

Joni Markkanen

Tuulipuiston alue- ja pohjarakenteiden suunnittelu

Opinnäytetyö
Rakennustekniikka

Kevät 2016



Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Joni Markkanen	Insinööri (AMK)	Toukokuu 2016
Opinnäytetyön nimi		
Tuulipuiston alue- ja pohjarakenteiden suunnittelu		47 sivua 2 liitesivua
Toimeksiantaja		
Kymen Sipti Oy		
Ohjaaja		
Lehtori Juha Karvonen DI Verner Vulkko RI Aleksei Kyllenen		
Tiivistelmä		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella tuulipuistojen alue- ja pohjarakenteiden suunnitteluun liittyvien lähtötietojen saatavuutta ja tarvittavaa laajuutta sekä sitä missä vaiheessa tietojen tulisi olla käytettävissä. Opinnäytetyön lähtökohtana olivat opinnäytetyön tilaajan tekemät havainnot, ettei suunnitteluun tarvittavia tietoja ole tarvittavassa laajuudessa saatavilla oikea-aikaisesti eikä voimalatoimittajilla tai -urakoitsijoilla aina ole varmaa tietoa, millaisessa laajuudessa lähtötietoaineistoa tarvitaan pohjarakennesuunnittelua varten. Työn tavoitteena oli tehdä yleinen ohje tuulipuiston platform-alueen ja perustusten suunnitteluun tarvittavien lähtötietojen hankinnan laajuuteen ja vaiheistamiseen.</p> <p>Työn teoria- ja tutkimusosuus suoritettiin kirjallisuustutkimuksena käyttäen hyödyksi yleistä kirjallisuutta pohjarakentamisesta ja geotekniikasta, tuulivoimayhdistysten ja -yhtiöiden verkkosivuja ja suunnitteludokumentteja. Teoriaosiossa käydään läpi perusasioita tuulivoimasta ja tuulivoimaloista, tuulivoimahankkeen vaiheistusta sekä tuulipuistorakentamiseen olennaisesti liittyvien osa-alueiden yleistä teoriaa. Työssä pyritään myös kuvaamaan platform-alueen suunnittelun erityispiirteitä, tuulivoimalan toimittajien asettamia erityisiä vaatimuksia ja sitä, minkälaisia tarpeita ne asettavat suunnittelulle.</p> <p>Tutkimuksessa havaittiin tuulivoimatoimittajien vaatimusten tuulipuistojen infrastruktuurin suunnitteluun olevan lähtökohtaisesti samansuuntaisia. Haasteita suunnitteluun aiheuttavat kuitenkin voimalatoimittajien väliset eroavaisuudet suunnittelun detaljitasolla ja suunnittelun aikaiset muutokset tienlinjauksissa sekä kuljetus- ja nosturikalustossa. Tutkimuksen avulla laadittiin lähtötietojen hankintaa avustava ja ohjaava lomake, jolle kirjataan kohteen suunnitteluun tarvittavat pohjatutkimukset sekä merkittävästi suunnitteluun vaikuttavat lähtötiedot. Näitä tietoja voidaan hyödyntää tuulivoimalakohtaisesti geoteknistä suunnittelua aloitettaessa.</p>		
Asiasanat		
Tuulivoimala, pohjarakentaminen, geotekniikka, suunnittelu, pohjatutkimus		

Author (authors)	Degree	Time
Joni Markkanen	Bachelor of Engineering	April 2016
Thesis Title		47 pages
Geotechnical Engineering and Regional Design of Wind Farms		2 pages of appendixes
Commissioned by		
Kymen Sipti Oy		
Supervisor		
Juha Karvonen, Senior Lecturer Verner Vulkko, Master of Engineering Aleksi Kyllonen, Bachelor of Engineering		
Abstract		
<p>The purpose of this thesis was to examine availability and scale of information that is required to start geotechnical engineering of a wind farm, and to define when the information should be available. The basis of the thesis was that designers have found that the information required to do the planning was not always available in right time or in the proper scale. In addition, it was not clear if the wind turbine provider knew when the information should be made available or what information is relevant to begin the geotechnical engineering work. The goal of this thesis was to make guide about what information is required to begin the designing work.</p>		
<p>The theory and research parts of this thesis were conducted mainly as literature research utilizing common literature about geotechnical engineering, websites of wind turbine associations and technical documents of wind turbine providers. The theory section, we discuss fundamentals of wind turbine construction and phasing of the wind farm project. In addition, a common theory that is relevant to wind farm construction is presented. One of the goals of this thesis was to describe special characteristics of designing a wind turbine platform area, the special requirements of design set by wind turbine providers and how they affect the design and planning work.</p>		
<p>During the research, it was found out that the special requirements set by the wind turbine providers were mostly similar. The challenges of designing were caused by differences in every providers plans in the detail level. Also, challenges are caused by the changes during the designing work that were caused by change of route, crane equipment or transportation vehicles. Based on the research, a form was created. This form defines what kind of geotechnical surveys need to be done and what significant information is required to start designing work. This information can be utilized in geotechnical engineering work of individual wind turbine platforms.</p>		
Keywords		
wind farm, geotechnics, geotechnical engineering, soil construction		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TUULIVOIMA JA -VOIMALAT	7
2.1	Tuulivoima suomessa 2015	8
2.2	Tuulivoimalan toimintaperiaate	9
2.3	Tuulivoimalatyypit	9
2.4	Tuulivoimalan osat ja niiden tiedot.....	10
3	TUULIVOIMALAN RAKENTAMINEN	17
3.1	Tuulivoimalahankkeen vaiheet.....	17
3.2	Suunnittelun käynnistäminen	22
3.3	Rakentaminen ja sen erityispiirteet.....	22
3.4	Tuulivoimalan kuljetus työmaalle	23
3.5	Rakentamista varten tehtävät tutkimukset.....	25
3.6	Tuulivoimalan perustamistavat	29
3.7	Perustusten kuivatus	31
4	PLATFORM-ALUEEN SUUNNITTELU.....	32
4.1	Kokoamis-, nosturi- ja perustusalue.....	33
4.2	Varastoalue	36
4.3	Tieverkon suunnittelu.....	36
5	YHTEENVETO JA ANALYYSI.....	40
	LÄHTEET.....	43

Käytetyt termit ja lyhenteet

Platform-alue	Platform-alue on tuulivoimalatyömaalla ja suunnittelussa käytetty termi, joka käsittää nosturille tarkoitetun nostoalueen, voimalan osien kasaamiseen ja varastointiin tarkoitetut alueet. Voimalan perustusalue kuuluu myös olennaisesti tähän alueeseen.
Naselli	Tuulivoimalan konehuone, joka pitää sisällään sähkön tuottamiseen tarvittavat komponentit. Myös roottori kiinnittyy naselliin voimansiirtoakselistaan.
Roottori	Koostuu voimalan siipilavoista ja keskiöstä, johon siivet kiinnittyvät.
IBA-alue	Important Bird Areas. Kansainvälisesti tärkeät lintualueet.
YVA-menettely	Menettely, jossa selvitetään ja arvioidaan hankkeen välittömät ja välilliset ympäristövaikutukset riittävällä tarkkuudella.
E1	Ensimmäisen levykuormituskerroksen ominaisarvo vastustaa painumaa. [MN/m ²]
E2	Toisen levykuormituskerroksen ominaisarvo vastustaa painumaa. [MN/m ²]
E2/E1	Arvojen E2 ja E1 välinen suhde, jonka tulee yleensä olla <2,2.
Molskotti	Esimurskattua kallioainesta, jonka rakeisuus vaihtelee 0–120 mm välillä.

1 JOHDANTO

Tuulivoimaloita on rakennettu viime vuosina kiihtyvällä tahdilla. Suomen hallituksen ilmasto- ja energiastrategian mukainen tavoite on, että vuonna 2025 noin 10% Suomen sähköntarpeesta tuotettaisiin tuulivoimalla. (14.)

Tässä opinnäytetyössä perehdytään maa-alueelle rakennettavien tuulivoimaloiden platform-alueen eli kasaus-, nosto- ja varastoalueen sekä voimaloiden tuloteiden suunnitteluun ja siihen vaikuttaviin seikkoihin pohjarakennesuunnittelun näkökulmasta. Selvityksen lähtökohtana on tarkastella lähtötietojen saatuuden ja projektin aikaisten muutosten vaikutuksia pohjarakennesuunnittelun käynnistämiseen sekä sen edistämiseen. Työssä tarkastellaan, kuinka käytävissä oleva nosturikalusto, voimalatyypit, valmistajan asettamat vaatimukset ja perustamistapa vaikuttavat suunnitteluun. Työn yhtenä tavoitteena on koota tuulivoimaloiden platform-alueen pohjarakenteiden suunnittelun edellyttämät pohjatiedot yksiin kansiin. Tämän avulla suunnitteluvaiheen käynnistyessä saataisiin riittävä määrä oikea-aikaisia lähtötietoja ja työnaikaisia muutoksia syntäisi entistä vähemmän.

Tämä opinnäytetyö koostuu kahdesta osasta. Ensimmäinen käsittelee tuulivoimaa ja tuulivoimaloita yleisesti. Toisessa osiossa perehdytään tuulipuiston alue- ja geotekniseen suunnitteluun ja se pitää sisällään platform-alueen ja siihen olennaisesti liittyvien alueiden suunnitteluun. Työ toteutetaan pääasiassa kirjallisuustutkimuksena.

Tavoitteena on saada aikaan selvitys, joka toimii apuna tuulivoimalarakentamisen pohjarakennusvaiheen suunnitteluun ja toteutukseen. Työssä selvitetään lähtötietojen ja lähtötietojen muutosten vaikutuksia suunnitteluun ja sen edistämiseen. Työn tarkoituksena on paneutua lähtötietojen hankintaan ja pyrkiä helpottamaan erityisesti suunnittelun käynnistämistä.

Työn tutkimusosiossa perehdytään suunnittelutyön tähänhetkisiin vaatimuksiin sekä suunnitteluprosessin aloittamiseen ja sen etenemiseen, esimerkiksi lähtötietojen hankintaan, maankäyttösopimuksiin, tarvittaviin maanmittauksiin, pohjatutkimuksiin ja siihen, kuinka ne vaikuttavat suunnitteluun sen eri vaiheissa. Tämän jälkeen perehdytään suunnittelun ongelmakohtiin eli tuloteiden reittiin muutoksiin, muutosten syihin ja siihen, kuinka suunnitteluprosessia voitaisiin tehostaa ja samalla saataisiin karsittua mahdollisesti myös kustannuksia.

2 TUULIVOIMA JA -VOIMALAT

Tuulivoiman merkitys Suomen energiatuotannossa on koko ajan kasvussa. Vuonna 2014 se tuotti vain 1,3 %, joka oli noin 1,1 TWh Suomen sähköntarpeesta. Ennätyksellinen vuosi 2015 tuplasi tuulivoimalla tuotetun sähkön määrän ja nosti osuuden 2,8 % eli noin 2,3 TWh. (21.) Suomen hallituksen ilmasto- ja energiastrategian mukaan vuonna 2025 tuulivoima tuottaa noin 10 % Suomen vuosittain tarvitsemasta sähköstä, jonka on arvioitu olevan noin 9 TWh. Energiateollisuuden haaveissa olisi tuottaa jopa 15 % Suomen sähkön tarpeesta tuulivoimalla vuoteen 2050 mennessä, joka tämän hetken ennusteiden mukaan olisi noin 20 TWh. (14.)

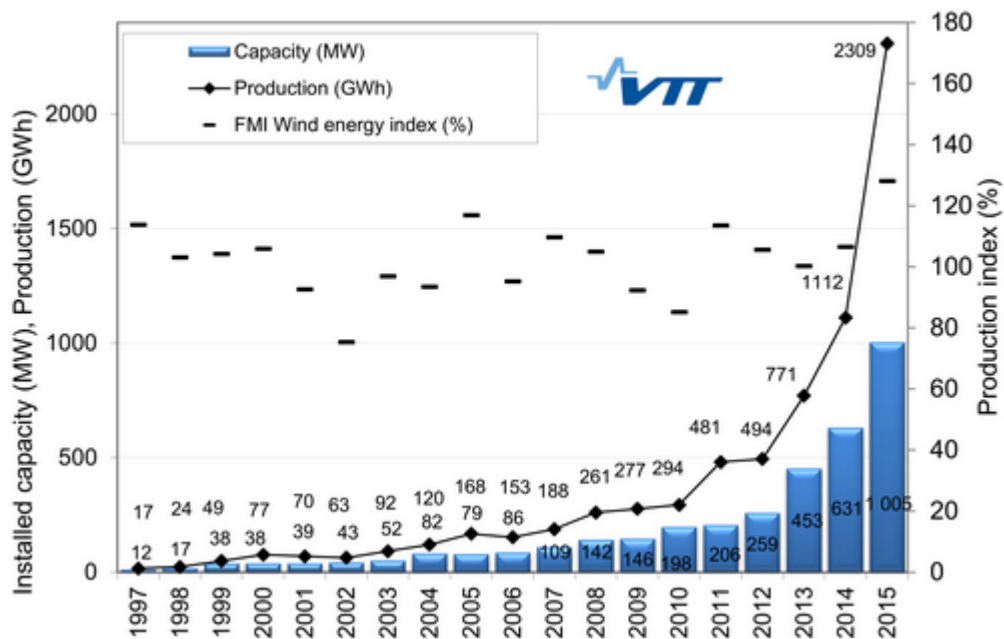
Näitä tavoitteita tukemaan Suomessa otettiin vuonna 2011 käyttöön uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä tukeva syöttötariffi, joka tarkoittaa sitä, että sähkön tuottajalle maksetaan tukea tavoitehinnan ja markkinahinnan erotuksen välinen summa. Tuen saatuaan voimalaitos on oikeutettu saamaan tukea 12 vuotta, jolloin sähköntuotannon tavoitehintaa on 83,5 €/MWh. Uusille tuulivoimaloille maksetaan kuitenkin ensimmäiset kolme vuotta korotettua tavoitehintaa 105,3 €/MWh. Tämä on toiminut hyvänä kannustimena tuulivoimarakentamisen lisäämiseksi ja vuoden 2011 tuulivoimakapasiteetti onkin lähes viisinkertaistunut vuoden 2015 loppuun mennessä (19.)

Tuulivoima on ympäristöystävällinen energiantuotantomuoto, sillä tuulivoimala tuottaa sen valmistamiseen ja pystyttämiseen käytetyn energian takaisin enintään 9 kuukaudessa. (4, 287.) Tuulivoimalan keskimääräinen hinta-arvio riippuu suuresti rakennustöiden hinnasta, mutta tyypillinen 2 MW:n tuulivoimala maksoi vuonna 2006 noin 1,23 miljoonaa euroa. Hinnassa ei kuitenkaan ole huomioitu rakennustöiden kustannuksia. (20.) Lähestulkoon kaikki tuulivoimalan valmistukseen käytetty materiaali voidaan kierrättää, minkä ansiosta tuulivoimala kuluttaa vain vähän luonnonvaroja. (4, 287.)

Tuuli syntyy siitä, kun auringon lämmittämä kevyempi ilmassa nousee ylöspäin ilmakehässä. Tämä aiheuttaa ilmanpaineen alentumista maanpinnalla. Paine-eron tasoittuminen aiheuttaa ilmassojen liikkumista, ja tätä ilmiötä kutsutaan tuuleksi. (4, 280.)

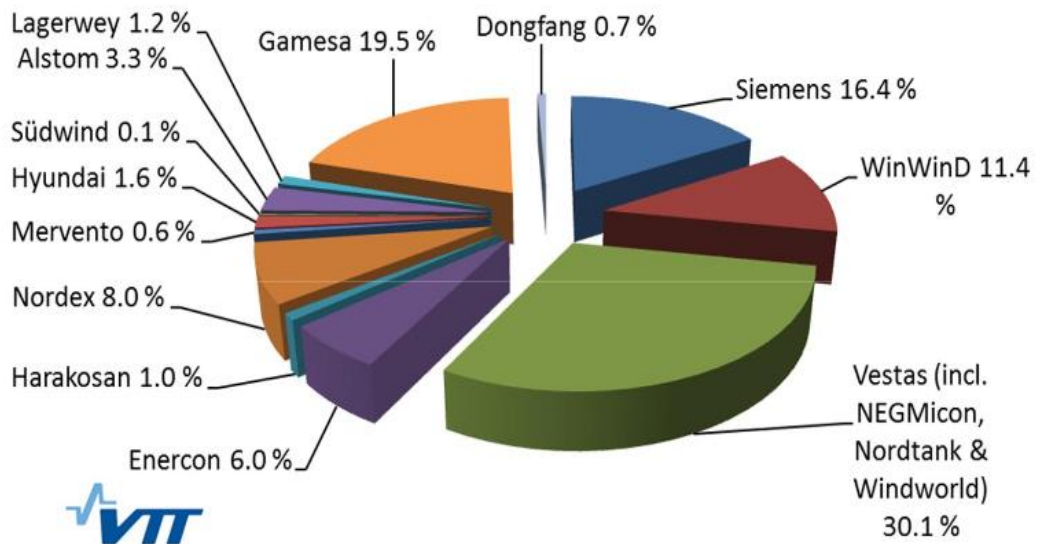
2.1 Tuulivoima suomessa 2015

Suomessa oli VTT:n mukaan vuoden 2015 lopussa tuulivoiman tuotantokapasiteettia 1005 MW, joka koostui 387 voimalasta. Voimaloiden keskiteho on 2,4 MW. Tuulivoimalat tuottivat vuonna 2015 2,3 TWh sähköä Suomen sähköverkkoon, joka oli noin 2,8 % kokonaistuotannosta 82,5 TWh (kuva 1). Uutta kapasiteettia rakennettiin 400 MW, joka koostuu 124 voimalasta, uusien voimaloiden keskitehon ollessa 3,2 MW. (5; 6; 42.)



Kuva 1 Suomen tuulivoimakapasiteetti ja sähköntuotanto 1997-2015.

Suomessa toimivien merkittävien tuulivoimantoimittajien lukumäärä oli vuonna 2014 jo lähes kaksinkertaistunut sitten 2010-luvun alkupuolen. Eniten markkinaosuuksia oli hävinnyt WinWinD vuonna 2013 tapahtuneen konkurssin vuoksi, kun taas eniten markkinaosuuttaan olivat kasvattaneet Tanskalainen Vestas ja Espanjalainen Gamesa (kuva 2). (5.)



Kuva 2 Tuulivoimalatoimittajien osuus Suomessa toteutetuista tuulivoimaloista vuonna 2014. (5,11)

2.2 Tuulivoimalan toimintaperiaate

Tuulivoimalan toimintaperiaate on muuttunut huomattavasti ajan saatossa. Ennen kuin tuulimyllyjä alettiin hyödyntää energiatuotannossa, niiden toiminta perustui tuulen aiheuttamaan painevoimaan. Nykyiset sähköntuotantoon tähtäävät voimalat toimivat tuulen aiheuttaman nosteen perusteella. Energiantuotantoon käytettävät voimalat tarvitsevat käynnistyäkseen vähintään 3 m/s tuulen voimakkuuden. Voimalan tuottama energia on täysin riippuvainen tuulen nopeudesta ja saavuttaakin nimellistehonsa 12 – 15 m/s tuulella ja tuottaa nimellistehonsa verran sähköä 15–25 m/s alueella. Tämän ohjearvon ylittävillä nopeuksilla voimala kuitenkin pysäytetään jotta siihen tai sen komponentteihin ei syntyisi mekaanisia vaurioita. (4, 283.)

2.3 Tuulivoimalatyypit

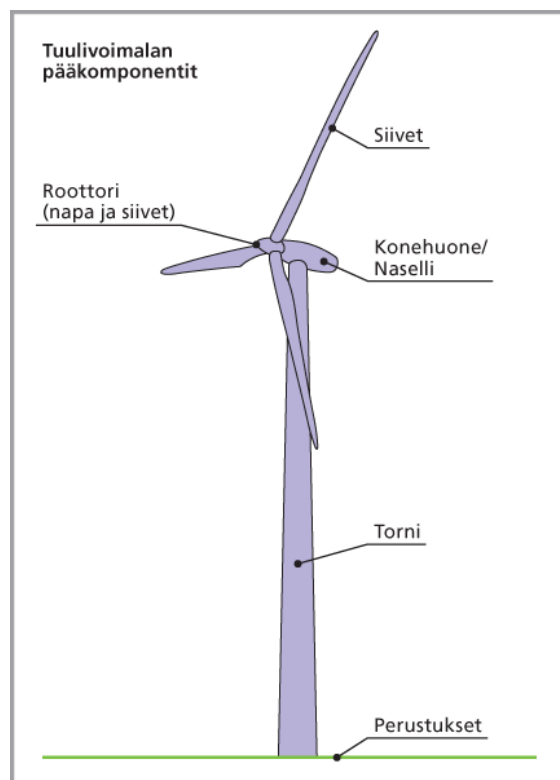
Tuulivoimalat voidaan jakaa kahteen pääryhmään akselinsa perusteella, pysty- ja vaaka-akselisiin voimaloihin eli turbiineihin. Vaaka-akseliset turbiinit voidaan luokitella vielä lapojensa määrän perusteella. Yleisimmin energiatuotannossa käytetty voimalatyyppi onkin vaaka-akselinen kolmilapainen turbiini, joko suoravetotekniikalla tai vaihteistolla varustettuna. Nykyisin päälajitteluperusteena

voidaan käyttää myös sitä, onko voimala sijoitettu maalle vai merelle. Merelle sijoitettavat voimalat voivat olla kooltaan suurempia kuin maalle rakennettavat voimalat. (1; 3.)

Tyypillisiä pystyakselisiä voimalatyyppejä ovat mm. *Dareius-*, *Savonius-* sekä spiraalinmuotoiset turbiinit. Pystyakselisiä turbiineja ei kuitenkaan suosita kaupallisessa energiantuotannossa johtuen siitä, että niiden pyyhkäisyypinta-ala on paljon vaaka-akselillista pienempi ja tästä syystä ne eivät pysty ottamaan talteen tuulesta yhtä paljon liike-energiaa kuin vaaka-akselinen turbiini. (1; 4.)

Vaaka-akseliset tuulivoimalat voivat olla yksi-, kaksi-, kolme- tai monilapaisia. Kaupalliseen energiantuotantoon on vakioitunut kuitenkin kolmelapainen voimala, sillä se on todettu kokonaistaloudellisesti kustannustehokkaimmaksi malliksi. Sen pyyhkäisyypinta-ala on optimaalisin suhteessa materiaalikustannuksiin ja roottorin painoon. Lisäksi kolmilapaisen roottorin stabiliteetti on helpompi varmistaa kuin muiden mallien. (1; 8.)

2.4 Tuulivoimalan osat ja niiden tiedot

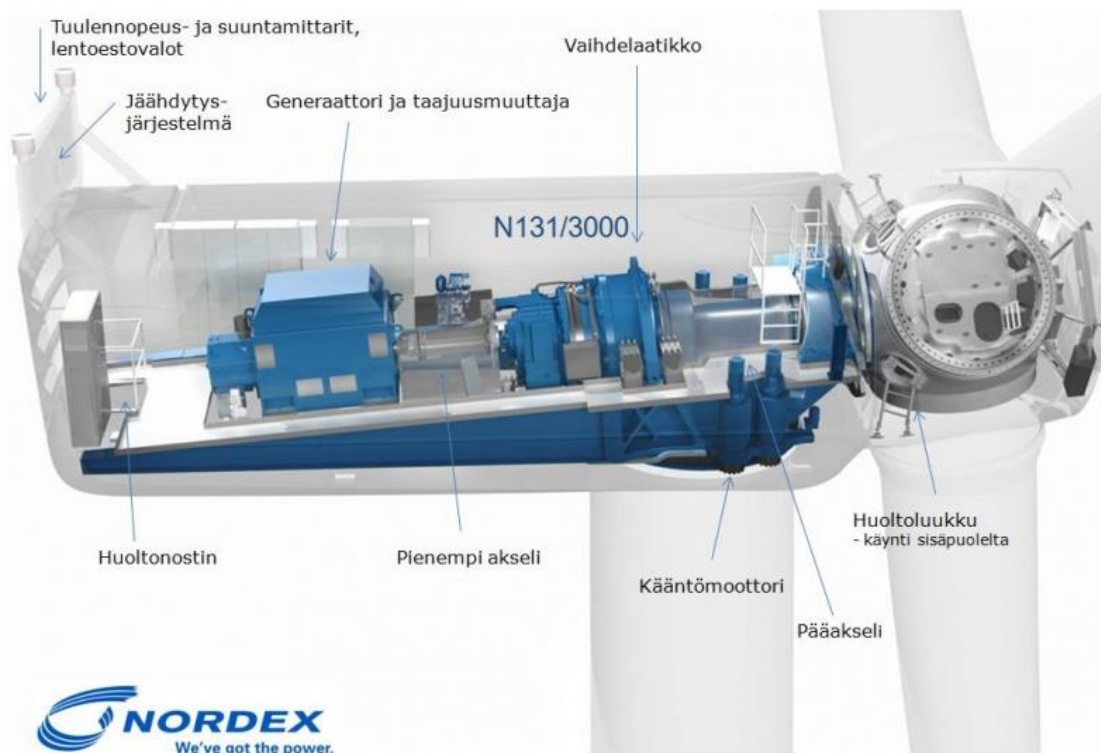


Kuva 3 Tuulivoimalan pääkomponentit. Suomen tuulivoimayhdistys.

Tässä kappaleessa käsitellään tuulivoimalan pääkomponentteja ja niiden teknisiä ominaisuuksia. Komponentit on esitetty (kuvassa 3). Esimerkkinä on käytetty Nordexin K08 Delta N100/3300, N117/3000 ja N131/3000-sarjan tuulivoimaloita.

2.4.1 Naselli

Tuulivoimalan konehuone on useimmiten valmistettu lasikuidusta ja pitää sisällään voimalan tärkeimmät komponentit sähkön tuottamisen kannalta, muun muassa vaihdelaatikon, generaattorin, jarrut ja muuntajia (kuva 4). Näitä komponentteja käytetään säätämään voimalan pyörimisnopeutta, sekä sammuttamaan voimala tuulien yltyessä liian voimakkaiksi ja tietysti muuttamaan pyörimisestä syntyvä mekaaninen energia sähköksi ja muuntamaan se sähköverkkoon soveltuvaksi. (2; 7.)



Kuva 4 Tuulivoimalan konehuone. Nordex N131/3000

Nasellin esimerkkimitat ovat 4,3 m x 4 m x 12,81 m. Painoa nasellille ilman voimansiirtoakselia kertyy noin 60 tonnia. Voimansiirtoakselin esimerkkimitat puolestaan ovat 3,3 m x 2,96 m x 6,25 m. Voimansiirtokomponenttien paino on yhteensä noin 64 tonnia ja se sisältää vaihdelaatikon painon. Muuntajan paino

on noin 9 tonnia ja vaihteiston paino noin 1,5 tonnia. Näin ollen nasellin kokonaispainoksi muodostuu noin 134 tonnia ilman roottoria. (9.)

2.4.2 Roottori

Voimalan roottori koostuu navasta, johon lavat kiinnittyvät, sekä siipien kulman säätöön tarvittavista säätimistä ja voimansiirtoakselista, joka siirtää pyörimisvoiman roottorilta vaihdelaatikolle. Vaihdelaatikko puolestaan kasvattaa roottorin pyörimisnopeutta vaiheittain niin, että saavutetaan generaattorin pyörittämiseen tarvittava nopeus. Vaihteisto aiheuttaa kuitenkin häviötä sekä lisää huollon tarvetta ja epäluotettavuutta. (1; 2.) Tästä syystä nykyisin suositaan suoravetoisia turbiineja, joita pyöritetään kestopagneettikoneilla. Roottorin keskiö on useimmiten valmistettu valuraudasta tai taotusta teräksestä. Nykyisten tuulivoimaloiden roottorin pyörimisen ominaisnopeus on noin 20–30 kierrosta minuutissa. (4, 287;15.)



Kuva 5 Roottorin napa Vestas.

Roottorin keskiön esimerkkimitat ovat 4,9 m x 4 m, x 5,3 m. Roottorin keskiön paino vaihtelee mallista riippuen 30 ja 37,5 tonnin välillä. Koottu roottori siipineen painaa noin 65–80 tonnia. (9.)

2.4.3 Siivet

Tuulivoimalan siivet ovat koko voimalan karakteristisin osa ja niiden ominaisuudet vaihtelevat suuresti voimalatyypistä ja sijoituspaikasta riippuen. Siipien pituus on kasvanut tasaisesti vuosien varrella ja nykyisin ne ovat noin 60–100 m

pitkiä. Siipien materiaalina käytetään pääsääntöisesti erilaisia lasi- ja hiilikuitu-komposiitteja, joiden sideaineena toimii epoksihartsi. Voimaloiden siivet onkin suunniteltu aerodynaamisesti siten, että voimala saa pyörimiseen tarvittavan voiman tuulen aiheuttamasta nosteesta. (1; 2; 7; 16.)



Kuva 6 Aerodynaaminen siiven muotoilu.

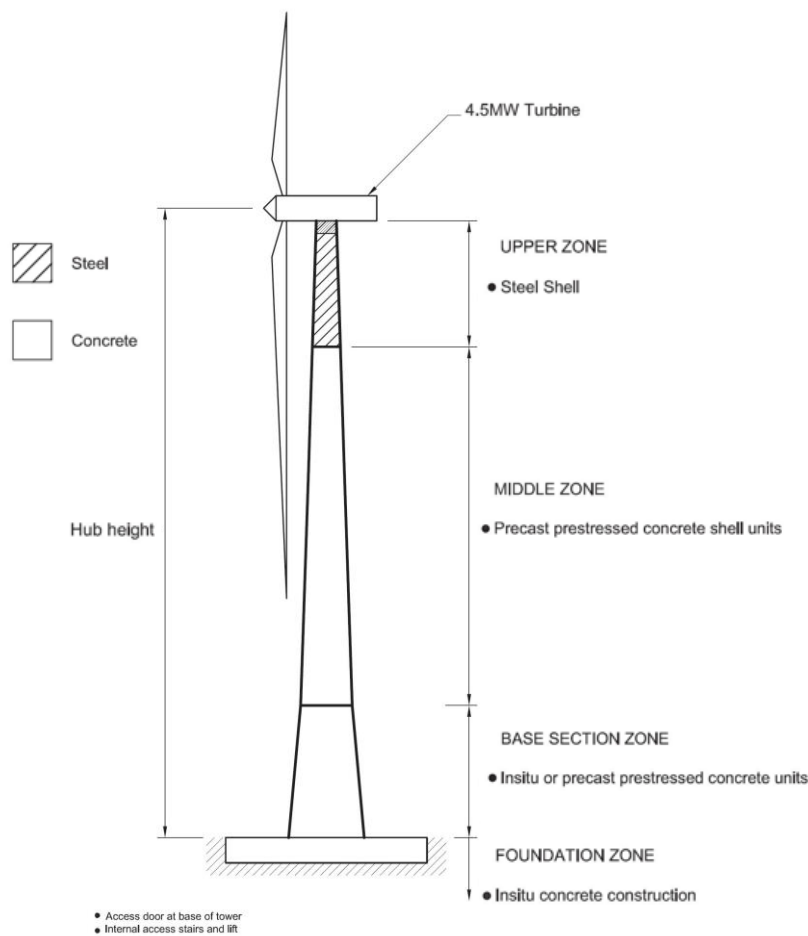
Siipien aerodynaamisia ominaisuuksia voidaan parantaa esitaivuttamalla siiven lapaa. Esitaivutus mahdollistaa pitempien ja kevyempien siipien valmistamisen. Siipien pyörimisestä aiheutuvaa melua on myös pyritty vähentämään optimoimalla siiven kärjen muotoa. Muita lisäominaisuuksia ovat järjestelmät, jotka suojaavat voimalaa ukkoselta, ja geelipinnoitteet, jotka suojaavat siipiä sään rasituksilta huonoissa keliolosuhteissa. Varsinkin kylmissä olosuhteissa siipien lavat varustetaan lämmittimillä, jotka estävät jään kertymisen siipien pintaan, minkä ansiosta voimala voi toimia normaalisti myös pakkasolosuhteissa. (17.)

Roottorin siipien pituudet riippuvat suuresti voimalan suunnittelusta nimellistehosta, tässä esimerkkimallilla siipien pituus on 49–65 m riippuen siipityypistä. Siipien leveydet ovat noin 4 metriä. Painoa kyseisille siiville muodostuu 11–15 tonnia riippuen pituudesta. (9.)

2.4.4 Tornit

Tuulivoimalan tornin rakenteet vaihtelevat suuresti riippuen voimalan korkeudesta ja sijainnista. Yleisimmät runkomateriaalit tornille ovat betoni ja teräs. Tuulivoimaloiden korkeus vaihtelee keskimäärin 40–140 metrin välillä. Nykyisin rakennettavat voimalat ovat napakorkeudeltaan 120–140 metrin välillä. (2;3.)

Useimmiten käytetään samasta materiaalista valmistettuja pyöreitä tornielementtejä niiden ulkokuoren ollessa umpinainen. Toisinaan voidaan käyttää hybriditorneja, joiden alaosa on valmistettu betonista ja yläosana käytetään teräksistä tornia. Syynä hybriditorneiden käyttöön on yleensä se, että isoja teräsosia on hankala kuljettaa rakennuspaikalle. Tästä syystä osa tornista voidaan valaa paikan päällä betonista. Betonielementtejä voidaan myös käyttää tornin rakentamiseen, ja niiden käytön syy on yleensä kustannuksista syntyvä säästö suhteessa tarvittavaan rakenteelliseen kestävyysasteeseen. Tornia voidaan kuitenkin keventää myös valitsemalla tornin teräsmateriaaliksi suuremman lujuusluokan teräs, joka on sitä kalliimpaa mutta kevyempää. (15.)



Kuva 7 Hybriditornin periaatekuva. Windfarmbob.

Nordexin N117/3000 141 metriä korkea betoniteräshybriditorni koostuu seitsemästä osasta. Pohjaosa on 23 m korkea, sylinterin halkaisija 4,29 m ja paino 48,5 tonnia. Välissä olevien osien korkeus vaihtelee 9–25 metrin välillä riippuen siitä, mihin kohtaan tornia ne tulevat. Väliin tulevien tornin osien paino pysyy kuitenkin 64 ja 70 tonnin välissä. Tornin lieriömäinen ylin osa on 35 m korkea, alaosan halkaisija on 4,29 m ja yläosan halkaisija on 3,26 m. Painoa tornin ylimmällä osalla on 53,6 tonnia. Hybriditornin kokonaispaino on tuolloin 344,6 tonnia. Vastaavasti 120 m korkea terästorni painaa 466,7 tonnia. (9.)

Ympäristöolosuhteiden vuoksi voidaan myös käyttää ristikkomastotornia. Ristikkotornia voidaan käyttää siitä syystä, ettei ympäröivä kasvillisuus häiriintyisi. Ristikkorakenne on myös kustannustehokas vaihtoehto hyvin korkeille torneille. Saksassa rakennettu Fuhrländer Wind Turbine Laasow (kuva 8) on napakorkeudeltaan 160 m korkea ristikkotorni, joka oli vuoteen 2012 asti maailman korkein tuulivoimala. (15, 7-8.)



Kuva 8 Fuhrländer FL2500 Wind Turbine, Laasow.

2.4.5 Perustukset

Tuulivoimaloiden perustamistapa valitaan pohjaolosuhteiden perusteella. Valinta edellyttävät aina pohjatutkimuksia. Voimalan perustamiseen on käytännössä kolme vaihtoehtoa, jotka ovat maanvarainen gravitaatio-perustus, paalu-

perustus tai kallioon ankkuroitu perustus. Perustusten keskeisenä osana on peruspulttikori, johon tornin alin osa kiinnittyy. Pulttikori toimitetaan useimmiten voimalavalmistajan toimesta. Pulttikorin ympärille suunnitellaan ja tehdään rauditus, jonka optimoitu muoto on puolikaaren muotoinen, niin että sen korkein kohta on pulttikorin ja voimalan kohdalla. Reunoille päin mentäessä perustusten korkeus pienenee ja samalla materiaalin tarve vähenee. Poikkeuksena on tilanne, jossa perustusten massaa täytyy kasvattaa esimerkiksi kumoamaan pohjaveden aiheuttamaa nostetta. (10.)



Kuva 9 Pulttikori jonka ympärille on alettu kasaamaan perustusten raudoitusta.

Esimerkiksi Nordexin toimittama pulttikori N117-tyyppin voimalalle koostuu kahdesta kuormaa jakavasta levykerroksesta jotka ovat molemmat 120 mm paksuja. Levyjen ulkohalkaisijat ovat 4,5 m ja 4,77 m. Pohjalle tulee vielä kolmas levy, joka on 120 mm paksu ja 4,65 m ulkohalkaisijaltaan. Ankkuripultit ovat 3,79 m pitkiä M42 pultteja ja niitä on 200 kpl. Painoa pulttikorille kaikkine osineen kertyy 30,7 tonnia. (9.)

3 TUULIVOIMALAN RAKENTAMINEN

Tässä luvussa perehdytään tuulivoimalahankkeen vaiheisiin, suunnittelun käynnistämiseen ja rakentamisprosessin eri vaiheisiin.

3.1 Tuulivoimalahankkeen vaiheet

Tuulivoimaprojektin läpiviemiseksi täytyy käydä läpi monivaiheinen prosessi, joista useita tehdään samanaikaisesti. Vaiheet ovat: (24; 28; 43.)

1. Esiselvitys
2. Sopivan alueen etsintä
3. Neuvottelut alueen maanomistajan kanssa ja vuokrasopimusten laatiminen
4. Alustavat neuvottelut verkonhaltijan ja sähkön ostajan kanssa
5. Tuulimittausten aloittaminen
6. ELY-keskuksen päätös sovelletaanko ympäristövaikutusten arviointimenettelyä (YVA)
7. Tarvittaessa YVA-selvitysten aloittaminen
8. Alueen kaavoitus tuulivoimalle sopivaksi
9. Lopulliset neuvottelut verkonhaltijan ja sähkönostajan kanssa
10. Lupien hakeminen
11. Rakennussuunnittelu
12. Maanrakennustyöt
13. Voimaloiden hankinta ja rakentamisen aloitus

3.1.1 Esiselvitys

Esiselvitys aloitetaan projektin alussa, jotta saadaan selvitettyä alueen soveltuvuus tuulipuiston rakentamiseen ja siihen liittyvät riskit. Esiselvityksen pohjalta voidaan arvioida onko taloudellisesti kannattavaa aloittaa lupaprosessin läpivie-

minen. Päätökseen vaikuttavat eniten alueen tuuliolosuhteet, mutta myös olemassa oleva sähköverkko, olemassa oleva tieverkko ja voimalan saavutettavuus. Myös etäisyys asutukseen ja luonnonsuojelukohteet tai kulttuurialueet vaikuttavat suuresti toteutus päätökseen. (24.)

Esiselvitys pitää sisällään tuuliolosuhteiden arvioinnin Suomen tuuliatlaksen avulla. Tuulienergian kartoitustietojen avulla voimaloiden alustavaa sijoitusta ja tuotantoa voidaan suunnitella ja arvioida. Kun voimaloiden alustava sijoitus on saatu suunniteltua, voidaan tehdä arvio alueella tarvittavista rakennustoista. Tämän jälkeen pystytään arvioimaan hankkeeseen vaikuttavia ympäristötekijöitä ja tarvittavia lupia. Kaikkien näiden vaiheiden jälkeen on mahdollista tehdä arvio investointi- ja käyttökustannuksista. (25.)

3.1.2 Sopivan alueen etsintä ja maanhankinta

Tuulivoimaa suunniteltaessa hankkeen kehittäjällä on mahdollisuus vuokrata tai ostaa tuulipuistolle kaavaillut maa-alueet. Usein päädytään vuokraamaan tarvittavat maa-alueet, sillä tuulivoimalan eliniän oletetaan olevan korkeintaan 30 vuotta. (24; 25; 26.)

Maanomistajien kanssa neuvotellaan vuokrasopimuksista joko projektin alkessa tai vasta sitten kun alustava suunnitelma tuulipuiston sijoittamisesta on tehty. Nykyisin projekti voidaan kuitenkin käynnistää myös yksinkertaisemmalla maankäytösopimuksella ja varsinainen vuokrasopimus kirjoitetaan vasta sitten, kun on todettu alueen soveltuvan tuulipuistorakentamiseen. Selvitysjakso voi kestää 2–5 vuotta. Mikäli selvitysjakson ajalta maksetaan vuokraa, on se joko kiinteä vuosimaksu tai koko selvitysjakson kattava kokonaishintainen sopimus. (24; 25; 26.)

Mikäli kiinteistölle päädytään tutkimusten jälkeen rakentamaan, vaihtuu selvitysjakson sopimus tuotantosopimukseksi. Tuotantojakson vuokrasopimus voi jatkua kiinteänä vuosivuokrana tai vaihtua voimalan tuotantoon perustuvaan malliin. Mikäli tontille ei kuitenkaan päädytä rakentamaan, sopimus voidaan purkaa selvitysjakson jälkeen. (24; 25; 26.)

Tuotantojakson sopimus on myös yleisesti määräaikainen ja kestoaltaan yleensä 20–30 vuotta. Vuokraa voidaan joutua myös maksamaan viereisien tonttien

omistajille vaikka voimalat eivät ole heidän omistamillaan mailla, mutta ovat tuulivoimalan vaikutusalueella eli ns. tuulenottoalueella, joka on noin 400–500 metrin säteellä voimalasta. (24; 25; 26.)

3.1.3 Tuulimittausten aloittaminen

Esiselvityksessä Suomen Tuuliatlaksesta selvinneiden tuulitietojen perusteella kaavaillulla rakennuspaikalla tulee aloittaa tarkentavat tuulimittaukset, joiden perusteella voidaan tarkasti arvioida voimalan kannattavuutta ennen investointipäätöstä. Tuulimittausten avulla saadaan määriteltyä voimalalle optimaalinen napakorkeus ja sopiva voimalatyyppe. Rahoittajat edellyttävät, että alueella on tehty luotettavat tuulimittaukset, ennen lopullisen investointipäätöksen tekoa. (24; 27.)

Tuulimittaukset suoritetaan voimalan suunnitellulla napakorkeudella mittausmastolla ja siihen asennettavilla anemometreillä. Tekniikan kehittyessä ja voimaloiden napakorkeuksien kasvaessa ovat kaikuluotaukseen perustuvat SO-DAR- JA LIDAR-mittausmenetelmät yleistyneet, koska korkeiden mastojen rakentaminen vaatii rakennus- ja lentoestoluvan. Tuulimittauksien tulisi kestää ainakin vuoden, jotta saadaan tarkka käsitys siitä kuinka vuodenajan vaihtelut vaikuttavat tuuliolosuhteisiin. (24; 27.)

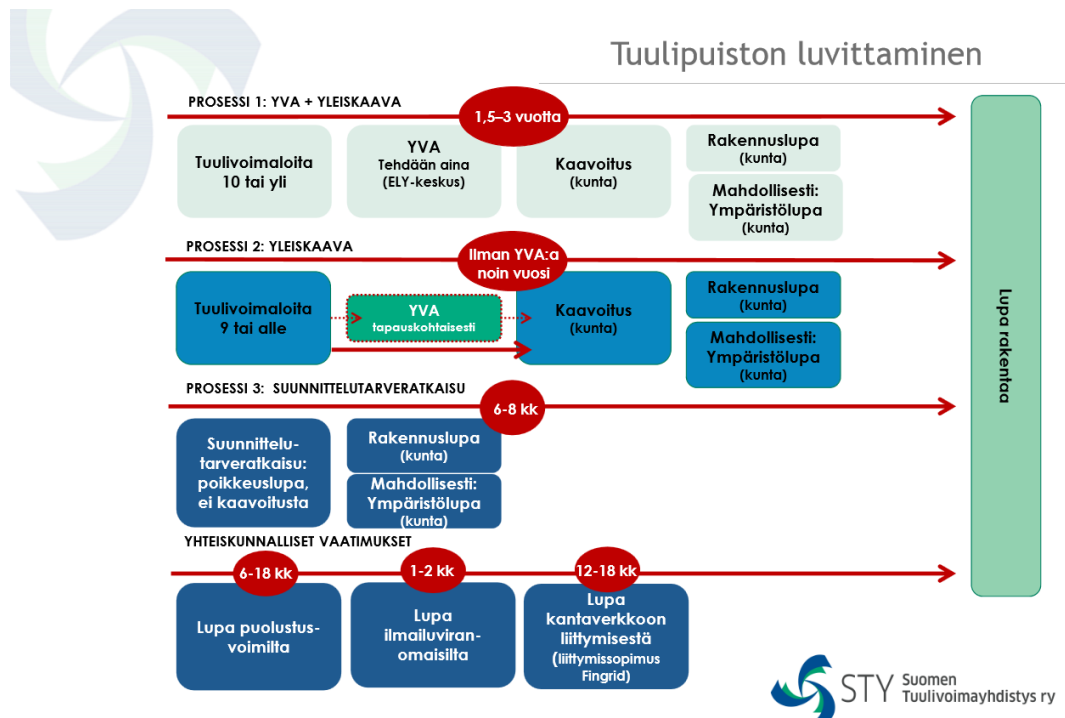
3.1.4 Tuulivoimaprojektin lupa-asiat

Tuulipuiston toimintaan saattamiseksi tarvitsee käydä läpi useita päällekkäisiä lupaprosesseja, jotka on esitetty alla olevassa luettelossa kestoineen. (24, 11; 29.)

1. Maankäyttöoikeuden hankkiminen
2. Ympäristövaikutustenarviointi-harkinta, kesto noin 1-2 kk
3. Ympäristövaikutusarviointi-menettely mikäli edellytetään 12-18 kk
4. Ympäristölupahakemus mikäli edellytetään 6-12 kk
5. Vesilain mukainen lupa mikäli edellytetään 6-12 kk
6. Lentoestelupahakemus (Finavian lausunto liitteeksi) 1-2 kk
7. Rakennuslupahakemus 2-4 kk

8. Lupa puolustusvoimilta 6-18 kk

9. Lupa kantaverkkoon liittymisestä ja liittymissopimus 12-18 kk



Kuva 10 Tuulipuiston luvituskaavio.

3.1.5 Alueen kaavoitus tuulivoimalle sopivaksi.

Kaavoituksella ohjataan tuulivoimaloiden sijoittamisessa edellytettävää suunnittelua ja yhteensovittamista muiden alueidenkäyttömuotojen kanssa. Mikäli suunniteltu alue on osoitettu tuulivoima-alueeksi, joko maakunta- tai yleiskaavassa, voidaan alueelle sijoitettavat tuulivoimalat yleensä toteuttaa lupamenettelyllä ilman tarkkaa kaavoitusta. (24; 30.)

Tuulivoimarakentamiselle soveltumattomia alueita ovat:

- Arvokkaat maisema-alueet
- Merkittävät rakennetut kulttuuriympäristöt
- Luonnonsuojelualueet
- Erämaa-alueet
- Kansainvälisesti tärkeät linnuston IBA-alueet

(31.)

Maakuntakaava

Maakuntakaavan tarkoituksena on yleispiirteinen alueidenkäytön suunnittelun ohjaaminen. Maakuntakaavan tehtävänä on tuulivoimarakentamisen kokonaisvaltainen ohjaaminen. Tuulivoima-alueiden määrittämistä maakuntakaavoissa edellytetään vähintään 8-10 tuulivoimalan hankkeissa. (24; 31.)

3.1.5.1 Yleiskaava

Yleiskaavan tarkoituksena on tuulivoimarakentamisen yleispiirteinen ohjaaminen sekä eri toimintojen yhteensovittaminen kunnan tai sen osan alueella. Näitä ovat esimerkiksi taajamat ja niiden lähialueet sekä alueet, joilla on erityisiä luonto- tai kulttuuriarvoja, joiden säilyttäminen edellyttää laajemman alueen yleispiirteistä suunnittelua. (24; 31.)

Maankäyttö- ja rakennuslain muutos (134/2011) astui voimaan vuonna 2011. Tehdyn lakimuutoksen myötä on paljon helpompaa soveltaa yleiskaavaa tuulivoimarakentamisen suunnitteluvälineenä aiempaa useammin. (30.)

3.1.5.2 Tuulivoimarakentamista suoraan ohjaava yleiskaava

Tuulivoimarakentamista suoraan ohjaavalla yleiskaavalla voidaan suunnitella tuulivoimarakentamista niin, että rakennusluvut tuulivoimaloille voidaan myöntää suoraan sen pohjalta. Tuulivoimarakentamista suoraan ohjaavaa yleiskaavaa voidaan käyttää tilanteissa, jossa muun maankäytön yhteensovittaminen tuulivoimarakentamisen kanssa voidaan ratkaista asemakaavaa yleisemmällä tarkkuudella. Näitä alueita ovat esim. merialueet sekä sisämaan maa- ja metsätalousvaltaiset alueet. (31.)

3.1.5.3 Asemakaava

Asemakaavan laatiminen tuulivoimaloiden alueelle on tarpeen, kun tuulivoimarakentaminen ja muun maankäytön yhteensovittamistarve sitä edellyttää. Asemakaavaa käytetään kun tuulivoimarakentaminen on tarpeen määritellä tarkasti suhteessa alueen muuhun maankäyttöön kuten taajaman läheisillä alueilla sekä teollisuus- ja satama-alueilla. Asemakaava tarvitaan myös silloin kun voimala vaikuttaa maisemaan, kaupunkikuvaan tai virkistyskäyttöön liittyviin alueisiin tai siitä syntyvä melu tai välkkyminen voi vaikuttaa alueen turvallisuuteen. (24; 31.)

3.1.6 Toteutettavuusselvitys

Toteutettavuusselvitys aloitetaan yleensä silloin, kun tarkat tuulimittaukset tuulipuistoalueella on suoritettu ja luvitus on edennyt sellaiseen vaiheeseen, että esteitä voimalan toteuttamiselle ei enää ole. Selvityksen tarkoituksena on saada tarkka käsitys projektin kannattavuudesta ja tehdä samalla riskiarvio. Selvityksen pohjalta saadaan tarkat tiedot projektin jatkosuunnittelua varten. (24.)

3.2 Suunnittelun käynnistäminen

Tuulipuistoalueen ja sen maarakennustöiden suunnittelu aloitetaan usein jo esiselvitysvaiheessa, jolloin ne ovat yleensä vielä hyvin karkealla tasolla. Suunnitelmia joudutaan tarkentamaan projektin edistyessä. Suunnitteluvaiheen tehtäviin kuuluu muun muassa:

- Voimaloiden tarkkojen sijoituspaikkojen valinta
 - Maaperätutkimukset, joiden avulla tehdään voimaloiden perustamistapalausunnot ja voidaan aloittaa infrastruktuurin pohjarakenteiden suunnittelu.
 - Maa-alueen raivaus-, täyttö- ja tasoitustarpeiden arviointi
 - Perustustavan valinta perustamistapalausunnon pohjalta ja perustus-suunnittelu
 - Kuljetus- ja nostosuunnitelma voimalatoimittajalta
 - Laitosten nostoalueiden koko ja muoto voimalatoimittajan antamien vaatimusten mukaan
 - Puiston tieverkon linjaus ja suunnittelu
 - Ilma- ja maajohtojen linjaus sekä sähköaseman sijoittamisen suunnittelu
- (32.)

Suunnitteluun perehdytään syvällisemmin tämän työn kappaleessa 4.

3.3 Rakentaminen ja sen erityispiirteet

Tuulivoimapuiston rakentaminen voidaan jakaa seuraaviin päävaiheisiin:

- Alueelle tulevien teiden rakentaminen ja nykyisten tieyhteyksien parantaminen
- Voimalaitosalueen tilavarausten tekeminen ja nostoalueen rakentaminen
- Voimalaitosten perustusten rakentaminen
- Sähköaseman ja voimajohtojen rakentaminen
- Voimalaitosten pystytys
- Voimaloiden koekäyttö ja käyttöönotto

(35, 20.)

Tuulivoimapuiston rakentaminen kestää keskimäärin 1-2 vuotta riippuen hankkeen koosta. Tuulipuiston rakentaminen alkaa yleensä raivaustöillä, joissa raivataan riittävästi tilaa voimalapaikoille johtaville teille ja sähkönsiirtolinjoille. Tämän lisäksi voimalapaikoille raivataan voimala-alueen lisäksi nostoalue. Näiden alueiden karkea pinta-ala on yleensä noin 0,5-1 hehtaaria. Puusto on myös raivattava niiltä alueilta mihin roottorin lavat ulottuvat kokoamisvaiheessa, mikäli roottori nostetaan paikalleen kokonaisena. (24.)

Seuraavana vaiheena ovat maanrakennustyöt, joissa rakennetaan uutta tieverkkoa voimaloiden välille ja kunnostetaan olemassa olevaa tieverkostoa. Voimalakomponenttien ja nosturikaluston kuljettaminen kokoamispaikalle vaatii, että ajoradan leveys on vähintään 5 metriä. Kaarteiden kohdalla voidaan tien leveyttä joutua kasvattamaan. Lisäksi puustoa joudutaan raivaamaan mutkien alueelta perustielinjaa leveämmältä alueelta, aukeaman leveyden tulisi olla vähintään 10 metriä ja jyrkissä kaarteissa vielä enemmän. Tuulipuiston sisäiset tiet ovat useimmiten päällystämättömiä murskepintaisia teitä. Olemassa olevia yksityisteitä pyritään hyödyntämään mahdollisimman paljon. Tuulipuistoa varten ei yleensä rakenneta uusia liittymiä maantieverkon kanssa vaan reitti pyritään suunnittelemaan olemassa olevien liittymien mukaan. (24.)

Nostoalue on suunniteltava tasaiseksi ja kantavaksi, jolloin pohjarakennustöiden laatuun tulee kiinnittää erityistä huomiota, sillä tuulivoimalaa pystytettäessä nosturin tukijalat eivät saa painua. (36; 37.)

Tuulipuiston jännite- ja tiedonsiirtokaapelit asennetaan voimaloiden välille samanaikaisesti tierakentamisen yhteydessä. Kaapelit asennetaan noin metrin syvyisiin kaapeliojiin hyödyntäen mahdollisimman paljon olemassa olevia tielinjauksia. Kaapelit liittyvät voimaloista tuulipuiston sähkömuuntoasemaan, josta ne liittyvät verkonhaltijan sähköverkkoon. (36, 69.)

3.4 Tuulivoimalan kuljetus työmaalle

Kuljetustapoihin ja -reitteihin vaikuttavat voimalatoimittajan vaatimusten lisäksi myös se, mistä suunnasta kuljetukset päätetään tuoda työmaalle. Voimalatoi-

mittajan ja kuljetusyhtiön valinnan jälkeen aloitetaan logistinen selvitys kuljetusyhtiön kanssa. Selvityksessä tehdään tarkka reittisuunnitelma ja suunnitellaan mahdolliset toimenpiteet reitillä, jotta kuljetukset saadaan perille työmaalle. Tuulivoimaloiden pääkomponentit tuodaan yleensä laivoilla mahdollisimman lähellä tuulipuistoa sijaitsevaan satamaan, josta ne jatkavat matkaansa maantiekuljetuksilla työmaalle. Tarvittavien kuljetusten määrä riippuu valitusta voimalatyypistä ja -toimittajasta. Tyypillisesti kuljetukset ovat seuraavat:

- Tornilohkot 5-7 kpl riippuen voimalan korkeudesta
- Perustuksen ja voimalan välinen liitosrengas
- Konehuone
- Roottorin napa
- Siivet 3kpl

(36.)

Haasteita kuljetuksille aiheuttavat mm. pitkät siivet ja painava konehuone. Kojoamisessa käytettävä päänosturi voidaan myös joutua kuljettamaan paikalle osina, jolloin sen kuljettamiseen voidaan tarvita jopa 50 rekkakuormaa. (36.)

Perustusvaiheen rakentamiseen liittyen työmaalle kuljetetaan betonia, jolloin yhtä perustusta kohden arvioitava betonikuljetusten määrä on noin 90 kuormaa. Kuljetusten määrät ovat suuresti riippuvaisia käytettävän kuljetuskaluston kapasiteetista. (36.)

Työmaalle kuljetettavat pohjarakenteisiin käytettävät täyttömateriaalit, jota käytetään nostoalueisiin, teiden rakentamiseen ja perustusten täyttöihin on suurin yksittäinen kuljetettava materiaalierä. Kuljetuksia tehdään paljon, kuormia saattaa liikkua työmaa-alueella jopa useita tuhansia. Yhteen kasettiautoon mahtuu vain noin 16...24 m³ mursketta. (36.)

Voimajohtoihin liittyvät kuljetukset ovat suuritöisiä, sillä suunnitellulta voimajohtolinjalta raivattu puusto pitää kuljettaa pois, jotta rakennustöitä voidaan tehdä esteettä. Voimajohtolinjalle tuodaan myös maarakennusmateriaaleja, rakennusbetonia, voimajohtolinjan pylviä ja muita rakentamiseen liittyviä tarvikkeita, jotka aiheuttavat jokainen kuljetuksia. (36.)

3.4.1 Nostokalusto ja nostot

Tuulivoimalan pystytys voidaan aloittaa, kun perustukset ja nostoalue sekä voimalalle johtavat tiet ja maakaapelit ovat valmiita. Tuulivoimala pystytetään ristikkopuomillisen päänosturin avulla. Päänosturin kokoaminen ja purkaminen nostopaikalla vaatii apunosturin, joka on yleensä teleskooppipuomillinen ajoneuvonosturi. Apunosturi avustaa päänosturia myös varsinaisissa nostotöissä. (36.)

Tuulivoimalan torni tuodaan asennusalueelle useassa osassa, konehuone kokonaisuutena, roottorin napa ja lavat erillisinä. Voimalatyypistä riippuen osa voimalan kojeistosta voi sijaita tornin alaosassa, jolloin ne nostetaan paikalleen perustusten päälle ja vasta sitten kootaan torni lohko kerrallaan, jonka jälkeen napseli ja roottori nostetaan paikalleen. Roottori voidaan koota valmiiksi maassa ja nostaa kokonaisuutena paikalleen tai se voidaan kasata nostamalla napa ja siivet erikseen paikalleen. (36.)

Yhden voimalan kokoamiseen valmiille perustuksille kuluu yleensä 2-3 päivää, siitä kun päänosturi on saatu koottua. Päänosturin purkaminen ja siirtäminen nostopaikalta toiselle ja uudelleen kokoaminen vie useita päiviä riippuen sääolosuhteista. Kova tuuli tai sankka sumu voivat aiheuttaa nostotöiden keskeytymisen. (36.)

3.5 Rakentamista varten tehtävät tutkimukset

Tuulivoimalat ovat perustamisen kannalta haastavia rakenteita voimakkaista ja vaihtelevista dynaamisista kuormista johtuen. Pohjatutkimusten tarkoituksena on saada tarpeeksi kattavat lähtötiedot voimaloiden, kokoamisalueiden, sähköasemien ja teiden perustussuunnittelua ja kustannusarviota varten. Tutkimusohjelman laadintavaiheessa hyödynnetään olemassa olevia karttoja mm. kallio-perä-, maaperä- ja peruskarttoja. Karttojen ja maastokäyntien pohjalta käytettävät tutkimusmenetelmät ja -määrät voidaan alustavasti arvioida ja määrittää. (24.)

Alustavilla pohjatutkimuksilla selvitetään pohjasuhteet esiselvitys- tai yleissuunnitteluvaiheessa niillä alueilla, joihin voimaloita on kaavailtu sijoitettavan. Näi-

den saatujen tietojen valossa voimaloiden paikkoja voidaan vielä hieman muuttaa, mikäli lähellä oleva rakennuspohja on paremmin rakentamiseen soveltuvaa. (24.)

Erityisen tärkeää on selvittää rakennusalueelle jäävien pehmeikköjen ja kallioiden sijainnit sekä ominaisuudet. Pehmeikköalueet edellyttävät massanvaihtoja, paaluttamista tai maan lujittamista, kun taas laajat kallioalueet voivat aiheuttaa suuria määriä louhintaa. Samalla tulee selvittää onko kallio laadultaan sellaista, että siitä louhittua materiaalia voidaan käyttää tuulipuiston alueella tehtäviin täyttöihin. (24.)

Rakentamista varten voidaan voimala- ja kokoamisalueet kartoittaa ja pinnat vaaita, jotta saadaan tarkempaa täydentävää tietoa laserkeilausaineston lisäksi maanpinnan korkeusasemasta tarkan maastomallin laatimista varten. (24.)

Toteutussuunnitteluvaiheessa tehdään tarkentavia ja täydentäviä pohjatutkimuksia teiden, kokoamisalueiden ja erityisesti voimalan perustusten kohdalla, joissa selviää:

- Maanvaraisissa perustamisolosuhteissa perustusten alapuolisen maan kerrosjakauma ja geotekniset ominaisuudet
- Kallioon kiinnitettävän perustuksen tapauksessa kallion korkeusasema ja laatu
- Irtomaakerrosten jakauma ja kerrosten geotekniset ominaisuudet
- Pohjavesipinnan taso (24.)

Vaihe	Suunnittelutehtävät	Tutkimukset
Esisuunnittelu	Voimaloiden alustava sijoitus	Tiedot aiemmin tehdyistä pohjatutkimuksista
	Infran alustava suunnittelu	Maastokatselmukset
Luvitus	Sijoituspaikkojen ja tielin- jausten uudelleen arvi- ointi.	
Toteutussuunnittelu	Alustava perustamistapa- lausunto.	Pohjatutkimusten suoritta- minen
	Pohjatutkimus- ja näyt- teenottosuunnitelma	
	Perustamistapaselvitys	
	Geotekninen suunnittelu	
	Työselostukset, piirustuk- set jne.	
	Yhteistyö muiden suunnit- telijoiden kanssa	
	Laadunvarmistus suunnit- telma ja työmaapalvelut	
Rakentaminen		Työn aikainen ja valmiiden rakenteiden laadunvar- mistus

Kuva 11 Prosessikaavio tuulivoimalan geoteknisestä suunnittelusta. (Kriikkula)

3.5.1 Pohjatutkimukset

3.5.1.1 Kairaukset

Jotta voidaan suunnitella oikeanlaiset perustukset tuulivoimalalle, on perustus-
ten alueen maakerrosten ominaisuudet ja kerrosjakauma tutkittava soveltuvilla
pohjatutkimusmenetelmillä. Kairaus suoritetaan useimmiten monitoimikairalla,
jolla voidaan tehdä useita erityyppisiä kairauksia. Näitä ovat mm. heijari-, puris-
tinheijari-, paino-, puristin-, porakone-, täry- ja siipikairaus. Kairauksissa selviää

maakerrosten paksuus ja laatu, sekä pohjaveden- ja kalliopinnantasot. Maaperätutkimusten tuloksista käy ilmi mm. maakerrosten rakeisuus, leikkauskestävyyskulma ja leikkauslujuus. (33.)

3.5.1.2 Pohjavesitasot määrittäminen

Tieto pohjaveden tasosta on tärkeää, sillä se voi rajoittaa mahdollisia perustamisratkaisuja ja työtapoja. Pohjavesitasot korkeus voi vaikuttaa maaperän kantavuus- ja painumaominaisuuksiin, siksi pohjavesitasoa pitäisi mitata ainakin vuoden pituiselta ajanjaksolta, jotta vuodenaikojen aiheuttamat pohjavedenpinnan muutokset voidaan ottaa huomioon. (33.)

3.5.1.3 Kantavuus- ja vakavuuslaskelmat

Tuulivoimalan geotekninen suunnittelu kuuluu tehdä Suomessa SFS-EN 1997-1 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu, mitoitusluokan 2 mukaan, joka kattaa antura-, laatta-, ja paaluperustukset, sekä kallioankkuroinnin ja muut tukirakenteet. Luiskat ja penkereet tulee kuitenkin suunnitella mitoitusluokalla 3. (34, 53.)

Tuulivoimalan perustusten- ja geotekninen suunnittelu kuuluu useimmiten geotekniseen luokkaan 3 jossain tapauksissa luokkaan 2, seuraamusluokkaan CC2 tai CC3. Luokat määritetäänkin usein voimalakohtaisesti, sillä olosuhteet tuulipuistotyömailla voivat vaihdella suuresti. (13.)

Tuulivoimalan perustusten mitoitus etenee EN 1997-1 standardin mukaisessa järjestyksessä:

- Mitoituskuormien määrittäminen
- Maaperän kantokestävyyden määrittäminen
- Painuman tarkastelu
- Kaatumis- ja liukumisvarmuuden tarkastelu

Perustusten rakenteellinen mitoitus tarkastelu on rajattu pois tämän työn teoriaosista.

3.5.2 Laadunvalvonta

Päävastuussa oleva urakoitsija vastaa laadunvarmistamisesta. Urakoitsijan on kyettävä esittämään käyttämiensä materiaalien olevan laadultaan ja soveltuvuudeltaan suunniteltua rakennetta vastaavia. Ennen työn aloittamista urakoitsijan tulee osoittaa tilaajalle, että hänellä on riittävät lähtötiedot ja suunnitelmat sekä pätevyys toteuttaa urakka suunnitelmien ja vaatimusten mukaisesti. (40.)

Päällysrakenteiden laadunvarmistukseen liittyviä kenttätutkimuksia ovat esim. kantavuus- ja tiiveysmittaukset, näytteenotot ja tarkemittaukset. Kantavuusmittauksista yleisimpiä ovat levykuormituskokeet, joilla mitataan maantiiveyttä ja kantavuutta kuormituslevyn alla. Kantavuus- ja tiiveysvaatimukset on esitetty pohjarakennussuunnitelmissa. Haluttaessa simuloida liikenteen aiheuttamia dynaamisia kuormia tiiveyttä voidaan testata Loadmankokeilla. (40,18.)

3.6 Tuulivoimalan perustamistavat

Tuulivoimalan perustamistapaa arvioitaessa tulee tarkastella maapohjan geoteknistä kantokestävyyttä ja varmistaa etteivät perustukset ja niiden alla sijaitsevat maakerrokset pääse liukumaan, kaatumaan, murtumaan, sortumaan, halkeamaan tai hallitsemattomasti painumaan, sillä nämä aiheuttavat rakenteisiin hallitsemattomia muodonmuutoksia jotka voivat vahingoittaa rakennetta ja haitata sen toimintaa. Myös mahdollinen eroosio tulee ottaa huomioon valittaessa perustustapaa. Perustusten tehtävä on siirtää rakenteisiin kohdistuvista voimista aiheutuvat kuormat maaperään mahdollisimman yksinkertaisesti ja taloudellisesti. (11; 12; 23.)

Tuulivoimalan perustuksille kuormitukset tulevat lähinnä rakenteiden suurista omapainoista ja tuulen aiheuttamasta vaaka kuormasta. Kaatava momentti, joka pienentää perustusten tehokasta pinta-alaa ja kasvattaa suuresti maahan kohdistuvaa painetta perustusten reunalla. (34.)

3.6.1 Gravitaatioperustus

Maanvarainen raudoitettu betoniperustus upotetaan pohjaolosuhteista riippuen 1–4 metriä maanpinnan alle. Perustuksen paksuus on reunoilta 1–2 metriä ja keskeltä 2–3,5 metriä riippuen voimalatyypistä ja pohjaolosuhteista. Perustus-

laatan halkaisija vaihtelee tyypillisesti 20–30 metrin välillä. Perustusten betonoinemiseksi menee tyypillisesti 600–800 m³ betonia. Perustus peitetään jälkeensä maamassoilla tai kiviaineksella niin, että siitä jää vain pieni osa näkyviin. Mikäli perustusalueelle ei järjestetä kuivatusta, tulee pohjaveden aiheuttama noste huomioida perustuksia suunniteltaessa (36.)

Massanvaihdolle perustaminen tulee kyseeseen silloin, kun pohjamaa on löyhää eikä kantavuus ole riittävä niin, että perustus ei kestäisi painumatta tuuli-voimalan aiheuttamia kuormituksia. Huonosti kantava pohjamaa voidaan kaivaa pois, jonka jälkeen tilalle tuodaan korvaavaa ainesta esim. soraa, murskettua tai louhetta. Massanvaihdon täyttö tiivistetään, jotta rakenteen painuma pysyy sallituissa rajoissa. Massanvaihto on hyvä vaihtoehto silloin, jos kantava maakerros löydetään korkeintaan 5m syvyydestä. Muussa tapauksessa on syytä pohtia muita mahdollisia perustamistapoja. Kallion ollessa lähellä maanpintaa voidaan perustus perustaa irtilouhinnalle, jolloin kyseessä ei ole kallioperustus vaan perustus toimii gravitaatioperiaatteella. (35; 36.)

3.6.2 Paaluperustus

Paalujen varaista perustusta käytetään, kun maan kantokyky ei ole riittävä eikä massanvaihto ole taloudellisesti kannattavaa. Paalutettaessa orgaaniset pinta-maat on kaivettava pois ja perustusalueelle on tuotava ohut murskekerros työalustaksi, jonka päältä paalutustyö voidaan suorittaa. Paalutyyppi tulee valita tapauskohtaisesti pohjatutkimustulosten, paalukuormien ja rakentamiskustannusten perusteella. Pohjatutkimusten perusteella selviää kuinka syvälle löyhien maakerroksien ominaisuudet ulottuvat ja kovan pohjan taso sekä paalutustyötä vaikeuttavien kivien ja lohcareiden esiintyminen. Paalutyyppistä riippumatta paalutus vaatii aina järeää asennuskalustoa. Paalutuksen jälkeen paalujen päät tulee valmistella ja betoniperustus valaa paalujen varaan. Paaluperustus voi olla halkaisijaltaan pienempi kuin maanvarainen perustus. Paaluperustustyyppejä ovat:

- Gravitaatiolla toimiva paaluperustus
- Kallioon ankkuroitu porapaaluperustus

(35.)

3.6.3 Kallioankkuriperustus

Kallioankkuriperustus tulee kyseeseen, kun voimalaa ollaan sijoittamassa ehjälle kallioalueelle ja kallion pinta on näkyvässä tai lähellä maanpintaa. Kallioon louhitaan tila perustuksille ja porataan reiät kallioankkureille. Kallioankkurit asennetaan porattuihin reikiin ja injektoidaan. Yläpäästään ankkurit kiinnitetään tuulivoimalan perustuksiin, joka on valettu kallioon louhittuun tilaan. Kallioon ankkuroitaessa säästetään perustuksen betonimäärissä, jolloin betonia kuluu vain noin puolet gravitaatioperustuksiin verrattuna. Ankkureiden määrä ja pituus riippuvat suuresti kallion laadusta ja voimalan aiheuttamista kuormituksista. Kallion laatua tutkitaan usein porarei'istä kuvaamalla ja vesimenekkeillä. (36.)

3.6.4 Muut perustamistavat

3.6.4.1 Keinosaaret

Keinosaari on vesialueelle "keinotekoisesti" rakennettava maa-alue, jonne voimala voidaan rakentaa kuten maalle yleensä. Keinosaarelle perustettaessa täytyy mahdolliset pehmeät maa-ainekset poistaa suunnitellun saaren alueelta, jonka jälkeen tehdään tarvittavat louhetäytöt. Täyttöalue tiivistetään tyyppillisesti pudotustiivistämällä. Louhetäytön pinta tasataan murskeella. Voimalan perustukset voidaan tehdä maanvaraisena gravitaatioperustuksena tai porapaaluperustuksena. Keinosaari tehdään voimalatyypin mukaan, mutta tyyppillisenä kokona voidaan pitää pinta-alaa 30 x 50 m. Tarvittava täyttö määrä on riippuvainen saaren paikan vesisyvyydestä. Saaren rantaluiska verhoillaan järeällä louheella jää ja aallokko räsitystä vastaan. Voimalan betoniperustus peitetään ympärystäytöllä kuten muissakin maanvaraisissa perustuksissa. (38,5-6; 39,29.)

3.7 Perustusten kuivatus

Myös kuivatussuunnittelua varten täytyy rakennuspaikalla tehdä pohjatutkimuksia, sillä pohjavesitiedot täytyy saada selville. Käytännössä tämä tarkoittaa pohjaveden havaintoputkien asentamista suunnitelluille rakennuspaikoille. Putkien

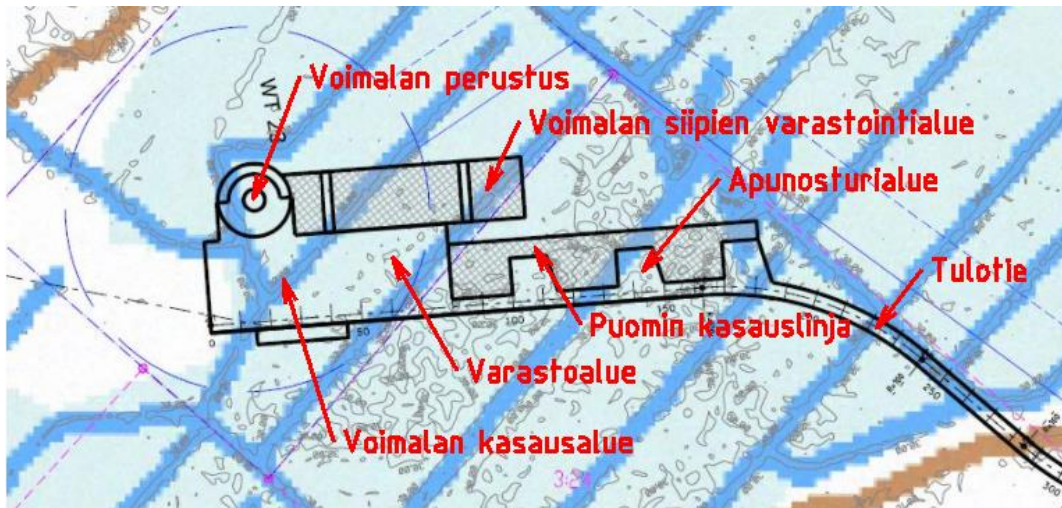
olisi hyvä olla maassa ainakin vuoden verran, jotta korkeimmat vesitasot saataisiin havaittua. Pohjavesi on yleensä korkeimmillaan keväällä lumien sulamisen jälkeen tai syksyllä pitkien sadejaksojen aikana. (22.)

Pohjavesihavaintojen lisäksi kuivatussuunnittelua varten rakennusalue on tarpeen kartoittaa ja vaaita, jotta rakennuspaikalle kertyvän veden valuma-alueen suuruus saadaan selville. Myös maanpinnan kaltevuus ja pintamaakerrosten laatu vaikuttavat olennaisesti veden virtaukseen ja sen kautta kuivatuksen suunnitteluun. Tiiviit maalajit kuten savet, siltti ja osa moreenimaalajeista läpäisevät vettä hitaasti samalla hilliten veden imeytymistä maaperään. Karkeat maalajit kuten hiekka läpäisevät vettä helposti, jolloin pohjavedenpinnan aleneminen voi saada aikaan suuret pohjavedenvirtaukset. Kartoituksissa onkin tärkeää selvittää kuivatusvesille soveltuva purkupaikka, joka on yleensä tuulivoimalatyömaiden sijainnista johtuen avo-oja. (22.)

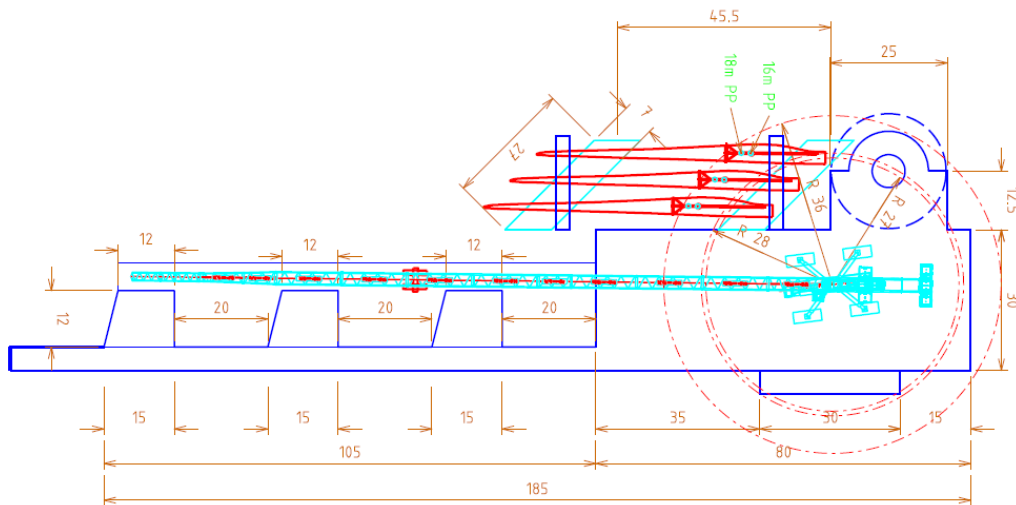
Tuloteiden ja kasausalueiden kuivatus hoidetaan yleensä niiden viereen rakennettavilla avo-øjilla, sillä niiden rakennekerrokset eivät ole hyvin vettä läpäiseviä aineksia vaan yleensä murskeita. Tarvittaessa perustusten salaojat sijoitetaan siten, että ne kiertävät perustuksen ympäri, jotta sade- ja sulamisvedet eivät pääse perustuksen alle. Putkisto suunnitellaan avo-ojaan purkavaksi ja 1% kaadolla viettäväksi. Salaojaputket tulisi pyrkiä sijoittamaan perustuskaivantoon perustusten viereen niiden ulkopuolelle. Joissain tapauksissa salaojitustaso voi olla niin syvällä ympäröivään pohjavedenpintaan nähden, että salaojitusta ei ole järkevä rakentaa vaan veden aiheuttama noste kumotaan kasvattamalla perustuksen kokoa. (22.)

4 PLATFORM-ALUEEN SUUNNITTELU

Oheisissa kuvissa on esitetty esimerkki platform-alueesta ja sen dimensioista. (Kuva 12.) Toisessa kuvassa on esitetty nosturi- ja nostoalueen tilavaatimuksia. (Kuva 13.)



Kuva 12 esimerkki platform- ja siihen liittyvät alueet



Kuva 13 esimerkki platform-alueen dimensioista ja nosturin sijoittumisesta.

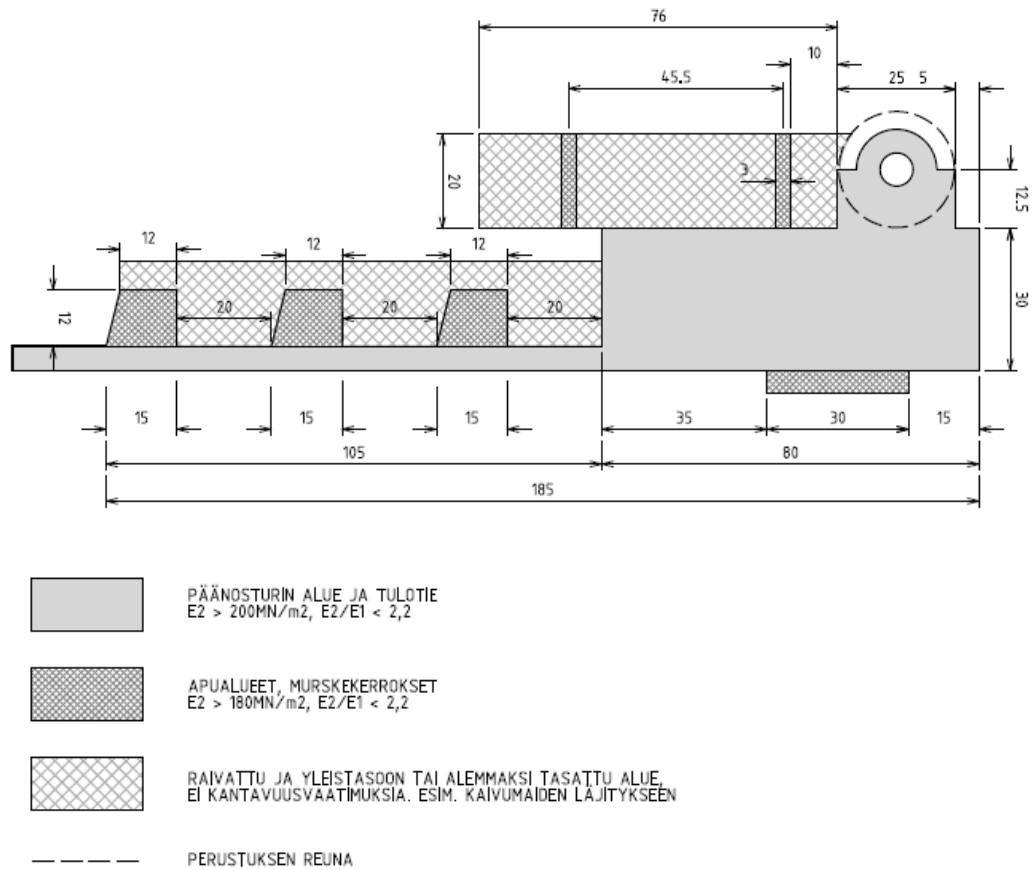
4.1 Kokoamis-, nosturi- ja perustusalue

Kokoamis- ja nosturialueella tuulivoimala pystytetään perustuksista naselliin, joten tämän alueen tulee olla riittävän tilava ja kantava, jotta projekti etenee turvallisesti ja sujuvasti. Esikasausalueelle kootaan tornielementtien ja voimalakomponenttien osat. Alue voidaan purkaa voimalan valmistuttua. (41.)

Kaikki rakentamisen päävaiheet sijoittuvat nosturialueelle, joten siihen kohdistuu siten paljon suuria kuormituksia. Nosturialueen mitat ja pohjaratkaisu vaihtelevat tapauskohtaisesti riippuen voimalatoimittajasta, voimalasta ja rakennuspaikasta riippuen. (41.)

Nosturikalustosta ja voimalan koosta riippuen platform-alueen kantamusvaatimukset ovat 160–200 kN/m² väillä. Johtuen suurentuneista voimaloiden koosta

ja täten nosturien kasvavasta koosta on joillakin voimalatoimittajilla vaatimuk-
sena jopa 250 kN/m^2 . Alueiden kantavuuden laadunvarmistus tehdään levy-
kuormituskokein ja raja-arvot voivat olla päällysrakenteen kantavassa kerrok-
sessa jopa $E_2 > 120\text{--}200 \text{ MN/m}^2$, ja suhde $E_2/E_1 < 2.2$ (9; 18; 41.)



Kuva 14 esimerkki platform-alueen kantavuuden suunnitteluarvoista.

Nosturi- ja esikasausalueen suunnittelu riippuu pohjamaan ominaisuuksista, ja ne on tästä syystä ensin pohjatutkimuksilla selvitettävä. Saatujen tulosten perusteella voidaan aloittaa nosturialueen suunnittelu. Alueet rakennetaan kahdessa eri vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa rakennetaan koko nosturi- ja esikasausalueen alusrakenne ja tarvittaessa alue paalutuskalustolle. Nosturialueen päällysrakenne tulee jätetään viimeistelemättä 16–18 metrin matkalla perustusten keskustasta platformille päin. Sen jälkeen kun perustusten rakennustyöt on saatettu päätökseen, voidaan päällysrakenne viimeistellä ja koko alue tasata suunniteltuun tasaukseen. Mikäli platform alueen ja ympäröivän alueen välinen korkoero on enemmän kuin 0,3 metriä tulee platform alueen reunaluiskat rakentaa $<20\%$ luiskakaltevuuteen. (41.)

Riippuen käytettävästä nosturikalustosta ja voimalatoimittajan vaatimuksista tulee nosturialueen olla joko täysin tasainen tai korkeintaan 1 % pintakallistuksella. Mikäli näihin raja-arvoihin ei päästä, tulee voimalatoimittajan kanssa neuvotella tapauskohtaisesti. Platformin pintamateriaalina tulisi käyttää mursketta tai soraa, joka on raekooltaan 0/32 mm ja 0/56 mm väliltä. Hienojakeita saa olla alle 5 %. (9; 18; 41.)

Nostoalueen ja voimalanperustuksen yläpinnan välinen korkoero tulee ottaa huomioon. Platformin ja perustusten yläpinnan välinen ero saa toimittajasta riippuen olla 0–2,5 m. Mikäli korkoero kasvaa liian suureksi, johtaa se raskaamman nosturikaluston hankintaan tai platformin tason nostoon, joka puolestaan vaikuttaa tulotien suunnitteluun. Asia tulee tarkistaa tapauskohtaisesti voimalatoimittajan kanssa. Rakennusvaiheessa poiskaivettu maa-aines, jota ei voida käyttää täyttömaana, tulee varastoida niille suunnitelluille läjityspaikoille tai vaihtoehtoisesti kuljettaa pois paikalta. Ylijäämämaata voidaan tarvittaessa käyttää tuulipuiston maisemointiin. (9; 18; 41.)

Platform- ja perustusalueella tulisi lähtökohtaisesti tehdä pohjatutkimuksia puristinheijari- tai painokairaamalla. Perustusten alta tulisi lähtökohtaisesti aina tehdä kalliovarmistus porakonekairaamalla. Mikäli pohjaolosuhteiden voidaan olettaa olevan samankaltaisia laajalla alueella esimerkiksi maaperäkartojen perusteella, ei laaja-alaisia pohjatutkimuksia tarvitse tehdä joka platformilla, vaan vähimmäisvaatimusten mukainen pohjatutkimus riittää. Platformeilta voidaan ottaa tämän lisäksi häiriintyneitä maanäytteitä, joiden avulla määritellään pohjamaan ominaisuuksia. (43.)

4.1.1 Apunosturialue ja puominkasauslinja

Apunosturin avulla kootaan päänosturin ristikkopuomi, tähän tarvitaan voimalasta ja nosturista riippuen noin 100–160 metriä pitkä tie, jossa on apunosturille tehtyjä levityksiä noin 20–30 metrin välein. Tulotietä pyritään käyttämään puominkasauslinjan alueena. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, jos tulotien pituusprofiili on liian jyrkkä puomin kasausta varten. Tällöin voidaan tarvittaessa rakentaa puomin kokoamista varten oma alue tai suunnitella tulotielle uusi taseus, jolloin tien rakentamiskustannukset kasvavat. Puominkasauslinjalle ei yleensä tehdä erillisiä pohjatutkimuksia vaan ne tehdään tierakentamisen yhteydessä tielle asetettujen lähtötietovaatimusten mukaisesti. (41; 43.)

4.2 Varastoalue

Varastoalue tarvitaan nostoalueen välittömään läheisyyteen. Siellä säilytetään voimalakomponentteja, kuljetuskehikoita ja työmaakontteja. Tämän alueen ei tarvitse olla myöskään päällystetty. Sen tulee olla tasainen ja pintarakenteen alta puusto ja kasvillisuus tulee poistaa alueelta juurineen ja humuskerroksi-neen. (41.)

4.3 Tieverkon suunnittelu

Tuulipuiston sisäiset tiet ovat tärkeä osa tuulipuistoa ja niillä varmistetaan nosturin ja voimalakuljetusten ongelmaton pääsy jokaiselle puiston voimalalle, joten ne on tärkeä suunnitella huolellisesti. Tieverkon geoteknistä suunnittelua ohjataan Eurokoodi 7 pohjalta EN 1997-1 geotekninen suunnittelu ja EN 1997-2 pohjatutkimus ja koestus. (18.)

4.3.1 Voimalatoimittajan asettamat vaatimukset

Tuloteitä suunniteltaessa tulee suunnitelmista selvittää tuulivoimaloiden paikka, suunnitelma tielinjauksesta, sekä tyyppi- ja pituuspoikkileikkaus tiestä rakennekerroksineen. Suunnitelmista tulee selvittää myös tien pituusprofiili geometrisine tietoineen kuten mäet ja notkot, sekä mahdolliset mutkat säteineen. Tämän lisäksi suunnitelmissa tulisi esittää kääntö- ja ohituspaikat, sekä miten nosturi-alue sijoittuu suhteessa voimalaan ja muuhun platformiin, jotta vältetään mahdollisilta ongelmilta voimalan pystytysvaiheessa. (9; 18;41; 43.)

Kuljetuksiin käytettävien teiden tulee olla valmiit ja tien vierustojen tulee olla raivattu kaikista esteistä ennen kuin voimalan osia aletaan toimittaa. Teitä on huollettava tarpeen tullen koko voimalan rakennus- ja kokoamisvaiheen ajan. Huoltovelvoite käsittää kaikki alueet joissa kuljetuksessa käytettävien ajoneuvojen voidaan olettaa liikkuvan, kuten tiet, nostoalueet ja kääntöpaikat. (9; 18; 41.)

4.3.2 Kuormat

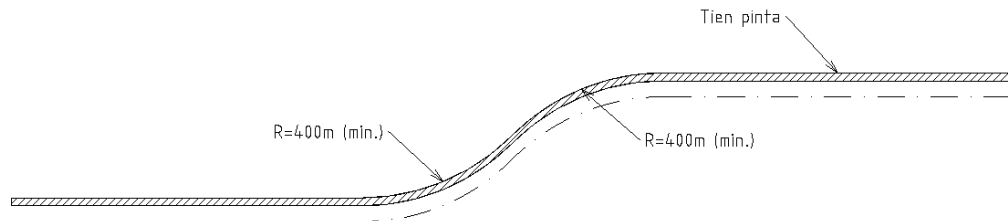
Tuloteiden kulutuskerroksen on kestävä raskaasta liikenteestä aiheutuvia kuormia voimalan rakennusvaiheessa. Perinteisen teräsrunkoisen tuulivoimalan perustuksiin käytettävän betonin työmaakuljetukset voidaan hoitaa noin 50–100 kuljetuksella riippuen kuljetuskaluston kapasiteetista. Mikäli tuulivoimala toteutetaan enemmän betonia vaativana paikalla valettavana hybridiratkaisuna, voi tarvittavien betonikuljetusten määrä nousta vielä suuremmaksi. Tämän lisäksi teillä liikennöi noin 15–40 erityiskuljetusta päänosturin pystyttämiseen liittyen ja 10–15 erityiskuljetusta tornin osien kuljetukseen liittyen. (41.)

Voimalan osien kuljettamiseen käytettävien teiden on kestävä 12 tonnin akselikuormia ja joillain voimalatyypeillä tämä kantavuus riittää myös voimalan nostoalueella. Tuulivoimaloiden koon kasvaessa, myös käytettävien teiden kantokykyvaatimukset kasvavat. Päänosturin siirtämiseen käytettävien teiden on kestävä jopa 16 tonnin akselikuormia, sillä kookas nosturikalusto aiheuttaa teille suuremman kuormituksen kuin voimalakomponenttien kuljetuskalusto. Raskain tiehen kohdistuva kokonaiskuormitus aiheutuukin nosturista joka voi painaa jopa 200 tonnia, jolloin vaadittu kantavuuskapasiteetti kasvaa entisestään samassa suhteessa. Tien on kyettävä vastustamaan muodonmuutoksia ja se varmistetaan laadunvarmistustoimenpitein. Kokeesta saadun E2-arvon vähimmäisarvo tien pintakerroksissa on 200 MN/m², joka varmistetaan tielinjalta levykuormituskokein työselityksen mukaisesti vähintään 100 - 500 metrin välein. (41; 43.)

4.3.3 Pituuskaltevuus

Kuljetusreitin kaltevuuksiin tulee kiinnittää erityistä huomiota. Pituuskaltevuus ei lähtökohtaisesti saa ylittää 8 % -kaltevuutta. Mikäli jostain syystä joudutaan suunnittelemaan jyrkempiä kohtia on voimalatoimittajan kanssa neuvoteltava asiasta tapauskohtaisesti. Tällaisia syitä voisi olla esim. äkillinen korkeuden muutos, jonka tasoittaminen ei olisi taloudellisesti järkevää. Mikäli reittimuutoksia ei tällaiselle tielle voida tehdä, ratkaistaan se käyttämällä erillistä lisävetoautoa avustamaan kuljetuksessa. Lisävetoauto aiheuttaa kuitenkin lisärasituksia tiehen ja se on otettava huomioon suunniteltaessa tien kulutus- ja muita rakennekerroksia. Lisäksi kaarteita voi joutua loiventamaan. Vaihtoehtoisesti tieosuutta voidaan parantaa päällystämällä tieosuus esim. asfaltilla, jolloin vältytään mutkien kääntösäteiden kasvattamiselta. Tasauksien kaltevuudet täytyy

myös suunnitella riittävän loiviksi. Ohjearvona voidaan pitää sädettä $r=400$ metriä. Joissain tapauksissa vaatimus on jopa $r=700$ m jotta käytettävä kuljetuskalusto pääsee ylittämään tasauksen ääriarvokohdat ilman vaaraa siitä, että se jäisi pohjastaan kiinni tai kuljetettaviin voimalakomponentteihin syntyisi ylimääräisiä rasituksia. (41.)

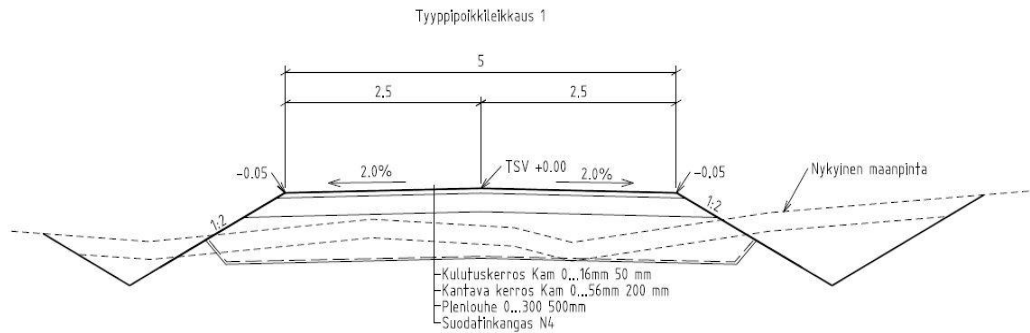


Kuva 15 Tien pituussuuntaisten mäkien pyöristyssäteet.

Mikäli kuljetusreitit ja olosuhteiden pakosta joudutaan suunnittelemaan niin, että kuljetuksiin käytettävä kalusto joutuu peruuttamaan tiellä jossa on korkeuseroja, ei tasausta voi enää suunnitella 8 % kaltevuudella. Tällöin kaltevuutena tulee käyttää 1,5 % -kaltevuutta, ellei kuljetuksessa käytetä avustavia vetoautoja. (9.)

4.3.4 Tien ominaisuudet

Normaali tien leveys on yleisesti 5 metriä, jos kohteen rakentamisessa tullaan käyttämään pyöräalustaisia nostureita. Korkeat yli 140 metriä napakorkeudeltaan olevat voimalat voivat vaatia pystytykseensä käytettävän raskaampia teläalustaisia nostureita. Tällöin teiden leveys voi kasvaa jopa 12 metriin ja tien molemmin puolin voidaan lisäksi joutua raivaamaan useita metrejä vapaata aluetta, jotta nosturi saadaan siirrettyä esteettömästi paikalleen. Tien tulee olla suunniteltu ja rakennettu siten, ettei siihen synny talvikausina routavaurioita. Tien sivukaltevuus saa olla korkeintaan 2 % ja minimissään sen on oltava vähintään 0,5 %. Tällöin pintavedet saadaan johdettua tien viereisiin avo-ojiin. (18.)



Kuva 16 Työmaatien tyypipoikkileikkaus esimerkki.

Jakava rakennekerros koostuu useimmiten louheesta, sorasta tai molskotista. Kerroksen tehtävänä on siirtää tiehen kohdistuvat kuormitukset pohjamaahan. Tästä syystä rakennekerroksen tulee kestää sään aiheuttamia kuormituksia ja olla routimaton, joten sen tulee olla vettä läpäisevä ja se on tiivistettävä 0,3:n metrin kerroksina. (41.)

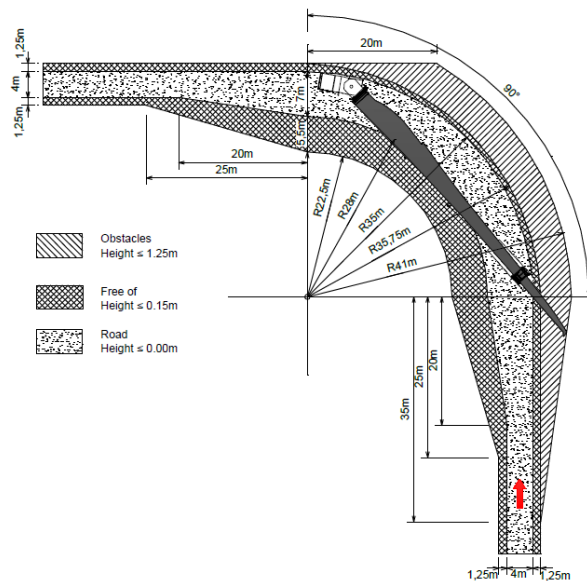
Kantava pintakerros koostuu yleensä murskeesta tai sorasta, materiaalin rae-koon tulisi olla 0/32 mm ja 0/56 mm välillä ja hienon aineksen osuus alle 5 %. Pintakerros tulisi asentaa mahdollisimman tasaisesti ja vähintään 0,25 metrin kerrospaksuudella. Pintakerros tulee tiivistää kerroksittain jyräämällä. (41.)

Jos tieosuudella on siltoja tai poikkeuksellisen suuria tien alittavia rumpuja on tien oltava suora vähintään 40 metriä ennen ja jälkeen kyseisen rakenteen. Kor-kopoikkeamat teiden tasaisilla osuuksilla saavat olla 30 metrin matkalla korkein-taan 0,15–0,30 metriä voimalatoimittajasta ja kuljetuskalustosta riippuen. (9; 18.)

Voimalakuljetuksiin käytettävien teiden risteysalueet tulee suunnitella ja tar-peen tullen muuttaa sellaisiksi, että ne kestävät tuulivoimalan osien kuljettami-sesta aiheutuvat poikkeukselliset kuormat, levittämällä tierakenteita risteysalu-eella. Risteysalueiden kuivatus hoidetaan tarvittaessa alitusrummuilla, jottei tie-rakenne vaurioidu eroosion, materiaalin huuhtoutumisen aiheuttamien onkaloi-den romahtamisen tai maavyörymien vuoksi. Mikäli tuulipuiston uloskäynti liittyy yleiseen tiehen, on osa voimalatoimittajista suositellut, että viimeiset 50 metriä työmaatietä ennen liittymää päällystetään asfaltilla, jotta kuljetuskaluston ren-kaat ehtivät puhdistua ennen siirtymistä yleisille teille. (18; 41.)

4.3.5 Kaarteet

Kaarteet voidaan jaotella yleisesti alle 90-asteen, 90-asteen ja yli 90-asteen kaarteisiin. Suunnitteluun vaikuttaa suuresti myös kohteessa käytettävä kuljetuskalusto ja kuljetettavien osien pituus. Kaarteissa ajotien leveyttä tulee levittää jopa useita metrejä, jotta käänнос onnistuu ongelmitta tai aiheuttamatta vahinkoja tie- ja penkkarakenteisiin tai kuljetettaviin osiin. Mutkan sisäkaarteiden kaarevuussäteen tulisi olla ainakin 28m jotta tie olisi ajokelpoinen. Mutkan yli menevät siiven pyyhkäisyalueet tulee olla raivattu puista ja muista esteistä. (43.)



Kuva 17 Voimalatoimittajan esimerkki 90-asteen kaarteiden suunnitteluun. Enercon.

5 YHTEENVETO JA ANALYYSI

Tuulipuistojen rakentaminen on lähtenyt Suomessa viime vuosina nopeaan kasvuun. Tuulipuistohankkeiden määrän kasvu on tuonut mukanaan suunnitteluun haasteita koko ajan kasvavien voimaloiden kokojen ja uusien voimalatoimittajien vaatimuserojen vuoksi. Haasteita suunnitteluun aiheuttaa se, ettei voimala-alueiden suunnitteluun ole yhtenäisiä suunnitteluohjeita, vaan yksityiskohdat ja vaatimukset on jokainen voimalatoimittaja määrittänyt itse.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella eri voimalatoimittajien antamia vaatimuksia tuulipuiston geotekniseen suunnitteluun ja aluesuunnitteluun. Samalla

piti pohtia, mitä tietoja tuulipuiston alue- ja geoteknisen suunnittelun käynnistämiseksi tarvitaan ja samalla laatia suunnittelun lähtötietojen hankkimista avustava lomake.

Tässä työssä käsiteltiin tuulivoimalan tuloteiden ja platform-alueen eli nosturi- ja kokoamisalueiden geoteknistä suunnittelua. Tuulipuistojen geoteknistä suunnittelua varten tarvitaan laajat maasto- ja pohjatutkimukset, jotta voimaloiden suunnittelu olisi mahdollista ja edelleen rakentaminen olisi turvallista. Tästä syystä kartoitus- ja pohjatutkimustiedot sekä voimalatoimittajan erityisvaatimukset on syytä ottaa huomioon mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Niiden avulla voidaan suunnitella kustannustehokas sijoituspaikka voimaloille sekä suunnitella tulotiet siten, että ne palvelevat tuulipuistoa hyvin ja kokonaistaloudellisesti.

Tuulipuistojen geoteknistä suunnittelua voisi helpottaa sillä, että toimittajien ohjeista ja vaatimuksista kootaan niin sanottu malliratkaisu jossa tyypilliset erityispiirteet on esitetty. Tämä voi kuitenkin olla haastavaa koska voimalatoimittajat ovat usein kansainvälisiä suuryrityksiä. Myös paikalliset rakennusmääräykset voivat vaihdella merkittävästi.

Vaikka suunnitteluvaatimuksia saataisiin yhtenäistettyä, riittää haasteita kasvavien voimalakokojen aiheuttamien kuormitusten vuoksi. Nosturikaluston paino ja dimensiot vaikuttavat tuulipuiston suunnitteluun merkittävästi. Nosturikaluston koko sanelee tarvittavien työmaateiden leveyden sekä teiden ympäristön tilavaraukset. Mitä raskaampaa nosturikalustoa käytetään, sitä suuremmat kantavuusvaatimukset se asettaa rakennettaville teille sekä nosto- ja kasausalueille.

Perustusten yläpinnan ja nostoalueen välinen suurin sallittu korkeus on tärkeä lähtötieto tuulivoimalan geoteknistä suunnittelua varten. Suurin sallittu korkoero vaihtelee voimalatoimittajasta riippuen ollen enimmillään noin 2,5 metriä. Korkeusero vaikuttaa nostoalueen ja perustuksen maarakenteisiin sekä kaivu- ja louhintatöiden määrään. Voimalatoimittaja määrittelee maksimikorkeuseron suunnittelemansa nostokaluston kapasiteetin ja ulottuman perusteella.

Haastattelujen perusteella tuloteiden pituusprofiilia suunniteltaessa voimalatoimittajien suunnitteludokumenteissa esitetyt ohjeelliset pyöristyssäteet $r = 400$ –

700 m eivät yleensä ole riittänyt. Määrääväksi vaatimukseksi muodostuu vaatimus siitä, ettei tien pituusprofiili saa muuttua 30 metrin matkalla enempää kuin 0,15 – 0,30 metriä. Täten hyvänä nyrkkisääntönä voidaankin pitää pituusprofiilin pyöristyssädettä $r = 1000$ m jolloin ei synny vaaraa siitä, että voimalan osat vaurioituisivat kuljetuksessa tai kuljetuskalusto jäisi pohjastaan kiinni.

Haastatteluissa kävi ilmi myös se, että mikäli nosturin puominkasauslinja on pituusprofiililtaan jyrkkä, on järkevää oikaista sen viereinen tie tuulivoimalatoimitajan vaatimusten mukaiseksi, kuin rakentaa erillinen tie puominkasauslinjalle ja apunosturialueille.

Oman haasteensa tuulipuistojen suunnitteluun aiheuttavat yksittäiset maanomistuksesta johtuvat ongelmat. Ongelmat rajoittuvat yleisesti voimalan tulotien linjauksen suunnitteluun. Mikäli maanomistaja ei ole halukas vuokraamaan tonttiaan tuulivoimatoimittajalle, tulee linjausta miettiä ja suunnitella uudestaan. Vaihtoehtoisesti kyseisen voimalan rakentamista voidaan lykätä ja keskeyttää sen hetkinen suunnittelu, kunnes asia on saatu sovituksi ja jatkaa mahdollisesti tuulipuiston seuraavassa vaiheessa.

Yksiselitteistä ohjetta tuulipuiston geotekniseen suunnitteluun on hankala laatia, sillä jokainen tuulipuistohanke on erilainen ja pohjaolosuhteet vaihtelevat suuresti voimalakohtaisesti. Tämän työn perusteella tehdyn lähtötietolomakkeen avulla voidaan kuitenkin huolehtia ja seurata voimalakohtaisesti sitä, että tarvittavat lähtötiedot on saatu ja tarvittavat pohjatutkimukset on tehty.

Lähteet

1. Suomen Tuulivoimalayhdistys ry. Tuulivoimalan rakenne. Saatavissa. http://www.tuulivoimatieto.fi/rakenne_ (viitattu 22.9.2015)
2. Tuulivoimala artikkeleja keräävä sivusto. Tuulivoimalan rakenne. <http://www.wind-science.org/iresen/page/wind-turbine-manufacturing.html> (viitattu 15.12.2015)

Suomen tuulivoimayhdistyksen kotisivu. Saatavissa. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka> (viitattu 15.12.2015)
3. Huhtinen, Korhonen, Pimiä, Urpalainen 2008. Voimalaitostekniikka. Painopaikka Opetushallitus 2008. (viitattu 13.11.2015)
4. VTT. 2014. Tuulivoimatilastot. Vuosiraportti. Saatavissa. http://www.vtt.fi/files/VTT_Wind_energy_statistics_Year_report_2014_public.pdf (viitattu 15.12.2015)
5. Energiateollisuus. Energian tuotanto energialähteittäin 2014. Saatavissa. <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energiالاhteet> (viitattu 15.12.2015)
6. Suomen tuuliatlas. Tuulivoimalan rakenne. Saatavissa. <http://www.tuuliatlas.fi/tuulivoima/index.html> (viitattu 19.12.2015)
7. Ympäristöhallinnon verkkopalvelu. Kolmilapainen tuulivoimala. Saatavissa. <http://www.ymparisto.fi/tuulivoimaneuvonta> (viitattu 19.12.2015)
8. Nordex suunnitteludokumentti K0801 041843 EN RO1 Transport access crane requirements pdf. Tuulivoimalan osien tiedot. (viitattu 4.1.2016)
9. Guidelines for design of wind turbines DNV/Risø 2002. Tuulivoimalan perustukset. Saatavissa. <http://homes.civil.aau.dk/rrp/BM/BM8/q.pdf>
10. Rantamäki, Tamminne. Pohjarakennus. Painopaikka Yliopistokustannus Otatieto 13.painos 1979/2006. (viitattu 7.1.2016)
11. Rantamäki, Jääskeläinen, Tamminne. Geotekniikka. Painopaikka Yliopistokustannus Otatieto 21.painos 1979/2006. (viitattu 7.1.2016)
12. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. RIL 207-2009 Geotekninen suunnittelu. RIL ry, Hansaprint Oy 2009. (viitattu 7.1.2016)
13. Energiateollisuus. Osuus sähkön tuotannosta ja kehitysnäkymät. Saatavissa. <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energiالاhteet/tuulivoima> (viitattu 14.1.2016)

14. World steel association. Saatavissa. Steel solutions in the green economy wind turbines. Saatavissa. <https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/worldsteel-wind-turbines-web/document/Steel%20solutions%20in%20the%20green%20economy:%20Wind%20turbines.pdf> (viitattu 26.1.2016)
15. World Wind energy association. Rotor and Rotor Blades: An Overview. Saatavissa. http://www.wwindea.org/technology/ch01/en/1_2_1_2.html (viitattu 27.1.2016)
16. LM Wind Powers. Rotor blades, product features. Saatavissa. <http://www.lmwindpower.com/Rotor-Blades/Products/Features/Standard> (viitattu 27.1.2016)
17. Vestas suunnitteludokumentti Road Crane Pad and Hardstand Specifications, 0038-8194.V09 pdf. Access road specifications. (viitattu 27.1.2016)
18. Motiva. Syöttötariffi. Saatavissa. http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuvan_energian_tuet/syottotariffi (viitattu 16.2.2016)
19. EWEA the european wind energy association. Economics of wind energy. Saatavissa. http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics_of_Wind_Energy.pdf (viitattu 16.2.2016)
20. Suomen tuulivoimayhdistys. Tuulivoimavuosi 2015. Saatavissa. http://www.tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2093/ennatysellinen_tuulivoimavuosi_2015_-_tuplattu_tuotanto_ja_jatti-investoinnit (viitattu 16.2.2016)
21. Jääskeläinen R. Pohjarakennuksen perusteet. Painopaikka Tammer-teknikka / Amk-kustannus 2.painos 2009. (viitattu 1.3.2016)
22. DNV/Risø 2002. Guidelines for design of wind turbines Saatavissa. <http://homes.civil.aau.dk/rrp/BM/BM8/q.pdf>
23. Oulunkaaren kuntayhtymä Tuulivoimaprojektin vaiheiden kuvaus Pöyry. 16.12.2010. (viitattu 4.3.2016)
24. OX2 suositukset ja hankkeet. Maanomistusasiat. Saatavissa. <http://www.ox2.com/fi/suosituksset-ja-hankkeet/maanomistajat/> (viitattu 7.3.2016)
25. Svenska lantbruksproducenternas centralförbund SLC r.f. Tuulivoima – mahdollisuuksia maaseudulle. Saatavissa. http://gammal.slc.fi/files/SLC_vindkraftsbroschyr_2013_fi_web.pdf (viitattu 7.3.2016)

26. Vaasa Energy Institute. Medvind tuulivoimaportaali. Tuulimittaukset. Saatavissa. http://www.vindkraft.fi/public/index.php?cmd=smarty&id=77_lfi (viitattu 8.3.2016)
27. Suomen tuulivoimayhdistys. Tuulivoimaprojektin vaiheet. Saatavissa. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimaprojekti> (viitattu 9.3.2016)
28. Suomen tuulivoimayhdistys. Tuulipuiston luvittaminen. Saatavissa. http://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/208-tuulipuiston_luvittaminen_sty.pdf (viitattu 9.3.2016)
29. Suomentuulivoimayhdistys. Tuulipuiston kaavoittaminen. Saatavissa. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimaprojekti/kaavoitus> (viitattu 9.3.2016)
30. Ympäristöministeriö. Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Saatavissa. http://www.tuulivoimaopas.fi/files/40/Tuulivoimarakentamisen_suunnittelu.pdf (viitattu 9.3.2016)
31. Suomen tuulivoimayhdistys. Maanrakennustyöt. Saatavissa. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimaprojekti/maanrakennus> (viitattu 10.3.2016)
32. Jääskeläinen R. Geotekniikan perusteet. Painopaikka Tammertekniikka / Amk-kustannus 1.painos 2009. (viitattu 14.3.2016)
33. RIL 207-2009. Geotekninen suunnittelu. Eurokoodin EN 1997-1 suunnitte-luohje. Painopaikka Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL. (viitattu 14.3.2016)
34. EPV-tuulivoima Laihian Rajavuoren tuulivoimapuisto. Perustustavat. Saatavissa. <http://www.epvtuulivoima.fi/wp-content/uploads/sites/5/Laihian-YVA-ohjelma.pdf> (viitattu 14.3.2016)
35. Puhuri Oy Pyhäjoen Parhalahden tuulipuisto. Perustustavat. Saata-vissa. http://www.puhuri.fi/files/final_puhuri_parhalahti_yva_selostus.pdf (viitattu 14.3.2016)
36. Metsähallitus laatumaa Kivivaara-Peuravaara, tuulivoimapuiston YVA. Rakennusvaiheet. Saatavissa. <http://www.laatumaa.fi/assets/Tuulivoima/Tuulivoima-Kivivaara-Peuravaara/YVA-selostus/Kivivaara-Peuravaara-YVS-sivut-1-89.pdf> (viitattu 15.3.2016)
37. Pohjois-Suomen Aluehallintavirasto. Perustaminen keinosaaressa. Saata-vissa. http://www.avi.fi/documents/10191/56938/psavi_paat_77_12_2-2012-11-20.pdf (viitattu 15.3.2016)
38. Rajakiri Maanahkiaisien merituulivoimapuisto YVA. Keinosaaari. Saata-vissa. <http://www.rajakiiri.fi/wp-content/uploads/sites/8/Maanahkiaisien-YVA-selostus2.pdf> (viitattu 15.3.2016)

39. Tiehallinto urakoitsijan laaturaportointi. Pohjarakentamisen laadunvarmistus. Saatavissa. http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2200062-v-09-urakoitsijan_laaturaportointi.pdf (viitattu 17.3.2016)
40. Enercon. Suunnitteludokumentti. PM-SiteL-SP016-Access Roads and Crane Platforms-E101_97-133m-Rev006ger-eng.pdf Access roads and crane platforms. (viitattu 31.3.2016)
41. Suomentuulivoimayhdistys. Vuosiraportti 2015. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoimaennusteita> (viitattu 4.4.2016.)
42. Asiantuntija haastattelut Kymen Sipti Oy. (viitattu 4.4.2016.)

KUVAT JA KAAVIOT

1. VTT tuulivoimatilastot 2015. <http://www.vtt.fi/palvelut/v%C3%A4h%C3%A4hiilinen-energia/tuulivoima/suomen-tuulivoimatilastot/>
2. VTT vuosiraportti 2014 tuulivoimakapasiteetti ja energiatuotanto. S.11 http://www.vtt.fi/files/VTT_Wind_energy_statistics_Year_report_2014_public.pdf
3. Tuulivoimalan osat. Saimaa Gardens Services-kotisivu http://www.saimaagardens.one1.fi/easydata/customers/rauhanalue/files/kuvat/tuulivoimalan_osat.gif
4. Tuulivoimalan konehuone. Tuulivoimalayhdistys tuulivoimaloiden rakenne. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>
5. Naselli työmaalla. Kymen Sipti Oy Kalajoki
6. Lavan aerodynaaminen muotoilu. <http://www.windturbinesyn-drome.com/wp-content/uploads/2012/11/blade.jpg>
7. Hybridi tornin osat ja rakenne. <http://www.windfarmbop.com/category/foundations/>
8. Fuhrländer FL2500 tuulivoimala. Seeba GmbH tornin valmistaja. http://www.energy.kth.se/compedu/webcompedu/WebHelp/S9_Renewable_Energy/B2_Wind_Energy/C10_Introduc-

tion_to_Onshore_Wind_Power/ID130_files/World%E2%80%99s_tal-
lest_turbine.htm

9. Perustusten raudoitus Kymen Sipti Oy. Kalajoki.
10. Tuulipuisto luvituskaavio. Suomentuulivoimayhdistys. http://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/208-tuulipuiston_luvittaminen_sty.pdf
11. Kaavio Kriikkula livo Opinnäytetyö liite 6
12. Platformialue 1 ja sen osat. Kymen Sipti Oy.
13. Platformialue 2 ja sen osat. Kymen Sipti Oy.
14. Platformialue 2 ja sen osat laadunvalvonta. Kymen Sipti Oy.
15. Mäkien pyöristyssäteet. Omatekemä
16. Työmaatien poikkileikkaus Kymen Sipti Oy.
17. Enercon specification access roads and crane platforms s. 13

Liitteet

1. Tuulivoimalan suunnittelun lähtötietolomake

Tuulivoimalan pohjarakenteiden suunnittelun lähtötietolomake

Tuulipuisto:	Voimala:	Pvm.:			
Lähtötiedot:					
Tuulipuiston layout vahvistettu:	k / e	Lisätietoja:			
Nostoalueen ja perustuksen yläpinnan välinen korkoero:	_____m	Lisätietoja:			
	Dimensiot:	Kantavuus:	Voimalatoimitajan E2- vaatimus:	Lisätietoja:	
Nostoalueen dimensiovaatimukset / Vähimmäiskantavuus	_____x_____ m	_____kN/m ²	_____MN/m ²		
	Leveys:	Kantavuus:	Pituus kaltevuus:		
Tuloteiden leveys, kantavuus, sallittu pituuskaltevuus	_____m	_____t/akseli _____kN/m ²	_____%		
Platformalueella sallittu suurin kaltevuus:	_____%	Lisätietoja:			
Puominkasauslinjan suurin sallittu pituuskaltevuus:	_____%	Lisätietoja:			
Muut lähtötiedot:	Pohjakartta	Kiinteistörajat	Tuulivoima-kaava	Koordinaatti ja korkeusjärjestelmä	Muita ohjeita tai rajoituksia
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pohjatutkimukset:					
	Perustusalue:	Platform:	Tulotie		
Puristinheijarikairaus: tai Painokairaus:	_____Kpl. <i>Suositus 5</i>	_____Kpl. <i>Suositus 4</i>	_____Kpl. <i>Suositus 1/200m</i>		
Porakonekairaus ja kalliovarmistus:	_____Kpl. <i>Min. 1</i>	Lisätietoja:			
Häiriintynyt maanäyte:	_____Kpl. <i>Min. / sarja</i>	Lisätietoja:			
Pohjavedenpinnan havaintoputki:	_____Kpl.	Lisätietoja:			

Pohjatutkimustulokset:			
	Perustus:	Platform:	
Irtomaakerrosten koostumus ja tiiveys:			Lisätietoja:
Kalliopinnan korko:			Lisätietoja:
Maalaji ja sen vesipi-toisuus:			Lisätietoja:
Maakerroksen laatu (aggressiivisuus, sähköjohtavuus):			Lisätietoja:
Pohjaveden korkeus-asema (GWL): (GL):			Lisätietoja:
pohjaveden laatu (ag-gressiivisuus, sähkö-johtavuus):			Lisätietoja: