

Mika Vandell

TUULIMITTAUSTEN TOIMINTAOHJE

Sähkötekniikan koulutusohjelma

2015

## TUULIMITTAUSTEN TOIMINTAOHJE

Vandell Mika  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Huhtikuu 2015  
Ohjaaja: Pulkkinen Petteri  
Sivumäärä: 22  
Liitteitä: 2 (42sivua)

Asiasanat: sodar, mastomittaus, toimintaohje

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli laatia toimintaohjeet tuulimittauksiin Pori Energia Oy:lle. Toimintaohjeissa kerrotaan mittauksen kannalta tärkeimmistä mittalaitteista sekä niiden asennustavoista. Mittaukset tulee aina tehdä IEC61400-12-1 -standardiin perustuen, joten tässä työssä perehdyttiin tuulimittauksen standardeihin, standardin mukaisiin asennustapoihin sekä mittauksen luotettavuuteen vaikuttaviin ilmiöihin. Näissä ohjeissa on huomioitu MEASNET-standardit sekä tulossa oleva IEC61400-12-1 Ed.2-standardi. Toimintaohjeet laadittiin Pori Energian käytössä oleville kahdelle eri mittaustavalle, sodar-mittauksiin sekä mastomittauksiin.

Tuulimittauksilla mitataan yleensä vuoden ajan tuuliolosuhteita suunniteltavissa olevan tuulivoimalan tulevalla sijoituspaikalla. Mittauksen perusteella tehdään investointipäätös, onko tuulivoimalan sijoitus kyseiselle alueelle kannattava. Mittaukset tulisi tehdä voimalan suunnitellulta napakorkeudelta. Mittauksilla varmistetaan alueen tuuliolosuhteet, keskituulennopeus ja turbulentsisuus.

## INSTRUCTIONS OF WIND MEASUREMENTS

Vandell Mika  
Satakunta University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
April 2015  
Supervisor: Pulkkinen Petteri  
Number of pages: 22  
Appendices: 2 (42pages)

Keywords: sodar, mast measurement, instruction

---

Purpose of this thesis was to draw up instructions of wind measurements. The thesis was made to Pori Energia Oy. In the instructions have been told of the most important measurement devices and their installation methods. The measurements always to be done according to IEC 61400-12-1 standard based on. In this work to examines the wind measurement standards, installation methods and the reliability of the measurements. Instructions was drawn up for two active measurement method, sodar measurements and mast measurements.

Wind measurements should be measured at usually one year time wind conditions in the planned wind turbine area. The basis of measurements are made the investment decision, whether profitable build the wind turbine for that area. Measurements should be made in the planned wind turbine hub height. So that ensure the measurement area wind conditions, the average wind speed and turbulent flows.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	PORI ENERGIA OY.....	6
3	TUULI.....	7
3.1	Miksi tuulivoimaa? .....	7
3.2	Tuulisuus.....	8
3.3	Tuuli maanpinnan lähellä.....	10
3.4	Tuulivoima.....	11
4	SIJOITUSPAIKAN VALINTA .....	12
4.1	Tuuliolosuhteet .....	12
4.2	Liitynnät sähköverkkoon .....	12
4.3	Rakentamista ja huoltoa tukevat palvelut .....	12
4.4	Maaston tyyppi.....	13
4.5	Ympäristövaikutukset .....	13
5	TUULIMITTAUKSET .....	14
5.1	Sodar (Sound detection and ranging).....	14
5.2	Mastomittaus.....	16
5.2.1	Kuppianemometri .....	17
5.2.2	Ultraäänianemometri .....	18
5.2.3	Tuulen suunta-anturi.....	19
5.3	Lidar (Light detection and ranging).....	20
6	YHTEENVETO .....	21
7	LÄHTEET .....	22

LIITTEET

## 1 JOHDANTO

Tuulimittaukset ovat tärkeässä osassa ennen lopullisia päätöksiä tuulivoimaloiden sijoituspaikoista. Yleensä vuoden kestäville tuulimittauksilla saadaan kattavasti tutkittua, onko suunniteltu paikka todella investoinnin arvoinen. Tuulimittaukset on aina tehtävä huolella, standardeja noudattaen, koska näitä mittaustuloksia tullaan käyttämään tuotantoarvioina rahoitusneuvotteluissa. Lisäksi voimalan toimittajan on tiedettävä sijoituspaikan tuulisuus, jotta se pystyy tarjoamaan oikean tyyppisen tuulivoimalan, joka tuottaa mahdollisimman hyvin tulevan sijoituspaikan tuulioloissa. Usein sijoituspaikalle ei tule vain yhtä tuulivoimalaa vaan useampia. Pelkästään tuulisin paikka ei välttämättä ole paras vaihtoehto. Lisäksi on myös otettava huomioon liitännät sähköverkkoon, ympäristövaikutukset, maaston tyyppi sekä rakentamista ja huoltoa tukevat palvelut.

Opinnäytetyöni aiheena on tuulimittausten toimintaohje, sodar-mittauksiin sekä mastomittauksiin. Työ tehtiin Pori Energia Oy:lle. Toimintaohjeen tarkoituksena on toimia apuna mittausjärjestelyjen käyttökuntoon laittamisessa sekä asiakkaille dokumenttina, josta he näkevät, millä tavoin mittauksia tehdään. Lisäksi toimintaohjeeseen on koottu tärkeimpiä tietoa eri mittalaitteiden asennustavoista, huolloista, kalibroinneista sekä etäisyyksistä häiritseviin tekijöihin. Mittausten kannalta on tärkeää, että kaikki mittalaitteet on huollettu sekä kalibroitu oikein, asiaan kuuluvalla tavalla. Mittalaitteiden asennus on myös tärkeässä osassa. Mittalaitteet tulee asentaa huolellisesti sekä riittävän etäälle häiritsevistä tekijöistä. Virheellisesti asennetut mittalaitteet voivat vääristää mittaustuloksia merkittävästi.

Opinnäytetyöhön sisältyy myös kaksi eri liitettä, joissa kerrotaan tarkemmin tuulimittausten toimintaohjeista. Niitä ei julkaista, vaan ne tulevat ainoastaan yrityksen käyttöön.

## 2 PORI ENERGIA OY

Pori Energia Oy on Porin kaupungin kokonaan omistama yritys, joka myy energiaa sekä energia-alan palveluita pääasiassa Satakunnan alueella. Yhtiö perustettiin vuonna 1898, jolloin sen päätehtävänä oli kaupunkivalaistus. Yhtiön liiketoiminnan alueita ovat sähkön myynti, energian tuotanto, kaukolämpö sekä kunnossapito-, urakointi- ja tuulivoimapalvelut. Konserniin kuuluvat emoyhtiön lisäksi Pori Energia sähköverkot Oy sekä Step Oy. Vuonna 2013 Pori Energia -konsernin liikevaihto oli 190,1 miljoonaa euroa ja liikevoitto 19,0 miljoonaa euroa. Tuolloin yrityksessä työskenteli 273 henkilöä.

Pori Energian sähköverkot Oy vastaa Porin alueella yli 50 000 verkon käyttäjän sähkön siirrosta sekä jakelusta. Lisäksi se vastaa verkonhallinnasta sekä sähköverkkojen rakennuttamisesta Porin alueella.

Pori Energian kaukolämpö tuotetaan ympäristöystävällisesti Aittaluodon sekä Kaanaan voimalaitoksilla. Lämmöntuotannon pääpolttoaineena on puu. Tällä hetkellä kaukolämpöverkkoa on noin 240 km.

Pori Energian tuulivoimapalveluilla on pitkä kokemus tuulivoimaprojekteista. Se tarjoaa monenlaisia palveluja, muun muassa kunnossapitopalveluita, tuulimittauksia, voimalaitospalveluita sekä sähköverkon suunnittelua ja rakentamista.

Sähköurakointipalvelut tarjoavat sähkötekniisiä palveluita yrityksille, teollisuudelle sekä yhteisöille. Toiminta-alueena on pääasiassa Satakunnan alue.

Step Oy toimittaa energiantuotanto- ja tukipalveluita muun muassa Harjavallan teollisuuspuistoon useille kumppaneille. Energiapalveluiden kumppanuussopimukset räätälöidään aina asiakkaan tarpeiden mukaan. /14/

### 3 TUULI

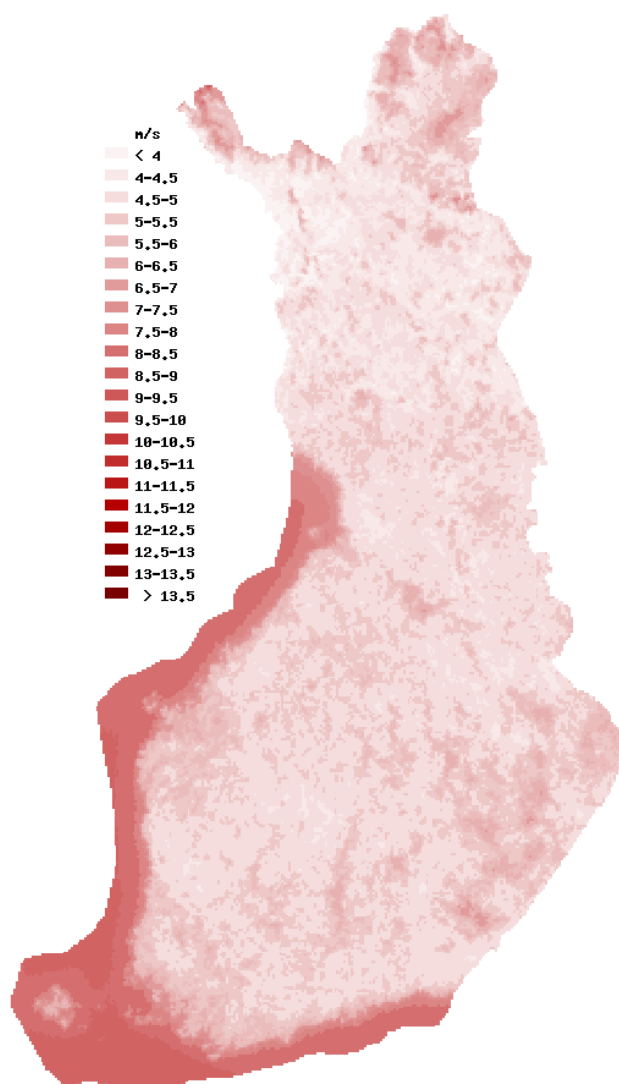
Tuulen syntymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat maapallon epätasainen jäähtyminen sekä lämpeneminen. Auringosta tuleva säteily vähenee ilmakehässä. Napa-alueiden lähellä säteily kulkee pidempiä matkoja kuin päiväntasaajalla, joten mitä lähemmäksi napa-alueita tullaan, sitä enemmän auringosta tuleva säteily vaimenee. Maanpinta lämpenee auringon vaikutuksesta eri tavoin eri leveysasteilla. Epätasaisesta lämpenemisestä johtuen napa-alueille siirtyy lämmintä ilmaa ja päiväntasaajalle viileämpää ilmaa. Tuuli syntyy lämpimän ilman kiertoliikkeestä. Tuuli pyrkii tasaamaan alueellisia lämpötilaeroja maapallolla. /1, 2, 5/

#### 3.1 Miksi tuulivoimaa?

Tuulivoima on uusiutuva, ilmainen sekä loppumaton energian muoto, jonka ympäristöhöydyt ovat moninkertaiset suhteessa tuulivoiman haittoihin. Se on polttoaineista riippumatonta energiaa, josta ei synny päästöjä maahan, ilmaan tai veteen. Hyödynnettävissä olevaa tuulienergiaa on kaikkialla maapallolla. Arvioiden mukaan tuulivoimaloilla hyödynnettävissä oleva tuulienergiapotentiaali on koko maailman sähkönkulutukseen verrattuna yli kymmenkertainen. Tuulivoiman raakapotentiaalista voitaisiin arvioiden mukaan hyödyntää yli 10 %. Tuulivoimalla tuotetulla sähköllä pystyttäisiin vähentämään merkittävästi riippuvuutta fossiilisista polttoaineista tuotetusta sähköstä. Suomessa on varsin hyvät tuuliolosuhteet tuulivoiman tuottamiseen. Suomessa tuuliolot ovat tuulivoimalan hyvillä sijoituspaikoilla selvästi paremmat, kuin esimerkiksi tuulivoiman edelläkävijällä Saksalla. Saksassa tuotetaan tuulivoimalla huomattavasti enemmän energiaa kuin Suomessa. Suomessa olevalla tuulienergiapotentiaalilla pystyttäisiin tuottamaan koko maan tarvitsema sähköenergia. Tällä hetkellä tuulivoimalla tuotetaan noin 1 % Suomen sähköntuotannosta, joten tuulivoimalla olisi mahdollista tuottaa sähköä huomattavasti enemmänkin. Lisäksi kotimaassa tuotettu tuulivoima on puhdasta lähienergiaa, joka tukee energiaomavaraisuutta ja vähentää näin ollen Suomen riippuvuutta tuontisähköstä. /1, 4, 5/

### 3.2 Tuulisuus

Talvikuukausina Suomessa tuulee eniten, kesäkuukausina selvästi vähemmän. Suomessa tuulioloihin vaikuttavat eniten maantieteellinen sijaintimme, Atlantilta maa-  
hamme tulevat matalapaineet sekä niiden kulkemat reitit. Keskimääräinen tuulen nopeus kilometrin korkeudessa on 9 - 9,5 m/s. Suomessa ilmastolle on tyypillistä selvät tuulen nopeuden vaihtelut vuodenajoittain rannikolla, tuntureilla ja merialueilla.

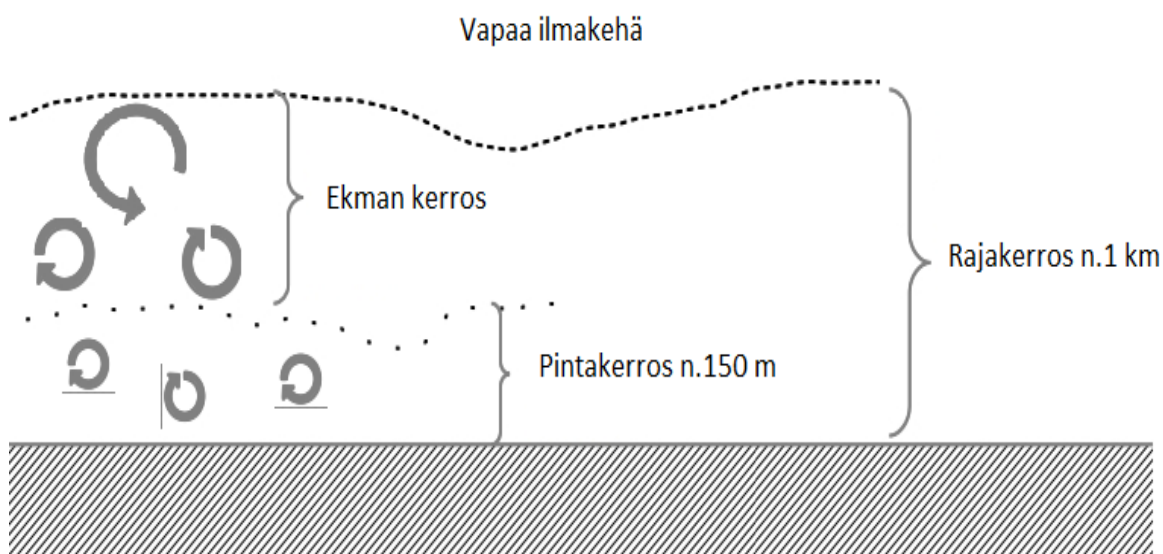


Kuva 1. Tuulen keskinopeudet Suomessa



Sisämaan kuukausittainen tuulen keskinopeus vaihtelee melko vähän. Sisämaassa tuulen mitattu vuosittainen keskinopeus on selvästi pienempi kuin merialueilla. Tuulen nopeus kasvaa korkeuden kasvaessa. Nopeuden kasvuun vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa maaston rosoisuus, maaston korkeuserot sekä ilman terminen tasapainotila. Rajakerroksessa tuulen nopeuden muutos korkeussuunnassa on merialueilla huomattavasti pienempi kuin metsämaastossa. Suomessa rajakerroksen korkeus on tyypillisesti 100 – 1000 metrin välillä maanpinnasta. Korkeus kuitenkin vaihtelee ajan, säätilanteen ja ilmakehän tilan muutoksista riippuen. Alemman ilmakehän suihkuvirtauksella saattaa olla vaikutuksia rajakerroksen yläosien nopeuden muutoksiin. Tuulensuunnalla ilmoitetaan ilmansuunta, josta tuuli puhaltaa. Suomessa vallitseva tuulensuuntasektori on etelä-länsi eli suurin osa tuulista tulee näiltä ilmansuunnilta.

/1, 2, 3/



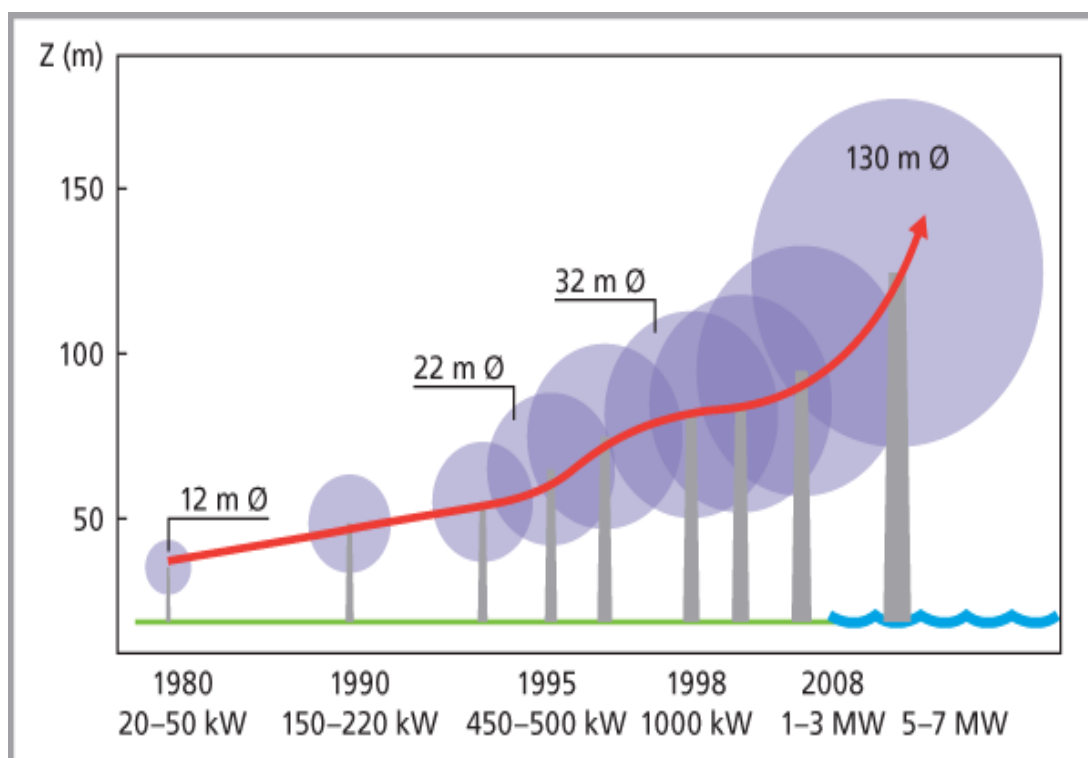
Kuva 2. Rajakerroksen rakenne

### 3.3 Tuuli maanpinnan lähellä

Merkittävät tuulet tuulivoimalan tuotannossa ovat lähellä maanpintaa, ulottuen aina 300 m:n korkeudelle asti. Tätä ilmakerrosta kutsutaan rajakerrokseksi. Tämän ilmakerroksen tuuli ja sen käyttäytyminen poikkeavat huomattavasti ylempänä olevan kerroksen, vapaan ilmakehän tuulista. Rajakerroksen tuuliin vaikuttavat ympäröivä maasto, maastossa olevat virtausesteet sekä maaston peitteisyys. Jotta pystytään arvioimaan tuulivoimalan tuotanto, tuulen nopeus ja tuulienergian potentiaali, on tutkittava vaikuttavia tuulia rajakerroksessa. Rajakerroksen lähimpänä maanpintaa olevaa ilmakerrosta sanotaan pintakerrokseksi. Pintakerroksen korkeus on noin 10 % rajakerroksen korkeudesta, riippuen maaston rosoisuudesta sekä ilman tasapainotilasta. Yleisesti pintakerroksen korkeus on 10 – 150 metriä maanpinnasta. Yläpuolisen ilmamasan virtaukseen vaikuttavat huomattavasti pintakerroksen maaston muodot sekä alustan kasvillisuus. Rajakerroksen vaikuttavana ominaisuutena on turbulentsisuus. Turbulenttinen virtaus on epäsäännöllistä; tuulen suunta ja nopeus vaihtelevat ajan suhteessa. Turbulenssi voidaan jakaa mekaaniseen ja termiseen turbulenssiin niiden syntymekanismin perusteella. Terminen turbulenssi syntyy ilman tiheydessä tapahtuvissa pystysuuntaisissa vaihteluissa erityisesti silloin, kun merenpinta tai maanpinta on ilmaa lämpimämpi. Tällöin lämmennyt ilma yrittää kohota ylöspäin. Ilman jäähtyminen ilmakehässä saa myös aikaan termisen turbulenssin, kun kylmä ilma yrittää vajota alaspäin. Mekaaniseen turbulenssiin vaikuttavat maaston rosoisuus sekä tuulen nopeuden muutokset korkeuden muuttuessa. /1, 2, 5/

### 3.4 Tuulivoima

Tuulivoima on ilmavirtauksen liike-energian muuntamista tuuliturbiineilla sähköenergiaksi. Tuulivoima on uusiutuvaa energiaa ja se on alkujaan peräisin auringon säteilyenergiasta. Tuulen tehoon sekä energiaan vaikuttaa ilman tiheys. Tuulivoimala ei pysty hyödyntämään tuulen koko nopeusaluetta. Voimala tarvitsee käynnistyäkseen vähintään 3 m/s tuulennopeuden, lisäksi niillä on voimalaturvallisuuden liittyen pysäytystuulennopeus, joka on n. 25 m/s riippuen voimalan mallista. Vakioteho saavutetaan, kun tuulennopeus on noin 13 – 14 m/s. Tuulivoimalan sijoitukseen parhaita paikkoja ovat merialueet, merten rannikot, mereen rajoittuvat pellot, suuret mäet tai vuoren rinteet, joissa tuulen keskinopeus on 5,5 - 7,5 m/s. Viimeisten kahdenkymmenen vuoden aikana tuulivoimaloiden koko, napakorkeus sekä roottorin halkaisija ovat kasvaneet merkittävästi ja ne tulevat edelleen kasvamaan. Tuulivoimalan tuottoa arvioitaessa on pystyttävä määrittämään tuulen nopeus ja mitoitustuuli roottorin koko alueelta sekä napakorkeudelta. /2, 3, 5/



Kuva 3. Tuulivoimaloiden kehittyminen

## 4 SIJOITUSPAIKAN VALINTA

Tuulivoimalan sijoituspaikkaa mietittäessä on otettava huomioon asioita, jotka vaikuttavat tuulivoimalaan rakentamisvaiheessa sekä voimalan valmistumisen jälkeen. Huomioitavia asioita ovat tuuliolosuhteet, liittynät sähköverkkoon, rakentamista ja huoltoa tukevat palvelut, maaston tyyppi sekä ympäristövaikutukset. Näitä asioita tutkimalla selviää onko suunniteltavalle paikalle järkevä rakentaa tuulivoimala.

### 4.1 Tuuliolosuhteet

Tuuliolosuhteet ovat merkittävin tekijä valittaessa taloudellista sijoituspaikkaa tuulivoimaloille. Pelkästään hyvät tuuliolosuhteet eivät kuitenkaan riitä, vaan on otettava myös muita asioita huomioon. Vuoden kestäville tuulimittauksilla saadaan kattavasti tutkittua alueen tuuliolosuhteet kaikkina vuodenaikoina. Tuuliolot saattavat myös vaihdella vuosien välillä samalla alueella.

### 4.2 Liittynät sähköverkkoon

Tuulivoimala-alueiden liittäminen sähköverkkoon vaikuttaa hankkeen kustannuksiin, etenkin pitkissä siirtoyhteyksissä. Lisäksi verkkoon liittäminen saattaa edellyttää muutoksia sähköasemaan tai vaatia uuden sähköaseman rakentamista. Fingridin suosituksen mukaisesti on pienet tuulivoimalaitokset ensisijaisesti liitettävä jakeluverkkoihin. Kantaverkkoon liitettäville voimalaitoksille ei ole olemassa mitään tarkkaa tehorajaa.

### 4.3 Rakentamista ja huoltoa tukevat palvelut

Rakentamista ja huoltoa tukevat palvelut on hyvä ottaa huomioon suunniteltaessa voimalan sijoituspaikkaa. Nämä vaikuttavat merkittävästi tuulivoimalan kustannuksiin. Tuulivoimaloiden suuret ja painavat osat vaativat hyvän tien, jotta voimalan osat voidaan kuljettaa rakentamispaikalle. Valmiina olevat tiet vähentävät kustannuksia. Lisäksi on hyödyksi, jos voimalan ylläpidon vaatimat huoltopalvelut sijaitsevat lähellä.

#### 4.4 Maaston tyyppi

Maaston tyyppi vaikuttaa voimalan perustuksien rakentamiseen sekä rakennuskustannuksiin. Kantavalle maapohjalle rakentaminen on yleensä helpompaa ja edullisempaa. Lisäksi maaston rosoisuudet vaikuttavat lähellä maanpintaa oleviin tuuliin sekä niiden luonteeseen. Rosoisessa maastossa vapaan ilmakehän tuuli heikkenee alaspäin tultaessa enemmän kuin tasaisessa maastossa.

#### 4.5 Ympäristövaikutukset

Tuulivoimalan rakentaminen ei saa vaarantaa merkittäviä luonnonarvoja eikä aiheutaa riskejä uhanalaisille lajeille. Tuulivoimalaitoksille sopivien alueiden määrittely tulee tehdä huolella ja hyvissä ajoin ennen lopullisen sijoituspaikan valintaa. Paikkaa suunniteltaessa on hyvä olla vaihtoehtoisia suunnitelmia, joista valitaan ympäristövaikutuksiltaan paras vaihtoehto. Tuulivoimaloiden sijoituksessa on tärkeää, ettei niitä ei sijoitettaisi lintujen muuttoreiteille, levähdys- tai kerääntymisalueille, eikä linnuston tärkeille pesimäalueille.

/2, 3, 15/

## 5 TUULIMITTAUKSET

Tuulimittauksilla mitataan yleensä vähintään vuoden ajan tuuliolosuhteita suunniteltavissa olevan tuulivoimalan tulevalla sijoituspaikalla. Mittausten perusteella tehdään investointipäätös, onko tuulivoimalan sijoitus kyseiselle alueelle kannattava. Mittaukset tulisi tehdä voimalan suunnitellulta napakorkeudelta, mutta ne voidaan myös tehdä  $\frac{3}{4}$  napakorkeudelta. Niillä varmistetaan alueen tuuliolosuhteet, keskituulennopeus ja turbulentsisuus. /10, 12/

### 5.1 Sodar (Sound detection and ranging)

SODAR-laitteisto on äänitutka, jonka toiminta perustuu Doppler-ilmiöön. Sen avulla mitataan tuulien profiileja äänen avulla. Se toimii samalla periaatteella kuin radiosignaalia lähettävä tutka, mutta se lähettää radiosignaalien sijaan ääniaaltoja. Mittaamalla ääniaaltojen hajontaa sekä Doppler-ilmiön aiheuttamaa taajuuden muutosta, se kerää tietoja ilmakehän turbulentsisuudesta, tuulen nopeudesta sekä tuulen suunnasta eri korkeuksilla yleensä 20 - 200 metrin korkeudesta.



Kuva.4 Äänitorvet ja lautaset

Järjestelmää käytetään pääasiassa tuulen nopeuden mittauksiin eri korkeuksilla, mutta sillä pystytään myös mittaamaan termodynaamista rakennetta ilmakehän alemmilla kerroksilla. Järjestelmässä on erityiset äänitorvet, jotka käyttävät tehokkaasti hyödykseen antennilohkoa, kun tuulikenttää mitataan kolmiulotteisesti suurella tarkkuudella. SODAR lähettää lyhyitä voimakkaita äänipulsseja kolmeen eri ilmansuuntaan  $120^\circ$  välein. SODARit toimivat monostaattisesti, jolloin vastaanotin sekä lähetin sijaitsevat samassa laitteessa. Akustinen äänitorvi on suunniteltu suojaamaan kaiutinelementtejä, joihin ääni heijastuu parabolisista lautasista. Tämä auttaa tuulien mittauksissa myös kovalla vesi- tai lumisateella. SODARin etuja on sen kyky mitata useampia korkeuksia samanaikaisesti sekä sen vahvuus tuuligradientin arvioimisessa. Tuuligradientista nähdään, kuinka paljon korkeus kasvattaa tuulen nopeutta. Tuuligradienttia käytetään optimi napakorkeuden arvioimiseen sekä turbiiniin kohdistuvien kuormitusten määrittämiseen. /6, 7/



Kuva.5 AQ500 wind finder

SODAR-laitteisto on yleensä rakennettu peräkärryn päälle, mikä tekee laitteistosta helppokäyttöisen sekä helposti liikuteltavan. Laitteiston etuihin kuuluu sen omavaraisuus, se on helppo asentaa toimintakuntoon, lisäksi sitä on helppo käyttää. Perävauvuun on rakennettu kiinteät antennit, sähköiset yksiköt sekä virtalähde. Äänitutka toimii akuston kautta. Akustot latautuvat aurinkopaneeleilla sekä aggregaatin avulla. Aggregaatti käynnistyy itsestään, kun akuston varaustaso laskee riittävän alhaiselle tasolle. Järjestelmä on luotettava vaativissakin maastoissa, joissa lumi ja jää saattaa aiheuttaa ongelmia muilla mittaustavoilla. Sen toimintavarmuus perustuu hyvin toimivaan lämmitysjärjestelmään. SODAR-mittaukset eivät yksistään ole hyväksyttävä mittaustapa tuulimittauksiin, vaan se toimii mittauksissa mastomittausten rinnalla täydentävänä mittalaitteena. Kun tuulimittauksissa käytetään sekä SODARia sekä mastomittausta, on SODAR sijoitettava vähintään maston pituuden päähän mittaustasta. SODARin sijoittamiseen ei tarvita erillistä rakennuslupaa toisin kuin mastomittauksessa. Laite pitää kovaa ääntä, joten sen aiheuttamat meluhaitat on otettava huomioon. /6, 7/

## 5.2 Mastomittaus

Mastomittauksissa käytettäviä mastomalleja on saatavana kahdenlaisia, putkimastoja sekä ristikkomastoja. Ristikkomastot ovat yleisimmin käytettyjä. Ristikkomastot ovat harustettuja malleja, jolloin mastoilte tehdään perustukset ja masto tuetaan maahan haruksilla. Ristikkomastot voidaan tehdä osista tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää teleskoopista mastoa. Putkimastoa on saatavana käännettävänä mallina, jolloin se kasataan maassa valmiiksi ja käännetään sen jälkeen pystyyn. Maston on oltava riittävän korkea, jotta pystytään mittaamaan tuulia vähintään tuulivoimalan suunnitellulta napakorkeudelta. Nykyään mastojen korkeudet ovat yleensä 120 metriä. Maston suoruus on tarkistettava maston asennuksen jälkeen. Niissä on oltava lentoestevalot sekä lentoestemaalaukset, jotta vältetään mahdollisilta lento-onnettomuuksilta. Tuulenmittauksissa käytetään kuppianometriä, ultraäänianemometriä sekä tuulen suuntaviiriä, jotka asennetaan eri korkeuksille sijoitettaviin puomeihin. Sen lisäksi mastoissa käytetään lämpötila-anturia ja paineanturia. /8, 9, 10/



### 5.2.1 Kuppianemometri

Kuppianemometri on nykyään yleisin ja yksinkertaisin mittalaite määriteltäessä tuulen tai ilmavirtauksen nopeutta. Kuppianemometrin mittauksissa hyödynnetään pyörimisliikettä, joka vaihtelee tuulen nopeuden mukaan. Pyörimisliikkeellä saadaan aikaiseksi mitattava signaali. Pyörimisliikkeen mittaukset voidaan suorittaa fotoelektrisesti mitaamalla tai mekaanisesti laskurilla. Anemometrit on syytä asentaa aina standardien mukaan, joissa määritellään muun muassa asennusetäisyydet häiritsevistä tekijöistä. Antureita on saatavana lämmittimellä tai ilman lämmitintä toimivia malleja. Suomen oloissa lämmittimellä varustettu malli on hyödyllinen, koska se estää anturin jäätyksen. Jäätyminen vaikuttaa oleellisesti mittaustuloksiin. Vaarana on kuppien osittain jäätyminen. /10, 11, 12/



Kuva.6 Kuppianemometri, Thiess First Class Advanced

### 5.2.2 Ultraäänianemometri

Ultraäänianemometrillä pystytään mittaamaan tuulen nopeutta sekä tuulen suuntaa. Sen toiminta perustuu ultraäänipulsseihin, joiden kulkuaika viivettä vertaillaan. Laitteessa on neljä lähetin-vastaanotinparia, joiden välissä pulssien käyttäytymistä analysoidaan. Ultraäänipulssien avulla pystytään määrittelemään tuulen suuntaa, tuulen nopeutta sekä virtuaalista lämpötilaa. Ultraäänianemometrejä on saatavilla yksi, kaksi tai kolmiulotteisella mittauksella. Nopean mittaustiheydensä vuoksi laite on erinomainen mitattaessa puuskittaista tuulta ja tuulen huippuarvoja. Yleensä ultraäänianemometriä käytetään toissijaisena mittalaitteena kuppianemometrinn rinnalla maston huipulla, koska nykyinen standardi ei tunne sitä. Sitä on saatavana myös lämmitettynä mallina, jolloin sen toiminta ei häiriinny lumen tai jään vaikutuksesta. /10, 11, 12/



Kuva.7 Ultraäänianemometri, Thiess Ultrasonic anemometer 2D

### 5.2.3 Tuulen suunta-anturi

Tuuliviiriä käytetään yleisesti mitattaessa tuulen suuntaa. Se on erittäin vanha keksintö mutta edelleen paras tapa mitata tuulen suuntaa. Mittausmastoon asennetaan tuuliviirejä eri puomikorkeuksille, jotta saadaan selvitettyä vallitsevat tuulen suunnat eri korkeuksilta. Tuuliviirissä on leveä takaosa, joka kääntää pienenkin tuulen osuessa siihen tuuliviirin takaosan myötätuuleen. Tuuliviirejä on saatavilla kahdenlaisia, jolloin signaali tuotetaan joko potentiometrillä tai optisella koodilevyllä. Potentiometrillä toimivan tuuliviirin akseli on liitetty magneettisesti potentiometriin, joten siinä ei ole varsinaista kontaktipintaa ja se pyörii jo pienessäkin tuulessa. Tuuliviirejä on saatavana lämmittimellä tai ilman lämmitintä. Lämmittimellä varustetuissa malleissa on laakerilämmitys, joten sen toiminta ei pääse häiriintymään. /10, 11, 12/



Kuva.8 Tuulen suunta-anturi, Thies Wind Direction Sensor

### 5.3 Lidar (Light detection and ranging)

LIDAR on etämittausrjestelmä, jonka toiminta perustuu laseriin. Se lähettää ilmakehään valopulsseja, jotka heijastuvat pienhiukkasista takaisin. Valon kulkuajasta määritellään mittauskorkeus ja tuulen nopeuden määrittämiseen käytetään valon Dopplersiirtymää. LIDAR lähettää kartiomaisesti säteitä eri suuntiin, muodostaen havainnoistaan kolmiulotteista tuulimittausta eri korkeuksilla. Mittauskorkeuden määrittämisessä käytetään myös tietoja ilman lämpötilasta, paineesta sekä kosteudesta. LIDARin avulla pystytään mittaamaan tuulen suuntaa sekä tuulen nopeutta 20 metrin välein eri korkeuksilta aina 500 metriin asti. Jokaiselta mitattavalta korkeudelta tallennetaan 10 minuutin keskiarvot, keskihajonnat sekä tuulikomponenttien ääriarvot. Turbulenttisuutta määriteltäessä käytetään tuulen ääriarvoja ja keskihajontoja. Laitteen etuna on sen keveys. /13/



Kuva.9 LIDAR, Leosphere Windcube V2

## 6 YHTEENVETO

Tuulivoimalan rakentaminen on iso investointi, johon liittyy monta eri vaihetta. Ennen lupien hakemista on syytä ottaa tarkasti selville suunniteltavan alueen soveltuvuus tuulivoimalan rakentamiselle, jolloin vältetään turhilta investoinneilta. Tuulivoimalan suunnitellulla alueella on huomioitava maaston tyypin soveltuvuus voimalalle, ympäristöarvot ja se, ettei ympäröivälle alueelle aiheuteta tarpeetonta häiriötä. Lisäksi kartoitetaan suunnitellun alueen tuuliolot, rakentamisen mahdollisuudet ja liitynnät sähköverkkoon. Esiselvityksen jälkeen voidaan hakea tarvittavat luvat, jotta päästään aloittamaan tuulimittaukset. Tuulimittausten vähimmäisaika on yleensä vuosi, jonka aikana pystytään kartoittamaan alueen tuuliolot, kaikkina vuodenaikoina. Mittalaitteiden huolellinen asentaminen on tärkeässä osassa mittausten onnistumisen kannalta. Myös mittalaitteiden huollot ja kalibroinnit on tärkeää suorittaa ennen tulevia mittauksia, jotta niillä saadaan luotettavia mittaustuloksia. Standardin ohjeita noudattamalla päästään yleensä hyvään lopputulokseen mittauksissa. Mittauslaitteiden toimintakuntoon laittaminen on kiinnostava projekti, josta löytyy yllättävän paljon huomioitavia asioita. Mittalaitteiden asennus, maston pystytys sekä mastossa tehtävät asennustyöt ovat tärkeitä mittausten onnistumiselle.

Aloittaessani tekemään tätä opinnäytetyötä, tuulimittaus oli minulle ennestään tuntematon käsite. Opinnäytetyötä tehdessäni olen oppinut ymmärtämään tuulivoimantuotantoa, tuulimittauksia sekä tuulivoiman tarjoamaa potentiaalia Suomen energiantuotannossa. Tuulimittaukset ovat tärkeitä kannattavan tuulivoimalan rakentamisessa.

## 7 LÄHTEET

- /1/ Suomen tuuliatlas. Viitattu.23.2.2015. [www.tuuliatlas.fi](http://www.tuuliatlas.fi)
- /2/ Suomen tuulivoimayhdistys. Viitattu.18.1.2015. [www.tuulivoimatieto.fi](http://www.tuulivoimatieto.fi)
- /3/ Tuulivoimaopas. Viitattu.27.2.2015. [www.tuulivoimaopas.fi](http://www.tuulivoimaopas.fi)
- /4/ Fingrid Oyj. Viitattu.15.2.2015. [www.fingrid.fi](http://www.fingrid.fi)
- /5/ European wind energy association. Viitattu.1.2.2015. [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
- /6/ Tuulisampo Oy. Viitattu.13.2.2015. [www.tuulisampo.fi](http://www.tuulisampo.fi)
- /7/ AQSsystem Stockholm AB. Viitattu.2.2.2015. [www.aqs.se](http://www.aqs.se)
- /8/ Aerial. Viitattu.5.2.2015. [www.aerial.fi](http://www.aerial.fi)
- /9/ Teräsrakenneyhdistys. Viitattu.3.1.2015. [www.terasrakenneyhdistys.fi](http://www.terasrakenneyhdistys.fi)
- /10/ International standard IEC61400-12-1 Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.2005. International electrotechnical commission.
- /11/ Adolf Thies GmbH & Co. Viitattu.10.2.2015. [www.Thiesclima.com](http://www.Thiesclima.com)
- /12/ Measnet evaluation of site specific wind conditions. Version1. November2009. Viitattu.28.2.2015. [www.measnet.com](http://www.measnet.com)
- /13/ RSC Finland Oy. Viitattu.10.1.2015. [www.rsc-wind.com](http://www.rsc-wind.com)
- /14/ Pori Energia Oy. Viitattu.25.2.2015. [www.porienergia.fi](http://www.porienergia.fi)
- /15/ WWF. Viitattu.18.1.2015. [www.wwf.fi](http://www.wwf.fi)