



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
VASA YRKESHÖGSKOLA  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Otso Karesola

TUULIMITTAUSJÄRJESTELYT TUULI-  
VOIMATUOTANNON KANNATTA-  
VUUDEN ARVIOINNISSA

Tekniikka ja liikenne  
2014

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Otso Karesola
Opinnäytetyön nimi	Tuulimittausjärjestelyt tuulivoimatuotannon kannattavuuden arvioinnissa
Vuosi	2014
Kieli	suomi
Sivumäärä	47
Ohjaaja	Riitta Niemelä

---

Opinnäytetyö tehtiin Lagerwey Development Oy:lle Kauhajoella. Työn aihe on tuulimittaukseen liittyvät käytännön järjestelyt, mittaustekniikka ja työmaakäytännöt. Tuulimittaukset järjestetään tuulivoimatuotannon kannattavuuden ennustamiseksi. Mittaukset toteuttaa Tuulitaito Oy yhdessä maston toimittajan Kapasystems Ky:n kanssa.

Työssä tuulimittauksiin perehdytään kokonaisuutena lupajärjestelyiden, mittauslaitteiden teoreettisen toiminnan, asennuksen ja mittausten luotettavuuteen vaikuttavien ilmiöiden kautta. Lisäksi työssä tutustutaan mastotyömaan käytäntöihin ja työturvallisuuteen. Tuulimittaukset käynnistettiin tammikuussa 2014.

Tuulimittausmaston pystyttäminen vaatii rakennus- tai toimenpideluvan ja lisäksi ilmailulain 165 § mukaisen lentoesteluvan. Tuulen nopeusmittauksen tulokseen vaikuttavia ilmiöitä ovat esimerkiksi tuuliväanne, tuulen varjostuminen ja virtausvääristymä. IEC 61400-12-1 -standardi antaa puitteet mittausinstrumenttien asentamiselle mastorakenteiden aiheuttamien ilmiöiden vaikutusten ehkäisemiseksi.

## ABSTRACT

Author	Otso Karesola
Title	Wind Speed Measurements in Practice
Year	2014
Language	Finnish
Pages	47
Name of Supervisor	Riitta Niemelä

---

The thesis was made for Lagerwey Development Oy in Kauhajoki. The main topic of the thesis is arrangement of wind speed measurements in practice, wind speed measurement technology and worksite practices. Wind speed measurement is done to assess wind energy production profitability. The measurements are carried out by Tuulitaito Oy in co-operation with the mast supplier Kapasystems Ky.

The aim of this study is to become familiar with the wind speed assessment project as a whole: building permits of the mast, the theoretical operation and installation of wind speed measurement instruments, phenomena which introduce uncertainties in the reliability of the measurements, operation and work safety at a mast worksite in practice. The wind speed assessment was launched in January 2014.

In addition to a building permit, installation of a wind monitoring mast requires a flight obstacle permit as specified in the Finnish Aviation Act. Phenomena, such as wind shear, flow distortion and shadowing of instruments introduce uncertainties to measurements. The IEC 61400-12-1 standard defines the requirements of instrumentation installation to prevent the effect of these phenomena.

---

Keywords                      wind speed measurement, met mast, anemometer, flow distortion, wind shear

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
2	LUPAJÄRJESTELYT JA ETUKÄTEISSELVITYKSET.....	9
	2.1 Rakennus- tai toimenpideluvan haku.....	9
	2.2 Lentoestelupa ja lainsäädäntö .....	12
	2.2.1 Sähkön saanti paikalle.....	13
	2.3 Toiminta pohjavesialueella .....	14
3	TUULEN MITTAUSLAITTEISTO .....	15
	3.1 Masto.....	15
	3.2 Anemometrit .....	16
	3.2.1 Kuppianemometri.....	16
	3.2.2 Propellianemometri .....	18
	3.2.3 Ultraäänianemometri.....	18
	3.3 Tuulen suuntasensori .....	19
	3.4 Ilman lämpötila- ja kosteusmittari .....	21
	3.5 Tiedon tallennuslaitteisto .....	22
	3.6 Etämittaustilteisto.....	23
	3.6.1 SODAR (Sound Detection and Ranging) .....	23
	3.6.2 LIDAR (Light Detection and Ranging) .....	24
4	TUULEN MITTAUKSEEN VAIKUTTAVAT ILMIÖT.....	26
	4.1 Tuuliväanne, tuuligradietti .....	26
	4.2 Virtausvääristymä .....	27
	4.3 Varjostus .....	29
5	MASTON JA INSTRUMENTTIEN ASENNUS .....	32
	5.1 Maston asennus .....	32
	5.2 Instrumenttien tuenta ja puomit .....	33
6	MASTOTYÖMAA.....	37
	6.1 Mastotyön vastuut.....	37
	6.1.1 Mastotyöntekijä.....	37

6.2 Maston nostaminen .....	38
6.3 Maston perustus ja kiinnitys .....	39
6.4 Maston suojaus.....	40
7 YHTEENVETO .....	43
LÄHTEET.....	45

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	Asemapiirros maston sijaintipaikalta.	s. 11
<b>Kuva 2.</b>	Yleiskuva lentoliikenteen korkeusrajoituksista /5/.	s. 13
<b>Kuva 3.</b>	Kapasystems Ky:n 120 metrin ristikkomasto.	s. 15
<b>Kuva 4.</b>	Thies Wind Transmitter First Class Advanced –kuppianemometri /13/.	s. 17
<b>Kuva 5.</b>	Propellianemometrin kolmekomponenttinen asennus /12, 79/.	s. 18
<b>Kuva 6.</b>	Thies Ultrasonic Anemometer 2D /13/.	s. 19
<b>Kuva 7.</b>	Thies Wind Direction Sensor First Class /13/.	s. 20
<b>Kuva 8.</b>	Thies Hygro-Thermo Transmitter Compact ja sääsuoja /13/.	s. 21
<b>Kuva 9.</b>	Wilmers Blueberry NDL 485 -dataloggeri /14/.	s. 22
<b>Kuva 10.</b>	AQSystems Wind Finder AQ500:n keilat /24/.	s. 23
<b>Kuva 11.</b>	AQSystems Wind Finder AQ500 /24/.	s. 24
<b>Kuva 12.</b>	LIDARin toimintaperiaate /12, 82/.	s. 25
<b>Kuva 13.</b>	Tuulennopeuden vaihtelu eri korkeuksilla /16/.	s. 26
<b>Kuva 14.</b>	Lapojen aksiaalinen kuormitus 9 m/s tuulessa tuuligradientilla 0,4 /17/.	s. 27
<b>Kuva 15.</b>	Mallinnus paikallisesta tuulen virtausnopeudesta kolmionmuotoisen ristikkomaston ympärillä /25, 72/.	s. 28
<b>Kuva 16.</b>	Varjostusesimerkin anemometrien asennus /23, 5/.	s. 29
<b>Kuva 17.</b>	Anemometriin mittausten välinen suhde 10 minuutin keskiarvolla /23, 7/.	s. 30
<b>Kuva 18.</b>	Mittausmaston esimerkkiasennus /11, 6–7/.	s. 32

<b>Kuva 19.</b>	IEC-61400-12-1 -standardin mukainen anemometri kiinnitys /25, 69/.	s. 33
<b>Kuva 20.</b>	Esimerkki huonosta anemometri asettelusta /18, 23/.	s. 34
<b>Kuva 21.</b>	Esimerkki hyvästä anemometri ja laitteiston asettelusta /18, 22/.	s. 35
<b>Kuva 22.</b>	Maston nosto-operaatio.	s. 38
<b>Kuva 23.</b>	Harusvaijeri kiristystä vaille.	s. 39
<b>Kuva 24.</b>	Ukkosenjohdatin ja ultraäänianemometri maston huipulla.	s. 40
<b>Kuva 25.</b>	Harusten huomioväritys.	s. 41
<b>Kuva 26.</b>	Obelux infrapunalentoestevalo.	s. 41

# 1 JOHDANTO

Ennen tuulipuistoprojektin aloittamista on tehtävä tarpeeksi kattavat tuulimittaukset tuulituotannon ennustamiseksi. Tuulivoimarakentamisessa ymmärrettävästi mikään ei ole yhtä tärkeää kuin luotettava tieto siitä, että tuulta on todella saatavilla tuotantotavoitteiden täyttämiseksi. Tuulimittauksien perusteella saatava tuotantoarvio on rahoitusneuvotteluissa yksi suurimmista investointipäätöksen syntyymiseen vaikuttavista seikoista. Tuulimittauksista saatava luotettava, standardin mukainen ja vertailukelpoinen tieto on siis ehdoton edellytys koko hankkeen toteutumiselle.

Opinnäytetyöni aihe on Lagerwey Development Oy:n tuulimittausten käytännön järjesteleminen Isojoen Rimpikankaan ja Jalasjärven Ilvesnevan alueella sekä mittauksessa käytettävään laitteistoon ja sen käyttökuntoon asentamiseen perehtyminen. Mittausmaston lupajärjestelyt, teoreettinen perehtyminen tuulen mittauslaitteistoon, mastotyömaan käytäntöihin ja työturvallisuuteen tutustuminen ovat ympäristöinsinöörin toimenkuvaan sopivia työskentelyn kohteita. Aihe valittiin yhteistyössä toimitusjohtaja Jaakko Leppisen kanssa. Työn päätavoite on tutustua tuulivoima-alan pääpiirteisiin ja toimintaedellytyksiin heti projektin alusta asti. Koko tuulimittausten aloittamisprosessi on kiinnostava aihe, sillä tuulimittausmaston toimintakuntoon saamisessa on pienoiskoossa samoja piirteitä kuin kokonaisen tuulivoimalan pystyttämässä. Kaikki maston lupamenettelyt, instrumenttien asennus, maston pystyttäminen ja ihmisten suorittamat työt mastossa heijastuvat tuulimittausmastojen lisäksi myös todelliseen tuulivoimarakentamiseen.

Lagerwey on Hollannissa 1979 perustettu tuuliturbiinivalmistajien pioneereihin kuuluva yritys. Lagerwey Development Oy on tuulivoimapuistojen kehitykseen, rahoitusneuvotteluihin ja kumppaniyritysten kanssa yhteistyöhön keskittyvä yritys. Lagerwey Finland on Kaskisten tuulivoima Oy:n kanssa yhteistyönä Suomeen perustettu yhtiö, jonka tarkoitus on aloittaa Kauhajoella myöhemmin mm. voimaloiden kokoonpano sekä tuuliturbiinien myynti ja huolto /1/.



## 2 LUPAJÄRJESTELYT JA ETUKÄTEISSELVITYKSET

Rakennushankkeen toteuttaminen vaatii joko rakennusluvan tai toimenpideluvan. Maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999, MRL) määritelty kaava- ja lupajärjestelmä asettaa vaatimukset kaikelle rakentamiselle. Mastoihin sovelletaan täysin samoja säädöksiä kuin muuhunkin rakentamiseen. Suurehkoja mastoja, jotka vaikuttavat maisemaan tai ympäristöön merkittävästi, on maankäyttö- ja rakennuslain 113§ mukaan pidettävä rakennuksina. Tällöin rakentaminen myös edellyttää rakennuslupaa. Masto, jota ei pidetä rakennuksena, tarvitsee maankäyttö- ja rakennusasetuksen 62§ mukaisen toimenpideluvan. Luonnonsuojelulaki ja muinaismuistolaki asettavat omat rajoituksensa mastojen asettamiselle /2/.

Rakennus- tai toimenpideluvan tarpeen ratkaisee kunnan rakennusvalvontaviranomainen. Rakennus- tai toimenpideluvan käyttöä ratkaistaessa maston korkeuden ja sen rakenteellisten ominaisuuksien vaikutusten tarkastelun ohella myös ympäristölliset vaatimukset vaikuttavat luvan laatuun. Alueella, joka vaatii tarkempaa viranomaisvalvontaa ympäristötekijöiden vuoksi, on mahdollista että rakennusluvan tarve koskee vähäisempää mastoa /2/.

### 2.1 Rakennus- tai toimenpideluvan haku

Toimin luvittamisprosessissa Lagerwey Development Oy:n asiamiehenä valmistellen lupaan tarvittavia asiakirjoja. Rakennus- tai toimenpideluvan haku tehdään kunnan rakennusvalvontaviranomaiselle lähetettävällä lomakkeella liitteineen. Itse hakemusprosessi on toimenpide- ja rakennusluvan välillä samankaltainen. Lupaan tarvittavat asiakirjat ovat joka kunnassa pääpiirteittäin samat, mutta kuntakohtaisia eroja on. Tässä työssä käsitellään kaikki asiakirjat joita tässä projektissa on tarvittu lupien hankkimiseen.

- Rakennuslupahakemus tai toimenpidelupahakemus
- Rakennustyön vastaavan työnjohtajan hakemus
- Selvitys rakennuspaikan omistus- tai hallintaoikeudesta
- Pääpiirustukset kohteen rakenteista

- Asemapiirros
- Karttaote sijaintipaikasta
- Naapurin kuulemislausunto
- Lentoestelupa

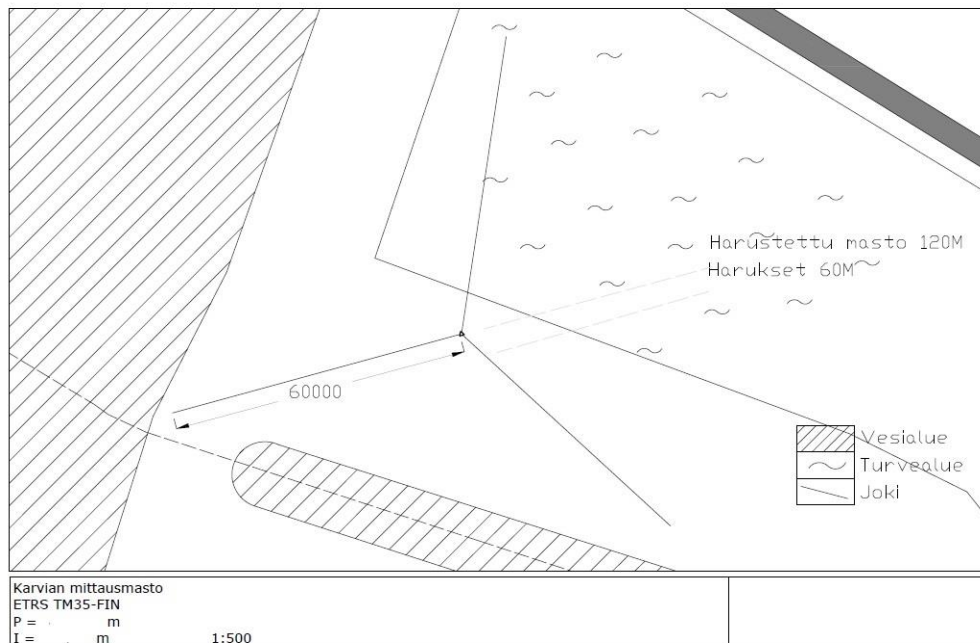
Rakennustyömaalla täytyy olla **vastaava työnjohtaja**, jonka hankkii rakennushankkeeseen ryhtyjä. Tässä projektissa vastaavana työnjohtajana toimi maston toimittaja Touko Kapanen Kapasystems Ky:ltä.

**Selvityksenä rakennuspaikan omistus-, hallinta-, tai käyttöoikeudesta** toimitetaan esimerkiksi selvitys maanomistajasta sekä kopio maanvuokrasopimuksesta tai kauppakirjasta.

**Pääpiirustukset** kohteen rakenteista, jotka ovat asiantuntijan laatimat, on toimitettava kahtena kappaleena Suomen rakentamismääräyskokoelma A2:n mukaisesti /3/.

**Asemapiirros**, jonka mittakaava on 1:200 tai 1:500. Piirustuksessa on oltava näkyvillä rakennuspaikan tai tontin tiedot /3/.

Asemapiirroksen luomiseen käytettiin AutoCAD Architecture -ohjelmistoa. Piirroksen pohjana käytettiin Maanmittauslaitoksen rasterimuotoista (TIFF) peruskartta-aineistoa sekä MML:n ortokuvia. Näiden aineistojen yhdistelmällä piirroksen saavutettiin asemapiirroksen tarkoituksenmukainen tarkkuus. Maanmittauslaitoksen peruskarttarasterin sijaintitietojen tarkkuus vastaa mittakaavaa 1:10 000 /4/. Ortokuvien sijaintitarkkuus on 0,5-2 m ja pikselikoko 0,5m /29/.



**Kuva 1.** Asemapiirros maston sijaintipaikalta.

**Karttaotteen** pohjana voidaan käyttää esim. Maanmittauslaitoksen Avoimien aineistojen tiedostopalvelusta saatavaa rasterimuotoisia maastokarttaotetta. Karttaotteen tarkoitus on osoittaa selkeästi rakennettavan kohteen sijaintipaikka.

**Naapurin kuuleminen** voi olla tarpeen lupa-hakemuksen yhteydessä. Rakennuslupahakemuksen vireille laittamisesta täytyy ilmoittaa naapurille, ellei se ole sijainnin tai kaavan sisällön huomioon ottaen naapurin edun kannalta tarpeetonta. Maanrakennuslain 133 §:ssa naapuriksi määritellään viereisen tai vastapäätä olevan kiinteistön tai muun alueen omistaja /6/. Naapurin kuulemisen tarve tarkistetaan kunnasta ennen luvan hakua. Rakennustarkastajalta saa tiedon naapureista, joita hankkeesta tiedottaminen koskee /7/.

Naapurin kuulemiseen voidaan käyttää kaikkiin kuntiin sopivaa ilmoituslomaketta naapurin rakennushankkeesta ja hakemuksen vireilletulosta /7/. Naapurille esite-

tään tarpeelliset hakemusasiakirjat ja suunnitelmat, kuten asemapiirustus ja pääpiirustukset. Naapuri voi halutessaan antaa huomautuksen rakennushankkeesta.

## 2.2 Lentoestelupa ja lainsäädäntö

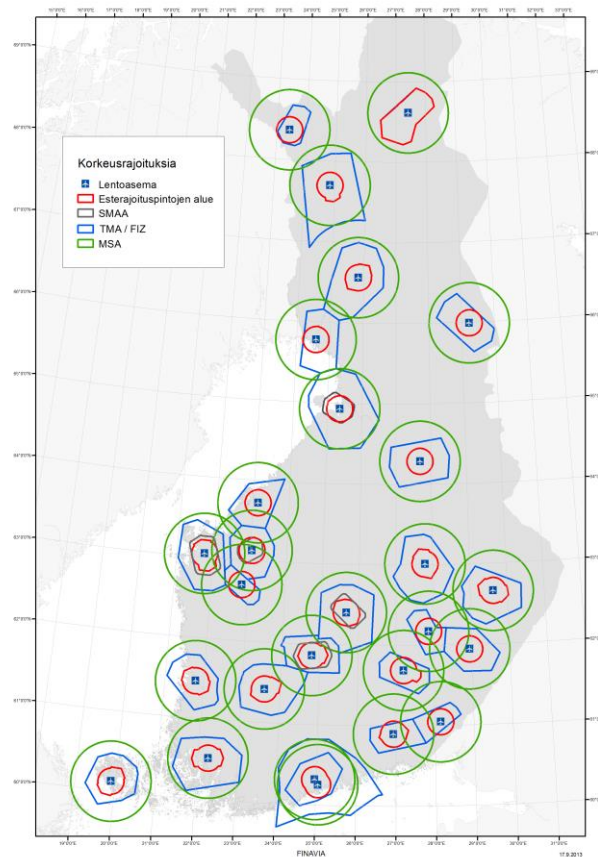
Ilmailulain (1194/2009) 165 § mukaan korkeita rakennuksia, rakennelmia ja laitteita, joihin myös mastot kuuluvat, ei saa asettaa siten että niitä voidaan erehdyksessä pitää ilmailua palvelevana laitteena tai merkinä. Mastot ja muut rakennelmat eivät saa häiritä lentoliikennettä tai ilmailua palvelevia laitteita, eikä muuten aiheuttaa vaaraa lentoturvallisuudelle.

”... sekaannusta, häiriötä tai vaaraa mahdollisesti aiheuttavan laitteen, rakennuksen, rakennelman tai merkin asettamiseen tarvitaan lentoestelupa, jos este:

- 1) ulottuu yli 10 metriä maanpinnasta ja sijaitsee lentopaikan, kevytlentopaikan tai varalaskupaikan kiitotien ympärillä olevan suorakaiteen sisällä, jonka pitkät sivut ovat 500 metrin etäisyydellä kiitotien keskilinjasta ja lyhyet sivut 2 500 metrin etäisyydellä kiitotien kynnyksistä ulospäin;
- 2) ulottuu yli 30 metriä maanpinnasta ja sijaitsee 1 kohdassa tarkoitetun alueen ulkopuolella mutta kuitenkin enintään 45 kilometrin etäisyydellä 81 §:ssä tarkoitetun lentoaseman mittapisteestä;
- 3) ulottuu yli 30 metriä maanpinnasta ja sijaitsee 1 kohdassa tarkoitetun alueen ulkopuolelta, mutta kuitenkin enintään 10 kilometrin etäisyydellä varalaskupaikan tai muun lentopaikan kuin 81 §:ssä tarkoitetun lentoaseman mittapisteestä; tai
- 4) ulottuu yli 60 metriä maanpinnasta ja sijaitsee 1–3 kohdassa tarkoitettujen alueiden ulkopuolella.” /8/

Lentoestelupaa haetaan liikenteen turvallisuusvirasto Trafilta. Luvan hakemiseen tarvitaan ilmaliikennepalvelujen tarjoajan, Finavia Oyj:n lausunto. Lausuntopyynnössä määritellään kohteen tyyppi ja esteen tilapäisyys, (masto, nosturi, tuulivoimala jne.) toiminta-aika, sijainti sekä esteen huippukorkeus maan- sekä merenpinnasta. Lisäksi hakemuksen liitteenä on toimitettava karttaote johon esteen sijaintipaikka on selkeästi merkitty.

Jos lentoturvallisuus ei vaarannu, Trafi voi myöntää luvan esteen asettamiselle. Lupa on myönnettävä, jos sen epääminen tuottaisi kohtuutonta haittaa maanomistajalle tai muulle erityiselle kohteen oikeudenhaltijalle. Lupaa käsiteltäessä esteestä lentoliikenteelle aiheutuvaa haittaa verrataan oikeudenhaltijalle syntyvään haittaan, jonka luvan myöntämättä jättäminen aiheuttaa /8/.



**Kuva 2.** Yleiskuva lentoliikenteen korkeusrajoituksista /5/.

Finavian laatimaa ESRI shapefile -muotoista paikkatietoaineistoa käytetään jo hankkeiden suunnitteluvaiheessa. Aineiston avulla voidaan suunnittelusta poistaa heti sellaiset paikat, joihin korkeaa lentoestettä ei tulla sallimaan. Aineiston perusteella ei kuitenkaan voida päätellä lentoestettä automaattisesti sallittavan.

### 2.2.1 Sähkön saanti paikalle

Maston rakennuspaikalle on järjestettävä mielellään kolmivaiheinen sähkönsyöttö. Mittausten aikana sähköä tarvitaan tuulimittariston käyttöön, anemometrien läm-

imitykseen ja maston lentoestevaloja varten /20/. Maston laitteisto käyttää talven huippuaikoina noin 10 kW sähköä, joten 3 x 25 A on tyypillinen asennettava liittymä. Tällöin liittymä kestää 17 kW kuorman. ( $3 \times 25 \text{ A} \times 230\text{V} = 17\,000 \text{ W}$ )

20 kV verkkoon liittymisen hinta vaihtelee paikallisen operaattorin ja sähköverkon vyöhykkeiden mukaan. Mahdollisuuksien mukaan maston paikka kannattaa valita siten, että paikalla on valmiiksi sähköliittymä. Jos verkkoon on liitettävä itse, liittymishinta on edullisin kun muuntamolle on suoraan mitattuna alle 300 metriä. Edullisimmillaan liittyminen verkkoon maksaa Fortumin hinnaston mukaan alle 3000 euroa /9/.

### **2.3 Toiminta pohjavesialueella**

Ilvesnevan alueelle pystytettävä masto sijaitsee Kihlakunnankankaan 1-luokan pohjavesialueella vedenottamon läheisyydessä, eli se sijoittuu pohjavedenottamon lähisuojavyöhykkeelle /27; 28/. Tuulimittausmaston toiminnasta ei aiheudu vaaraa pohjavedelle sillä laitteiden toiminta ei edellytä vaarallisten aineiden käyttöä. Täten alueella ei myöskään varastoida ympäristölle ongelmallisia aineita. Käytettävien työkoneiden öljyjen on oltava biohajoavia. On myös pidettävä huoli, että työkoneista ei vuoda mitään maaperään.

Pohjaveden huomiointi on kuitenkin tärkeää maston asennusvaiheessa. Rakennusluvan hakijan on selvitettävä pohjaveden korkein pinta rakennusalueella /27/. Pohjaveden korkeustiedot pyydettiin Etelä-Pohjanmaan ELY-keskukselta. Saadun pohjavesikartan mukaan pohjaveden pinta on alle 5 metriä maanpinnasta. Jalasjärven ympäristösihteerin lausunnon mukaan maaperään ei saa porata yli metrin syvyyteen ulottuvia pistoja. Yleensä maston harusankkurit kaivetaan maahan routarajan alapuolelle, mutta pohjavesialueella näin ei tehdä. Haruksen kiinnitetään paikalta löytyviin tai mukana tuotaviin luonnonkiviin kaivamatta niitä erikseen maahan.

### 3 TUULEN MITTAUSLAITTEISTO

Tuulimittauksessa käytetyimmät laitteet ovat kuppi-, propelli- ja äänianemometrit, äänipulssin avulla toimiva SODAR-laitteisto sekä optinen kaukokartoituslaite (LIDAR) /10/.

#### 3.1 Masto



**Kuva 3.** Kapasystems Ky:n 120 metrin ristikkomasto.

Tyypillisiä tornivaihtoehtoja on kaksi: ristikkomasto (lattice) ja putkimasto (tubular). Molempia mastotyyppejä on saatavilla ylös käännettävänä (tilt-up), teleskooppina tai kokonaisena mallina. Mallit voivat olla harustettuja taikka maahan perustettuja. Käännettävä harustettu putkimasto on kätevä asennuksen helppouden vuoksi. Torni voidaan kasata ja instrumentit asentaa ja huoltaa maantasossa. Lisäksi torni ei tarvitse maaperustusta ja on suhteellisen edullinen.

Kuvassa on esitetty tässä mittauksessa käytetty Kapasystems'in 120 metriä korkea ristikkomasto. Masto on kolmesta osasta rakennettu teleskooppimasto.

Maston tulee olla tarpeeksi korkea, jotta tuulia voidaan mitata turbiinin suunnitellulla korkeudella. Sen on kestettävä paikalle odotetut tuuli-, jää- ja lumiolosuhteet. Tuulen vuoksi maston on oltava tukeva heilumisen estämiseksi. Harukset kiinnitetään ankkureilla, jotka valitaan paikan maatyypille sopivaksi /11/.

## **3.2 Anemometrit**

Mekaaninen anemometri tuottaa tietoa mittauslaitteen ohi kulkeneen tuulen matkasta. Tuulennopeus on siis kulkeneen tuulen matkan ja ajan keskiarvo. Tämän kaltainen mittauslaite ei tarvitse erillistä virtalähdettä /12, 77/.

### **3.2.1 Kuppianemometri**

Kuppianemometri käyttää hyväkseen pyörimisliikettä, joka vaihtelee tuulennopeuden mukaan. Pyörimisliike tuottaa mitattavan signaalin. Pyörimisliikkeen nopeutta voidaan mitata joko mekaanisella laskurilla joka rekisteröi kierrosten määrän, mittaamalla jännitteen muutosta (tasa- tai vaihtovirtaa) tai fotoelektristä vaihtelua mittaamalla /12, 77/ .

Elektroninen kuppianemometri mittaa välitöntä tuulennopeutta. Pyörivä kara on yhdistetty tasa- tai vaihtovirtageneraattoriin jonka ulostulo muunnetaan tuulennopeudeksi. Fotoelektrisessä vaihteessa on enintään 120-rakoinen reikälevy ja valo-kenno. Levyn jaksottainen liike luo pulsseja kupin joka pyörähdyksellä /12, 78/.

Kuppianemometrin vaste ja tarkkuus määrittyvät laitteen painon, mittojen ja sisäisen kitkan perusteella. Näiden parametrien muuttuessa instrumentin vaste muuttuu. Jos tahdotaan mitata turbulenssia, tarvitaan pieni, kevyt ja pienikitkainen sensori. Kaikista parasvasteisimmilla kupeilla on noin 1 metrin matkavakio. Matkavakio tarkoittaa sitä ilmamäärää metreissä, jonka on liikuttava anemometrin ohi, jotta mittari vastaa ja näyttää 63.2 % askeleen muutoksen tuulennopeudessa /12, 78/.

Kun turbulenssidataa ei tarvita, kupit voivat olla isompia ja raskaampia 2-5 metrin matkavakiolla. Suuremmilla laitteilla saadaan myös käyttökelpoista dataa tuottava



näytteenottoväli suuremmaksi, yhteen kertaan muutaman sekunnin välein. Kuppianemometrien tarkkuus tuulitunnelitestien perusteella on n.  $\pm 2\%$  /12, 78/.

Ympäristötekijät, kuten jää ja hiekka vaikuttavat kuppianemometrien luotettavuuteen. Anemometrin jäätyminen aiheuttaa vääristyneitä mittauksia ja lopulta voi pysäyttää mittarin kokonaan. Lämmitetty kuppianemometri vaatii enemmän sähköä, mutta eliminoi ongelman tehokkaasti. Hiekka taas juuttuu laakereihin aiheuttaen kitkaa ja kulumaa /12, 78/.



**Kuva 4.** Thies Wind Transmitter First Class Advanced -kuppianemometri /13/.

Mittauksessa käytetty Thies:n kuppianemometri on kalibroitu MEASNET:n IEC 61400-12-1 -standardiin perustuvan ohjeen mukaisesti akkreditoitussa kalibrointilaitoksessa. Laitteen fotoelektrinen skannaus muunnetaan kanttiaaltosignaalksi. Kanttiaaltosignaalin taajuus on verrannollinen pyörimisnopeuteen nähden. Huomioitava seikka mittarissa on se, että se toimii hyvin vaihtelevalla 3,3V – 42V tasavirralla, mikä tekee siitä hyvin mukautuvan. Anemometriä on saatavana lämmitettynä mallina, jolloin laakeri ja liikkuvat osat tai kupit eivät pääse jäätymään /13/.

### 3.2.2 Propellianemometri

Propellianemometrissa on polystyreenivaahdosta tai polypropeeneista valmistettu potkuri, joka välittää voiman akselin avulla vaihto- tai yleisemmälle tasavirta-generaattorille tai optiselle katkojalle joka tuottaa pulssisignaalia. Malleilla, joita käytetään tuulivoimatarkoituksiin, on nopea vaste. Ne käyttäytyvät lineaarisesti muuttuvissa tuuliolosuhteissa. Yleisesti potkuri pidetään tuulensuuntaisena tuuliviirin avulla, samalla tuulen suunnasta voidaan kerätä dataa. Menetelmän tarkkuus on sama kuin kuppianemometrillä,  $\pm 2\%$ . Propellianemometrillä voidaan mitata myös tuulen pystykomponenttia. Kuvassa näkyy yleinen kolmekomponenttinen asennus. Laite vastaa parhaiten akselinsuuntaiseen tuuleen, mutta huonosti kohtisuorasti akselia vastaan tulevaan tuuleen  $1/12$ ,  $79\%$ . Tässä projektissa propellianemometriä ei käytetä.



**Kuva 5.** Propellianemometrin kolmekomponenttinen asennus  $1/12$ ,  $79\%$ .

### 3.2.3 Ultraäänianemometri

Ultraäänianemometri käyttää ääniaaltoja tuulenopeuden ja suunnan määrittämiseen. Kahden muuntajan välissä lennätetään ultraäänipulsseja ja pulssien lentoajasta määritetään tuulen voimakkuus. Muuntajaparilla voidaan mitata yksi-, kaksi- tai kolmiulotteista virtausta. Spatiaalinen resoluutio, eli kuinka lähellä toisiaan

olevia arvoja voidaan erotella, määrittäyty muuntajien välin perusteella. Ultraäänianemometrejä, joilla on hieno temporaalinen resoluutio (kuinka usein sensori voi saada haluttua tietoa), voidaan käyttää turbulenssin mittaukseen /12, 78/.



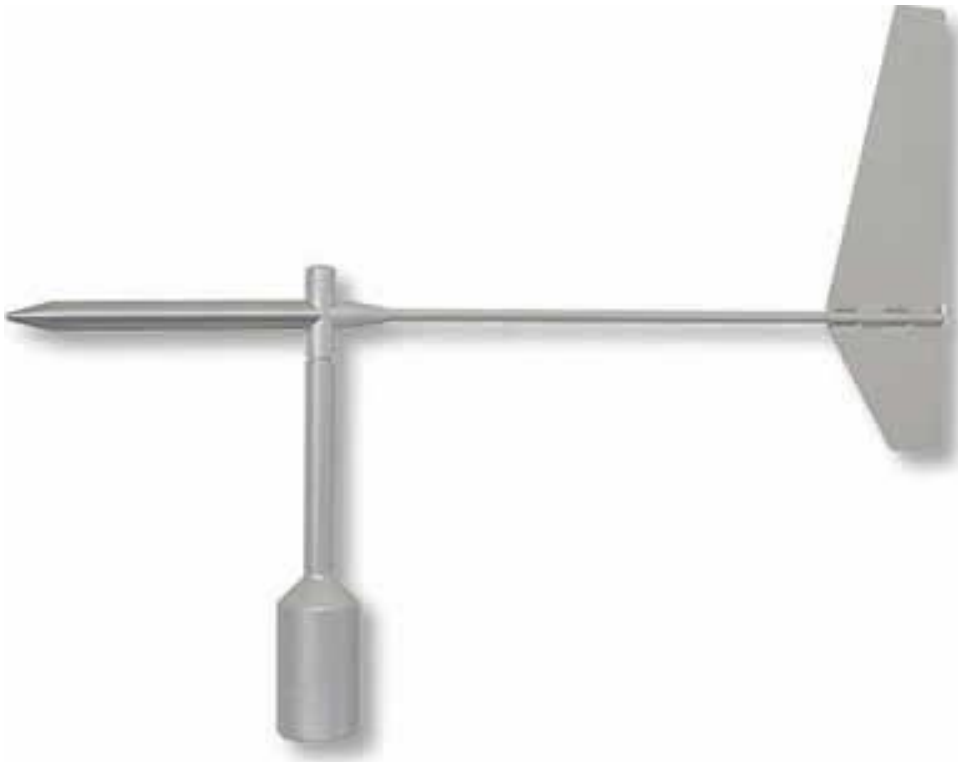
**Kuva 6.** Thies Ultrasonic Anemometer 2D /13/.

Kuvassa on projektissa käytetty ultraäänianemometri, jota käytetään toissijaisena mittarina maston huipulla. Jos kuppianemometriä mittausta häiriintyy, käytetään varalla ultraäänianemometriä. Thies:n 2D-mittari koostuu kahdesta ultraäänimuuntajaparista, jotka ovat toisiaan vastapäätä 200 mm etäisyydellä. Muuntajat toimivat sekä akustisina lähettiminä sekä vastaanottimina. Näillä vastaanotetaan tuulen nopeuden horisontaalikomponenttia sekä virtuaalista lämpötilaa. Koska ultraäänianemometrin mittaustiheys on niinkin nopea kuin 400 Hz, mittausta on inertiaton. Tämän vuoksi laite on ihanteellinen puuskittaisen tuulen ja huippuarvojen mittaamiseen. Ultraäänianemometri on kuppiversiosta poiketen RS485-liitäntäinen /13/. Kuppianemometrillä puuskittaisen tuulen mittausta on hankalampaa sen hitauden vuoksi. Ultraäänianemometrissä sen sijaan mittausta ei käytetä liikkuvia osia, joilla olisi tuulen vastusta, jolloin mittausta on välitön.

### 3.3 Tuulen suuntasensori

Tuulen suuntaa mitataan yleisesti tuuliviirillä. Tavanomaisessa viirissä on leveä perä, johon tuuli tarttuu. Etupäässä on vastapaino, joka tasapainottaa laitetta viirin

ja laitteen liitoskohdassa. Laite on laakeroitu kitkan pienentämiseksi, jolloin viiri saadaan liikkumaan pienellä voimalla /12, 81-82/. Kuvassa näkyvässä Thies:n laitteessa laitteen toimintakynnys on 0,5 m/s /13/.



**Kuva 7.** Thies Wind Direction Sensor First Class /13/.

Tuuliviirit tuottavat signaalin yleensä kontaktinsulkimella tai potentiometrillä. Potentiometrillä toimivat laitteet ovat kontaktinsuljinlaitteita parempia, mutta myös kalliimpia /12, 82/. Mittauksessa käytetty Thies:n laite on potentiometritoimintainen. Viirin akseli on yhteen liitetty kontaktittomasti ja magneettisesti potentiometrin akseliin, jolloin viirin liikekitka on pieni. Laitteen laakerin ja kääntyvien osien jäätyksen ehkäisemiseksi laite on sähkölämmitetty /13/.

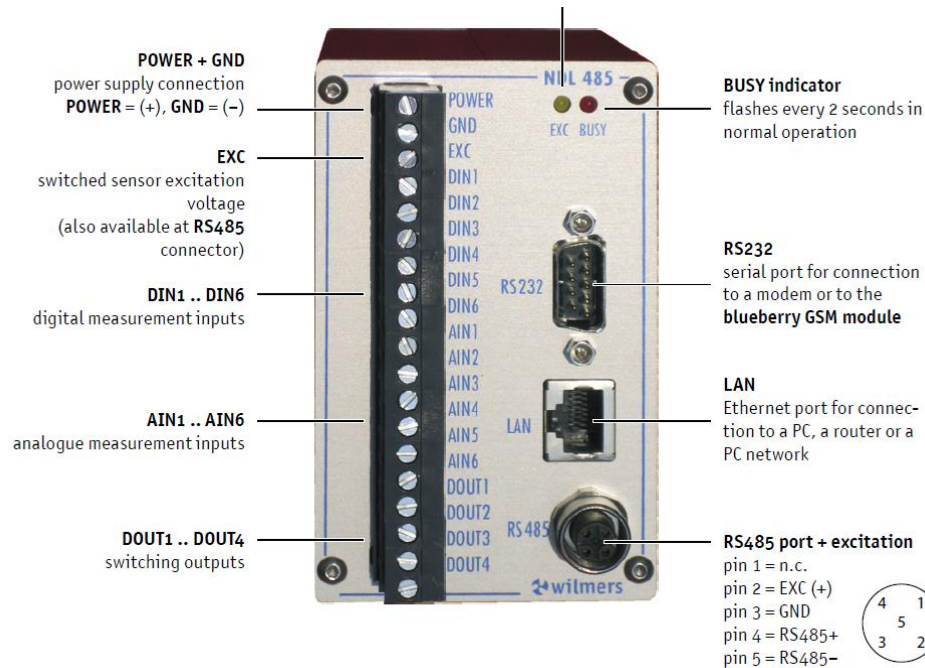
### 3.4 Ilman lämpötila- ja kosteusmittari



**Kuva 8.** Thies Hygro-Thermo Transmitter Compact ja sääsuoja /13/.

Kuvassa esitetty Thies:n lämpötila- ja ilmankosteusmittari koostuu kapasitiivisesta ilmankosteuselementistä ja resistanssilämpömittarista. Lämpömittarissa on platinasta valmistettu resistanssikäämi, jonka vastus muuttuu lämpötilan mukaan. Mittari on valmistettu IEC 751 -standardin mukaan, joten 0 celsiusasteessa vastuksen resistanssi on 100  $\Omega$ . Mittarityyppi Pt 100 saa nimensä tästä /13/. Kun mittaria käytetään ulkotiloissa, suositellaan mittarin suojana käytettävän siihen tarkoitettua valkoista suojakupua, joka on esitetty kuvassa oikealla. Kupu suojaa mittaria tehokkaasti lämpösäteilyn ja säätilojen aiheuttamilta virheiltä /13/.

### 3.5 Tiedon tallennuslaitteisto



**Kuva 9.** Wilmers Blueberry NDL 485 -dataloggeri /14/.

Maantasossa sijaitseva Blueberry NDL 485 on modulaarinen dataloggeri sekä ohjausjärjestelmä. Järjestelmässä on kuusi digitaalista sekä analogista mittaussisään- tuloa joihin voi liittää mittareita jotka syöttävät pulssi-, jännite- tai virtamuodossa olevia signaaleja. Ultraäänianemometri liitetään viisinapaiseen RS485-väylään. RS485-väylää on mahdollisuus käyttää myös järjestelmän laajentamiseen. Ohjaus- järjestelmässä on neljä digitaalista ulosmenoa, joilla voidaan ohjata laitteita ja ak- tivoida hälytyksiä /14/.

Dataloggeriin saadaan etäyhteys internet-selaimen kautta GSM/GPRS-moduulilla. Etäyhteyden toiminta vaatii langattoman internet-yhteyden, jossa sisäänpääsy lait- teeseen ulkoapäin on mahdollinen /14/. Suomessa ainakin Sonera tarjoaa tähän sopivaa OpenGate -palvelua.

## 3.6 Etämittausteisto

### 3.6.1 SODAR (Sound Detection and Ranging)

SODAR-laitteisto on Doppler-ilmiöön perustuva äänitutka. Se luokitellaan kaukomittausjärjestelmäksi, koska se ei tarvitse paikallista sensoria mittauspisteessä. SODAR perustuu akustiseen takaisinsirontaan. Se lähettää äänipulsseja pystysuunnassa sekä pienessä kulmassa pystysuorasta katsoen. Luodakseen kolmiulotteisen mittauksen tuulen voimakkuudesta laite vaatii vähintään kolme pystykeilaa eri suuntiin /12, 80/.



**Kuva 10.** AQSystems Wind Finder AQ500:n keilat /24/.

Ilmassa olevat partikkelit ja ilman taitekertoimen fluktuaatio takaisinsirottelee ilmaan lähetettyä äänipulsseja. Fluktuaatio voi johtua tuuliväänteestä, josta on kerrottu tarkemmin luvussa 4.1, tai esim. ilman lämpötila- ja kosteusgradienista. SODAR kerää takaisin maahan sirotellun äänen mikrofoneilla. Yleisesti kaupalliset SODARit ovat monostaattisia, eli lähetin ja vastaanotin sijaitsevat samassa laitteessa. Äänen lähetys- ja vastaanottovälistä määritellään signaalin korkeus. Takaisintulevasta äänentaajuuden muutoksesta tuulen nopeus. Matalat, alle 4 m/s ja korkeat, yli 18 m/s tuulet ja muut ilmastoilmiöt voivat aiheuttaa vaikeuksia SODAR-mittauksessa /12, 80/.



**Kuva 11.** AQSystems Wind Finder AQ500 /24/.

Suosittu AQ500 -SODAR-laitteisto on perävaunuun rakennettu liikkuva laite. Liikkuvuus onkin laitteen parhaita etuja, sillä voidaan mitata lyhyitä ja pitkiä jaksoja helposti. Se myös mahdollistaa mittaukset monissa kohteissa, jossa mastomittaus ei ole mahdollista.

Verrattuna muuhun SODARin käyttöön, tuulivoimatarkoituksissa SODARIin liitetty epävarmuutta mittaustietojen luotettavuuden ja oikeellisuuden suhteen. Epävarmuustekijöitä voidaan karsia kalibraatiolla. SODAR-mittalaitteet kalibroidaan hyväksytyllä menetelmällä joko tuulitunnelissa tai kalibroituja mittalaitetta vastaan /12, 80/.

Mittausmastoon verraten SODAR kalibroidaan asettamalla se noin maston etäisyydelle mastosta, ja samaan aikaan mitataan 10 minuutin mittausjaksoja. SODAR mittaa tuulia 20–200 m korkeuksilla. Tämän mittaustavan vahvuus on tuuligradientin arvioinnissa. Tuuligradientin avulla saadaan tietoon miten paljon korkeus lisää tuulen nopeutta /15/.

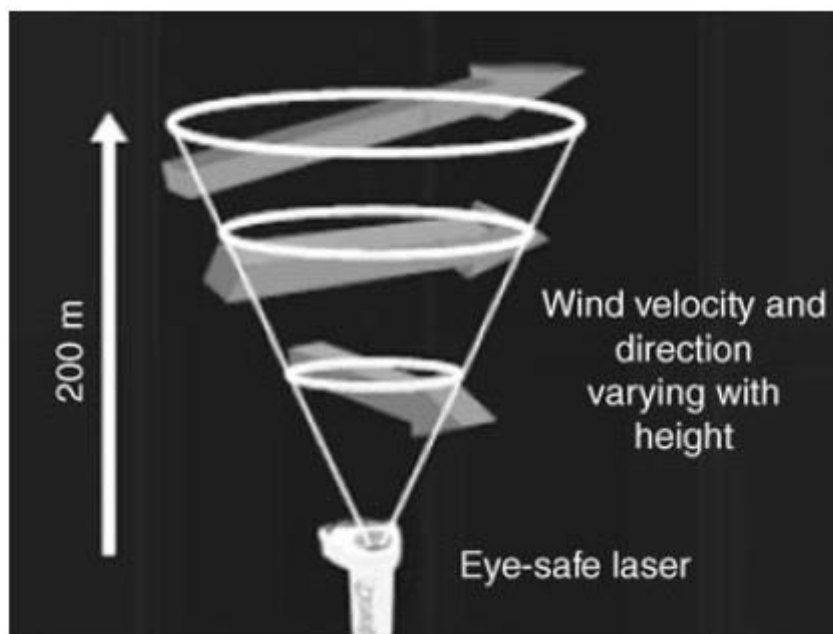
### **3.6.2 LIDAR (Light Detection and Ranging)**

SODARin tavoin, LIDAR luokitellaan myös kaukomittauslaitteeksi. Samoin sillä voidaan tehdä kolmiulotteisia mittauksia tuulikentästä. LIDARin lähettämä valo-keila reagoi ilman kanssa ja osa valosta sirotaan takaisin laitteeseen. Palautunut



valo analysoidaan nopeuden ja etäisyyden määrittämiseksi. LIDAR perustuu tuulen kuljettamien luonnollisten aerosolien säteilyn Doppler-ilmiön mittaamiseen. LIDAR toimii laserilla, joten yksi sen huolista on silmäturvallisuus. Suurin osa LIDAREista toimiikin silmäturvallisella 1.5 mikronin aallonpituudella /12, 81/.

Tuulivoimatarkoituksiin LIDARista on olemassa kaksi kaupallista vaihtoehtoa. Ensimmäinen, jatkuva-aaltainen LIDAR, lähettää tasaista aaltoa, muuttaen tunnistimen tarkennusta. Pulssijärjestelmässä tunnistin pysyy paikallaan, ja laite lähettää pulssittaisia signaaleja tarkkaillen signaalin ajoitusta saadakseen tietoja korkeudesta. Myös LIDARilla päästään 200 metrin korkeuksiin /12, 81/.



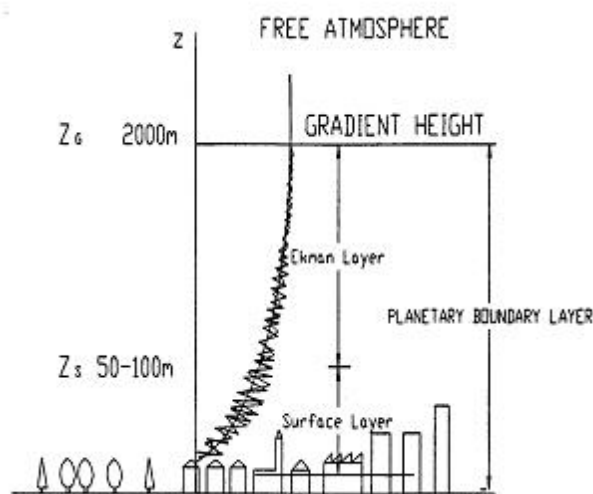
**Kuva 12.** LIDARin toimintaperiaate /12, 82/.

Kuvasta näkyy, kuinka LIDARin keila kääntyy 30 astetta pystysuorasta asemasta. Keila pyörii kerran sekunnissa ja skannaa samalla. Pyöriessään keila sieppaa tuulen eri kulmissa ja rakentaa tuulenopeakartan kiekon muotoisena. Tyypillisessä ohjelmassa laite skannaa viideltä eri korkeudelta kolme kertaa /12/.

## 4 TUULEN MITTAUKSEEN VAIKUTTAVAT ILMIÖT

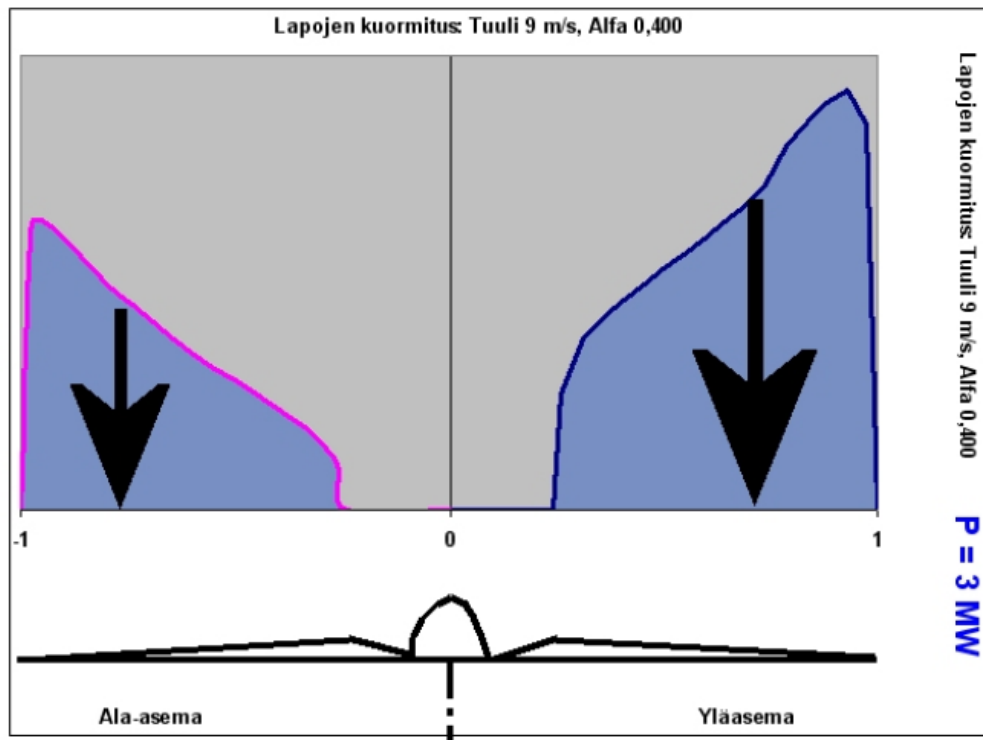
Tuulimittausdatan on oltava luotettavaa ja tehtyjen mittausten täytyy olla vertailukelpoisia maailmanlaajuisella tasolla. IEC 61400-12-1 -standardissa on annettu ohjeet anemometrien asennukseen siten että maston, mastossa olevien muiden laitteiden ja ilmastoilmiöiden vaikutukset mittaukseen voidaan minimoida. Tuulen nopeusmittauksen tulokseen ja tuulivoimalan tuotantoon vaikuttavia ilmiöitä ovat esimerkiksi tuuliväanne, varjostus ja virtausvääristymä.

### 4.1 Tuuliväanne, tuuligradientti



**Kuva 13.** Tuulen nopeuden vaihtelu eri korkeuksilla /16/.

Tuulen nopeus muuttuu korkeussuunnassa voimakkaammaksi kuvan esittämällä tavalla. Tätä voimakkuuden muutosta kutsutaan **sheariksi**, tuuliväanteeksi tai tuuligradientiksi. Kuvaajan muotoa kutsutaan shear-profiiliksi. Tuuliväanne pienenee mitä korkeammalle ilmakehässä nouseaan. Tuulimittauksissa pyritään mahdollisimman tarkkoihin tuloksiin, joten edustavimman tuloksen saamiseksi tuulennopeus on paras mitata oletetun tuulivoimalan napakorkeudelta. Jos tämä ei ole mahdollista, kohtuullinen kompromissi on mitata alimmillaan 75 %:n korkeudella napakorkeudesta. Kun mittausta ei suoriteta napakorkeudelta, on mahdollista tehdä shear-profiilin mallinnus. Arvioissa on kuitenkin aina epävarmuutta, joten se ei ole ensisijaisesti suositeltavaa /16/.



**Kuva 14.** Lapojen aksiaalinen kuormitus 9 m/s tuulella tuuligradientilla 0,4 /17/.

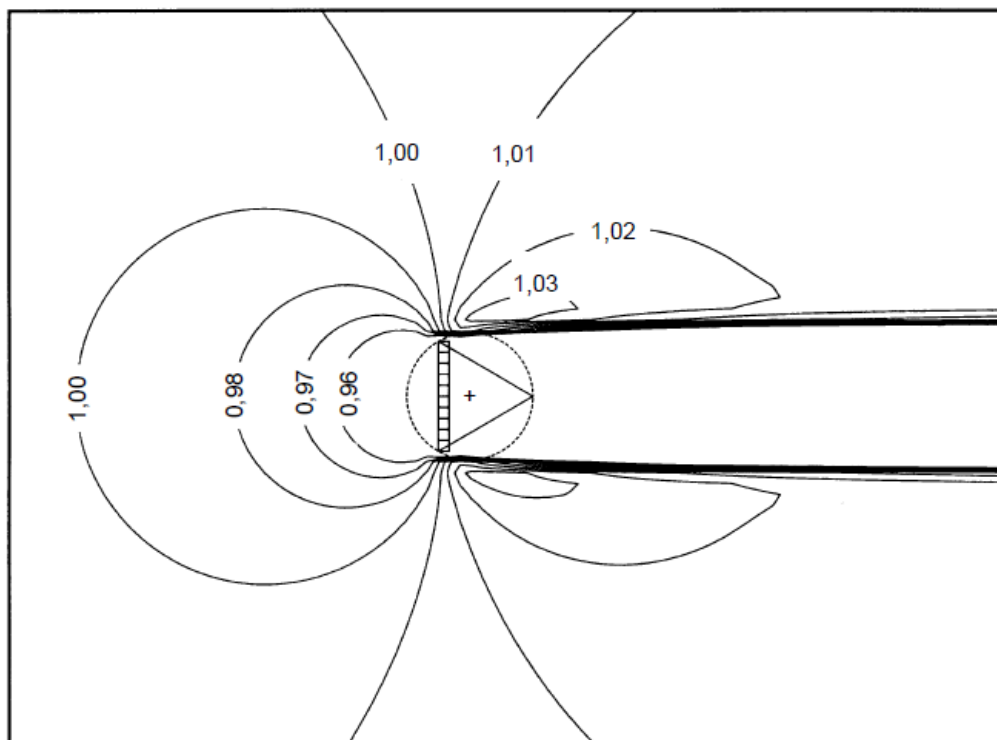
Kuvassa on esitetty, kuinka tuuligradientti vaikuttaa lapoihin saapuvan tuulen kuormitukseen. Tuuligradientin vuoksi tuulivoimalan yläpuolella pyörivään laapaan kohdistuu suurempi voima kuin alapuolella. Lapojen kuormitus muuttuu joka kierroksella, mikä nopeuttaa voimalan väsymistä. Tuulimittaukset tulisi suorittaa siten, että tuuligradientista ja muista tekijöistä saadaan tietoa jo riittävän aikaisessa vaiheessa tuulivoimaprojektia /17/.

Risø:n ehdottama tapa on hankkia tuulenopeustietoa 11 pisteestä pystysuunnassa esim. mittausmaston ja maassa olevan etämittauslaitteen yhdistelmällä /22, 47/. Myös Erkki Haapasen mukaan tuuligradientista saadaan hyvin tietoa käyttämällä mittauspaikalla SODAR-laitteistoa. SODAR mittaa tuulen nopeutta 5 metrin portain aina 200 metriin saakka /17/.

## 4.2 Virtausvääristymä

Anemometrin asettelulla on suuri merkitys mittauksen tarkkuuteen. Huono asettelu voi aiheuttaa yhtä merkittävän epätarkkuuden kuin kalibroinnista tai laitteen

suunnittelusta voi aiheutua. Jos anemometri mittaa esim. tuulen suunnasta johtuen maston takana, on varsin selkeää että mittaus ei edusta vapaan ilmakentän todellista tuulen nopeutta. Huomioitavaa on, että tuulen virtausvääristymä (flow distortion) voi kasvaa suureksi esim. suoraan mastoa päin tai instrumenttien kiinnityspuomia päin tuullessa. Anemometrin roottori on saatava erotettua tarpeeksi kauas kiinnitysrakenteista, jotta tämän kaltaiset vaikutukset saadaan siedettävälle tasolle. Selkeästi paras paikka anemometrin kiinnittämiseen on pystypuomi maston huipulla /18, 27/. Kun anemometrejä asennetaan puomeihin maston varrella, sekä maston että puomin virtausvääristymä tulee ottaa huomioon. Muut instrumentit tulee asentaa lähelle napakorkeutta, mutta siten, että ne eivät häiritse anemometrejä /25, 66/.



IEC 2045/05

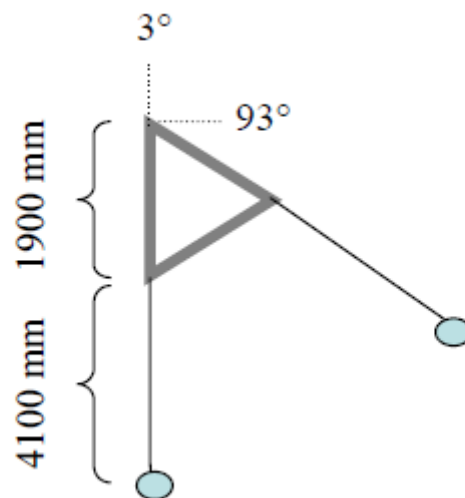
**Kuva 15.** Mallinnus paikallisesta tuulen virtausnopeudesta kolmionmuotoisen ristikkomaston ympärillä /25, 72/.

Kuvassa on IEC 61400-12-1 -standardissa esitetty havainnollistus virtausvääristymien synnystä. Suoraan mastoa päin tuullessa maston eteen keskelle syntyy

alue, jossa tuulenopeus muuttuu pienemmäksi. Tuulimittauksissa ja instrumenttien asennuksessa tämä on osattava ottaa oikein huomioon.

### 4.3 Varjostus

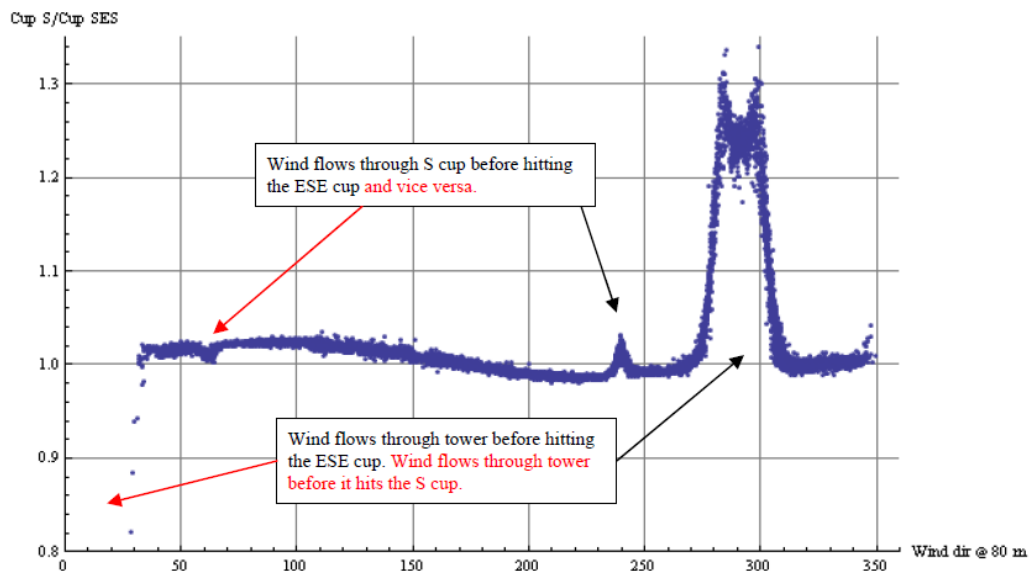
Tyypillisesti mastossa käytetään useita anemometrejä eri korkeuksilla tuulen nopeuden mittaamiseen sekä yhtä tai kahta tuuliviiriä tuulensuunnan määrittämiseen /16/. Tässä mittausjärjestelyssä mittauskorkeudet ovat 120, 90 ja 60 metriä. Ylimmällä tasolla on kolme anemometriä. Periaatteessa yksikin toimiva anemometri kullakin korkeudella antaa tarpeellisen tiedon, mutta useampi mittari huipulla takaa että aina on olemassa mittaustulos, jota maston rakenteet tai esim. ukkosenjohdatin eivät varjosta. Alemmilla tasoilla 90 ja 60 metrissä käytetään kahta anemometriä maston vastakkaisilla puolilla. Näiden kahden mittarin antamia arvoja voidaan verrata keskenään ja lukea tuulen suunnan suhteen paremmin edustavaa mittausta /20/.



**Kuva 16.** Varjostusesimerkin anemometrien asennus /23, 5/.

Esteiden varjostava vaikutus on tärkeä huomioida mittauksissa. Mittarin näyttämä lukema häiriintyy helposti tuullessa vastakkaiselta puolelta mastoa. Edessä oleva harusvaijeri tai mastossa oleva muu laite häiritsee mittauslaitteita helposti. Myös kohtuullisen kaukana oleva toinen mittari ja sen puomi aiheuttaa helposti varjos-

tusta. Kuvassa on esitetty varjostusesimerkin havainnollistamiseksi sinisin palloin anemometrit, jotka osoittavat etelä- (S, 183 °) ja kaakkoissuuntiin. (ESE, 123 °)



**Kuva 17.** Anemometrieni mittausten välinen suhde 10 minuutin keskiarvolla /23, 7/.

Kuvaajan Y-akseli esittää kahden anemometrin mittaustuloksen keskinäistä suhdetta, eli kuinka hyvin mittaukset vastaavat toisiaan. Kuvaajan X-akselilla näkyy astelukuna suunta josta mittauksen aikana on tuullut. Y-akselilla näkyvän suhteen eroaminen suuntaan tai toiseen arvosta 1.0 tarkoittaa mittareiden tuloksen olevan erilainen. Tämä tarkoittaa että toinen mittareista on joko toisen mittarin tai maston varjossa. Tällöin täydellisin ja varjostamaton mittaus molempiin mittareihin näyttäisi kuvaajassa suoralta viivalta.

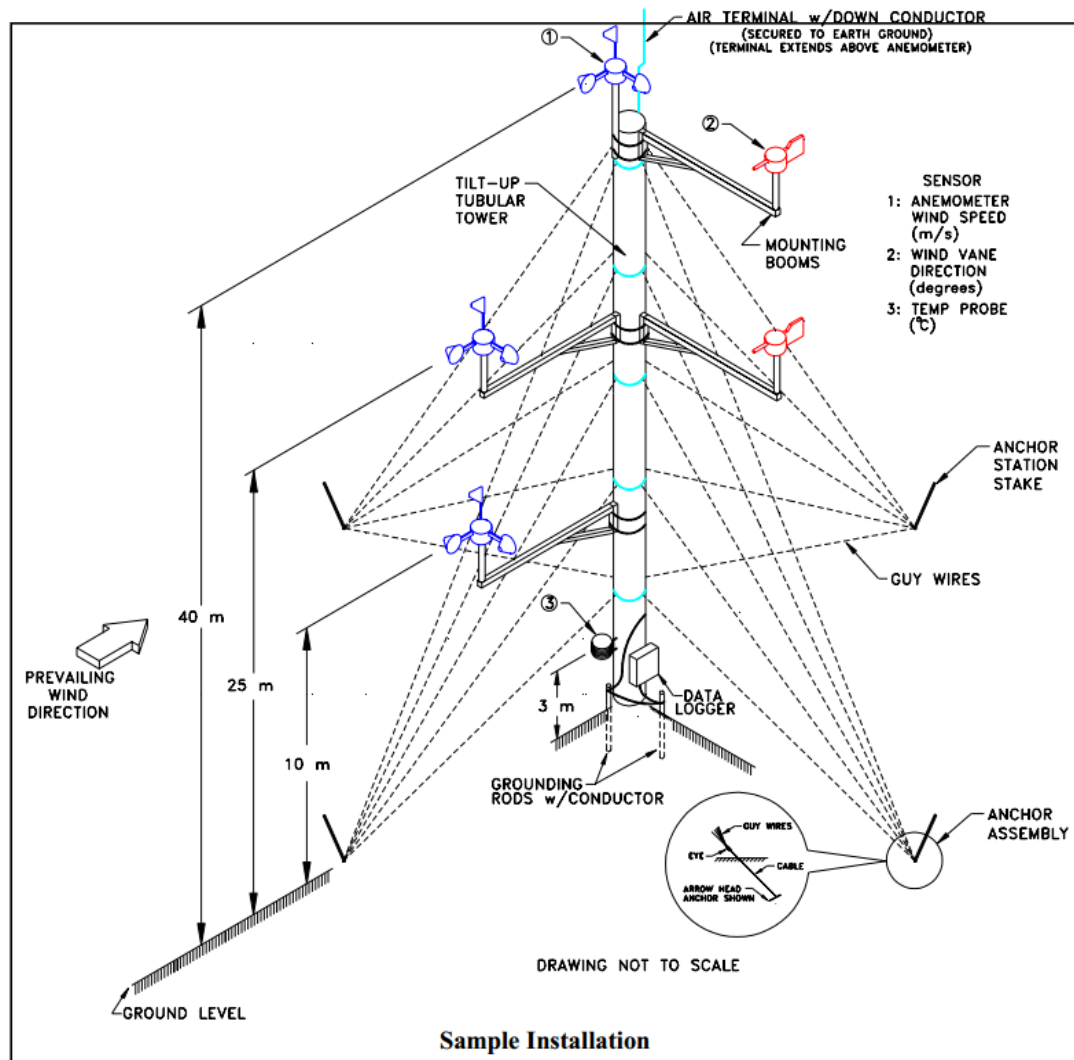
Kuvassa pohjoisesta, eli n. suunnilta 0° tuleva tuuli osuu mastoon ennen osumistaan eteläpuolen mittariin, jolloin varjossa oleva mittari ei saa hyvää tulosta. 270-300 asteen tienoilla tilanne on samankaltainen. Masto varjostaa kaakkoissuunnassa olevaa mittaria. Näistä suunnista mittausten suhde on niin huono, että kahden mittarin avulla on vaikea arvioida tuulen todellista nopeutta, ellei olla varmoja että yhteen paremmin tätä suuntaa edustavaan mittariin voi luottaa. Tuulen suunnan

65° kohdalla nähtävä kumpu kuvaajassa osoittaa että tästä suunnasta tuullessa etelänpuoleinen mittari on kaakkoissuunnassa sijaitsevan mittarin varjossa. Tätä seuraavassa piikissä 240 asteen tuulessa tilanne on toisin päin, eli eteläpuolen mittari varjostaa kaakkoispuolen mittaria.

Kuvassa huomattavaa on myös lievä siniaallon muoto. Siniaalto on merkki maston varjostusvaikutuksesta mittaukseen, jolloin eri suunnasta tuullessa mittarit näyttävät hiukan eri lukemaa. Siniaallon suurempi voimakkuus tarkoittaa vahvempaa maston aiheuttamaa varjostusta /20/.

## 5 MASTON JA INSTRUMENTTIEN ASENNUS

### 5.1 Maston asennus



**Kuva 18.** Mittausmaston esimerkkiasennus /11, 6–7/.

Kuvassa on esitetty tuulimittausmaston esimerkkiasennus putkityyppisellä mastolla. Tässä työssä käytetään ristikkomastoa. Kuva havainnollistaa silti hyvin maston ja instrumenttien asennuksen pääpiirteittäin. Kolmionmallinen ristikkomasto harustetaan kolmeen eri suuntaan esitetyn neljän sijasta.

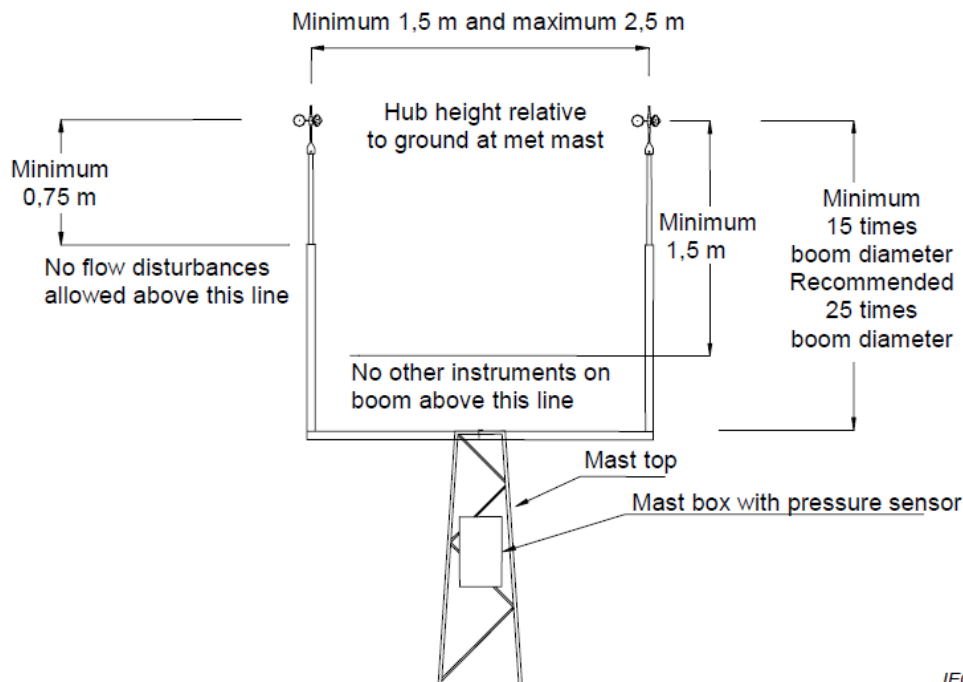
Maston harustamisessa ja instrumenttien asettelussa on huomioitava vallitseva tuulen suunta. Useimmiten, kuten tämän projektin tapauksessa, Suomessa vallit-



seva tuulensuunta on mereltä päin eli lounaasta. Harusvaijerit pyritään sijoittamaan pohjois-koillissuuntaan 120 asteen välein, jotta mittaukset saataisiin parhaiten hyödynnettyä vallitsevasta tuulen suunnasta. Mittauspuomit täytyy sijoittaa siten että maston varjostava vaikutus on mahdollisimman pieni /21/.

Tuentakalustolla on käytännössä samat vaatimukset ilmaston suhteen kuin mastolakin. Sen on kestävä tuuli, jää, lumi ja korrosio. Tuenta ei saa estää sade- ja muun veden poistumista mittalaitteista. Jumiin jäänyt vesi luultavasti rikkoo sensorin jäätyessään /11, 5-10/.

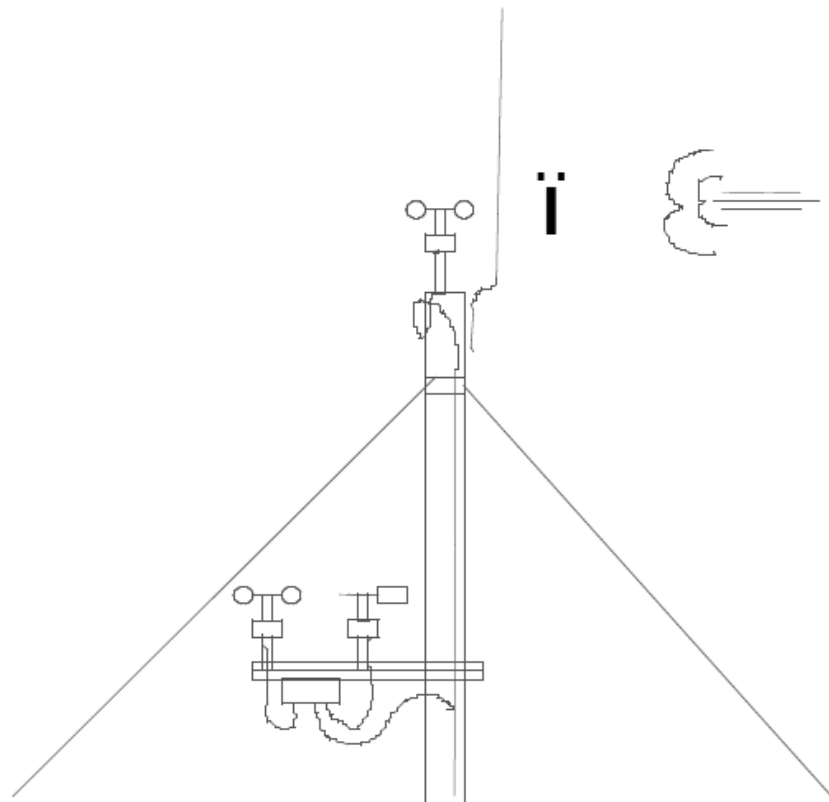
## 5.2 Instrumenttien tuenta ja puomit



**Kuva 19.** IEC-61400-12-1 -standardin mukainen anemometrien kiinnitys /25, 69/.

Mittausinstrumentit asennetaan mastoon horisontaalisen puomin päähän tai maston huipulle vertikaaliputkella. Instrumenttien asentaminen kauemmas mastosta puomin päähän auttaa vähentämään itse maston ja kiinnityslaitteiden vaikutuksia mittauksiin /11, 5-9/. Ensisijainen toimintatapa anemometrin asennuksessa on kiinnittää se maston huipulle, missä muita instrumentteja tai laitteistoa ei ole lähellä. Anemometri tulisi asentaa pyöreän pystyputken päähän, ja anemometrin

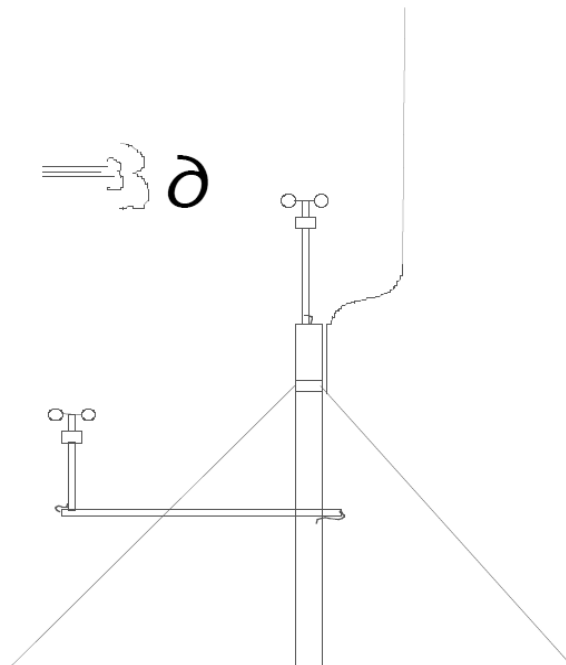
kaapeli tulee kuljettaa tämän putken läpi. Pystyputken halkaisija tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin anemometrin rungon halkaisija. Kuvanmukaista IEC:n suositusten mukaista asennustapaa käytettäessä anemometri on nostettava 15 kertaa horisontaalipuomin halkaisijan korkeudelle virtausvääristymän ehkäisemiseksi. Tämä on minimikorkeus. IEC:n suosittelema korkeus on 25 kertaa puomin halkaisija. Putken ja anemometrin tulee olla suorassa, poikkeama pystyasennosta tulee olla alle  $2^\circ$ . Anemometrin kiinnityspannan on oltava kompakti, sileä ja symmetrinen. Putken on aina noustava vähintään 0,75 metrin korkeudelle horisontaalipuomista. Jos korkeutta on nostettava lisää, voidaan käyttää paksumpaa kannakeputkea. Kahden anemometrin väli horisontaalisuunnassa on oltava vähintään 1,5m mutta enintään 2,5m. Muut instrumentit on asennettava vähintään 1,5m anemometriä alapuolelle /25, 69/.



**Kuva 20.** Esimerkki huonosta anemometriä asettelusta /18, 23/.

Kuvassa on esitetty huonoja toimintamalleja anemometrien asentamiseen. Kuvassa oikealta vasemmalle on vallitseva tuulensuunta. Ylimmäinen anemometri on kiinnitetty niin lähelle huippua että maston huippuun kohdistunut virtausvääristymä tulee vaikuttamaan mittaukseen. Alempi anemometri on kiinnitetty kulmikkaaseen horisontaalipuomiin. Puomin muodon vuoksi tuuli tarttuu puomiin helpommin. Puomi on myös liian lyhyt erottaakseen anemetrin kunnolla mastosta sekä anemetrin horisontaalipuomista erottava pystypilari on erittäin lyhyt. Etäisyys puomista ei ole tarpeeksi suuri virtausvääristymän ehkäisemiseksi /18, 23/.

Koko asennuksessa on huomioitu huonosti kaapeleiden, liittimien ja kiinnikkeiden aiheuttamat ongelmat. Tuuli tarttuu kulmikkaisiin pintoihin ja roikkuviin johtoihin. Alemman puomin laitteet on sijoitettu maston kiinnitysharusten taakse, jolloin mittaukset mitä todennäköisimmin häiriintyvät. Mittarit ja muuntaja ovat liian lähellä toisiaan. Laitteiston asettelu aiheuttaa todennäköisesti suurimmat mahdolliset virtausvääristymät, kun tuulee vallitsevasta tuulen suunnasta /18, 23/.



**Kuva 21.** Esimerkki hyvästä anemometrien ja laitteiston asettelusta /18, 22/.

Kuvassa on esitetty hyvin asennettu mittauslaitteisto vallitsevan tuulensuunnan mukaisesti. Korkeimmalle asennettu anemometri on korkean pystypilarin päässä, jolloin masto ei vaikuta siihen. Myös ukkosenjohdatin on asetettu oikein tuulen suuntaan nähden. Alempi anemometri on tarpeeksi kaukana mastosta ja nostettu tarpeeksi korkealle horisontaalipuomiin nähden (vähintään 15 kertaa puomin paksuus). Horisontaalipuomin muoto on pyöreä /18, 22/. Kuten kuvasta nähdään, maston harukset, laitteisto ja johdot on asennettu siten että niiden virtausvääristymävaikutus mittaukseen on minimoitu.

## **6 MASTOTYÖMAA**

### **6.1 Mastotyön vastuut**

Mastotyön työnjohdosta vastaa vastuunalainen esimies. Esimiehen on oltava riittävän pätevä mastotöihin liittyvissä asioissa. Tehtävien siirto edelleen mastoryhmien esimiehille edellyttää, että henkilö, jolle tehtävä siirretään, on pätevä tehtävään ja tietoinen vastuustaan. Mastotyöryhmällä on oltava oma kärkimies, joka järjestää ja ohjaa ryhmän työt sekä huolehtii turvallisuudesta ja työn suorittamisesta. Mastotyöurakoitsijan odotetaan toimivan työturvallisuuslain 738/2002 sekä yleisten mastotyön työsuojeluohjeiden mukaisesti. Tilaaja eli rakennuttaja on mastotyön tilannut osapuoli. Tilaajan on valvottava, että urakoitsija ja aliurakoitsijat työskentelevät tilaajavastuulain mukaisesti. Tilaaja vastaa omien töidensä vaarojen arvioinnista ja oman henkilöstönsä turvallisuudesta /26, 6/.

#### **6.1.1 Mastotyöntekijä**

Mastotyöntekijä on 18 vuotta täyttänyt, mastotyöhön maassa tai mastossa osallistuva, mastotyökoulutuksen saanut työntekijä. Mastotyöntekijällä on oltava aina mastotöissä mukanaan mastotyölupa. Mastotyöluvan saaminen vaatii lääkärintarkastuksen mastotyöntekijöiden työolosuhteisiin perehtyneillä työterveysasemilla /26, 40/. Mastotyöluvan myöntää mastotöistä vastaava esimies, joka toteaa työntekijän olevan ammattitaitoinen ja sopiva mastotyöhön, sillä ehdolla että työntekijällä on voimassa olevat tarvittavat koulutukset /26, 6/.

## 6.2 Maston nostaminen



**Kuva 22.** Maston nosto-operaatio.

Maston pystyyn nostamiseen tarvitaan n. 15–20 tonnin nosturi. Vaikeasti saavutettavalla mastotyömaalla on huomioitava, miten ajonosturi saadaan paikalle. Jos tie paikalle on heikko, on eduksi suorittaa työ aikana jolloin maaperä kantaa hyvin, kuten pakkassäällä. Masto on sisäkkäin kasattuna 48 metriä korkea, joten nosturin puomi on oltava tarpeeksi pitkä. Sopiva nosturi 60 metrin puomilla löytyi VS-Nostot Oy:lta. Nosturin nostaessa mastoa yläpäätä, peräpäätä nostetaan ilmaan traktorin etukuormaajalla ja viedään samanaikaisesti asennuspaikkaa kohden. Kun teleskooppimasto on asennettu paikkaansa, masto nousee vinsillä täyteen mitaansa.

Otettaessa ajoneuvonosturi käyttöön työmaalla, työpaikan vastuunalaisen työnjohdon on huolehdittava että nosturin pystytystarkastus suoritetaan. Ajoneuvonos-

turin pystytystarkastuspöytäkirja löytyy julkaisun Mastotyön työturvallisuusohje 2013 liitteestä H. Pöytäkirjassa tarkasteltujen seikkojen merkitään olevan kunnossa tai ne on merkittävä korjatuksi. Tällaisia tarkastuskohteita ovat mm. nosturin rakenne, tukemislaitteet, käyttöpaikka, työalustan maaperän laatu ja vakaus, turvalaitteiden toimivuus ja nostolaitteen sopivuus tarkoitettuun työhön. Haastavassa nostossa tehdään myös erillinen nostosuunnitelma, jossa ennakoitaan tekijöitä, kuten alueella olevat esteet ja sää /26, 55/.

### 6.3 Maston perustus ja kiinnitys

Mittausmaston asentaminen ei vaadi juurikaan maanrakennustöitä. Perustus on erittäin kevytrakenteinen ja pienitöinen. Maston perustana on n. 20cm vahva kerros 0-65 mursketta. Murskeen päälle maston pohjaksi asetetaan 5cm paksu vesivaneri, jonka ala on 2m<sup>2</sup>.

Harukset ovat kuumasinkittyä teräsvaijeria. Paikoissa joissa pohjavesi ei vaaranu, voidaan harusankkurit kaivaa maahan routarajan alapuolelle n. 3 m syvyyteen. Kuoppa kaivetaan ja betoniankkuri asetetaan kuoppaan oikeaan asentoon ja kulmaan. Jos paikka sijaitsee pohjavesialueella ja sitä on suojeltava, harukset kiinnitetään paikan päältä löytyviin tai mukana tuotuihin luonnonkiviin. Maata kaivetaan mahdollisimman vähän /21/.



**Kuva 23.** Harusvaijeri kiristystä vaille.

Kuvassa on ankkuriin kiinnitetty harusvaijeri. Mastossa on harukset kolmeen eri suuntaan 120 asteen välein. Joka välillä on viisi kappaletta harusvaijereita eri korkeuksilla. Maston pystyyn nostamisen jälkeen harukset kiristetään tasaisesti ja varoen joka puolelta, jonka jälkeen maston suoruus tarkistetaan.

#### 6.4 Maston suojaus

Maston tulee olla suojattu myös ympäristötekijöiltä, kuten salamoilta ja ruostumiselta. Ukkosen iskeminen korkeaan mastoon ei varsinaisesti ole estettävissä, joten masto ja sen laitteisto pyritään suojaamaan ukkoseniskuilta. /18, 24/.



**Kuva 24.** Ukkosenjohdatin ja ultraäänianemometri maston huipulla.

Ukkosenjohdatin tulisi asentaa maston huipulle siten, että se suojaa maston ylintä anemometriä. Voidaan olettaa ukkosenjohdatin suojaavan ympäriltään 60° säteeltä. Maadoituksen tienä maahan voidaan käyttää itse mastoa, mutta lisäsuojauksa saavutetaan erillisellä maadoituskaapelilla. Maston maantasossa on syytä johdattaa kaapeli maahan maadoitussauvalla. Jos laitteistoa ei ole valmiiksi varustettu ylijännitesuojilla, sen tekeminen on jälkikäteen suotavaa /18, 24/.

Muilta osin masto on suojattava niin, ettei siihen voi kiivetä luvottomasti. Kaikki maantasossa olevat osat on merkattava selkeästi, jotta maston kaatumisonnetto-



muudelta vältyttäisiin /11/. Harusten alapääät merkitään vähintään kahden metrin korkeudelle keltamustalla huomioväriyksellä.



**Kuva 25.** Harusten huomioväritys.

Mastossa on oltava standardin EN 353-1 mukaiset putoamissuojat sekä yleisten määräysten mukaiset tikkaat. Ulkoa kiivettävässä mastossa suositellaan ensisijaisesti turvakiskoa. Sivullisten pääsy vaara-alueelle on estettävä. Kun mastossa työskennellään, vaara-alueella ei saa tehdä muita ulkotöitä. Maston rungon on oltava varustettu kiipeämisen estolla /26, 15-16/.



**Kuva 26.** Obelux infrapunalentostevalo.

Finavian lentoestelausannon mukaisesti masto on varustettava pienitehoisilla lentoestevaloilla ja -maalauksella. Merkitsemällä esteet vähennetään niiden aiheuttamaa vaaraa ilma-aluksille. Lentoestevalojen ja -maalauksen on oltava kansainvälisen siviili-ilmailun yleissopimuksen mukaisia.

Putoavasta jäädästä on varoitettava ”Varokaa mastosta putoavia jäitä” -kilvillä asentaen ne todennäköisiin maston lähestymissuuntiin. Maston runkoon on kiinnitettävä mastoon kiipeämisen kieltävä sekä hengenvaarasta ilmoittava kyltti. Jos mastossa on laitteita, jotka vaarantavat työturvallisuuden, niistä on ilmoitettava kyltillä, joka opastaa lukemaan laitetilassa olevat turvaohjeet. Maston omistaja huolehtii varoituskylttien asettamisesta ja laitetilassa olevista turvallisuus- ja toimintaohjeista. Maston tulee olla ilmailuviranomaisen näkyvyysvaatimusten mukainen /26, 15-16/.

## 7 YHTEENVETO

Tuulimittausten aloittamisen aikatauluun vaikuttaa ehdottomasti eniten rakennus- tai toimenpidelupajärjestelyiden sujuvuus. Luvan saamisen nopeuteen voi vaikuttaa keskustelemalla ensin kunnan rakennusviranomaisen kanssa, jolloin hankealueesta saadaan tarpeellisia tietoja jo hankkeen suunnitteluvaiheessa. Tällöin tarvittavista selvityksistä saadaan hyvä kuva ja asiakirjojen valmistelu helpottuu. Täsmällinen ja hyvin valmisteltu lupahakemus menee varmemmin käsittelyn läpi ilman täydennystarpeita. Hankkeen paikan valinnassa kannattaa jo suunnitteluvaiheessa ottaa selvää alueen soveltuvuudesta ja sen erityispiirteistä. Jos masto soveltuu paikalle huonosti häiriten liikaa olemassa olevaa alueen käyttötarkoitusta, lupaa ei luultavasti myönnetä. Tällöin on etsittävä uusi paikka ja luvittamiseen käytetty aika pitenee. Mittausten oli määrä alkaa syksyllä, aloitettua ne saatiin tammiukuussa 2014.

Luotettava mittausaika on vähintään vuosi, jolloin saadaan tietoa myös vuodenaikojen vaikutuksesta tuulen nopeuteen. Mittauksen varmuuden korostamiseksi mittauksia kannattaa jatkaa mahdollisesti kolmesta neljään vuotta. Anemometrit on asennettava mastoon siten, että mittareihin saapuva tuulen nopeus ei vääristy. Oikeilla asennusmenetelmillä voidaan tehokkaasti välttää ilmastoilmiöiden vaikutukset mittauksarkkuuteen. Huomioiden vallitseva tuulen suunta, mittarit asennetaan tarpeeksi etäälle mastosta siten, että edustava mittauksulos saadaan mahdollisimman varmasti.

Liikuteltava tekniikka helpottaa mittauksien järjestämistä. Uskon että tulevaisuudessa siirrytään enenevässä määrin tuulen etämittauslaitteistojen, ennen kaikkea SODARin, käyttöön sen helppouden vuoksi. Mittausmaston asentaminen vaatii paljon työvoimaa ja tekniikkaa, jolloin syntyy myös kustannuksia. Siksi mittauksia kannattaakin jatkaa pidempään, jolloin mittauksien kustannus vuotta kohden pienenee. Toistaiseksi uskon mittausmaston luotettavuuden olevan parempi, sillä instrumentteja käytetään useampia jolloin yksittäisen mittarin virheet erottaa helposti. Etämittauslaitteet vaativat myös kalibrointia. Tulevaisuudessa mastomittausten asema voi olla erilainen, sillä etämittauksitekniikka kehittyy vauhdilla.

Tämän opinnäytetyön teko on auttanut minua ymmärtämään tuulivoimatuotannon periaatteet ja tuulen mahdollisuudet voiman lähteenä. Tuulipuiston kehittämisessä tarvitaan tuulen nopeuden laajaa kokonaiskuvaa, mutta myös todellista pistetietoa suunnittelualueelta. Tuulimittauksen antama tieto on olennainen tuulipuistoon investoimisen kannalta. Alueen kokonaiskuvan arviointiin esimerkiksi Ilmatieteen laitoksen Tuuliatlas on hyvä väline, mutta todellisen paikkakohtaisen tuulisuuden arviointiin tarvitaan tuulimittauksia.

## LÄHTEET

- /1/ Lagerwey Finland Oy Hollantilais-suomalaista tuulivoimaa Kauhajoelta Suomea valloittamaan. Suupohjan Elinkeinotoimen Kuntayhtymä. Viitattu 27.3.2014. <http://www.suupohja.info/sijoitu-suupohjaan/polku-perille-yrittajaksi-kauhajoen-seudulle/lagerwey-finland-oy-hollantilais-suomalaista-tuulivoimaa-kauhajoelta-suomea-valloittamaan/>
- /2/ Mastot maisemassa. Ympäristöopas 107. 2003. Ympäristöministeriö. [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41706/Ympäristöopas\\_107.pdf](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41706/Ymparistoopas_107.pdf)
- /3/ Jalasjärven kunta. Rakentajan ABC. Viitattu 20.3.2014, [http://www.jalasjarvi.fi/site?node\\_id=1533](http://www.jalasjarvi.fi/site?node_id=1533)
- /4/ Peruskarttarasterin metatieto. Maanmittauslaitos. Viitattu 20.3.2014. <http://www.paikkatietohakemisto.fi/catalogue/ui/metadata.html?uuid=c6e94f34-4925-4fa6-bac9-6b25f4e7cebf&lang=fi>
- /5/ Finavia. 2013. Korkeusrajoitukset paikkatietoaineistona. Viitattu 15.3.2014. <https://www.finavia.fi/fi/tiedottaminen/lentoesteet/korkeusrajoitukset-paikkatietoaineistona/>
- /6/ L 5.2.1999/132. Maankäyttö- ja rakennuslaki. Säädös säädöstietopankki Finlexin sivuilla. Viitattu 15.3.2014. <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>
- /7/ Ilmoitus naapurin rakennushankkeesta ja hakemuksen vireilletulosta - lomake. Suomi.fi. Viitattu 20.9.2013. [http://www.suomi.fi/suomifi/suomi/asioi\\_verkossa/lomakkeet/kun\\_ke6696/](http://www.suomi.fi/suomifi/suomi/asioi_verkossa/lomakkeet/kun_ke6696/)
- /8/ L 1194/2009. Ilmailulaki. Säädös säädöstietopankki Finlexin sivuilla. Viitattu 5.2.2014. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20091194>
- /9/ Liittymismaksuhinnasto. Fortum Sähkönsiirto Oy. 2013. Viitattu 28.3.2014. [http://www.fortum.com/countries/fi/sitecollectiondocuments/sahkon-siirto-ja-liittymat/fss\\_liittymishinnasto\\_1.6.2013\\_fi.pdf](http://www.fortum.com/countries/fi/sitecollectiondocuments/sahkon-siirto-ja-liittymat/fss_liittymishinnasto_1.6.2013_fi.pdf)
- /10/ Wikipedia, vapaa tietosanakirja: Lidar. Päivitetty 17.3.2013. Viitattu 15.8.2013. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Lidar>
- /11/ Bailey, B., McDonald, S., Bernadett, D., Markus, M., Elsholz, K. 1997. Wind Resource Assessment Handbook.
- /12/ Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., 2009. Wind Energy Explained: theory, design and application - 2<sup>nd</sup> ed. Wiley.
- /13/ Thies Clima. Verkkosivut. Viitattu 28.3.2014. <http://www.thiesclima.com/>

- /14/ Data Logger blueberry NDL 485 Manual. Wilmers Messtechnik GmbH. Viitattu 30.3.2014.  
<http://www.wilmers.com/download/manual-ndl485-0103-en.pdf>
- /15/ Sodar tuulimittaustekniikka. 2010. Haapanen, E., Tuulitaito Oy. Viitattu 23.3.2014. [http://www.tuulitaito.fi/Artikkelit/sodar\\_tuulimittaustekniikka.pdf](http://www.tuulitaito.fi/Artikkelit/sodar_tuulimittaustekniikka.pdf)
- /16/ Wind Energy – The Facts: Best Practice for Accurate Wind Speed Measurements. European Wind Energy Association. Viitattu 12.3.2014.  
<http://www.wind-energy-the-facts.org/best-practice-for-accurate-wind-speed-measurements.html>
- /17/ Tuulimittausten merkitys ja mahdollisuudet tuulipuiston suunnittelussa ja käytössä. 2010. Haapanen, E., Tuulitaito Oy. Viitattu 12.3.2014.  
<http://www.tuulitaito.fi/Artikkelit/tuulimittauksista.pdf>
- /18/ Recommended Practices for Wind Turbine Testing 11. Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry. Second Print. 2003. Viitattu 20.3.2014.  
[http://ieawind.org/Task\\_11/recommended\\_pract/Recommended%20Practice%201%20Anemometry\\_secondPrint.pdf](http://ieawind.org/Task_11/recommended_pract/Recommended%20Practice%201%20Anemometry_secondPrint.pdf)
- /21/ Leppinen, J. 2013. Sähköpostiviesti 19.8.2013. Lagerwey Development Oy.
- /22/ Wagner, R., Courtney, M.S., Larsen, T.J., Paulsen, U.S. 2010. Simulation of shear and turbulence impact on wind turbine performance. Risø DTU. Viitattu 12.3.2014.  
[http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:82065/datastreams/file\\_4550246/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:82065/datastreams/file_4550246/content)
- /23/ Lindelöw-Marsden, P., Pedersen, T.F., Gottschall, J., Vesth, A., Wagner, R., Courtney, M.S., Larsen, T.J., Paulsen, U.S. 2010. Flow distortion on boom mounted cup anemometers. Risø DTU. Viitattu 20.3.2014.  
[http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:82841/datastreams/file\\_5113326/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:82841/datastreams/file_5113326/content)
- /24/ AQSsystems. Verkkosivut. Viitattu 15.4.2014. <http://www.aqs.se/>
- /25/ IEC 61400-12-1:2005: Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines. 2005. International Electrotechnical Commission.
- /26/ Mastotyön turvallisuusohje 2013. Työturvallisuuskeskus TTK, sähköalojen työalatoimikunta. Viitattu 13.4.2014.  
[http://www.ttk.fi/files/2904/Mastotyön\\_työturvallisuusohje\\_2013.pdf](http://www.ttk.fi/files/2904/Mastotyön_työturvallisuusohje_2013.pdf)
- /27/ Ympäristösihteerin lausunto rakennuslupahakemukseen. 12.11.2013. Jalasjärven kunta. Ympäristö- ja rakennuslautakunta.

/28/ Etelä-Pohjanmaan liitto. 2013. Etelä-pohjanmaan tuulivoimaselvityksen täydennys – Jalasjärven Ilvesnevan ja Kauhavan Voltti-Kakkurin alueet. Viitattu 15.4.2014. <http://www.epliitto.fi/upload/files/IlvesnevaVolttiKakkuri.pdf>

/29/ Maanmittauslaitoksen ortokuvan metatieto. Maanmittauslaitos. Viitattu 20.3.2014. <http://www.paikkatietohakemisto.fi/catalogue/ui/metadata.html?uuid=b20a360b-1734-41e5-a5b8-0e90dd9f2af3&lang=fi>