessa arviointiselostuksessa esitetään muun muassa tuulivoimalan vaikutukset ympäröivään asutukseen sekä rakennettuihin alueisiin ja luontoon, eliöstöön sekä maisemaan. Lisäksi huomioidaan vaikutukset alueen virkistyskäyttöön, elinkei-

notoimintaan sekä liikenteeseen. Erityisesti lentokenttien läheisyyteen perustettavilla tuulivoimaloilla voi olla haitallisia vaikutuksia esimerkiksi ilmavalvontatutkien toimintaan. Tuulivoimalaitoksen aiheuttamat turvallisuusriskit, esimerkiksi lavoista irtoavien jäiden aiheuttamat vaarat, on arvioitava. (4; 11, s. 11 - 14; 16.)

Tuulivoiman suurimmiksi haitoiksi arvioidaan yleensä tuulivoimaloiden vaikutus maisemakuvaan sekä tuulivoimalan lapojen pyörimisestä aiheutuva melu ja valon sekä varjon vaihtelu. Kuvaan 6 on yhdistetty kaksi havainnekuvaa Metsälän tuulivoimapuistoon suunniteltujen voimaloiden maisemavaikutuksista. (10, s. 68 - 74.)



KUVA 6. Havainnekuvia Metsälän tuulivoimapuistoon suunniteltujen voimaloiden vaikutuksista maisemaan (17, s. 75 - 77)

Tuulivoimaloiden eliöstövaikutukset kohdistuvat useimmiten lintuihin, mutta niiden vaikutukset eivät välttämättä ole niin suuria kuin usein ajatellaan. Kasvillisuusvaikutukset taas rajoittuvat pääasiassa rakentamisvaiheeseen. Erityisesti näin on silloin, kun paikalle joudutaan rakentamaan uusia liikenneyhteyksiä se-

kä sähkönsiirtoverkkoa. Hyvällä suunnittelulla voidaan minimoida tuulivoimaloista aiheutuvia ympäristövaikutuksia. (10, s. 68 - 74.)

Tuulivoimalaitoksen valintaperusteisiin vaikuttavat muun muassa halutun tuulivoimalan ominaisuudet, jotka taas riippuvat tuuliolosuhteista ja tuulen nopeusjakaumasta. Jokaiseen kohteeseen tulisikin valita parhaiten kyseisen paikan tuuliolosuhteita hyödyntävä tuulivoimalaitos. Voimalaitoksen optimaalisen napakorkeuden määrittäminen on myös tärkeää, jotta saadaan hyödynnettyä korkeammalla puhaltavat voimakkaammat tuulet, mutta samalla pidetään itse tornin ja perustusten rakennuskustannukset riittävän matalina. Tuotantotehon lisäksi on syytä tarkastella laitteiston vikaantumisherkkyttä ja soveltuvuutta paikallisiin ilmasto-olosuhteisiin. Yleisesti voidaan sanoa, että esimerkiksi säädettävillä laivoilla varustettujen voimalaitosten hyötysuhde on parempi kuin kiinteälapaisen, mutta hinta ja vikaantumisherkkyys ovat yksinkertaisempaa laitteistoa suuremmat. (10, s. 77 - 93.)

Tuulivoimalatoimittajan valinnan jälkeen tehdään tarkemmat alue-, perustus-, pohjarakenne-, kuljetus- ja nostosuunnitelmat. Aluesuunnitelma sisältää muun muassa tuulivoimalalle tulevan tien sekä sähkölinjan tai -kaapelin linjauksen ja suunnittelun. Perustussuunnittelun edellytyksenä on se, että toimittaja ilmoittaa suunnittelun vaatimat lähtötiedot ja että omat maaperätutkimukset ovat valmiina. Tämän jälkeen tehdään päätös perustustavasta. Yleisimmin käytössä olevat perustustavat ovat maanvarainen betonilaattaperustus ja kallioperustus, jossa perustus ankkuroidaan kallioon terästangoilla tai vaijerinipuilla. Massiivinen betonilaattaperustus on yleensä kalliimpi kuin kallioperustus, ja lisäksi betonilaattaa voidaan joutua paaluttamaan riittävän lujuuden ja kantavuuden saavuttamiseksi. (10, s. 100 - 102.)

2.3 Tuulivoimarakentamisen tulevaisuuden näkymät

Suomen hallituksen tavoitteena on saada kasvatettua tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä 6 terawattituntiin vuoteen 2020 mennessä. Tämän saavuttamiseksi tarvittaisiin noin 800 tuulivoimalaitosta, joiden yhteenlaskettu tuulivoimakapasiteetti olisi noin 2 500 megawattia. Tavoitteen täyttymiseksi Suomeen tuli-

si rakentaa yli 500 tuulivoimalaitosta vuoteen 2020 mennessä. Samalla sähkön-
tuotannon ja tuulivoimakapasiteetin pitäisi yli kymmenkertaistua. (18, s. 7.)

Suomen Tuulivoimayhdistys ja VTT pitävät yllä tilastoa Suomessa rakenteilla
olevista sekä eri suunnitteluvaiheissa olevista tuulivoimalaprojekteista. Vuoden
2012 lokakuussa Suomessa oli rakennusvaiheessa yhteensä seitsemän tuuli-
voimalaitoskokonaisuutta, joiden yhteenlaskettu teho tulee olemaan 134 mega-
wattia. Rakennustöiden valmisteluvaiheessa taas oli kymmenen tuulivoimalai-
toskokonaisuutta, joiden yhteisteho on 87 megawattia. Näistä projekteista yksi
on merellä sijaitseva, niin sanottu offshore-hanke. Lupahakemusvaiheessa ole-
via hankkeita sekä hankkeita, joiden YVA-selvitys on hyväksytty, oli tiedossa
1 362 megawatin edestä. Edellä mainittujen hankkeiden lisäksi kaavasuunnitte-
luvaiheessa olevia tuulivoimalaitosprojekteja oli vireillä yhteensä noin 2 500
megawatin edestä. (2.)

Maakuntien liitot ovat laatineet vuosien 2010 ja 2011 aikana tuulivoimaselvityk-
siä alueillaan. Selvitykset on laadittu kaikissa muissa maakunnissa paitsi Pir-
kanmaan, Uudenmaan ja Pohjois-Lapin maakunnissa. Tarkoituksena oli kartoit-
taa alustavasti tuulivoiman tuotantoon parhaiten soveltuvia alueita, jotta tuuli-
voima voitaisiin ottaa paremmin huomioon esimerkiksi maakuntakaavaa laadit-
taessa. (5, s. 3 - 7.)

Selvityksen alkuvaiheessa on jätetty kaikki tuulivoimatuotantoon soveltumatto-
mat alueet ja näiden suojavaoähykkeet tarkastelun ulkopuolelle. Tällaisia alueita
olivat muun muassa luonnonsuojelualueet, Natura-alueet, tärkeät linnustoalueet
sekä valtakunnallisesti merkittävät maisema-alueet. Lisäksi rajoittavana tekijänä
käytettiin 500 - 1000 metrin suojaetäisyyttä asutukseen. Jäljelle jääneistä alu-
eista rajattiin ulkopuolelle alueet, joiden tuulisuus 100 metrin korkeudella oli alle
6 m/s. Tämä tarkastelu tehtiin Suomen tuuliatlaksen antamien tuulisuustietojen
perusteella. (5, s. 8.)

Selvitysten mukaan Suomessa on noin 250 potentiaalista aluetta tuulivoiman
tuotantoon. Näiden alueiden yhteen laskettu pinta-ala on noin 3 400 neliökilo-
metriä, ja potentiaalinen tuulivoimakapasiteetti voisi olla noin 12 000 megawat-
tia. Suurin tuulivoimapotentiaali on selvitysten mukaan Pohjois-Pohjanmaalla,

jossa sijaitsee noin 25 prosenttia koko Suomen tuulivoimapotentialista. Lisäksi Lapissa, Etelä-Pohjanmaalla sekä Varsinais-Suomessa on hyvät mahdollisuudet tuottaa sähköä tuulivoimalla. Suurimmat rajoitukset edellä mainittujen alueiden käyttöönottoon asettaa lentoliikenne. Suomen lentoliikenteen turvallisuudesta vastaava Finavia on asettanut rajapintoja eli korkeuksia, joiden yläpuolelle ei saa ulottua rakenteita. Alue, jossa vapaan korkeuden tulee olla vähintään 150 metriä, kattaa 17 prosenttia edellä mainitusta 12 000 megawatin potentiaalista. 200 metriin yltävä vapaa korkeus taas kattaa jo 35 prosenttia kartoitetusta tuulivoimakapasiteetista. Tämä vaikeuttaa kyseisten alueiden ottamista tuulivoimatuotantoon, sillä nykyisten tuulivoimaloiden kokonaiskorkeudet vaihtelevat yleensä 140 - 200 metrin välillä. (5, s. 17 - 25.)

Meneillään olevien tuulivoimalahankkeiden ja niihin liittyvien alustavien selvitysten määrän perusteella voidaan arvioida, että kiinnostus tuulivoimalla tuotettavaa sähköä kohtaan on lisääntynyt myös Suomessa. Kiinnostusta ovat lisänneet yhä edelleen kehittyneet tekniset ratkaisut ja kilpailun myötä laskeneet laitekustannukset sekä valtion takaama tuotantotuki. (19, s. 6.)

3 GEOTEKNINEN SUUNNITTELU

Pohjarakennesuunnittelun tarkoituksena on suunnitella rakennukselle tai rakenteelle riittävän kantavat perustukset, joiden varassa rakenne seisoo painumatta, kallistumatta ja kaatumatta koko suunnitellun käyttöikänsä. Pohjarakennesuunnittelijan tulee hallita muun muassa perustussuunnitteluun ja pohjarakentamiseen sekä maaperän teknisiin ominaisuuksiin eli geotekniikkaan liittyviä tietoja ja taitoja. Pohjarakenteiden kuivatus ja tarvittaessa routasuojaus ovat myös tärkeitä osa-alueita pohjarakennesuunnittelussa. (20, s. 13; 21, s. 9; 22, s. 3.)

Rakennuslupahakemukseen on liitettävä selvitys pohjaolosuhteista sekä kuvaus kyseisiin olosuhteisiin parhaiten soveltuvista perustustavoista. Selvityksessä tulee ottaa huomioon rakennettavan kohteen erityispiirteet sekä rakennusvaiheen, käytön ja käytöstä poistamisen aiheuttamat ympäristövaikutukset. (14, 49§ - 55§.)

3.1 Pohjatutkimusmenetelmät

Yleisimmin käytettyjä pohjatutkimusmenetelmiä ovat erilaiset kairaukset, joista seuraavassa esitellään tarkemmin paino-, heijari-, siipi- ja puristinkairaus sekä puristin-heijarikairaus, tärykairaus ja porakonekairaus. Nykyään pohjatutkimuksia tehtäessä käytetään usein teloilla liikkuvia monitoimikairoja, joiden avulla voidaan suorittaa useita erityyppisiä kairauksia. Kuvassa 7 on yksi tällainen monitoimikaira. (20, s. 240 - 268.)



KUVA 7. Monitoimikaira (23)

Rakennuksen tai rakennelman perustusten alle jäävien maakerrosten koostumus ja ominaisuudet on tutkittava etukäteen, jotta osataan suunnitella oikeanlaiset pohjarakenteet. Pohjatutkimusten avulla selvitetään muun muassa maakerrosten laatu sekä niiden paksuudet ja kalliopinnan sekä pohjaveden sijainti maanpintaan nähden. Pohjatutkimuksista saatujen tulosten perusteella selvitetään tai arvioidaan esimerkiksi maakerrosten rakeisuutta, tilavuuspainoa, kitkakulmaa, leikkauslujuutta ja painumaparametreja. (20, s. 238.)

3.1.1 Painokairaus

Painokairaus on yksi yleisimmin käytettävistä kairaustavoista Suomessa. Menetelmä toimii parhaiten hiekka- ja sorakerrostumia tutkittaessa sekä löyhissä moreeneissa. Sen avulla voidaan selvittää muun muassa tiiviin pohjakerroksen sijainti, tiiviydeltään erilaisten maalajikerrosten rajapinnat sekä maakerrosten suhteellinen tiiviys. (20, s. 243 - 249; 24, s. 4 - 6.)

Painokairaukset tehdään koneellisten monitoimikairauskoneiden avulla. Perustilanteessa painokairaa kuormitetaan 1 kN:n suuruisella voimalla, ja samalla kairaa kierretään myötäpäivään joko vääntövarren avulla tai hydraulisesti. Kairaus-

vastus päätellään siitä, kuinka monta puolikierrosta kairaa pitää kiertää, että saavutetaan 0,2 metrin tunkeuma. (20, s. 244 - 246; 24, s. 4 - 6.)

Jos maakerros on niin löyhää, että kaira painuu maahan itsestään pelkän kuormituksen voimasta, kuormitusta tulee vähentää niin, että painumanopeus on alle 50 mm/s. Toinen erityistilanne on se, jos kairan tunkeuma on sadan puolikierroksen jälkeen alle 0,2 metriä. Tämän jälkeen kairaa yritetään upottaa syvemmälle lyömällä. Jos kaira saadaan lyöntien avulla syvemmälle, jatketaan kairausta normaalisti. Kairaus päättyy siihen, kun kaira ei uppoa enää lyömälläkään tai silloin, kun saavutetaan ennalta määrätty kairaussyvyys. (20, s. 244 - 249; 24, s. 4 - 6.)

Jokaisesta kairauksesta on tehtävä kairauspöytäkirja, josta selviää muun muassa kairan kuormitus, kärjen syvyys kuormitusta muutettaessa, se puolikierrosten lukumäärä, mikä tarvitaan 0,2 metrin suuruisen tunkeuman saavuttamiseksi sekä muut erityistoimenpiteet, kuten kairan lyöminen. Lisäksi merkitään kairauksen aikana tehdyt muut havainnot, joita voidaan käyttää apuna kairaustulosten tulkitsemisessa, arvio maalajeista ja kerrospaksuuksista sekä kairauksen päättymisen syy. (24, s. 6 - 7.)

3.1.2 Heijarikairaus

Heijarikairaus soveltuu painokairausta paremmin tiiviiden ja karkearakeisten maakerrostumien tutkimiseen, mutta sen ominaisuudet eivät sovellu esimerkiksi savi- ja silttikerrostumien tutkimiseen. Heijarikairauksen avulla voidaan myös määrittää esimerkiksi kiinteään pohjakerrokseen lyötävien tukipaalujen pituus. (20, s. 250 - 253; 24, s. 9 - 11.)

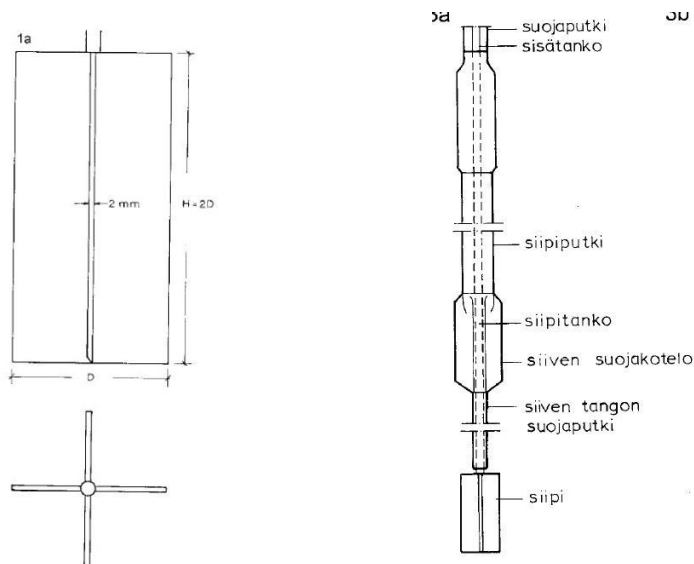
Heijarikairaus suoritetaan painokairauksen tavoin monitoimikairan avulla. Nykyisin kairaukset tehdään pääasiassa monitoimikairoilla. Heijarikairaus suoritetaan pudottamalla vakiomassaista painoa eli heijaria vakiodulta korkeudelta kairaankiinnitetylle lyöntialustalle. Heijarin massa on 63,5 kg ja pudotuskorkeus on 50 cm. Kuten painokairauksessa, myös heijarikairauksessa merkitään mittauspöytäkirjaan 0,2 metrin uppoaman saavuttamiseksi tarvittava iskumäärä. Kairaus lopetetaan yleensä siinä vaiheessa, kun päästään tavoitesyvyyteen, kairauskärki pysähtyy kiveen, lohkareeseen tai kallioon tai 0,2 metrin tunkeuman

saavuttamiseksi tarvitaan jatkuvasti yli 200 iskua. (20, s. 250 - 253; 24, s. 9 - 11.)

3.1.3 Siipikairaus

Siipikairaus soveltuu hienorakeisten ja pehmeiden maakerrosten, kuten savi-, siltti-, lieju- ja turvekerrosten tutkimiseen. Siipikairauksen avulla pyritään määrittämään maakerroksen leikkauslujuus maaperässä vallitsevissa jännitys- ja kosteusolosuhteissa. Lisäksi mittaustulosten perusteella voidaan arvioida maaperän suhteellisia leikkausjännitys-muodonmuutos -ominaisuuksia sekä esimerkiksi huippulujuus, häiritty lujuus ja jäännöslujuus. Häiriintymättömän maakerroksen ja häiriintyneen maakerroksen välisestä suhteesta saadaan määritettyä maakerroksen sensitiivisyys, S_t . Hyvin sensitiivisen, $S_t > 30$, maakerroksen käsittely voi olla hyvin hankalaa, ja rakennustöiden aiheuttama maaperän häiriintyminen voi aiheuttaa kantavuuden heikentymistä ja jopa sortumia. (25, s. 1; 26, s. 45; 27, s. 18.)

Siipikairan kärki muodostuu neljästä toisiaan vastaan kohtisuorassa olevista levyistä, joiden korkeutta ja leveyttä voi vaihdella tutkittavan maan ominaisuuksien mukaan. Kuvassa 8 on standardin mukainen siipikairan kärkikappale sekä havainnekuva siipikairan alaosa.

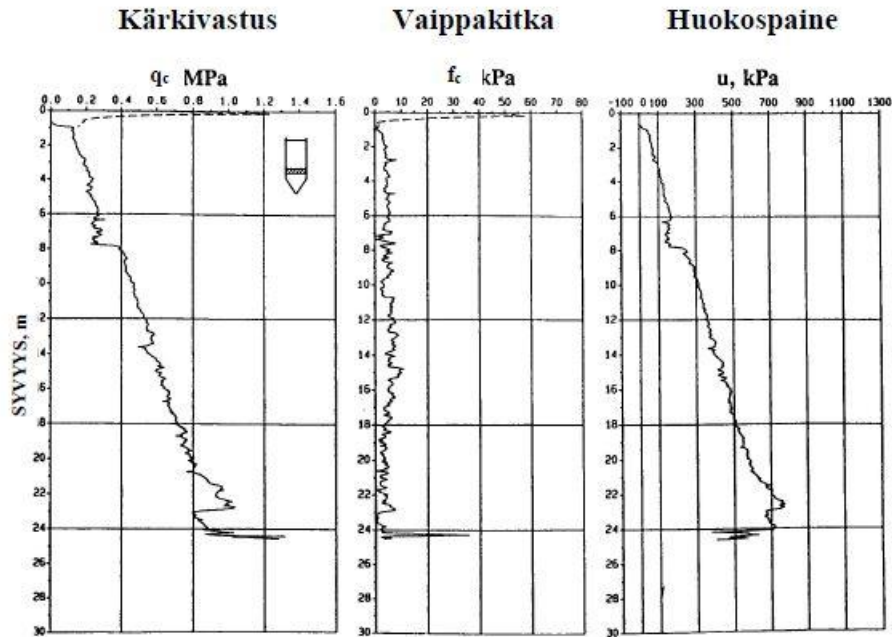


KUVA 8. Siipikairan standardin mukainen kärkiosa sekä siipikairan alaosa (25, s. 2 - 3)

Siipikaira upotetaan maahan 200 - 500 mm:n päähän halutusta kairaus­syvyydestä, minkä jälkeen kairan kärki työnnetään hitaasti haluttuun kairaus­syvyyteen. Tämän jälkeen suoritetaan niin sanotun suljetun leikkaus­lujuuden mittaus pyörittämällä siipikairaa 0,1° sekunnissa. Kairan varteen pyöritys­vaiheessa kohdistuvaa kitkaa pyritään eliminoimaan esimerkiksi suo­japutken avulla. Tämän jälkeen pyöritetään siipikairaa kaksikymmentä kierrosta nopeudella 1 - 2 sekuntia/kierros, minkä jälkeen voidaan määrittää häirit­tyä leikkaus­lujuutta vastaava maksimimomentti. Kairaus­mittauksia tehdään haluttuun syvyyteen asti esimerkiksi 0,5 - 1,0 metrin välein. (20, s. 258 - 260; 25, s. 1 - 5.)

3.1.4 Puristinkairaus

Puristinkairaus eli CPT-kairaus on menetelmä, jonka avulla voidaan tutkia pehmeiden ja kivettömien maakerrosten lujuus- ja tiiviyso­minaisuuksia sekä maakerrosten rajapintojen sijaintia. Puristinkairauksessa kairaa ja sen päässä olevaa standardinmukaista kärkikappaletta painetaan maahan vakionopeudella 20 mm/s. Samalla mitataan kärkikappaleeseen kohdistuvaa kärkivastusta sekä kärkikappaleen seinämään vaikuttavaa kitkavastusta. Kairan kärkikappaleeseen ja sen seinämään vaikuttaa kitkavastuksen lisäksi myös huokosvedenpaine, jonka mittaamiseksi tarvitaan CPTU-kaira. Huokosvedenpaineen mittauksen avulla saadaan eliminoitua huokosvedenpaineen aiheuttama vaikutus kärkivas­tuksen ja vaippakitkan arvoihin. Kuvassa 9 on esitetty CPTU-kairauksella saa­tavia mittaustuloksia. (28, s. 7 - 12.)



KUVA 9. CPTU-kairauksen avulla saatavat mittaustulokset (28, s. 10)

Kärkivastusarvojen perusteella voidaan arvioida maan tiiviytttä, kerroksellisuutta sekä rakeisuutta. Jos maakerrokset ovat ohuita, CPT-kairausten tulosten perusteella on vaikeaa määrittellä eri maakerrosten tiiveyksiä. Tämä johtuu siitä, että kärkivastuksen arvoon vaikuttavat alapuolisen kerroksen lisäksi myös yläpuolisten maakerrosten ominaisuudet. Mittauslaitteiston erottelukyvystä voidaan mainita, että esimerkiksi löyhän maakerroksen keskellä olevan tiiviin maakerroksen paksuus tulisi olla ainakin 0,4 - 0,7 metriä, jotta siitä saataisiin edustavia mittaustuloksia. Tiiviin maakerroksen ympäröimän löyhän maakerroksen paksuus taas tulisi olla vähintään 0,2 - 0,4 metriä. CPTU-kairauksen sisältämän huokosvedenpainemittauksen avulla voidaan havaita paljon ohuempiakin maakerroksia. Kärkivastus on suurin silloin, kun maa-aines on karkeaa, maa on tiiviissä tilassa, maa on ylikonsolidoitunutta ja maassa vallitseva pystyjännitys on suuri. (28, s. 43 - 44.)

Vaippakitkan avulla voidaan mitata kairauksen aikana kairaamiseen kohdistuvia vaakasuuntaisia paineita. Vaippakitkan mittaustuloksia kasvattavat maa-aineksen karkeus, kitkamaan tiiviyysaste ja koheesiomailla ylikonsolidaatioaste. Suuri sensitiivisyys eli häiriintymisherkkyys taas laskee vaippakitkan arvoa. Kärkivastuk-

sen, vaippakitkan ja huokosvedenpaineen muutoksista ja keskinäisistä suhteista voidaan arvioida eri maalajien välisten kerrosten sijaintia. (28, s. 44.)

3.1.5 Puristin-heijarikairaus

Puristin-heijarikairauksessa yhdistetään edellä mainittujen puristinkairauksen ja heijarikairauksen ominaisuuksia. Tällöin pystytään tutkimaan yhdellä menetelmällä sekä pehmeiden savi- ja silttimaiden että tiiviiden kitkamaiden ominaisuuksia. Puristin-heijarikairauksessa käytetään heijarikairan kärkikappaletta, joka kestää lyömistä paremmin kuin puristinkairan kärki, johon on sijoitettu erilaisia mittausantureita. Tästä johtuen puristusvoiman mittaaminen ei ole yhtä tarkkaa kuin puristinkairauksessa. Puristin-heijarikairauksen suorittaminen eroaa esimerkiksi normaalista puristinkairauksesta sillä tavalla, että kairaustankoja pyöritetään koko kairauksen ajan. Pyörittämisen tarkoituksena on vaippakitkan pienentäminen sekä kairaustankojen pitäminen suorana kairausta suoritettaessa. (28, s. 59.)

Puristin-heijarikairaus aloitetaan puristinkairauksena, jota jatketaan siihen asti, kunnes saavutetaan kairauslaitteen maksimipuristusvoima. Tämän jälkeen siirytään heijarikairausvaiheeseen, joka kestää niin pitkään, kunnes kokonaislyöntiluku kahdella peräkkäisellä 0,2 metrin kerroksella on korkeintaan viisi lyöntiä / 0,2 m. Puristin-heijarikairaus tulee päättää heijarikairaukseen. Kairauslaitteiston maksimipuristusvoima on yleensä 15 - 30 kN, ja vääntömomentin tulee olla vähintään 200 Nm. Kairauslaitteiston pitää pystyä painamaan kairaustankoa maahan nopeudella 20 +/- 5 mm/s, ja pyörityslaitteen pitää pyörittää tankoa vakionopeudella 12 +/- 3 kierrosta minuutissa. Heijarin paino (63,5 kg) ja pudotuskorkeus (0,5 m) ovat samat kuin tavallisessa heijarikairauksessa. Lyöntitiheys heijarivaiheessa tulisi olla 25 - 45 lyöntiä minuutissa. Kairauksen aikana mitataan kairan upottamiseen tarvittava puristusvoima, pyörittämiseen tarvittava vääntömomentti, lyöntien määrä ja kairausvyvyys. (28, s. 61 - 63.)

3.1.6 Tärykairaus

Tärykairaus on dynaaminen kairausmenetelmä, joka voidaan suorittaa kevyellä porauskalustolla, esimerkiksi käsikäyttöisellä kallioporakoneella. Tärykairausta käytetään monesti hankalakulkuisissa kohteissa, jonne voi olla vaikea päästä

tavallisilla porausvaunuilla. Tärykairauksen avulla halutaan yleensä varmistaa se, että kalliopinta ei sijaitse halutun syvyyden yläpuolella. Sen avulla voidaan lisäksi selvittää esimerkiksi kalliopinnan tai kantavan pohjamaan sijaintisyvyys. Ongelmana kalliopinnan selvittämisessä on se, että menetelmä ei kykene erottelemaan suuria kiviä kalliosta. Tämän johdosta varmoihin tuloksiin kalliopinnan etsinnässä päästään vain suorittamalla useita kairauksia lähekkäisistä pisteistä. Menetelmä ei sovellu kairausvastuksen selvittämiseen, sillä käytettävät porakoneet toimivat eri tehoilla, ja jopa yksittäisen porauslaitteen perättäisten iskujen tehoissa voi olla eroja. (24, s. 8.)

Tärykairausta tehtäessä voidaan havaita selkeät maalajien kerrosrajat esimerkiksi kairaajan tuntohavaintojen perusteella. Nopeana tutkimusmenetelmänä sen avulla voidaan myös selvittää maan kivisyyttä tai lohkaraisuutta tekemällä useita lähekkäin sijaitsevia kairauksia. Painokairauksen tapaan tärykairaus ulotetaan joko määräsyyvyyteen tai läpäisemättömään kerrokseen tai kohteeseen asti. Kairauspöytäkirjaan on merkittävä kairauksen päättymisen syy. (24, s. 8.)

3.1.7 Porakonekairaus

Porakonekairausta käytetään muun muassa kalliopinnan korkeustasoa selvittäessä, kallion laatua arvioitaessa ja kallionäytteitä otettaessa. Sitä voidaan käyttää myös pohjavesiputkien sekä erilaisten työputkien asentamiseen. Porakonekairausta käytettäessä tiiviin kalliopinnan tai suuren kivilohkareen sijainti havaitaan yleensä kairan tunkeutumisen nopeuden selkeästä pienenemisestä. Oletetun kallion pinnan saavuttamisen jälkeen tuleekin porata vielä vähintään 3 metriä, jotta voidaan olla varmoja, että kyseessä on todella kallio eikä esimerkiksi suuri kivi. (29, s. 3 - 5.)

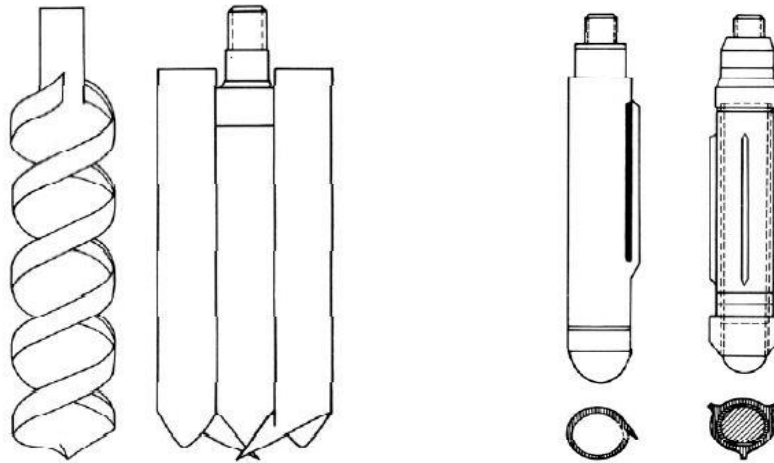
Porakonekairauksen aikana käytetään vesi- tai ilmahuuhtelua, jonka avulla saadaan poistettua kairan sisään joutuva materiaali. Erityisesti vesihuuhtelua käytettäessä voidaan kairausten yhteydessä joutua käyttämään suoja-putkia. Niiden käytöllä pyritään estämään esimerkiksi huuhteluveden pääseminen rakennekerrokseen silloin, kun porataan rakennetulla alueella. Suoja-putkia käytetään myös paksujen maakerrosten läpi porattaessa sekä vesistö-kairauksissa. (29, 5 - 6.)

Porakairan tunkeumanopeuden avulla arvioidaan muun muassa kallion kovuutta sekä rikkonaisuutta. Sen perusteella voidaan myös arvioida kallion päällä olevien maakerrosten ominaisuuksia sekä maakerrosrajojen sijaintia. Porakonekairausten yhteydessä voidaan myös kerätä näytteitä niin maaperästä kuin kalliostakin. Kallionnäytteitä otetaan joko erillisillä näytteenottimilla tai keräämällä huuhteluviedestä talteen porauksen yhteydessä muodostamaa materiaalia eli niin sanottua porasoijaa. (29, s. 6.)

3.1.8 Näytteenotto

Maaperästä otetaan usein myös näytteitä, joiden ominaisuuksia tutkitaan laboratorioissa tai paikan päällä. Näytteet voivat olla näytteenottotavasta riippuen joko häiriintyneitä tai häiriintymättömiä. Näytteenottomenetelmää valittaessa tulee ottaa huomioon muun muassa maalajin ja haluttujen näytteiden vaikutus eri menetelmien käyttökelpoisuuteen. Ennen näytteenottoa on tehtävä esimerkiksi silmämääräinen arvio maaperän koostumuksesta ja ominaisuuksista sekä mahdollisuuksien mukaan maaperän geologisia ominaisuuksia selvittäviä kairauksia. Tämän jälkeen voidaan tehdä näytteenottosuunnitelma, jossa määritetään näytteenottopaikat, -syvyydet ja -tavat. (30, s. 3 - 4.)

Häiriintyneet näytteet ovat menettäneet luontaisen rakenteensa, joten niistä ei voida tutkia esimerkiksi lujuus- tai muita geoteknisiä ominaisuuksia. Häiriintyneistä näytteistä voidaan kuitenkin määrittää muun muassa maalajin rakeisuus, ja joissain tapauksissa esimerkiksi savinäytteen vesipitoisuus. Häiriintyneiden maanäytteiden ottamiseen käytetään yleisimmin kierre- tai lapiokairaa. Tämän lisäksi käytetään yleisesti kannu- ja pienoismäntäkairoja sekä heijarikairaan liitettäviä näytteenottimia. Näytteenottimia on esitetty kuvassa 10. (30, s. 3 - 5.)



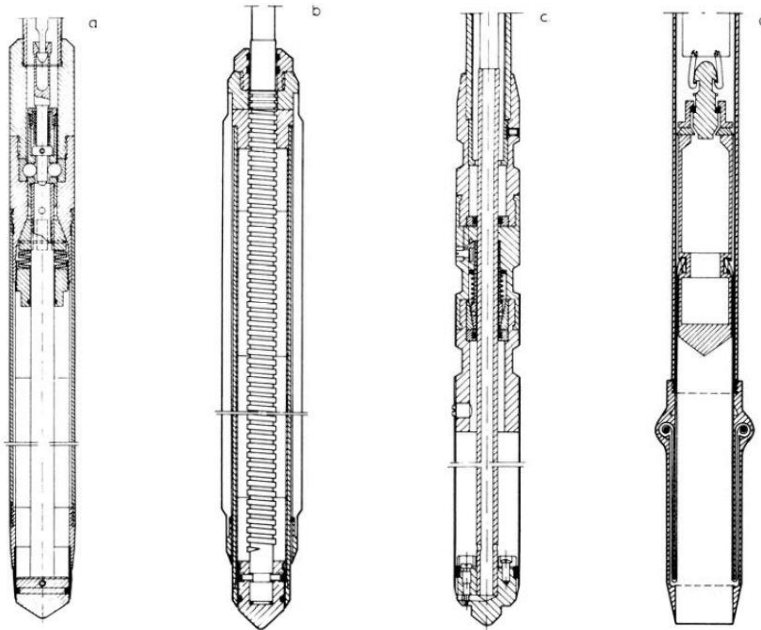
KUVA 10. Näytteenottimet vasemmalta oikealle: kierreetin, lapio-otin, kannuotin ja pienoismäntäotin (30, s. 9 - 10)

Maaperästä on lähes mahdotonta ottaa täysin häiriintymättömiä näytteitä. Häiriintymättömät maanäytteet pyritään kuitenkin ottamaan niin, että näytteenottolanteessa häiritäisiin maaperän luontaista tilaa mahdollisimman vähän. Näytteenoton onnistumisen edellytyksenä on se, että osataan valita parhaiten kyseisiin maaperäolosuhteisiin soveltuvat näytteenottomenetelmät ja -laitteet. Tarkoituksena on ottaa näytteitä, jotka vastaisivat mahdollisimman hyvin luonnontilaisen maaperän olosuhteita. (30, s. 3.)

Ennen häiriintymättömien maaperänäytteiden ottamista on erityisen tärkeää tehdä tarkempia kairaustutkimuksia, jotta saadaan selvitettyä esimerkiksi pohjavesipinnan korkotaso ja edustavimmat näytteenottopisteet. Häiriintymättömiä maanäytteitä voidaan ottaa esimerkiksi koekuopan pohjalta. Tällöin metallinen, molemmista päistä avoin näytepurkki painetaan maahan niin, että näytteen yläpinta on purkin yläreunan tasolla. Näytepurkin päälle laitetaan kansi, se irrotetaan maasta, käännetään ympäri, minkä jälkeen näyte tasataan sekä purkki suljetaan myös toisesta päästä. Purkin irrottamiseksi joudutaan todennäköisesti kaivamaan maata sen ympäriltä. (30, s. 6.)

Häiriintymättömiä maanäytteitä voidaan ottaa myös kairaamalla muun muassa ST I-, ST II- ja norjalaistyyppisillä mäntäkaivoilla, joiden avulla saadaan samasta

kairauspisteestä yksi näyte syvyysmetriä kohti. Kuvassa 11 on esitetty neljä erityyppistä mäntäkairaa.



KUVA 11. Näytteenottimet vasemmalta oikealle: ST I- ja ST II-tyyppiset, norjalaistyyppinen sekä foliomäntäkaira (30, s. 11)

Edellä mainitut näytteenottimet sisältävät suojaputken sekä sen suojassa olevan sisäsylinterin ja näytepurkin tai -purkit. Norjalaistyyppisessä mäntäkairassa on vain yksi 80 senttimetriä pitkä näytteenottoputki, kun ST I- ja ST II-näytteenottimissa on useita pienempiä näytepurkkeja. Foliomäntäkairoilla saadaan otettua yli metrin pituisia yhtämittaisia näytteitä, mutta niiden käsittely näytteenoton jälkeen on huomattavasti hankalampaa kuin jo valmiiksi purkitettujen näytteiden käsittely. (30, s. 6 - 8.)

3.1.9 Pohjavesipinnan määrittäminen

Pohjavesipinnan korkeuden määrittäminen on usein tärkeässä osassa pohjatutkimuksia tehtäessä. Pohjavesipinnan sijainti perustustasoon nähden vaikuttaa esimerkiksi maaperän kantavuuteen sekä painumaominaisuuksiin, ja joissain tapauksissa se voi vaikuttaa jopa perustussuunnitteluun. Luotettavien tulosten saamiseksi pohjavesipinnan korkeus pitäisi mitata riittävän pitkältä ajanjaksolta,

sillä sen korkeustaso riippuu suurelta osin sateisuudesta. Lisäksi pohjavesipinnan korkeus voi vaihdella huomattavasti eri vuodenaikojen mukaan. (20, s. 276 - 277.)

Pohjavesipinnan korkeustaso määritetään yleensä pohjavesiputkien avulla. Yksinkertaisimmillaan korkotaso voidaan määrittää yhdestä putkesta, mutta jos halutaan tarkempaa tietoa esimerkiksi pohjaveden virtaussuunnasta, käytetään vähintään kolmea pohjavesiputkea. Tällöin saadaan selvitettyä pohjaveden korkeudet eri havaintopisteissä sekä veden virtaussuunta maaperässä. (20, s. 276 - 277.)

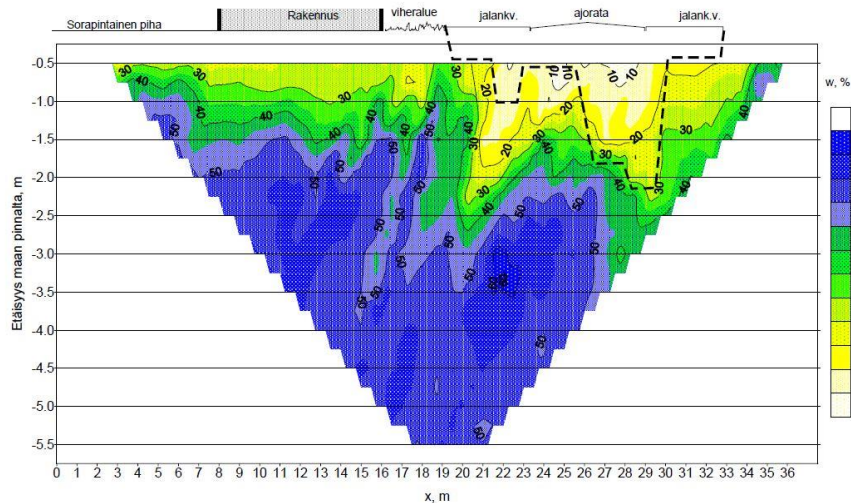
3.1.10 Muut tutkimusmenetelmät

Muita pohjarakennesuunnittelussa käytettäviä maaperän tutkimusmenetelmiä ovat esimerkiksi seisminen luotaus ja sähköinen vastusluotaus. Näitä menetelmiä käytetään pääasiassa tielinjausten kartoittamiseen. Lisäksi tielinjauksilla voidaan käyttää myös maatutkaa jo olemassa olevien rakennekerrosten sijainnin selvittämiseksi tai uusien tierakenteiden laadunvarmistuksessa.

Seismissen luotauksen tarkoituksena on selvittää kallioperän sekä eri maakerrosten sijainti maanpintaan nähden. Käytännössä mittaus tapahtuu niin, että maan pinnalla räjäytetään pieni räjähdde, joka aiheuttaa maaperässä etenevän värinäaallon. Maan pinnalle on myös sijoitettu tasavälein värinää havainnoivia geofoneja, jotka mittaavat räjähdyspisteestä lähtevän värinän kulkuajan eri etäisyyksille. Värinäaallot voivat välittyä geofoneille eri reittejä pitkin. Lähellä olevat geofonit havaitsevat yleensä ensimmäisenä lähinnä maanpintaa olevassa kerrostumassa etenevän värinän. Kauempana sijaitseville geofoneille värinä voi välittyä myös syvemmällä olevien maakerrosten tai kallion kautta. Tämä johtuu siitä, että värinäaaltojen nopeus vaihtelee maalajin, sen tiiveyden ja kosteuspitoisuuden mukaan niin, että tiheimmässä kerroksessa värinäaallo etenee nopeimmin. Suuri kosteuspitoisuus kasvattaa myös värinän etenemisnopeutta. (20, s. 281 - 282; 32.)

Sähköisen vastusluotauksen avulla tutkitaan maakerrosten vesipitoisuutta. Aiempien tutkimusten perusteella tiedetään, millaisia vesipitoisuuksia eri maalajit normaalisti sisältävät. Kuvassa 12 esitetään sähköisen vastusluotauksen avulla

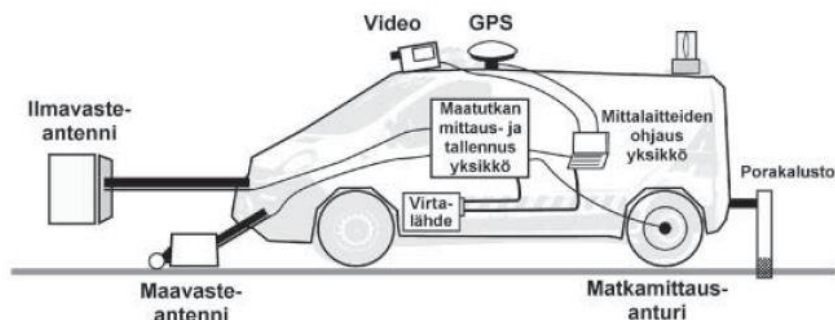
saatu maaperän vesipitoisuusjakauma. Selvittämällä eri maakerrosten vesipitoisuudet voidaan näin ollen määrittää tutkittavalla alueella esiintyvät maalajit ja niiden kerrosrajat. (20, s. 280 - 281; 31, s. 4 - 8.)



KUVA 12. Maakerrosten vesipitoisuus sähköisen vastusluotauksen avulla määritettynä (31, s. 7)

Menetelmän avulla voidaan selvittää myös kalliopinnan tai tiiviiden maakerrosten sijainti. Sähköisen vastusluotauksen mittaussyvyys voi ulottua 15 metriin asti. Sähköisessä vastusluotauksessa maahan asennetaan mittauselektrodeja vakioetäisyydelle toisistaan. Mittauslaitteisto mittaa elektrodeille syötettävät jännitteet sekä elektrodien välille muodostuvat potentiaalierot. Lähellä toisiaan olevat elektronit mittaavat maan pinnan lähellä olevien maakerrosten ominaisvastusta, kun taas mittauslinjan ääripäissä olevien elektronien avulla saadaan selville syvällä olevien kerrostumien ominaisvastukset. (20, s. 280 - 281; 31, s. 4 - 8.)

Maatutkaluotauksessa käytetään hyväksi radiotaajuisia sähkömagneettisia aaltoja, joiden taajuus vaihtelee 10 - 3000 megahertsin välillä. Yleisimmin käytetty maatutkatyyppi on niin sanottu impulssitutka, jonka voi asentaa esimerkiksi autoon kuvan 13 tavalla. (33, s. 10 - 12.) Maastotutkimuksia tehtäessä maatutkaa voidaan lisäksi vetää esimerkiksi moottorikelkan tai mönkijän perässä (36).



KUVA 13. Autoon kytketty maatutkauslaitteisto (33, s. 13)

Impulssitutka lähettää tutkittavaan väliaineeseen pulssin, jonka pituus vaihtelee alle nanosekunnista kymmeneen nanosekunteihin. Maahan kohdistetun pulssin sisältämästä energiasta osa heijastuu takaisin kohti maanpintaa maaperän sähköisiltä ominaisuuksiltaan eroavista rajapinnoista ja osa etenee syvempiin kerroksiin heijastuen vasta sieltä. Takaisin heijastuvasta signaalista mitataan kulku-aika sekä amplitudi, joiden perusteella maaperästä ja sen kerroksista voidaan määrittää jatkuva luotausprofiili. Menetelmän käyttö on viime aikoina lisääntynyt, koska mittaus voidaan tehdä nopeasti rakenteisiin koskematta. (33, s. 10 - 12.)

3.2 Perustusten mitoituskriteerit

Tuulivoimalan perustuksia mitoitettaessa tulee ottaa huomioon monia asioita. Perustusten kautta maaperään tai pohjarakenteisiin siirtyvät niin yläpuolisten rakenteiden paino kuin myös tuulen aiheuttaman momentin synnyttämä kuormitus. Kuormitusten lisäksi tulee huomioida maaperän ominaisuudet, kuten koonpuristuvuus, leikkauslujuus ja kantavuus. (21, s. 9; 22, 13.)

Routiminen on Suomen olosuhteissa tekijä, joka pitää normaalisti ottaa huomioon pohjarakentamisessa. Tuulivoimaloiden perustustasot ulottuvat kuitenkin yleensä selvästi routarajan alapuolelle tai tuulivoimala perustetaan kallionvaraisesti. Kummassakaan tapauksessa routiminen ei ole ongelma, joten sen käsittely on jätetty työn teoriaosuuden ulkopuolelle.

Suomessa käytetään geoteknisessä suunnittelussa ja rakennesuunnittelussa eurokoodin mukaista mitoitus tapaa. Virallinen ohjeistus geoteknisen mitoituksen tekemiseen löytyy Suomen standardisointiliiton julkaisusta SFS-EN 1997-1, Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Eurokoodi 7. Se sisältää tarkemmat suunnitteluohjeet sekä antura- ja paaluperustuksille että ankkureille, stabiliteetille ja penkereille. Suomen rakennusinsinöörien liiton julkaisu, RIL 207-2009 Geotekninen suunnittelu, sisältää käytännössä samat tiedot kuin edellä mainittu standardi. (34.)

Eurokoodi 7 mukaan geotekniset mitoitus tavat (Design Approach, DA) voidaan valita kolmesta eri vaihtoehdosta. Kukin mukana oleva maa on itse valinnut mitoitus tapansa käytössä olevista vaihtoehdoista DA1, DA2 ja DA3. Mitoitus tapa DA2 on otettu Suomessa käyttöön antura-, laatta- ja paaluperustuksien sekä ankkuri- ja tukirakenteiden suunnittelussa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että mitoitus tapa DA2 on käytössä tuulivoimaloiden pohjarakenteita suunniteltaessa. Luiskien, penkereiden ja kokonaisvakavuuden mitoituksessa käytetään mitoitus tapaa DA3. (34, s. 53.)

3.2.1 Mitoitus kuormat

Tuulivoimaloiden perustuksille tulevat mitoitus kuormat ovat riippuvaisia tuulivoimalan fyysisistä mitoista sekä tuulen aiheuttamista voimalan siipiin kohdistuvista vaakasuuntaisista kuormituksista. Yläpuolisten rakenteiden paino ja tuulesta aiheutuva momenttivoima kuormittavat tuulivoimalan pohjarakenteita. Voimalaan kohdistuvat vaakakuormat aiheuttavat suuren kaatavan momentin. Samalla voimalan perustusten tehokas pinta-ala pienenee huomattavasti ja maahan kohdistuva paine kasvaa.

Mitoitus kuorman suuruus lasketaan kahdella eri kaavalla, jotka ovat standardissa EN 1997-1 ilmoitetut 6.10a ja 6.10b. Molemmilla kaavoilla lasketaan lisäksi kaksi erilaista kuormitusvaihtoehtoa, ja näistä epäedullisin valitaan mitoittavaksi kuormaksi. (34.)

Kaava 6.10a

$$1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf}$$

Kaava 6.10b

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \psi_{0,i} * Q_{k,i}$$

K_{FI} = luotettavuusluokkakerroin

$G_{kj, sup}$ = pysyvän kuorman ominaisarvon yläraja

$G_{kj, inf}$ = pysyvän kuorman ominaisarvon alaraja

$Q_{k,1}$ = määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo

$\sum_{i>1} \psi_{0,i} * Q_{k,i}$ = muut samanaikaisesti vaikuttavat muuttuvat kuormat

Käytännössä mitoituskuormat voidaan siis laskea neljällä eri tavalla taulukon 1 mukaisesti. Muuttuvan kuorman vaikutusta ei huomioida kaavassa 6.10a, ja kaavalla 6.10b laskettaessa se oletetaan aina epäedulliseksi. Kuormien vaikutusten laskennassa käytettävät osavarmuusluvut löytyvät liitteestä 1. Samassa liitteessä on esitetty myös mitoistavan 2 mukaisessa laskennassa käytettävät osavarmuuslukujen yhdistelmät. (34, s. 49 - 50.)

TAULUKKO 1. Mitoituskuormien laskentatavat (34, s. 49)

Kaava	Pysyvä kuorma	Muuttuva kuorma
6.10a	Epäedullinen	-
6.10a	Edullinen	-
6.10b	Epäedullinen	Epäedullinen
6.10b	Edullinen	Epäedullinen

Liitteessä 2 on laskettu esimerkkinä tuulivoimalan aiheuttamat kuormitukset kaavan 6.10b mukaisesti sekä epäedullisilla että edullisilla pysyvillä kuormilla. Samassa liitteessä on laskettu lisäksi maan kantokestävyys molemmissa kuormitustilanteissa.

3.2.2 Maaperän kantokestävyys

Maaperän kantokestävyydellä ilmaistaan sitä kuormitusta, jonka maaperä kestää murtumatta. Maaperän kantokestävyuden mitoitusarvo lasketaan eurokoodien mukaisesti ottaen huomioon pysty- ja vaakakuormien kokonaisvaikutus

teholliselle pohjapinta-alalle. Laskennassa käytettävää mitoitus tapaa 2 voidaan soveltaa kahdella eri tavalla.

Ensimmäinen tapa on DA2, jossa kuormien tai niiden vaikutusten, maan ominaisuuksien sekä käytettävän rakenteen kestävyys ominaisarvot muutetaan mitoitusarvoiksi osavarmuuskertoimien avulla heti laskennan alkuvaiheessa. Toinen tapa on DA2*, jossa laskenta suoritetaan murtorajatilan laskentaan asti ominaisarvoilla. Vasta tässä laskennan viimeisessä vaiheessa otetaan käyttöön osavarmuusluvut. Käytettäessä mitoitus tapaa DA2* kaikkien pysyvien kuormien oletetaan olevan epäedullisia. Liitteessä 3 on laskettu tuulivoimalan aiheuttamat kuormitukset myös mitoitus tavalla DA2*. Kuormitus yhdistelmät lasketaan molempien tapojen mukaisesti, ja saatavista tuloksista mitoittavaksi kuormitus yhdistelmäksi valitaan epäedullisin vaihtoehto. (21, s. 217 - 230; 34, s. 53; 35, s. 24.)

Laskennassa käytetään muun muassa maan tilavuuspainoja perustasanturan ylä- ja alapuolella, perustuksen mittoja, perustussyvyyttä sekä maalajille ominaista kitkakulmaa φ tai koheesiota c . Kantokestävyys mitoitus arvon laskenta suoritetaan kaavan 1 mukaisesti. (21, s. 217 - 230; 35, s. 47 - 48.) Liitteissä 2 ja 3 on laskettu esimerkkinä tuulivoimalan aiheuttamat kuormitukset kahdella eri tavalla sekä maan kantokestävyys kyseisissä kuormitustilanteissa.

$$R/A' = c' N_c b_c s_c i_c + q' N_q b_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma \quad \text{KAAVA 1}$$

R = mitoituskuorma [kN]

A' = tehokas kuormitus pinta-ala [m²]

c' = tehokas koheesio

q' = maan tehokas tilavuuspaino perustustason yläpuolella [kN/m³]

γ' = maan tehokas tilavuuspaino perustustason alapuolella [kN/m³]

B' = perustuksen tehokas leveys [m]

N_c, N_q ja N_γ = kitkakulmasta φ riippuvia kantavuuskertoimia

b_c, b_q ja b_γ = perustuksen pohjan kaltevuudesta riippuva kerroin

s_c, s_q ja s_γ = anturan muodosta riippuva kerroin

i_c , i_q ja i_v = vaakakuorman kuormitusresultantille aiheuttaman kaltevuuden kerroin

Lisäksi pitää tarkastaa, että kaikissa murtorajatiloissa pätee kaavan 2 mukainen ehto.

$$V_d \leq R_d$$

KAAVA 2

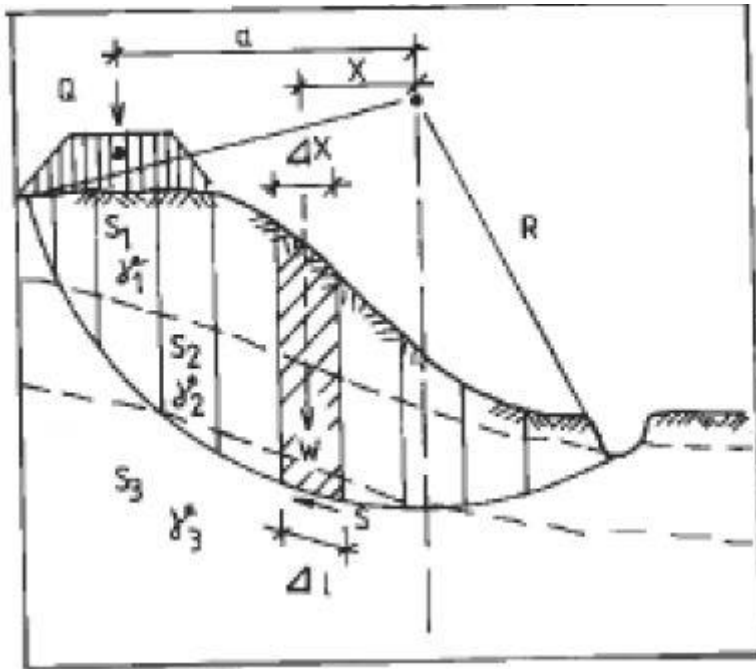
V_d = pystysuoran kuorman mitoitusarvo

R_d = kestävyuden mitoitusarvo

Pohjamaan kantokestävyys riippuu maan ominaisuuksien lisäksi usein kuorman suuruudesta. Esimerkiksi kitkamailla maan pinnalle tuotava kuorma muuttaa liukupinnalla vaikuttavien ja liukumista estävien voimien suuruutta. Tämän vuoksi geoteknistä suunnittelua voidaan pitää normaalia rakennesuunnittelua monimutkaisempänä aihepiirinä. (35, s. 21.)

Liukupinta-analyysi on yksi maaperän kantavuuden selvittämiseksi tehtävä tarkastelu. Liukupinta-analyysin lähtökohtana on selvittää se, voiko maaperään kohdistuva kuormitus aiheuttaa maaperän murtumisen eli maakappaleen liukumisen pois paikoiltaan kuormituksen johdosta. Murtuminen on mahdollista niin tasaiseen maastoon kuin rinteeseen tai esimerkiksi rinteiden päälle perustettaessa. (20, s. 201 - 203.)

Epähomogeenisessä maaperässä liukupinta muodostuu yleensä kohtaan, jossa se kulkee mahdollisimman pitkän matkan heikosti kantavissa maakerroksissa. Tätä tietoa käytetään vaarallisimman liukupinnan määrittämisessä. Kun liukupinnan todennäköisin sijainti on määritetty, alkaa varsinainen liukupintalaskenta. Laskennassa huomioidaan murtumista edesauttavat tekijät eli kuormituksen aiheuttama aktiivimomentti liukupinnan keskipisteen suhteen sekä murtumista leikkauspinnassa vastustavat kitka- ja koheesivoimat, jotka aiheuttavat liukupinnan keskipisteen suhteen niin sanotun passiivimomentin. Tilanne on esitetty kuvassa 14. (20, s. 201 - 213.)



KUVA 14. Periaatekuva koheesiomaalle tehtävässä liukupintalaskennassa käytettävistä parametreista (20, s. 207)

Jos kuormitus välittyy pohjamaalle jäykän, laattamaisen kappaleen kautta, liukupinnan alkupisteeksi muodostuu yleensä homogeenisissä maissa jäykän laatan reuna. Jos kuormitus tulee esimerkiksi paikalle kasatusta penkereestä, liukupinnan alkupiste voi muodostua mihin tahansa kuormituksen alaisena olevaan kohtaan. (20, s. 201 - 203.)

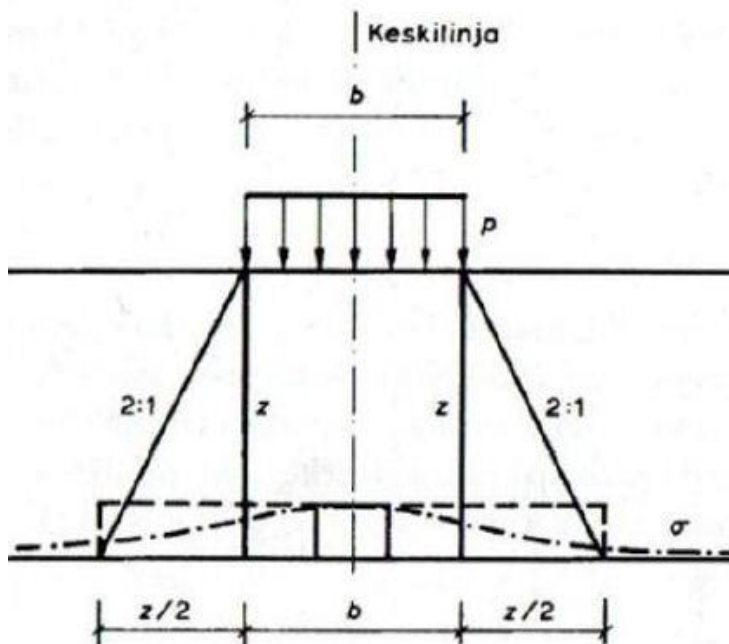
3.2.3 Painuminen

Painuminen on yksi yleisimmistä maakerrosten päälle perustetuille rakenteille tapahtuvista ilmiöistä. Suurin osa maaperässä tapahtuvasta painumasta johtuu maaperän tiivistymisestä eli konsolidaatiosta. Konsolidoituminen tarkoittaa sitä, että maa-aineksessa oleva huokostilavuus pienenee kuormituksen vaikutuksesta. Kitkamailla alkupainuma voi olla suuri, ja kyseisillä mailla painuma laske- taankin yleensä joko alkupainuman tai konsolidaatiopainuman avulla. Kitka- maan alkupainuma on kimmoisaa muodonmuutosta, joten kuormituksen poistu- essa maanpinta palautuu ainakin osittain alkuperäiseen tasoonsa. Hienorakei- sissa koheesiomaalajeissa alkupainuma on pieni, koska maapartikkeleiden vä- lissä oleva vesi ei pääse purkautumaan huokosista kovin nopeasti. Tämän

vuoksi painumalaskenta suoritetaan yleensä pitkäaikaisen konsolidaatiopainuman avulla. (20, s. 118 – 120; 36.) Painumalaskentaesimerkkejä löytyy liitteestä 4.

Maaperän kokoonpuristuvuutta arvioidaan häiriintymättömälle maaperänäytteelle tehtävällä ödometrikokeella. Sen avulla voidaan määrittellä muun muassa maaperänäytteen konsolidaatiojännitys σ_c , kokoonpuristuvuusmoduuli M , kokoonpuristuvuusindeksi C_c , moduuliluku m ja moduuliekspONENTTI β . Näiden parametrien avulla voidaan laskea rakenteen painumien suuruus sekä painumanopeudet. (20, s. 120 - 130.)

Painumalaskelmien tekemiseksi tulee laskea perustuksen ja sen päällisten rakenteiden maaperään kohdistamat lisäjännitykset. Kuormien aiheuttamat lisäjännitykset lasketaan niiden ominaisarvoista. Käsin laskettaessa käytetään yleensä likimääräismenetelmää, jossa kuorman aiheuttama jännitys pienenee syvemmälle mentäessä suhteessa 2:1. Menetelmän avulla voidaan laskea jäykien laattojen, kuten perustusanturoiden ja taipuisien laattarakenteiden, kuten tiepenkereiden pohjamaahan aiheuttamia lisäjännityksiä. Laskennassa käytettävä periaate on esitetty kuvassa 15. (20, s. 145 - 146.)



KUVA 15. Periaatekuva kuormien aiheuttaman lisäjännityksen jakautumisesta likimääräismenetelmällä laskettaessa (20, s. 145)

Kun halutaan saada tarkempia arvioita lisäjännityksistä, käytetään laskennassa Boussinesqin menetelmää, jossa tarkastellaan pistemäisten kuormitusten aiheuttamien jännitysten leviämistä maaperässä. Peruseriaatteena teoriassa on se, että kuormituksen aiheuttaman jännityksen suuruus on kääntäen verrannollinen kuormituspisteestä mitatun etäisyyden neliöön. Laajan maanpäällisen ja taipuisan kuorman tiettyyn pisteeseen aiheuttaman lisäjännityksen suuruus saadaan laskettua summaamalla kaikkien pistekuormien aiheuttamat jännitykset kyseisessä pisteessä. Menetelmän avulla voidaan laskea myös jäykkien laattojen aiheuttamia jännityksiä. (20, s. 151 - 156.)

Varsinaiset painumalaskelmat tehdään maaperätietojen, perustuksen mittojen sekä alku- ja lisäjännityksien perusteella. Perustuksen alle jäävä pohjamaa jaetaan kerroksiin niin, että aivan perustuksen alapuolella olevat kerrokset jaetaan ohuisiin, esimerkiksi 0,2 - 0,5 metrin paksuisiin kerroksiin. Syvemmillä olevat kerrokset taas voivat olla paksumpia, esimerkiksi 2 - 5 metriä. Tällä menetelmällä pohjamaan kokonaispainuma saadaan laskettua tarkemmin, koska perustukselta tuleva lisäjännitys pienenee syvemmälle mentäessä ja suhteelliset muodonmuutokset ovat suurimmat lähempänä perustuksen alapintaa. (20, s. 159.)

3.2.4 Kaatuminen ja liukuminen

Perustusrakenteet tulee mitoittaa kaatumista ja liukumista vastaan. Kaatumistarkastelussa otetaan huomioon kaatavien ja vakauttavien kuormien mitoitusarvot. Niiden momentit taas lasketaan todennäköisimmän kaatumispisteen suhteen. Teräsankkureiden avulla voidaan lisätä varmuutta kaatumista vastaan, mutta laskennassa ne voi ottaa huomioon vain silloin, kun ankkurit on jännitetty ja suojattu korroosiota vastaan. (35, s. 45 - 46.) Liitteessä 5 on esimerkki kaatumis- ja liukumisvarmuuden laskennasta.

Liukumisen estäminen on erityisen tärkeää silloin, kun perustetaan kaltevan kallion varaan, tai silloin, kun rakenteeseen kohdistuvat vaakakuormat ovat huomattavan suuria. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi patorakenteet. Yleensä määräävimmit mitoitusilanteet ovat kaatumis- ja liukumistarkastelussa samat.

Tällöin kaatavat vaakakuormat ovat suurimmillaan ja rakennetta vakauttavat pystykuormat pienimmillään. (21, s. 27 - 28; 35, s. 29 - 31, s. 47.)

Monissa rakenteissa liukuminen voidaan estää kasvattamalla rakenteen massaa, mutta tällöin pitää ottaa huomioon maaperän ja pohjarakenteiden kantavuus. Kallion varaan rakennettavissa perustuksissa liukumisen estäminen on helpointa tehdä kallioon kiinnitettävien teräspulttien avulla. Kallioon porattuihin reikiin asennetaan teräspultit, jotka jäävät yläpäästään paikalle valettavan perustuksen sisään. Tarvittaessa pultit voidaan myös valaa tai injektoida paikoilleen. (21, s. 27 - 28; 35, s. 46 - 47.)

Kaatumis- ja liukumistarkasteluja tehtäessä ei voida ottaa huomioon sellaisia kaatumista tai liukumista estäviä kuormia tai voimia, joiden pysyvyys on epävarmaa. Näin ollen esimerkiksi jännittämättömiä teräsankkureita ei voida huomioida laskennassa. (35, s. 46 - 47.)

3.2.5 Värähtely

Tuulivoimaloiden mittojen kasvaessa myös voimalan lapojen pyörimisliikkeestä aiheutuvat värähtelyt kasvavat. Voimalavalmistajat pyrkivät ratkaisuihin, joissa tuulivoimalan rakenteiden ominaistajuus olisi suurempi kuin roottorin suurin mahdollinen pyörimistäajuus. Näin voidaan välttää tilanteet, joissa roottorin pyörimistäajuus kävisi lähellä rakenteiden ominaistajuutta. Suurin syy voimalavalmistajien kiinnostuksesta resonoinnin minimoimiseen johtuu siitä, että se heikentää tuulivoimalan tehokkuutta. Rakenteiden resonointi voisi pahimmillaan aiheuttaa myös rakenteiden pettämisen. (37; 38.)

Tutkimusten mukaan roottorin suositellun pyörimistäajuuden tulisi olla vähintään 15 prosenttia pienempi kuin rakenteiden ominaistajuus. Tällöin olisi hyvin todennäköistä, että haitallisia vaurioita ei syntyisi. Värähtely voisi periaatteessa siirtyä tuulivoimaloiden rakenteita myöten myös pohjamaahan ja aiheuttaa siellä ylimääräisiä kuormituksia. Rakenteiden stabiiliutta voidaan lisätä myös jäykkien perustusten avulla. (37.)

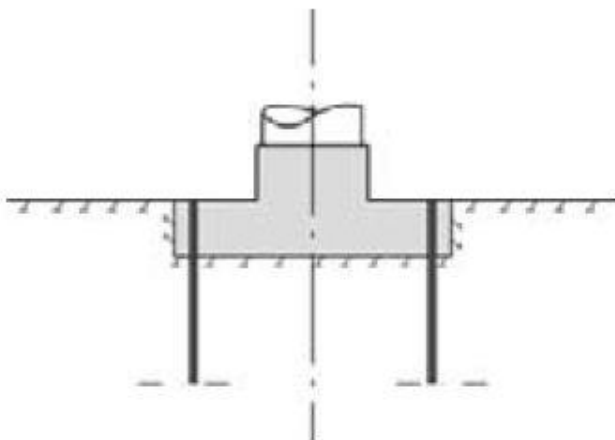
3.3 Tuulivoimalan perustamistapoja

Tuulivoimaloiden maaperään aiheuttamat kuormitukset ovat suuria. Pelkästään tuulivoimalan maanpäälliset rakenteet voivat olla massaltaan useita satoja tonneja. Perustukseen käytetään yleensä satoja kuutiometrejä betonia sekä kymmeniä tonneja terästä (39). Lisäksi Suomessa tuulivoimaloita rakennetaan eniten rannikkoalueilla, jossa maaperäolosuhteet eivät aina ole parhaat mahdolliset. Näistä tekijöistä johtuen pohjarakenteiden suunnittelu on haastavaa.

3.3.1 Kallioperustus

Luotettavin tapa saada painavien rakenteiden, kuten tuulivoimaloiden, perustukset kantaviksi, painumattomiksi ja routimattomiksi on rakentaa ne ehjän kalliotaan varaan. Kallioperustuksen edellytyksenä on usein se, että kalliopinta on joko näkyvässä tai lähellä maanpintaa. Ennen perustussuunnittelun aloittamista on tutkittava kalliotaan kovuus sekä rikkonaisuus. (21, s. 24 - 25; 40, s. 56.)

Varsinainen perustuksen rakennustyö tehdään tasatun kalliopinnan päälle tai sitten kalliotaan louhitaan syvennys, johon perustus valetaan. Kalliotaan tehtävät tuulivoimaloiden perustukset voidaan myös ankkuroida kalliotaan teräsankkureilla, jotka injektoidaan betonilaastilla kalliotaan porattuihin reikiin. Ankkureina voidaan käyttää esimerkiksi harjaterästankoja tai teräspunoksia. Ankkuroidun kallioperustuksen periaateratkaisu on esitetty kuvassa 16.

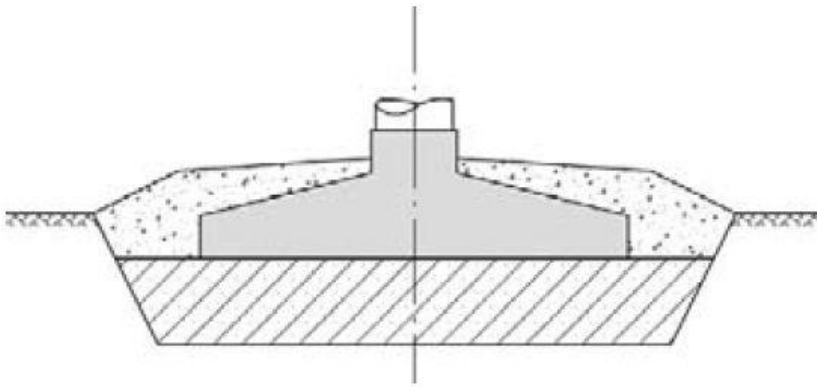


KUVA 16. Periaateratkaisu kalliotaan ankkuroidusta tuulivoimalan perustuksesta (40, s. 55)

Teräsankkurit siirtävät esimerkiksi tuulikuormista perustukselle aiheutuvia momenttikuormia vetojäännityksen välityksellä kallioon. Niiden avulla saadaan pienennettyä tarvittavan perustuslaatan kokoa. (21, s. 24 - 30; 40, s. 56.)

3.3.2 Maanvarainen perustus

Maanvaraisiksi perustuksiksi luetaan sekä suoraan alkuperäisen pohjamaan varaan rakennettavat perustukset että massanvaihdon päälle tehtävät perustukset. Molempien vaihtoehtojen perustusrakenteet ovat keskenään samankaltaisia. Maanvaraisen perustuksen periaateratkaisu esitetään kuvassa 17.



KUVA 17. Periaateratkaisu massanvaihdolla tehtävästä tuulivoimalan perustuksesta (40, s. 55)

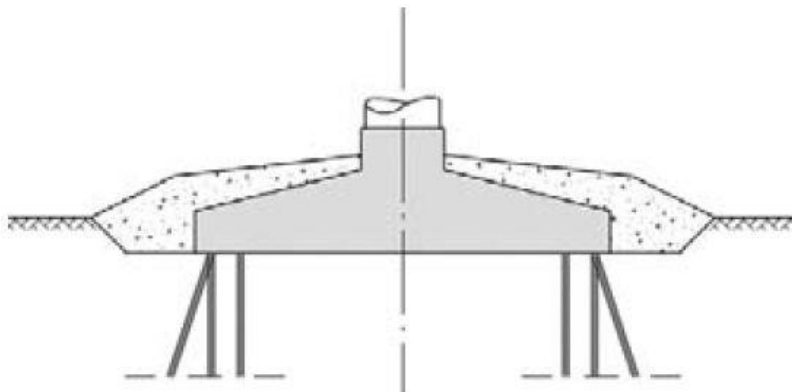
Tuulivoimala on mahdollista perustaa maanvaraisen laatan päälle silloin, kun perustuspaikalla sijaitsevan pohjamaan kantavuus on riittävän suuri. Käytännössä maaperän tulisi tällöin olla joko tiivistä moreenia, soraa tai hiekkaa. Teräsbetonisen, 1 - 3 metriä paksun perustuksen pohja valetaan yleensä 2 - 4 metrin syvyyteen murskekerroksen päälle. Perustuksen pohja voi olla neliön tai ympyrän muotoinen, ja sen pinta-ala määritellään tuulivoimalatoimittajan antamien kuormitusvoimien mukaisesti. Normaalisti suurten tuulivoimalaitosten perustuslaatta on pinta-alaltaan 400 - 600 neliömetriä. (41, s. 30; 42, s. 21.)

Massanvaihto joudutaan tekemään silloin, kun pohjamaa ei ole tarpeeksi kantavaa. Perustusten alta poistetaan pohjamaata, kunnes saavutetaan riittävän kantava maakerros. Tämän kerroksen päälle tuodaan murske- tai sorakerroksia,

jotka tiivistetään huolellisesti. Riittävä kaivussyvyys on arvioitava tapauskohtaisesti. Jos tarvittava kaivussyvyys on yli viisi metriä, on syytä miettiä muita perustamistapoja. Näin syvien kaivantojen tapauksessa on otettava huomioon myös pohjaveden aiheuttamat ongelmat kaivantojen vakavuuteen. Teräsbetoniset perustukset tehdään kuten suoraan pohjamaan varaan rakennettaessa. (41, s. 30.)

3.3.3 Lyöntipaaluperustus

Lyöntipaaluperustusta käytetään yleensä tilanteissa, joissa riittävän kantavuuden saavuttaminen ei ole muilla keinoin mahdollista. Tällaisia kohteita voivat olla muun muassa syville pehmeiköille tehtävät perustukset, jolloin massanvaihtoa ei ole teknisesti mahdollista toteuttaa tai se ei ole taloudellisesti järkevää. Tällöin valmisteltavat pohjatyöt tehdään kuten pohjamaan varaan tehtävässä perustuksessa. Pintamaata poistetaan 2 - 4 metriä, minkä jälkeen pohjalle levitetään murskettä. Murskekerroksen päältä suoritetaan paalutus, ja paalujen varaan valetaan teräsbetoniperustus. Lyöntipaaluperustuksen tyyppiratkaisu on esitetty kuvassa 18. (41, s. 30 - 31; 42, s. 22.)



KUVA 18. Periaateratkaisu tuulivoimalan lyöntipaaluperustuksesta (40, s. 55)

Paalujen koko ja lukumäärä sekä lyöntisyvyys on määritettävä jokaisessa kohteessa erikseen. Paalut voidaan lyödä joko kallioon tai kantavaan maakerrokseen asti. Paalutyypinä voidaan käyttää esimerkiksi teräsbetonista lyöntipaalua tai teräsputkipaalua. Lyöntipaaluja mitoitettaessa on paalujen kantokestä-

vyiden lisäksi otettava huomioon myös paalujen geotekninen veto- ja taivutuskestävyys sekä pitkillä paaluilla nurjahduskestävyys (35, s. 20, 54 - 55). Kitka ja varsinkaan koheesiopaaluja ei käytetä tuulivoimaloiden perustuksissa. Paalukoon valintaan vaikuttavat muun muassa huonosti kantavan pohjamaakerroksen paksuus ja kantokyky sekä perustuksiin kohdistuvat kuormitukset. Paalutettu perustus voidaan joissain tapauksissa mitoittaa pienemmäksi kuin normaali maanvarainen perustus. (40, s. 54.)

3.3.4 Porapaaluperustus

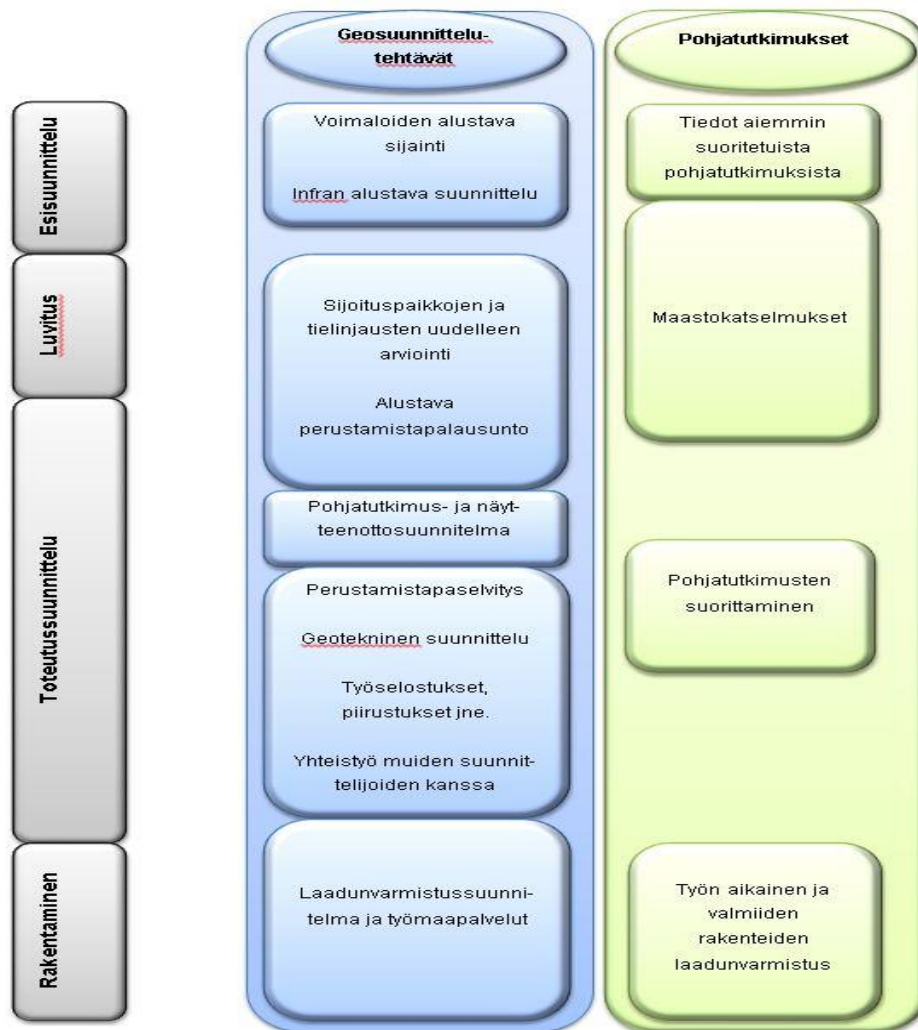
Suomessa on tehty tuulivoimaloiden perustuksia myös kallioon ankkuroitujen porapaalujen avulla. Ankkuroitu porapaalu koostuu esimerkiksi noin 600 millimetriä halkaisijaltaan olevasta porapaalusta sekä sen sisälle asennettavasta noin 200 millimetriä halkaisijaltaan olevasta teräsputkiankkurista, joka injektoidaan kiinni kallioon. Porapaalu upotetaan kallioon perustussuunnitelman mukaiselle syvyydelle. (43.)

Porapaalujen ankkurointia varten kallioon porataan lisäksi noin 300 millimetriä halkaisijaltaan oleva reikä, joka ulottuu useita metrejä porapaalun alapuolelle. Teräsputkiankkurit injektoidaan juotoslaastin avulla kiinni kallioon porattuihin reikiin. Laastin kovetuttua ankkureille suoritetaan koeveto, jonka tarkoituksena on varmistaa, että ankkurit kestävät niille tulevat rasitukset. Lopuksi porapaalut betonoidaan ja niiden päälle valetaan varsinainen perustus. Porapaalumenetelmän avulla perustuslaatan tilavuus voi pienentyä kolmasosaan maanvaraiseen ja tavalliseen paaluperustukseen verrattuna. (43.)

4 TUULIVOIMAPUISTON GEOTEKNINEN SUUNNITTELUPRO- SESSI

Tutkimusosuudessa käydään läpi suurien tuulivoimapuistojen geotekniseen suunnitteluprosessiin sisältyvät vaiheet. Työssä käytetään esimerkkikohteena suunnitteluvaiheessa olevaa Metsälän tuulivoimapuistoa, jonka yhteydessä on jo tehty alustavia suunnitelmia sekä suoritettu siihen liittyviä pohjatutkimuksia. Näiden ja aiemmista pienimuotoisemmista projekteista saatujen tietojen avulla luodaan prosessikaavio, jonka avulla pystytään hahmottamaan tuulivoimapuistojen rakentamiseen liittyvä geotekninen suunnitteluprosessi.

Prosessikaaviossa kuvataan suunnittelutehtävien, pohjatutkimusten sekä muiden projektiin kuuluvien toimintojen väliset yhteydet. Suunnittelutehtävät ja niiden eteneminen on esitetty prosessikaaviossa sinipohjaisissa laatikoissa. Pohja- sekä maastotutkimukset ja niiden suoritusajankohdat näkyvät kaavion oikeassa laidassa vihreissä laatikoissa. Valmis prosessikaavio on esitetty kuvassa 19. Sama prosessikaavio hieman isommassa koossa löytyy myös liitteestä 6.



KUVA 19. Prosessikaavio tuulivoimalan geoteknisestä suunnittelusta

Seuraavissa luvuissa esitellään työssä tarkasteltava esimerkkikohte sekä selvitetään tarkemmin tuulivoimaloiden geotekniseen suunnitteluprosessiin kuuluvia tehtäviä. Projektin aikaiset tehtävät on jaoteltu esisuunnitteluun, pohjatutkimuksiin ja rakentamissuunnitteluun.

4.1 Esimerkkikohteen kuvaus

Metsälän tuulivoimapuisto sijaitsee Kristiinankaupungissa noin 20 kilometriä kaupungin keskustan eteläpuolella ja valtatie 8:n itäpuolella. Matkaa Pohjanlahden rannalle on noin 10 kilometriä. Suunnittelualueen tarkempi sijainti on esitetty kuvassa 20.



KUVA 20. Metsälän tuulivoimapuiston hankealue ja sen sijainti kartalla (17, s. 31)

Tarkoituksena on rakentaa noin 19 neliökilometrin laajuiselle alueelle enintään 45 tuulivoimalaa, joiden yksittäisteho on 2 - 5 megawattia. Hankkeen kokonaiskapasiteetti olisi näin ollen 90 - 225 megawattia. Tuulivoimaloiden lisäksi hankkeen toteuttamiseksi on rakennettava jokaiselle voimalalle riittävän kokoinen nostoalue, jonka koko vaihtelee nostokalustosta riippuen yleensä 400 - 500 neliömetrin välillä. Alueelle on myös rakennettava uusia teitä sekä levennettävä nykyisiä. Uusia teitä pitää rakentaa toteutusvaihtoehdosta riippuen 15 - 25 kilometriä. (17, s. 31 - 37.)

Metsälän tuulivoimapuistohankkeen ympäristövaikutusten arviointiohjelma valmistui maaliskuussa 2009. Hankkeen yhteysviranomaisena toimiva Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus antoi lausuntonsa arviointiohjelmasta toukokuussa 2009. Loppuvuodesta 2010 valmistui tarkempi ympäristövaikutusten arviointiselostus, josta yhteysviranomainen antoi lausuntonsa helmikuussa 2011.

4.2 Esisuunnittelu

Metsälän tuulivoimapuiston pohjarakennesuunnitteluprosessi on alkanut jo hankkeen esisuunnitteluvaiheessa, kun on kartoitettu mahdollisia voimaloiden sijoituspaikkoja. Puiston sijaintiin vaikuttavat tekijät ovat pääosin teknistaloudellisia, kuten tuuliolosuhteet sekä puiston sijainti valmiiseen infrastruktuuriin nähden. Lisäksi sijaintiin vaikuttavat ympäristönsuojelulliset näkökohdat sekä asutuksen läheisyys. Yksittäisten voimaloiden sijaintiin vaikuttavat valmiin tieverkoston lisäksi myös pohjarakentamisolosuhteet sekä maaston korkeusvaihtelut.

Metsälän tuulivoimapuiston suunnittelualueella on tehty maastokatselmuksia ja katselmusten perusteella alustavia suunnitelmia voimaloiden sijoittamisesta alueelle. Samalla on myös arvioitu tarvittavia pohjanvahvistusmenetelmiä, perustamistapoja sekä eri vaihtoehtojen kustannuksia. Alustavien suunnitelmien pohjalta on tehty ympäristövaikutusten arviointiselostus, jonka tarkoituksena on selvittää hankkeesta ympäristölle aiheutuvat vaikutukset. Geotekninen suunnittelija on ollut mukana maaperään ja pohjaveteen vaikuttavien ympäristövaikutusten arvioinnissa. Ympäristövaikutusten arviointiprosessin aikana on jouduttu muuttamaan yksittäisten voimaloiden sijaintia. Tämän vuoksi tarkempien kairaus- ja geoteknisten suunnitelmien laatiminen aloitettiin, kun ympäristövaikutusten arviointiselostus oli hyväksytty. Esisuunnitteluvaiheessa olisi myös mahdollista käyttää hyväkseen alueella aiemmin suoritettujen pohjatutkimusten tuloksia.

Geotekninen suunnittelija voi olla projektin aikana mukana myös esimerkiksi maa-aineksen otto- sekä läjitysalueiden suunnittelussa. Maanottoalueilta otettavan materiaalin ominaisuudet, kuten routivuus sekä soveltuvuus rakentamiseen, on tutkittava. Jos rakentamisessa on tarkoitus käyttää itse louhittua kalliomursketta, myös kallion ominaisuudet on tutkittava ja kallio luokiteltava ennen louhinnan aloittamista. Samalla voidaan tutkia myös tieleikkauksista saatavien massojen soveltuvuutta rakentamiseen.

4.3 Pohjatutkimukset

Pohjatutkimuksia tehdään tuulivoimaloiden perustuspaikoilla, nostoalueilla ja uusien sekä mahdollisesti vanhojen tielinjausten alueella. Metsälän alueella on tehty alustavia kairauksia jo esisuunnitteluvaiheessa. Tällöin pohjaolosuhteita on tutkittu painokairauksilla muun muassa tuulivoimaloiden perustusten kohdalta sekä voimaloille johtavien nykyisten ja tulevien tielinjausten lähistöllä. Tutkimusten perusteella voidaan todeta, että suunnittelualueella kallioperä sijaitsee pääosin korkeintaan 2 metrin etäisyydellä maan pinnasta. Kallioisten mäkien välissä olevilla suoalueilla kallio on hieman syvemmällä. Perusteelliset pohjatutkimukset suoritetaan vasta, kun yleissuunnitelmat tarkentuvat ja tuulivoimaloiden sijoituspaikat varmistuvat.

4.3.1 Tuulivoimaloiden perustusten pohjatutkimukset

Metsälän tuulivoimapuiston jokaiselle voimalalle on laadittu pohjatutkimussuunnitelma, jonka sisältö perustuu alustavien kairausten tuloksiin sekä maastokatselmuksen aikana geoteknisen suunnittelijan tekemiin arvioihin pohjaolosuhteista. Pohjatutkimukset sisältävät kaksi porakonekairausta sekä kaksi heijari- tai painokairausta. Painokairausta käytetään pääasiassa pohjamaan ollessa pehmeää tai löyhää. Heijarikairauksia taas tehdään useammin silloin, kun pohjamaa on tiivistä kitkamaata tai kantava pohjamaa tai kallio on lähellä maan pintaa. Jokaisen voimalan kohdalta otetaan lisäksi 1 - 2 kappaletta häiriintyneitä maanäytteitä, joiden avulla määritellään pohjamaan koostumusta. Kun kallion päällä olevat maakerrokset ovat paksuja, perustusten kohdalta otetaan maanäytesarjoja 1 - 2 tutkimuspisteestä. Häiriintyneet näytteet otetaan tässä tapauksessa edustavista maakerroksista (36).

Pohjatutkimusten avulla tulee selvittää kalliopinnan sijainti, mikä onnistuu varminnin porakonekairausten avulla. Jos kalliopinta on niin syvällä, että kallionvarainen perustaminen ei ole mahdollista, tutkitaan paino- ja heijarikairausten avulla maakerrosten paksuus, kairausvastukset ja maakerrosten suhteelliset tiiveydet. Kallion ollessa syvällä kairauksilla pyritään myös selvittämään kantan pohjamaan sijainti sekä sen kantavuus. Näiden tietojen perusteella voidaan suunnitella esimerkiksi paaluperustukset. Maanäytteiden avulla selvitetään tar-

kemmin maakerrosten koostumus sekä määritetään kunkin kerroksen pääasiallinen maalaji. Kairausten yhteydessä on myös tehtävä havaintoja pohjavesipinnan korkeustasosta. Tarvittaessa on käytettävä pohjavesiputkea, joka voidaan asentaa kairauksen yhteydessä kairausreikään.

Saatujen kairaustulosten, pohjavesimittausten sekä maaperänäytteiden avulla tehdään perustamistapalausunto. Siinä ilmoitetaan maakerrosten paksuus, tilavuuspaino ja tehollinen tilavuuspaino sekä arviot pohjavesipinnan sijainnista, maakerrosten kitkakulmasta, koheesiosta, kimmokertoimesta ja Poisson-vakiosta. Lisäksi lasketaan perustuksen alle jäävän maaperän kantokestävyys. Tässä tilanteessa voidaan ilmoittaa myös perustukselle sallittavan pohjapaineen arvo tai paaluperustuksen tapauksessa paaluille sallittava kuorma.

Riittävän kantavuuden saavuttamiseksi voidaan joutua tekemään pohjanvahvistustoimenpiteitä, kuten massanvaihtoa tai syvätiivistystä. Toimenpiteiden jälkeen on varmistettava, että niiden vaikutukset ovat olleet riittäviä. Massanvaihdon ja syvätiivistyksen onnistuminen tulee arvioida maan päältä suoritettavilla tiiveysmittauksilla tai kantavuuskokeilla, esimerkiksi levykuormituskokeen avulla. Yksi mahdollisuus syvätiivistyksen vaikutusten tutkimiseen ovat tiivistyksen jälkeen tehtävät kairaukset, joita voidaan käyttää täyttömateriaalista riippuen myös massanvaihdon yhteydessä. Syvätiivistyksen onnistumista voidaan arvioida lisäksi joko mittaamalla maanpinnan korko ennen tiivistystä ja sen jälkeen tai mittaamalla jokaisen pudotuksen seurauksena tapahtunut painuma.

4.3.2 Tutkimukset nosto- ja tiealueilla

Tuulivoimalan perustuksen lisäksi pohjatutkimuksia pitää tehdä myös tuulivoimalan nostoalueella sekä voimalalle johtavalla tielinjalla. Nostoalueelle tehdään samankaltainen pohjatutkimus kuin perustuksille. Nostoalueella tehdään maaperän tasalaatuisuudesta riippuen yleensä 2 - 4 kappaletta paino- tai heijari-kairausta. Nämä kairaukset suoritetaan yleensä nostoalueen nurkissa tai niiden läheisyydessä. Maaperäolosuhteet huomioon ottaen kairauksia voidaan tehdä enemmänkin. Kallion ollessa lähellä maan pintaa tai nostoalueen sijaitessa esimerkiksi tasalaatuisella hiekka- tai soraharjulla voidaan nostoalueella selvittää

ilman kairauksia. Tarvittaessa otetaan lisäksi maanäytteitä joko kairausten yhteydessä tai erillisellä näytteenottokairauksella kairauspisteiden läheisyydestä.

Tielinjausten kartoittamiseen voidaan käyttää alkuvaiheessa laserkeilausaineiston perusteella luotua maastomallia, jonka perusteella tehdään alustavat linjaussuunnitelmat. Tielinjauksilla käydään tekemässä paino- ja heijarikairauksia, joiden tarkoituksena on selvittää pohjamaan kantavuus linjauksen alueella. Esimerkiksi Metsälän suunnittelualueella on suoritettu esisuunnitteluvaiheessa painokairauksia sekä olemassa olevilla tielinjauksilla että suunnitelluilla linjauksilla.

Kalliopinnan sijainti selvitetään porakairauksella. Tärykairauksia voidaan myös suorittaa silloin, kun poravaunun liikuttaminen maastossa on haastavaa. Esimerkkinä tällaisesta tilanteesta on kohde, jossa rakennetaan uutta tielinjaa vaikeissa maasto-olosuhteissa. Tällöin pitää kuitenkin muistaa, että tärykairauksella saatavat tulokset kalliopinnan määrittämiseksi eivät ole yhtä luotettavia kuin porakairaustulokset. Kairauspisteiden tarkat sijainnit määritetään kairaussuunnitelmassa. Pisteiden tulisi sijoittua niin, että saadaan kattava ja totuudenmukainen kuva keskimääräisistä pohjaolosuhteista. Toisaalta voidaan myös ajatella, että kairauspisteiden sijoittaminen rakentamisen näkökulmasta epäedullisiin kohteisiin antaa paremmat valmiudet varautua haastavimpien rakentamisolosuhteiden varalle.

Tielinjauksilla voidaan myös joutua tekemään pohjanvahvistustoimenpiteitä, kuten massanvaihtoa tai pohjamaan stabilointia. Jos tietä tehtäessä vahvistetaan maaperää stabiloimalla, sen onnistuminen on varmistettava esimerkiksi tekemällä kairauksia. Kairaukset voivat olla maaperästä ja sen tiiviysasteesta riippuen heijari-, paino- tai siipikairauksia.

Teiden ja nostoalueiden valmistuttua on varmistettava, että rakenteet ovat riittävän kantavia. Työselostuksessa määritetään kantavuus- ja tiiveyssuhdevaati-
mukset eri kohteille, tutkimusmenetelmät niiden määrittämiseksi sekä mittauspaikat ja tarvittavien mittausten lukumäärä. Kantavuusmittaukset voidaan tehdä esimerkiksi levykuormituskokeen avulla. Tien rakennekerroksia voidaan tutkia

myös maatutkan avulla, jolloin saadaan nopeasti tarkastettua tierakenteen tasa-laatuisuus.

4.3.3 Haasteita aiemmissa kohteissa

Suomessa toimivat tuulivoimalatoimittajat ovat pääosin ulkomaisia suuryrityksiä, jotka ovat tottuneet toimimaan Suomen ilmasto- ja maaperäolosuhteista poikkeavissa olosuhteissa. Tästä on aiheutunut ongelmia erityisesti eteläeurooppalaisten voimalatoimittajien kanssa. Ulkomaisten toimijoiden vaatimat pohjatutkimukset, niistä ilmoitettavat tulokset ja heidän käyttämänsä pohjatutkimusmenetelmät saattavat poiketa Suomessa käytettävistä käytännöistä ja menetelmistä. Suomessa ei välttämättä edes ole joidenkin kairausten suorittamiseen tarvittavaa välineistöä tai osaamista. Yksi tällaisista pohjatutkimusmenetelmistä on Keski- ja Etelä-Euroopassa yleisesti käytetty SPT-kairaus. Lisäksi voimalatoimittajat voivat vaatia tutkimuksia sellaisten ongelmien varalle, joita ei Suomessa esiinny.

Vaikka Suomessa toimitaan periaatteessa samojen säännösten ja asetusten mukaisesti kuin muualla Euroopassa, ilmasto-olosuhteiden ja muussa toimintaympäristössä olevien eroavaisuuksien vuoksi joudutaan usein neuvottelemaan pohjatutkimusten suoritustavoista sekä tulosten sisällöstä. Tuulivoimalatoimittajat on usein saatava vakuuttuneiksi siitä, että tarvittavat pohjatutkimukset voidaan suorittaa eri menetelmillä ja niistä saatavat tulokset ovat riittäviä pohjarakennesuunnittelun laatimiseksi.

4.4 Rakentamissuunnittelu

Metsälän tuulivoimapuistoprojektissa geotekninen suunnittelija on laatinut alustavan perustamistapalausannon maastokatselmusten ja jo olemassa olevien tai alustavien maaperätutkimusten perusteella. Alustava perustamistapalausunto sisältää kuvauksen suunnittelualueen maasto- ja pohjaolosuhteista sekä mahdolliset perustamisvaihtoehdot eri pohjaolosuhteisiin.

Geotekniseen suunnitteluun sisältyy pohjatutkimussuunnitelman laatiminen. Pohjatutkimussuunnitelma tehdään tuulivoimalakohtaisesti ottaen huomioon kunkin sijoituspaikan ominaispiirteet, joita on selvitetty esimerkiksi maastokat-

selmuksen avulla. Suunnittelussa voidaan käyttää apuna jo olemassa olevaa mittausmateriaalia, jos sen paikkansapitävyys voidaan todeta. Pohjatutkimuksen tulokset on lisäksi saatettava sellaiseen muotoon, että niitä voidaan käyttää suunnittelun apuna.

Pohjatutkimusten tulosten perusteella laaditaan ennen rakentamisen aloittamista työselostus pohjarakenteiden toteuttamisesta. Työselostus sisältää muun muassa ohjeet pintamaan poistamisesta niin perustusten kohdalta kuin tie- ja nostoalueilta, maiden sijoittamisesta sekä kuivatusrakenteiden suunnittelusta.

4.4.1 Tuulivoimaloiden geotekninen suunnittelu

Varsinainen geo- ja pohjarakennesuunnittelu voidaan aloittaa, kun pohjatutkimusten tulokset ovat selvillä ja voimalaitosten kuormitusvaikutukset on saatu voimalatoimittajalta. Geotekninen suunnittelija laskee pohjatutkimusten perusteella maan kantokestävyyden. Samalla valitaan jokaiselle voimalalle parhaiten soveltuva perustusratkaisu, joka on yleensä joko kallionvarainen tai maanvarainen perustus. Perustamistavan valintaan vaikuttavat pohjaolosuhteiden lisäksi myös kustannukset, minkä vuoksi tässä vaiheessa vertaillaan saavutettavien kantavuuksien lisäksi myös eri perustamisvaihtoehtojen aiheuttamia rakentamiskustannuksia.

Maanvaraisen perustuksen tapauksessa on varmistettava laskennallisesti, että rakenteiden aiheuttaman painuman suuruus pohjamaassa ei ole liian suuri. Jos maanvaraisen laattaperustuksen tekeminen ei ole mahdollista pohjamaan riittämättömän kantokestävyyden tai liian suurten painumien vuoksi, suunnittelija valitsee paikalle parhaiten soveltuvan pohjanvahvistus- tai perustamismenetelmän. Vaihtoehtoina ovat esimerkiksi paalutus, massanvaihto tai syvätiivistys. Perustukset on lisäksi mitoitettava liukumista ja kaatumista vastaan.

Paalutettuja perustuksia käytetään heikosti kantavissa kohteissa, jolloin paalut lyödään joko kallioon tai kovaan pohjamaahan asti. Tällöin tuulivoimalan kuormat välittyvät pääasiassa paalujen kärkivastusten välityksellä kallioon tai pohjamaahan. Paalutussuunnittelun alkuvaiheessa geotekninen suunnittelija määrittelee kallion sijainnin tai vastaavasti kantavan pohjamaan sijainnin ja kanta-

vuuden. Kallion tai kovan pohjamaan sijaitessa syvällä voidaan ottaa huomioon myös kitkan tai koheesion vaikutus paalujen kantavuuteen.

Paalutusta käytettäessä geoteknisen suunnittelijan tehtäviin kuuluu muun muassa paalujen lyöntiohjeiden laatiminen sekä käytettävän lyöntitehon määrittäminen. Lisäksi geoteknisen suunnittelijan tulee tarkistaa paalujen nurjahduskestävyys yhdessä rakennesuunnittelijan kanssa. Rakennusvaiheessa tarkastetaan paalutuksen onnistumista iskuaaltomittausten tai loppulyöntien avulla sekä muiden paalutustyön aikana tehtyjen havaintojen perusteella. (44, s. 29 - 30.)

Massanvaihtosuunnitelman tulee sisältää massanvaihdon ala ja syvyys sekä massanvaihdossa käytettävä materiaali, tiivistämismenetelmät ja kerrospaksuudet. Tämän lisäksi on ilmoitettava, miten massanvaihdon onnistuminen varmistetaan. Vaihtoehtoina ovat esimerkiksi tiiveysmittaukset ja levykuormituskoeket. Syviä massanvaihtoja suoritettaessa on tehtävä kaivantojen vakavuustarkastelu sekä mahdollisesti selvittävä pohjaveden alentamistarve. Kaikille kaivannoille on lisäksi määritettävä käytettävä luiskakaltevuus.

Syvätiivistyssuunnitelma sisältää muun muassa tiedot pudotuspisteiden sijainnista, maaperää suojaavan pudotusalustan paksuuden ja materiaalin rakeisuuden, tarvittavan pudotusenergian suuruuden sekä pudotuskertojen lukumäärän. Lisäksi suunnitelmassa esitetään syvätiivistyksen työvaiheet sekä laadunvalvontaan liittyvät toimenpiteet. (45.)

Pohjamaan ollessa riittävän kantava suunnitellaan vielä perustusten alle jäävät rakennekerrokset sekä mahdolliset kuivatusjärjestelmät. Työselostuksessa määritetään käytettävien rakennekerrosten paksuus, täyttöön soveltuvat materiaalit, tiivistysmenetelmät, tiivistyksessä käytettävät kerrospaksuudet sekä tiivistyskaluston ominaisuudet.

Geoteknisen suunnittelijan tekemien laskelmien perusteella rakennesuunnittelija suunnittelee tuulivoimalan perustukset. Perustukset on suunniteltava pinta-alaltaan niin suuriksi, että perustuksesta maahan kohdistuva kuormitus jää pienemmäksi kuin maan kantokestävyyden mitoitusarvo.

4.4.2 Teiden ja nostoalueiden geotekninen suunnittelu

Tuulivoimalalle johtavien teiden sekä tuulivoimalan vieressä sijaitsevan nostoalueen pohjarakenteet tulee mitoittaa rakentamisvaiheen kuormitusten mukaan. Kuljetuskaluston ja kuljetettavien elementtien yhteispaino on suurimmillaan yli 100 tonnia. Käytettävän nostokaluston paino on myös noin 100 tonnia, mutta nostotilanteessa siihen lisätään vielä painavimmillaan yli 50 tonnia massaltaan oleva voimalaelementti. Kuljetus- ja nostotilanteissa pohjarakenteille muodostuvat kuormat pyritään pitämään riittävän pieninä joko akselien lukumäärää lisäämällä tai nosturin tukipinta-alaa kasvattamalla. Tie- ja nostoalueille määritetään kantavuusvaatimukset sekä sallitut painumat, ja lisäksi niille tehdään samanlaiset vakavuus- ja painumatarkastelut kuin perustuksille.

Geotekninen suunnittelija määrittää tarvittavat tierakenteen paksuudet, rakennekerroksissa käytettävät materiaalit sekä rakennekerroksille tehtävät tiivistystoimenpiteet ja niissä tarvittavan kaluston ominaisuudet. Vaihtelevissa pohjaolosuhteissa rakennekerrosten paksuudet pitää suunnitella ottaen huomioon myös pohjamaan kantavuuden vaihtelut. Suunnittelutiedot kirjataan työselostukseen sekä rakennusohjeisiin. Jos pohjamaata joudutaan tiivistämään tai rakennekerrosten alla pitää käyttää suodatinkangasta tai jotain muuta vahvikemateriaalia, siitä mainitaan työselostuksessa. Samassa yhteydessä määritetään tien kuivatussuunnitelman mukaisten rakenteiden, kuten rumpujen asentamisen yhteydessä käytettävät kivimateriaalit sekä niiltä vaadittava raekoko.

5 YHTEENVETO

Tuulivoimaloita ollaan rakentamassa Suomeen yhä kiihtyvällä tahdilla. Voimalavalmistajien tuotekehityksen seurauksena uudet tuulivoimalat ovat yhä suurempia niin tehoiltaan kuin fyysisiltä mitoiltaan. Tämä aiheuttaa yhä suurempia kuormituksia pohjamaassa, mikä taas johtaa vaativampiin suunnittelutehtäviin ja monimutkaisempiin ratkaisuihin sekä perustus- että pohjarakennesuunnittelussa.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kuvata suuren, maalle sijoitettavan tuulivoima-
puiston rakennusprojektin aikaiset geotekniset suunnittelutehtävät. Työssä käsiteltiin tuulivoimaloiden perustusten, tuulivoimaloille rakennettavien teiden sekä nostoalueiden geoteknistä suunnittelua. Tarkastelun ulkopuolelle jätettiin sähköasemien sekä voimajohtolinjojen ja maakaapeleiden vaatima pohjasuunnittelu.

Geoteknisten suunnitelmien laatiminen edellyttää kattavia tietoja rakennuspaikan maasto- ja pohjaolosuhteista. Tämän vuoksi alustavia maastokatselmuksia ja pohjatutkimuksia on tehtävä mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Niiden perusteella voidaan myöhemmin tehdä suunnitelmat voimaloiden sijoituspaikoista sekä varsinaisten pohjatutkimusten suorittamisesta. Hyvin suunniteltujen ja suoritettujen pohjatutkimusten perusteella voidaan tehdä sekä rakenteellisesta että taloudellisesta näkökulmasta tehokkaat pohjarakenneratkaisut.

Jokainen tuulivoimapuistoprojekti on erilainen, ja erityisesti maaperäolosuhteet vaihtelevat niin projekti- kuin tuulivoimalakohtaisestikin. Tämän vuoksi on hyvin vaikea laatia yleispätevää ohjeistusta, joka toimisi sellaisenaan kaikissa koh-teissa. Tämän työn tuloksena saadun projektimallin tarkoituksena on toimia muistilistana, josta voidaan poimia tarvittavat toimenpiteet kulloinkin meneillään olevaan hankkeeseen.

LÄHTEET

1. Turkia, Ville – Holttinen, Hannele 2013. Tuulivoiman tuotantotilastot - Vuosi-raportti 2011. Espoo: VTT. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T74.pdf>. Hakupäivä 28.1.2013.
2. Suomen tuulivoimatilastot. 2013. VTT. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/>. Hakupäivä 1.2.2013.
3. Kuikka, Joonas 2013. Puhdasta sähköä tuhansille. Pohjalainen 5.2.2013. S.
4.
4. Tuulivoimatieto. 2013. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Saatavissa:
<http://www.tuulivoimatieto.fi/>. Hakupäivä 14.1.2013.
5. Klap, Aleksis 2012. Yhteenveto maakuntien liittojen tuulivoimaselvityksistä. Ympäristöministeriön raportteja 19/2012. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saata-vissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=138953&lan=fi>. Haku-päivä 5.2.2013.
6. Suomen tuuliatlas. 2010. Yhteenvetoraportti. Helsinki: Työ- ja elinkeinominis-teriö. Saatavissa:
http://www.tuuliatlas.fi/linked/fi/Tuuliatlas_yhteenvetoraportti.pdf. Hakupäivä 1.2.2013.
7. Paakkari, Merja 2011. Sisä-Suomen tuulivoimaselvitys 2011. Hafmex Wind Oy. Saatavissa: http://www.keskisuomi.fi/filebank/22088-Tuulivoima_loppurap_yleinen.pdf. Hakupäivä 18.2.2013.
8. Tuuliatlas. Työ- ja elinkeinoministeriö / Ilmatieteenlaitos. Saatavissa:
<http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/>. Hakupäivä 5.2.2013.
9. Medvind Tuulivoimaportaali. 2013. Vaasa Energy Institute. Saatavissa:
http://wind.vei.fi/public/index.php?cmd=smarty&id=-1_ifi&PHPSESSID=8876e71d22bde09d956fc68592b5b0bb. Hakupäivä 12.3.2013.

10. Tuulivoiman projektiopas. 1999. Motivan julkaisu 5/1999. Energia-Ekono Oy. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/files/228/tuulivoimanprojektiopas.pdf>. Hakupäivä 1.2.2013.
11. Tuulivoimarakentaminen. 2005. Ympäristöministeriön esite. Soprano Communications Oy. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=42234&lan=fi>. Hakupäivä 2.1.2013.
12. Space technology optimises windmill efficiency. 2009. European Space Agency. Saatavissa: http://www.esa.int/Our_Activities/Technology/TTP2/Space_technology_optimises_windmill_efficiency. Hakupäivä 5.4.2013.
13. L 11.2.2011/134. Laki maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta.
14. A 10.9.1999/895. Maankäyttö- ja rakennusasetus. Ympäristöministeriö.
15. VNa 14.4.2011/359. Valtioneuvoston asetus ympäristövaikutusten arviointimenettelystä annetun valtioneuvoston asetuksen 6 §:n muuttamisesta.
16. VNa 17.8.2006/713. Valtioneuvoston asetus ympäristövaikutusten arviointimenettelystä.
17. Kristiinankaupungin Metsälän tuulivoimapuisto - ympäristövaikutusten arviointiselostus. 2010. EPV Tuulivoima Oy. Saatavissa: <http://www.ely-keskus.fi/fi/ELYkeskukset/EtelaPohjanmaanELY/Ymparistonsuojelu/YVA/paattynee/muut/Sivut/KristiinankaupunginMetsalantuulivoimapuistohanke.aspx>. Hakupäivä 18.3.2013.
18. Tarasti, Lauri 2012. Tuulivoimaa edistämään. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/32699/Tuulivoimaa_edistamaan_A4_lop.pdf. Hakupäivä 5.2.2013.

19. Seurantaohje. Uusiutuville energialähteillä tuotettavan sähkön tuotantotuen hakeminen ja seurantavelvoitteet. 2012. Energiamarkkinavirasto. Saatavissa: http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Seurantaohje_01_05_2012.pdf. Hakupäivä 5.3.2013.
20. Jääskeläinen, Raimo 2009a. Geotekniikan perusteet. Jyväskylä: Tammer-tekniikka / Amk-Kustannus Oy.
21. Jääskeläinen, Raimo 2009b. Pohjarakennuksen perusteet. Jyväskylä: Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy.
22. Ympäristöministeriön asetus pohjarakenteista. 2003. B3 Suomen rakentamismääräyskokoelma - Pohjarakenteet - Määräykset ja ohjeet 2004. Helsinki: Ympäristöministeriö.
23. Geomachine Oy. Verkkogalleria. Saatavissa: <http://www.geomachine.fi/gallery>. Hakupäivä 4.4.2013.
24. Kairausopas 1. 1981. Painokairaus, tärykairaus, heijarikairaus. Helsinki: Rakentajain kustannus Oy.
25. Kairausopas II. 1999. Siipikairaus. 2. painos. Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys r.y.
26. Ronkainen, Nanna 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Suomen ympäristö 2/2012. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.
27. Korhonen, K-H. – Gardemeister, R. – Tammirinne, M. 1974. Geotekninen maaluokitus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Geotekniikan laboratorio, tiedonanto 14. Otaniemi.
28. Kairausopas VI. 2001. CPTU/Puristinkairaus, puristin-heijarikairaus. Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys r.y.
29. Kairausopas V. 1986. Porakonekairaus. Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys ry ja Rakentajain Kustannus Oy.

30. Kairausopas III. 1984. Maanäytteiden ottaminen geoteknillisiä tutkimuksia varten. 4. painos. Helsinki: Suomen geoteknillinen yhdistys r.y.
31. Törnqvist, Jouko – Laaksonen, Rainer – Juvankoski, Markku 2001. Sähköinen vastusluotaus tien painumalaskennan lähtötietojen hankkimisessa. Menetelmäkuvaus TPPT 9. Espoo: VTT. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/9-vastusluotaus.pdf>. Hakupäivä 12.2.2013.
32. Seismiset luotaukset ja muut maastomittaukset. Geologian tutkimuskeskus. Saatavissa: <http://www.gtk.fi/asiantuntijapalvelut/maankaytto/kiviaines/maastomittaukset/>. Hakupäivä 12.2.2013.
33. Rakenteen parantamissuunnittelua edeltävät maatulkatutkimukset ja tulosten esittämistapa – menetelmäkuvaus. 2004. Tiehallinto. Helsinki: Tiehallinto. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100027-v-04rakentparantamissuunn.pdf>. Hakupäivä 22.3.2013.
34. RIL 207-2009. Geotekninen suunnittelu. Eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluoheje. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
35. Liikenneviraston ohjeita 12/2011. 2011. Eurokoodin soveltamisohje. Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2011-12_ncci7_web.pdf. Hakupäivä 11.2.2013.
36. Kallio, Vesa 2013. Keskustelu 28.3.2013.
37. Al Satari, Mohamed – Hussain, Saif 2008. Vibration Based Wind Turbine Tower Foundation Design Utilizing Soil-Foundation-Structure Interaction. AIP Conference Proceedings. 7/8/2008, Vol. 1020 Issue 1. S. 577 - 584.
38. Zhang, Zijun 2009. Wind turbine vibration study: a data driven methodology. University of Iowa, Industrial Engineering. Thesis. Saatavissa: <http://ir.uiowa.edu/etd/454/>. Hakupäivä 15.4.2013.

39. Wind turbine foundations. Tuote-esitys. Peikko Group. Saatavissa:
<http://materials.crasman.fi/materials/extloader/?fid=8310&org=2&chk=8d7e2487>
. Hakupäivä 8.2.2013.
40. Vähänkyrön tuulivoimapuisto ympäristövaikutusten arviointiselostus. 2010. EPV Tuulivoima Oy. Saatavissa:
http://www.epvtuulivoima.fi/Dokumentit/Yhti%C3%B6t/EPVT%20Aineisto/YVASelostus_V%C3%A4h%C3%A4kyr%C3%B6.pdf. Hakupäivä 2.4.2013.
41. Laihian Rajavuoren tuulivoimapuisto - ympäristövaikutusten arviointiselostus. 2012. EPV Tuulivoima Oy. Saatavissa:
<http://www.epvtuulivoima.fi/Dokumentit/Yhti%C3%B6t/EPVT%20Aineisto/Laihian%20YVA-Selostus.pdf>. Hakupäivä 7.2.2013.
42. Kivivaara-Peuravaara. Tuulivoimapuiston ympäristövaikutusten arviointiohjelma. 2012. Metsähallitus Laatumaa. Saatavissa:
http://www.laatumaa.com/sivustot/Laatumaa/fi/tuulivoima/Documents/Kivivaara-Peuravaara_YVA_Osa1.pdf. Hakupäivä 7.2.2013.
43. Eronen, Sami – Lotvonen, Sakari – Viitala, Jouko – Jokiniemi, Hannu 2005. Tuulivoimalan porapaaluperustus. Ruukki. Powerpoint –esitys Geotekniikan päivillä 17.11.2005. Saatavissa:
<http://www.bredenbergteknik.se/res/RUUKKI/borraderorpalarvindkraftverk.pdf>. Hakupäivä 7.2.2013.
44. Geotekniset laskelmat. 2003. Tiehallinto. Helsinki: Tiehallinto. Saatavissa:
<http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100018-v-03geoteklask.pdf>. Hakupäivä 26.3.2013.
45. Kallio, Vesa 2012. T535303 Infran pohjarakenteet, 3 op. Opintojakson oppimateriaali syksyllä 2012. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.

LIITTEET

Liite 1 Kantokestävyyden laskennassa käytettävät osavarmuusluvut

Liite 2 Tuulivoimalan kuormitukset ja maan kantokestävyys (DA2)

Liite 3 Tuulivoimalan kuormitukset ja maan kantokestävyys (DA2*)

Liite 4 Varmuus liukumista ja kaatumista vastaan

Liite 5 Painumalaskentaesimerkkejä

Liite 6 Prosessikaavio tuulivoimalan geoteknisestä suunnittelusta

Mitoitustavalla 2 laskettaessa käytetään ohjeen RIL 207-2009 mukaisesti seuraavien osavarmuuslukujen yhdistelmiä:

A1 "+" M1 "+" R2

Kuormien (γ_F) tai kuorman vaikutusten (γ_E) osavarmuusluvut

Kuorma	Merkintä	Sarja	
		A1	A2
Pysyvä: Epäedullinen (Yhtälö 6.10a) (Yhtälö 6.10b) (Yhtälö 6.10)	$\gamma_{Gkj,sup}$	1,35 K_{FI}	1,0 K_{FI}
		1,15 K_{FI}	
Edullinen (Yhtälö 6.10a) (Yhtälö 6.10b) (Yhtälö 6.10)	$\gamma_{Gkj,inf}$	0,9	1,0
		0,9	
Muuttuva: Epäedullinen (Yhtälö 6.10b) (Yhtälö 6.10)	γ_Q	1,5 K_{FI}	1,3 K_{FI}

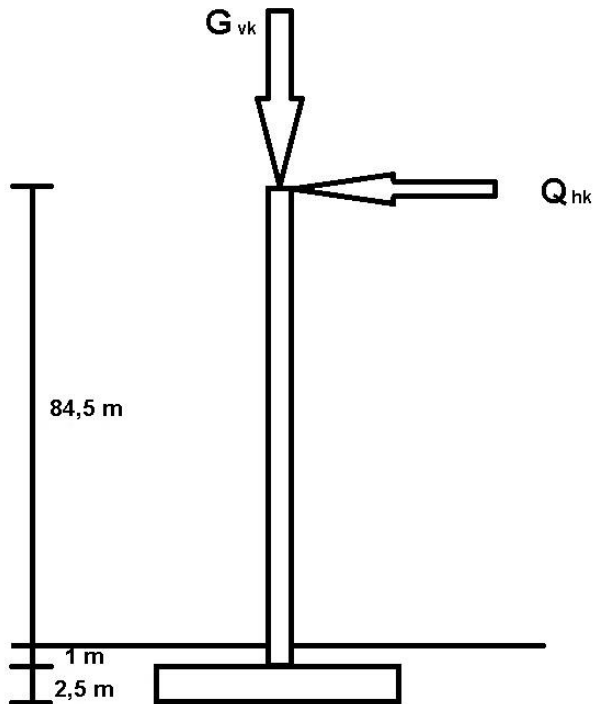
Maaparametrien γ_M osavarmuusluvut

Maaparametri	Merkintä	Sarja	
		M1	M2
Leikkauskestävyysskulma (Kitkakulma)	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Tehokas koheesio	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Suljettu leikkauslujuus	γ_{cu}	1,0	1,5
Yksiaksaalinen puristuskoee	γ_{qu}	1,0	1,5
Tilavuuspaino	γ_γ	1,0	1,0

Antura- ja laattaperustusten sekä tukirakenteiden kestävyden (γ_R) osavarmuusluvut

Kestävyys	Merkintä	Sarja R2
Kantokestävyys	$\gamma_{R,v}$	1,55
Liukuminen	$\gamma_{R,h}$	1,1

Lasketaan tuulivoimalan perustusanturalle tulevat kuormitukset sekä perustuksen kantokestävyys annetuilla mitoituskuormilla.



Anturan mitat: pinta-ala 16,4 m x 16,4 m ja korkeus 2,5 m

Anturan tiheys 24,2 kN / m³

Tuulesta aiheutuva vaakakuorma: $Q_{hk} = 900$ kN

Tuulivoimalan omasta painosta aiheutuva pystykuorma: $G_{vk} = 5\,600$ kN

Anturan painosta aiheutuva pystykuorma: $G_{antura} = (2,5 \times 16,4 \times 16,4) \text{ m}^3 \times 24,2$
kN / m³ = 16 300 kN

Anturan yläpuolisen maan paino $G_{ant, yp} = 4\,000$ kN

Pohjamaan arvoja (Hk)

Tilavuuspaino: $\gamma = 17$ kN / m³

Tehokas tilavuuspaino pohjavesipinnan alapuolella: $\gamma' = 7$ kN / m³ (pohjaveden pinta perustustasossa)

Kitkakulma: $\varphi' = 30^\circ$

Koheesio: $c' = 0$

Kerroin perustuksen pohjan kaltevuudelle: $b_c, b_q, b_v = 1$ (perustus tasaisella pohjalla)

Luotettavuusluokkakerroin $K_{FI} = 1,0$

Kantokestävyyden osavarmuusluku: $\gamma_{R,v} = 1,55$

Epäedullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku: $\gamma_{Gkj, sup} = 1,15$

Edullisen pysyvän kuorman osavarmuusluku: $\gamma_{Gkj, inf} = 0,9$

Määrävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku: $Q_{k,1} = 1,5$

Mitoitustapa DA2 (kaava 6.10b)

$$1,15 * K_{FI} * G_{kj, sup} + 0,9 * G_{kj, inf} + 1,5 * K_{FI} * Q_{k,1} + 1,5 * K_{FI} * \sum_{i>1} \varphi_{0,i} * Q_{k,i}$$

Lasketaan perustukselle aiheutuvat pystysuuntaiset mitoituskuormitukset (V_d) edullisilla ja epäedullisilla pystykuormilla. Edullisilla pysyvillä kuormilla laskennassa käytetään kerrointa 0,9 ja epäedullisilla pysyvillä kuormilla kerrointa 1,15. Lisäksi lasketaan vaakasuora mitoituskuormitus (H_d) ja sen aiheuttama momenttikuormitus (M_d).

Kuormien määrittämisen jälkeen lasketaan kantokestävyyden varmuuden laskentaan tarvittavia arvoja.

	$V_{edullinen} (V_{min}, H_{max})$	$V_{epaedullinen} (V_{max}, H_{max})$
V_d	$(G_{vk} + G_{antura} + G_{ant, yp}) * \gamma_{Gkj, inf} =$ $= (5\ 600 + 16\ 300 + 4\ 000) \text{ kN} * 0,9$ $= 23\ 310 \text{ kN}$	$(G_{vk} + G_{antura} + G_{ant, yp}) * \gamma_{Gkj, sup} =$ $= (5\ 600 + 16\ 300 + 4\ 000) \text{ kN} * 1,15$ $= 29\ 785 \text{ kN}$
H_d	$Q_{k,1} * Q_{hk} = 1,5 * 900 \text{ kN} = 1\ 350 \text{ kN}$	1 350 kN
M_d	$H_d * 88 \text{ m} =$ $= 1\ 350 \text{ kN} * 88 \text{ m} = 118\ 800 \text{ kNm}$	118 800 kNm
e_d	$M_d / V_d = 118\ 800 \text{ kNm} / 23\ 310 \text{ kN}$ $= 5,10 \text{ m}$	$M_d / V_d = 118\ 800 \text{ kNm} / 29\ 785 \text{ kN}$ $= 3,99 \text{ m}$
B'	$2 * (B / 2 - e_d) =$ $= 2 * (16,4 \text{ m} / 2 - 5,10 \text{ m}) = 6,2 \text{ m}$	$2 * (B / 2 - e_d) =$ $= 2 * (16,4 \text{ m} / 2 - 3,99 \text{ m}) = 8,42 \text{ m}$
A'	$B' * L = 6,2 \text{ m} * 16,4 \text{ m} = 101,7 \text{ m}^2$	$B' * L = 8,42 \text{ m} * 16,4 \text{ m} = 138,1 \text{ m}^2$
B'/L	$6,2 \text{ m} / 16,4 \text{ m} = 0,378$	$8,42 \text{ m} / 16,4 \text{ m} = 0,513$
N_q	$e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45^\circ + \varphi'/2) = 18,40$	18,40

N_γ	$2(N_q-1)\tan\phi' = 20,09$	20,09
s_q	$1 + (B' / L) \sin\phi' =$ $= 1 + 0,378 * 0,5 = 1,189$	$1 + (B' / L) \sin\phi' =$ $= 1 + 0,513 * 0,5 = 1,257$
s_γ	$1 - 0,3 *(B' / L) =$ $= 1 - 0,3 * 0,378 = 0,887$	$1 - 0,3 *(B' / L) =$ $= 1 - 0,3 * 0,513 = 0,846$
m_B	$[2 + (B' / L)] / [1 + (B' / L)] =$ $= (2 + 0,378) / (1 + 0,378) = 1,73$	$[2 + (B' / L)] / [1 + (B' / L)] =$ $= (2 + 0,513) / (1 + 0,513) = 1,66$
i_q	$(1 - H_d / V_d)^{m_B} =$ $= (1 - 1\,350\text{ kN} / 23\,310\text{ kN})^{1,73}$ $= 0,902$	$(1 - H_d / V_d)^{m_B} =$ $= (1 - 1\,350\text{ kN} / 29\,785\text{ kN})^{1,66}$ $= 0,926$
i_γ	$(1 - H_d / V_d)^{m_B+1} =$ $= (1 - 1\,350\text{ kN} / 23\,310\text{ kN})^{1,73+1}$ $= 0,850$	$(1 - H_d / V_d)^{m_B+1} =$ $= (1 - 1\,350\text{ kN} / 29\,785\text{ kN})^{1,66+1}$ $= 0,884$

Lasketaan varmuus kantokestävyydelle edullisilla pystykuormilla

$V_{\text{edullinen}}$:

Kantokestävyyden mitoitusarvo

$$R/A' = c' N_c b_c s_c i_c + q' N_q b_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma$$

$$\Rightarrow R/A' = q' N_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma s_\gamma i_\gamma =$$

$$= 17\text{ kN/m}^3 * 18,4 * 1,189 * 0,902 + 0,5 * 7\text{ kN/m}^3 * 6,2\text{ m} * 20,09 * 0,887 * 0,850 =$$

$$= 664\text{ kN/m}^2$$

Kantokestävyys

$$R_d = R/A' * A' / \gamma_{R,V} = 664\text{ kN/m}^2 * 101,7\text{ m}^2 / 1,55 = 43\,567\text{ kN}$$

$$V_d = 23\,310\text{ kN}$$

Kantokestävyyden varmuus ja pohjapaineen arvo

$$R_d/V_d = 43\,567 / 23\,310 = \mathbf{1,87}\text{ OK} \rightarrow V_d/A' = 23\,310\text{ kN} / 101,7\text{ m}^2 = 229\text{ kPa}$$

Kantokestävyyden varmuus edullisilla pystykuormilla on 1,87 ja perustukselle tulevan pohjapaineen arvo on 229 kPa.

Lasketaan varmuus kantokestävyydelle epäedullisilla pystykuormilla

$V_{\text{epäedullinen}}$:

Kantokestävyyden mitoitusarvo

$$R/A' = q' N_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma s_\gamma i_\gamma =$$

$$= 17 \text{ kN/m}^3 * 18,4 * 1,257 * 0,926 + 0,5 * 7 \text{ kN/m}^3 * 8,42 \text{ m} * 20,09 * 0,846 * 0,884 =$$

$$= 807 \text{ kN/m}^2$$

Kantokestävyys

$$R_d = R/A' * A' / \gamma_{R,v} = 807 \text{ kN/m}^2 * 138,1 \text{ m}^2 / 1,55 = 71\,889 \text{ kN}$$

$$V_d = 29\,785 \text{ kN}$$

Kantokestävyyden varmuus ja pohjapaineen arvo

$$R_d/V_d = 71\,889 / 29\,785 = \mathbf{2,41} \text{ OK} \rightarrow V_d/A' = 29\,785 \text{ kN} / 138,1 \text{ m}^2 = 216 \text{ kPa}$$

Kantokestävyyden varmuus epäedullisilla pystykuormilla on 2,41 ja perustukselle tulevan pohjapaineen arvo on 216 kPa.

Mitoitustapa DA2* (kaava 6.10a)

$$1,35 * K_{FI} * G_{kj,sup} + 0,9 * G_{kj,inf}$$

Lasketaan perustukselle aiheutuvien kuormitusten (V_k ja H_k) suuruus ensin ominaisarvoilla. Tämän jälkeen lasketaan kantokestävyyden varmuuden laskentaan tarvittavia arvoja, ja lopuksi lasketaan pysyvien kuormitusten mitoitusarvot kertomalla niiden ominaiskuormat kertoimella 1,35.

	$V_{edullinen} (V_{min}, H_{max})$
V_k	$(G_{vk} + G_{antura} + G_{ant, yp}) =$ $= (5\,600 + 16\,300 + 4\,000) \text{ kN}$ $= 25\,900 \text{ kN}$
H_k	900 kN
M_k	$H_k * 88 \text{ m} =$ $= 900 \text{ kN} * 88 \text{ m} = 79\,200 \text{ kNm}$
e_k	$M_k / V_k = 79\,200 \text{ kNm} / 25\,900 \text{ kN}$ $= 3,06 \text{ m}$
B'	$2 * (B / 2 - e_k) =$ $= 2 * (16,4 \text{ m} / 2 - 3,06 \text{ m}) = 10,28 \text{ m}$
A'	$B' * L = 10,28 \text{ m} * 16,4 \text{ m} = 168,6 \text{ m}^2$
B'/L	$10,28 \text{ m} / 16,4 \text{ m} = 0,627$
N_q	$e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45^\circ + \varphi'/2) = 18,40$
N_y	$2(N_q - 1) \tan \varphi' = 20,09$
s_q	$1 + (B' / L) \sin \varphi' =$ $= 1 + 0,627 * 0,5 = 1,314$
s_y	$1 - 0,3 * (B' / L) =$ $= 1 - 0,3 * 0,627 = 0,812$
m_B	$[2 + (B' / L)] / [1 + (B' / L)] =$ $= (2 + 0,627) / (1 + 0,627) = 1,61$
i_q	$(1 - H_k / V_k)^{m_B} =$ $= (1 - 900 \text{ kN} / 25\,900 \text{ kN})^{1,61}$ $= 0,945$
i_y	$(1 - H_k / V_k)^{m_B + 1} =$ $= (1 - 900 \text{ kN} / 25\,900 \text{ kN})^{1,61 + 1}$ $= 0,912$

Kantokestävyyden mitoitusarvo

$$R/A' = c' N_c b_c s_c i_c + q' N_q b_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma$$

$$\Rightarrow R/A' = q' N_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma s_\gamma i_\gamma =$$

$$= 17 \text{ kN/m}^3 * 18,4 * 1,314 * 0,945 + 0,5 * 7 \text{ kN/m}^3 * 10,28 \text{ m} * 20,09 * 0,812 * 0,912 =$$

$$= 924 \text{ kN/m}^2$$

Kantokestävyys

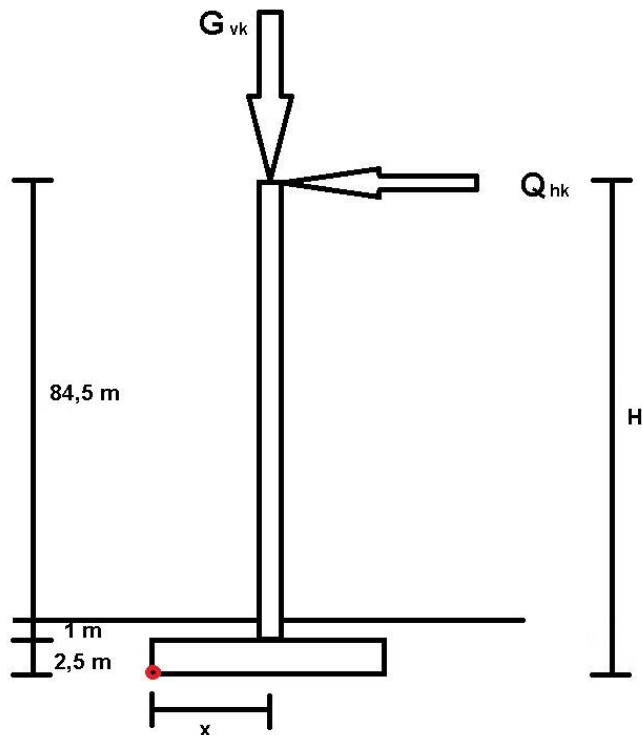
$$R_d = R/A' * A' / \gamma_{R,v} = 924 \text{ kN/m}^2 * 168,6 \text{ m}^2 / 1,55 = 100\,500 \text{ kN}$$

$$V_d = 1,35 * V_k = 1,35 * 25\,900 \text{ kN} = 34\,965 \text{ kN}$$

Kantokestävyyden varmuus ja pohjapaineen arvo

$$R_k/V_k = 100\,500 / 34\,965 = \mathbf{2,87} \text{ OK} \rightarrow V_d/A' = 34\,965 \text{ kN} / 168,6 \text{ m}^2 = 207 \text{ kPa}$$

Kantokestävyyden varmuus pysyville kuormille on 2,87 ja perustukselle tulevan pohjapaineen arvo on 207 kPa.



Tuulivoimalan varmuus liukumista vastaan tarkistetaan seuraavalla kaavalla

$$H_d \leq R_{H,d}$$

$$R_{H,d} = (V_d \tan \varphi_k) / \gamma_{R,h} = 0,9 * 23\,310 \text{ kN} * \tan 30^\circ / 1,1 = 11\,000 \text{ kN}$$

$$H_d = 1,5 * 900 \text{ kN} = 1\,350 \text{ kN}$$

⇒ 1 350 kN ≤ 11 000 kN, joten varmuus liukumista vastaan on riittävä

Tuulivoimalan kokonaisvarmuus kaatumista vastaan lasketaan vertailemalla kaatavan tuulikuorman aiheuttamaa momenttia sekä pystyssä pitävän perustuksen ja tuulivoimalan painon aiheuttamaa momenttia punaisen pisteen suhteen. Laskennassa ei oteta huomioon perustuksen päällä olevaa maakerrosta.

$$H = 88 \text{ m}$$

$$x = 8,2 \text{ m}$$

$$Q_{hk} = 900 \text{ kN}$$

$$G_{vk} = 5\,600 \text{ kN}$$

$$G_{antura} = 16\,300 \text{ kN}$$

Kaatava momentti

$$M_{\text{kaatava}} = Q_{\text{hk}} * H = 900 \text{ kN} * 88 \text{ m} = 79\,200 \text{ kNm}$$

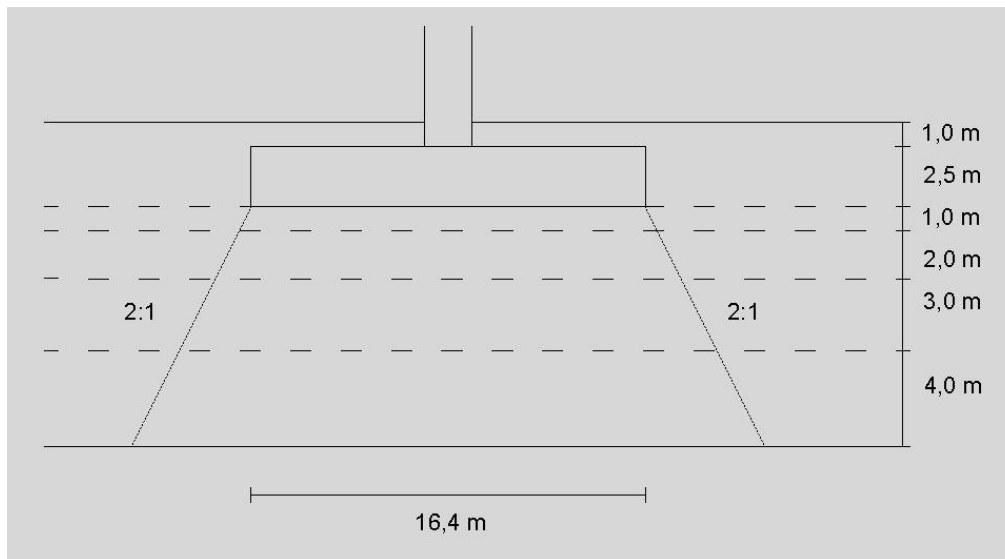
Tukeva momentti

$$M_{\text{tukeva}} = (G_{\text{vk}} + G_{\text{antura}}) * x = (5\,600 + 16\,300) \text{ kN} * 8,2 \text{ m} = 179\,580 \text{ kNm}$$

Kokonaisvarmuus kaatumista vastaan

$$F = \frac{M_{\text{tukeva}}}{M_{\text{kaatava}}} = \frac{179\,580 \text{ kNm}}{79\,200 \text{ kNm}} = 2,27$$

Kitkamaalle painumalaskenta voidaan tehdä joko alkupainumakaavojen tai konsolidaatiopainumakaavan avulla. Tässä liitteessä painuma on laskettu kolmella eri kaavalla.



1. Alkupainuman laskenta Tiehallinnon ohjeen (TIEL 2172068-99) mukaan

Perustuksen paksuus 2,5 m ja perustamissyvyys 3,5 m. Perustus on neliön mallinen ja sivun pituus $b = 16,4$ m. Perustuksen alla 10 m hiekkamaata, jonka tilavuuspaino $\gamma = 18 \frac{kN}{m^3}$. Pohjavesipinta sijaitsee yli kymmenessä metrissä.

$$s = \frac{i_s q B}{E_d} c_T$$

s = perustuksen painuma [mm]

i_s = perustuksen muotokerroin

q = pohjapaine [kN/m^2]

B = perustuksen leveys [m]

E_d = maapohjan muodonmuutosmoduuli [MPa]

c_T = kerroin kokoonpuristuvan kerroksen paksuudelle

$V_k = 25\,900$ kN (pysyvä pystysuuntainen kuormitus)

$A = 16,4$ m x $16,4$ m = 269 m² (laskennan yksinkertaistamiseksi oletetaan, että kuormitus on keskeistä eikä vaakasuuntaisia kuormituksia ole)

Kokoonpuristuvan hiekkakerroksen paksuus $T = 10$ m

Kertoimet i_s ja c_T saadaan kuvaajista

$i_s = 0,8$

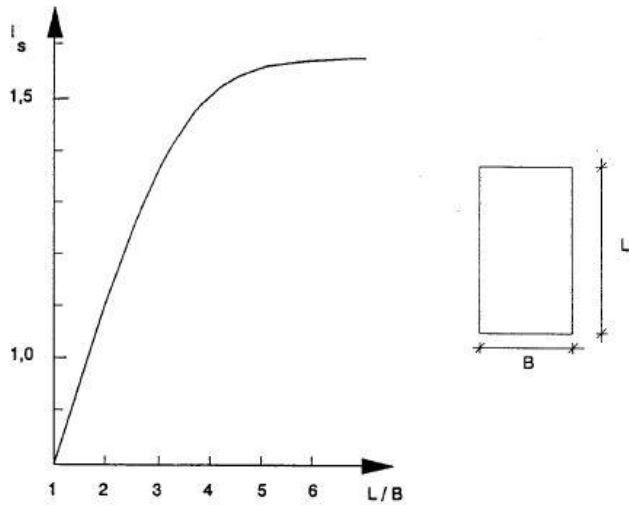
q = pohjapaine [kN/m^2]

$B = 16,4$ m

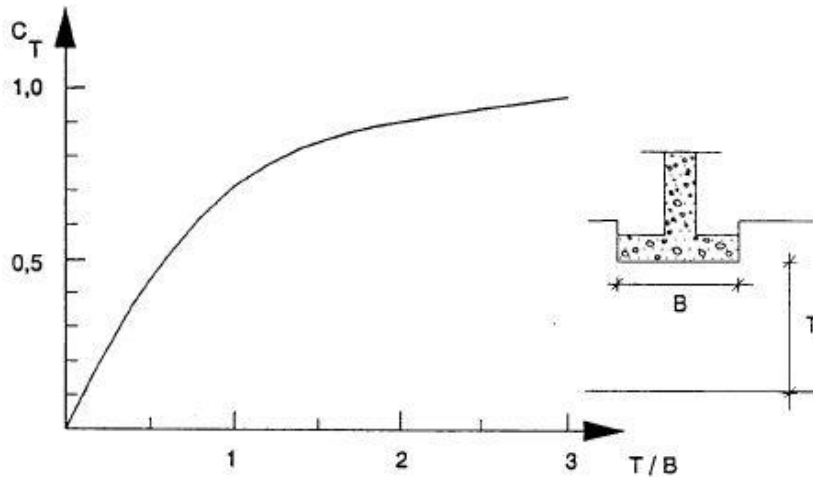
$E_d = 40$ MPa (arvioitu)

$c_T = 0,5$

$$s = \frac{0,8 * \frac{25\,900\text{ kN}}{16,4\text{ m} * 16,4\text{ m}} * 16,4\text{ m}}{40\text{ MPa}} * 0,5 = 16\text{ mm}$$



Perustuksen muotokertoimen i_s riippuvuus perustuksen mitoista



Kertoimen c_T riippuvuus painuvan kerroksen paksuudesta

Rämö, S., Maan varaan perustettavan sillan painumalaskelma in situ -menetelmällä, diplomityö, TKK, 1990

Suhteellinen tiiviyys	Heijari-kairaus N_{20} (L/0,2 m)	Puristin-kairaus q_c (MPa)	Paino-kairaus 1) MHT (pk/0,2 m)	SPT-kairaus 3) N_{30} (L/0,3 m)	Kitka-kulma 2) (ast.)	Muodonmuutosmoduuli E_d (MPa)
Hyvin löyhä	< 5	< 2,5	< 10	< 4	29 - 32	< 10
Löyhä	3 - 10	2,5 - 5,0	10 - 30	4 - 10	32 - 35	10 - 20
Keskitiivis	8 - 17	5,0 - 10,0	20 - 50	10 - 30	35 - 37	20 - 30
Tiivis	12 - 36	10,0 - 20,0	40 - 90	30 - 50	37 - 40	30 - 60
Hyvin tiivis	> 30	> 20,0	> 80	> 50	40 - 45	60 - 90

Teräspalkkipaalut. Helsinki 1999, Tielaitos, siltayksikkö, TIEL 2173448-99.

2. Alkupainuma norjalaista kaavaa käyttäen

$$s_i = \mu_0 \mu_1 \frac{q B}{E_u}$$

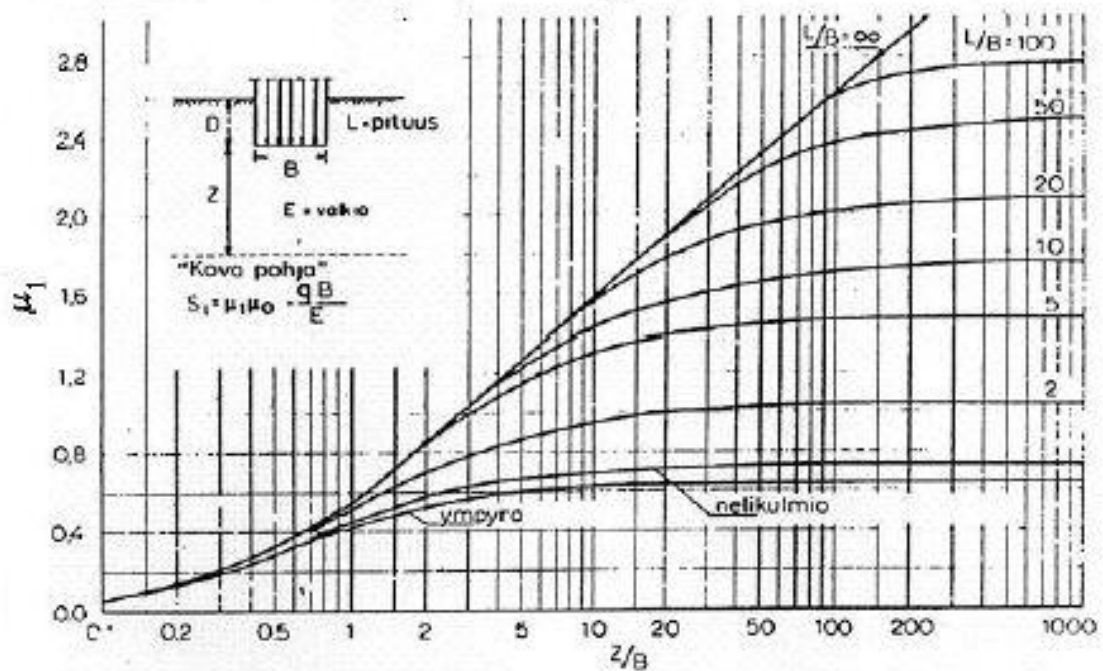
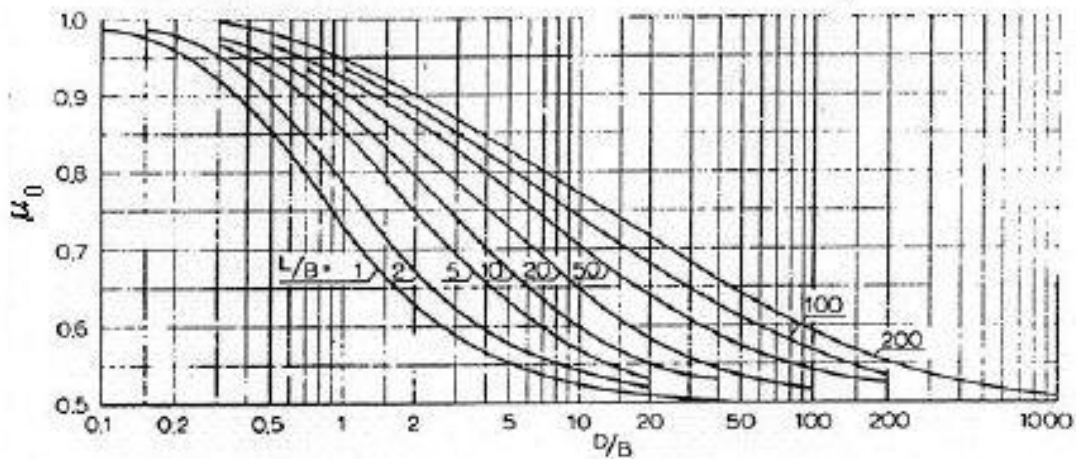
q = suorakaiteen muotoisen laatan tasainen kuorma [kN/m²]

E_u = suljetun tilan muodonmuutosmoduuli [MPa]

μ₀ ja μ₁ = nomogrammeista saatavat arvot

B = perustuksen leveys [m]

$$s_i = 0,95 * 0,35 * \frac{25\,900\text{ kN}}{16,4\text{ m} * 16,4\text{ m}} * 16,4\text{ m} = 13\text{ mm}$$



3. Painumalaskenta konsolidaatiokaavan avulla

Perustuksen paksuus 2,5 m ja perustamissyvyys 3,5 m. Perustus on neliön mallinen ja sivun pituus $b = 16,4$ m. Perustuksen alla 10 m hiekkamaata, jonka tilavuuspaino $\gamma = 18 \frac{kN}{m^3}$. Pohjavesipinta sijaitsee yli kymmenessä metrissä.

$$V_k = 25\,900 \text{ kN}$$

Perustuksen yläpuolisen maan aiheuttama kuormitus (tuulivoimalan tornin ”syrjäyttämää” tilavuutta ei vähennetä)

$$q = 1,0 \text{ m} * 269 \text{ m}^2 * 18 \text{ kN/m}^3 = 4\,842 \text{ kN}$$

$$A = 269 \text{ m}^2$$

Suhteellinen kokoonpuristuma lasketaan kaavalla

$$\varepsilon = \frac{1}{m \beta} \left[\left(\frac{\sigma_{vo} + \sigma_z}{\sigma_v} \right)^\beta - \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma_v} \right)^\beta \right]$$

ε = painuma [mm]

m = moduuliluku

β = jännitysekspONENTTI

σ_{vo} = tehokas jännitys

σ_z = rakenteen aiheuttama lisäjännitys syvyydessä z

σ_v = vertailujännitys (=100 kPa)

$$m = 300$$

$$\beta = 0,5$$

$$\sigma_v = 100 \text{ kPa}$$

Koko rakennelman ja sen päällisen maakerroksen perustuksen alapintaan aiheuttama pohjapaine

$$\sigma = \frac{V_k + q}{A} = \frac{(25\,900 + 4\,842) \text{ kN}}{269 \text{ m}^2} = 114,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Jaetaan painuva maakerros neljään osaan (1 m + 2 m + 3 m + 4 m = 10 m)

	z [m]	σ_{vo} [kPa]	σ_z [kPa]	ε	Δz [mm]	s= $\varepsilon * \Delta z$ [mm]
1	0,5	$4,0\text{m} * 18\text{kN/m}^3 = 72 \text{ kPa}$	107,6	0,00328	1000	3,3
2	2	$5,5\text{m} * 18\text{kN/m}^3 = 99 \text{ kPa}$	90,8	0,00255	2000	5,1
3	4,5	$8,0\text{m} * 18\text{kN/m}^3 = 144 \text{ kPa}$	70,4	0,00176	3000	5,3
4	8	$11,5\text{m} * 18\text{kN/m}^3 = 207 \text{ kPa}$	51,6	0,00113	4000	4,5
						18,2 mm

Konsolidaatiopainuman suuruus yhteensä 18,2 mm.

σ_z :n suuruus eri kerroksissa lasketaan likimääräismenetelmällä

$$\sigma_z = \frac{\sigma}{(B+z)(L+z)}$$

$$\sigma_{z1} = \frac{30\,742\text{ kN}}{(16,4\text{ m} + 0,5\text{ m})(16,4\text{ m} + 0,5\text{ m})} = 107,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{z2} = \frac{30\,742\text{ kN}}{(16,4\text{ m} + 2,0\text{ m})(16,4\text{ m} + 2,0\text{ m})} = 90,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{z3} = \frac{30\,742\text{ kN}}{(16,4\text{ m} + 4,5\text{ m})(16,4\text{ m} + 4,5\text{ m})} = 70,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{z4} = \frac{30\,742\text{ kN}}{(16,4\text{ m} + 8,0\text{ m})(16,4\text{ m} + 8,0\text{ m})} = 51,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{300 * 0,5} \left[\left(\frac{72\text{ kPa} + 107,6\text{ kPa}}{100\text{ kPa}} \right)^{0,5} - \left(\frac{72\text{ kPa}}{100\text{ kPa}} \right)^{0,5} \right]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{300 * 0,5} \left[\left(\frac{99\text{ kPa} + 90,8\text{ kPa}}{100\text{ kPa}} \right)^{0,5} - \left(\frac{99\text{ kPa}}{100\text{ kPa}} \right)^{0,5} \right]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{300 * 0,5} \left[\left(\frac{144\text{ kPa} + 70,4\text{ kPa}}{100\text{ kPa}} \right)^{0,5} - \left(\frac{144\text{ kPa}}{100\text{ kPa}} \right)^{0,5} \right]$$

$$\varepsilon_4 = \frac{1}{300 * 0,5} \left[\left(\frac{207\text{ kPa} + 51,6\text{ kPa}}{100\text{ kPa}} \right)^{0,5} - \left(\frac{207\text{ kPa}}{100\text{ kPa}} \right)^{0,5} \right]$$

