

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma / Automaatio- ja prosessitekniikka

Timo Kunnasluoto

SODAR-KENTTÄMITTAUKSEN RAPORTOINTI

Opinnäytetyö 2014

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma

KUNNASLUOTO, TIMO

SODAR-kenttämittauksen raportointi

Opinnäytetyö

30 sivua

Työn ohjaaja

Lehtori Vesa Kankkunen

Toimeksiantaja

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu

Marraskuu 2014

Avainsanat

tuulimittaus, SODAR, käyttöohje, tuuli

Opinnäytetyön aiheena oli tehdä käyttöohje Kymenlaakson ammattikorkeakoulun tutkimuslaboratorion tuulenmittauksissa käytettävälle Sodar-mittalaitteelle. Työ jakautuu kahteen osioon. Nämä ovat raportointi ja ohjeenteko. Työn raportointi osiossa käydään läpi tuulivoima yleisesti sekä sen käyttöä Suomessa. Kerrottiin eri tuulenmittaus-tavoista ja niiden toimintaperiaatteista. Haluttiin perustella, mihin tuulenmittausta käytetään ja miksi se on tarpeellista. Ohjeiden luomisesta sekä itse ohjeista on raporttiosiossa kerrottu pääkohdittain.

Työtä varten kerättiin tietoa tuulivoimasta ja tuuliprojektien vaatimuksista, sekä eri tuulenmittaus-tavoista ja perehdyttiin tuulenmittauslaitteiden toimintaan. Tuulenmittauslaitteiden toiminnan ja ominaisuuksien tunteminen on tärkeässä osassa suunnitel-taessa niiden käyttöä. Tärkeimpänä osana tiedonkeruuta oli tutustuminen Kymenlaak-son ammattikorkeakoulun Sodar-laitteeseen, jolle käyttöohjeet tehtiin. Opinnäytetyön käytännön osuutta varten oltiin mukana viemässä Sodar-laitetta mittauspaikalle suorit-tamaan tuulenmittausta.

Ohjeet korvaavat nykyisin käytössä olevat ohjeet tuulimittauksen toteuttamiseen. Oh-jeista haluttiin tehdä mahdollisimman yksinkertaiset ja selkeät, mutta samalla kattaa kaikki laitteen käyttöön tarvittavat kohdat. Käyttöohjetta tullaan hyödyntämään tule-vaaisuudessa laitteella toteutettavissa tuulenmittausprojekteissa.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

KUNNASLUOTO, TIMO

Reportage of SODAR field measurement

Bachelor's Thesis

30 pages

Supervisor

Vesa Kankkunen Lecturer

Commisioned by

Kymenlaakso University of Applied Sciences

November 2014

Keywords

wind measurement, SODAR, user manual, wind

The purpose of this thesis was to create user a manual for the SODAR wind measurement system used by Kymenlaakso University of Applied Sciences research laboratory. The thesis is divided into two parts reporting and drafting of the user manual for SODAR wind measurement. The thesis contains information about wind power in general and how it is used in Finland. In addition wind measurement systems and their working principles are explained. A particular objective was to explore where wind measurement is used and why it is needed.

Information about wind power and wind measurement was collected for this thesis. The most important part was studying the working principle of the SODAR measurement unit.

The user manual replaces the old guidelines for completing wind measurement. The purpose was to prepare as clear and simple instructions as possible, but at the same time cover all the necessary parts. The manual will be used for helping the usage of wind measurement unit in the future.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	5
2	TUULIVOIMA YLEISESTI	6
	2.1 Tuulivoima	6
	2.2 Tuulivoima Suomessa	11
3	TUULENMITTAUSTAVAT	14
	3.1 Tuulen etämittaus	15
	3.2 Mastomittaus	16
	3.3 Doppler-ilmiö	17
	3.4 Sodar	18
	3.5 Lidar	21
4	TUULENMITTAUS KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULUSSA	22
	4.1 Tuulenmittaus	22
	4.2 Käytössä oleva tuulenmittauslaitteisto	23
5	OHJEEN TEKO KYAMKIN SODAR-LAITTEELLE	24
	5.1 Sodar-laitteelle tehtävät valmistelut mittauksista varten	24
	5.2 Mittauksen aloittaminen	25
6	YHTEENVETO	26
	LÄHTEET	28

LIITTEET

Liite 1. 41 sivua.

1 JOHDANTO

Ilmastopolitiikka on lisännyt tarvetta vähentää fossiilisia polttoaineita energianlähteenä ja suosia sen sijaan uusiutuvia energianlähteitä. Päästöjen rajoittamisella ja päästökaupalla pyritään kannustamaan uusiutuvan energian käyttöä. Niinpä tuulivoimalla tuotettu sähkö yleistyy muiden uusiutuvien energioiden ohella. Kasvava tuulivoiman rakentaminen lisää tarvetta myös tuulenmittaukselle. Mittauksen tarpeen lisääntyminen luo kilpailua tuulenmittauksen tarjoajille ja kasvattaa mittausten vaatimuksia. Mittauksen tarjoajan täytyykin suunnitella projektin toteutus entistä paremmin kilpailukyvyn varmistamiseksi. (1.)

Tämä opinnäytetyö on tehty Kymenlaakson ammattikorkeakoululle, osana tuulenmittausprojektin kehittämistä. Opinnäytetyö koostuu ohjeenteko-osiosta ja raportin teosta. Tarkoituksena on laatia käyttöohje koulun käyttämälle Sodar-laitteelle. Lisäksi olennainen osa opinnäytetyöstä on tietojen hakeminen ja käytössä olevaan laitteeseen tutustuminen. Laitteen käytön tuntemus on välttämätöntä ohjeen tekoa varten. Käyttöohje Kymenlaakson ammattikorkeakoulun Sodar-laitteelle tehtiin kevään 2014 aikana.

Käyttöohjeen tavoitteena on saada luotua selkeä ohjeistus Sodarin käytöstä. Ohjetta hyödyntämällä kokematonkin käyttäjä pystyy suorittamaan ennen mittauksen aloittamista Sodarille tehtävät valmistelut, kuljetuksen mittausta paikalle, mittauksen aloittamisen sekä laitteen käytön mittauksen aikana. Lisäksi Sodaria varten tehdään huoltopäiväkirja, johon kirjataan laitteelle tehtävät huollot.

Yksinkertaiselle ohjeistukselle oli tarvetta, sillä tulevaisuudessa laitetta tullaan hyödyntämään tuulivoimaprojekteissa. Aiheen työlle sain tammikuussa 2014. Työn ohjaajana toimii lehtori Vesa Kankkunen ja Kymenlaakson ammattikorkeakoulun insinööri-toimiston puolelta tutkimusinsinööri Erja Tuliniemi.

2 TUULIVOIMA YLEISESTI

2.1 Tuulivoima

Kuten lähes kaikki uusiutuvat luonnonvarat, niin myös tuuli on peräisin auringon tuottamasta energiasta. Tuuli syntyy, kun aurinko lämmittää maan pintaa ja aiheuttaa ilma-alojen liikkeen. Vain noin kahdesta kolmeen prosenttia auringosta maahan tulevasta energiasta muuttuu tuuleksi. Silti tämä energian määrä on noin neljäkymmentä kertaa maailman tämänhetkistä energiankulutusta suurempi. Teknisesti hyödynnettävissä oleva tuulivoiman määrä on vuositasolla noin 53 000 terawattituntia. (2.)

Tuulta pystytään hyödyntämään energiantuotannossa tuulivoimaloiden avulla. Tuulivoimaloissa tuulen liike-energia muutetaan voimalan lapojen avulla mekaaniseksi energiaksi turbiinille. Tuulivoimalan lavat pyörittävät turbiinia. Turbiini on joko suoraan tai vaihteiston välityksellä kiinni generaattorissa. Pyörivä generaattori tuottaa sähköä. Voimalan toimintaa säädellään monella hallintalaitteella ja voimanvälitystä säädellään vaihteistolla. (1.)

Edellä kuvattu tuulivoiman toiminta on yksinkertaistettu malli aksiaalisesta voimalasta. Tuulivoimaloita on useita erimallisia. Ne voivat olla pysty- tai vaaka-akselisia kuten esimerkiksi spiraalinen roottori, savonius-roottori ja aksiaalinen roottori. Näistä voimalamalleista kolmilapainen aksiaalinen turbiinimalli, jossa tuuli kulkee akselin suuntaisesti, on selvästi yleisimmin käytetty sähköntuotannossa.(1.)



Kuva 1. Kolmilapainen aksiaalinen tuulivoimala

Tuulivoimaloiden fyysinen koko vaihtelee aina joistakin kymmenistä metreistä jopa 150 metriin asti. Voimalan kokoon vaikuttaa voimalasta halutut ominaisuudet sekä rakennuspaikka. Suurempitehoisia ja korkeampia voimaloita voidaan rakentaa varsinkin merelle. (1.)

Tuuliolot ovat suuri tekijä voimalan kokoluokassa. Tuulivoimala saa kaiken energiansa tuulesta. Mitä enemmän tuulta on, sitä enemmän voimalalla voidaan tuottaa tehoa. Tuulen nopeus muuttuu voimakkaammaksi korkeammalle mentäessä. Voimalan korkeutta kasvattamalla saadaan siis lisättyä voimalan tehoa. Voimalan korkeuden kasvassa myös voimalan lapakokoa saadaan kasvatettua mikä, puolestaan vaikuttaa voimalan tehoon kaavan 1 mukaisesti. Tuulivoima rakentamisessa onkin tärkeätä ymmärtää eri tuuliolojen vaikutukset voimalan sähköntuotantoon. (1.)

Tuulivoimalassa lapojen kärkinopeuden halutaan olevan mahdollisimman nopea, sillä silloin saadaan suuri kärkinopeussuhde ja sitä kautta tuotettua paras teho. Tämä pätee vain tuulivoimalatyypeissä, jotka hyödyntävät lavan pyörimisliikettä, kuten esimer-

kiksi aksiaalinen voimala. Tuulivoiman lavan teho tietylle tuulen nopeudelle voidaan laskea alla esitettyllä kaavalla. (3.)

Kaava 1. Tuulivoimalan tuottama teho annetulla tuulen nopeudella. (3.)

$$P = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * A * C_p \quad (1)$$

P on tuulivoimalan tuottama teho, [W]

ρ on ilman tiheys, [kg/m³]

v on tuulen nopeus, [m/s]

A on potkurin pyyhkäisyypinta-ala, [m²]

C_p on tehokerroin, joka on riippuvainen voimalasta

Kaavassa käytettävän potkurin pyyhkäisyypinta-ala saadaan laskettua kaavalla.

$$A = \pi * R^2 \quad (2)$$

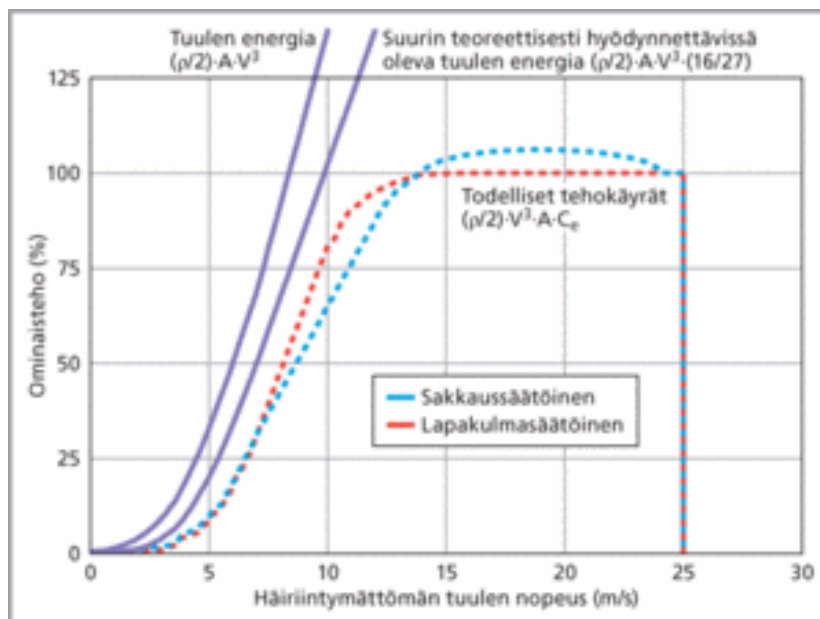
A on potkurin pyyhkäisyypinta-ala, [m²]

R on voimalan lavan pituus, [m]

Tuulivoimala pystyy muuttamaan vain 59 % tuulen kineettisestä energiasta mekaaniseksi energiaksi pyörittämään roottoria. Tämä tuulivoiman teoreettinen maksimi hyötysuhde on osoitettu vuonna 1919 Albert Betzin toimesta ja onkin siksi nimetty Betzin laiksi. Teoria perustuu turbiinin siipikehän läpi virtaavan ilman hidastumisen kasvamiseen talteen otettavan liike-energian määrän kasvaessa. Nykyisillä voimaloilla saadaan hyödynnettyä noin 45 – 50 % tuulen energiasta. (4.)

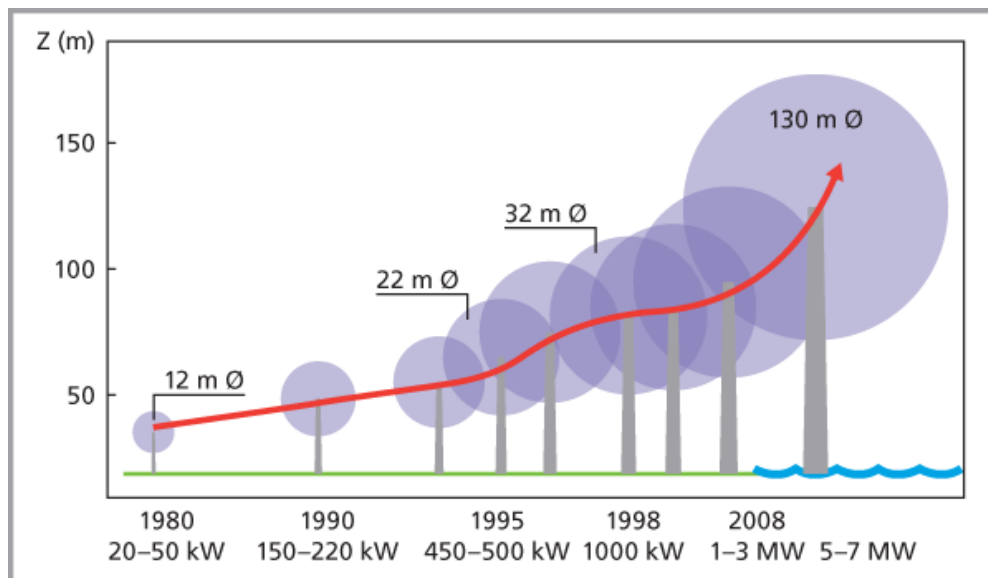
Pienemmillä tuulivoimaloilla, jotka ovat kokoluokkaa 10 metriä, pystytään tuottamaan sähköä jo heikoimmilla 3 – 5m/s tuulioloilla. Tämä mahdollistaa kyseisten voimalatyyppien käyttämisen esimerkiksi omakotitalouksissa. Kooltaan suurempien voimaloiden käynnistymisnopeus on noin 3 – 4 m/s ja optimi tuulen nopeus sähköntuotan-

nolle on voimalan koosta riippuen noin 13 m/s. Kuva 2 esittää kuinka tuulennopeus vaikuttaa voimalasta saatavaan tehoon. Tuulivoimalaa ei saada käytettyä koko tuuli-alueella. Yleisesti sähköntuotannossa käytössä olevat voimalat käynnistyvät tuulen nopeudella 3 – 4 m/s ja vastaavasti ne joudutaan pysäyttämään tuulen nopeuden lähes-tyessä 25 m/s. Voimalan lapakulmia säätämällä saadaan reagoitua tuulen nopeuden äkkinäisiin muutoksiin. Tuulen nopeutta ja suuntaa mitataan anometrin ja tuuliviirin avulla. Saatujen tietojen perusteella turbiini osataan kääntää tuulen suuntaiseksi. Mit-taustiedot auttavat myös säätämään voimalan asetukset vastaamaan tuulioloja. Voima-lan säätömahdollisuus parantaa voimalan hyötysuhdetta, koska roottori saadaan pidet-tyä koko ajan tuulensuuntaisesti. (5.)



Kuva 2. Tuulen nopeuden vaikutus voimalalla tuotettuun tehoon. (6.)

Kasvatettaessa tuulivoimalan fyysistä kokoa saadaan voimalalla tuotetun sähkötehon määrää kasvatettua kaavan 1 osoittamalla tavalla. Tämä perustuu siihen, että voimalan lapojen koon suurentuessa saavutetaan suurempi akselin pyörimisnopeus. Lisäksi lapojen sijainti korkeammalla mahdollistaa korkeamman ilma-alan vähemmän turbul-lenttisten tuulien hyödyntämisen. Tekniikan kehittyessä ja lapakoon kasvaessa myös tuulivoimaloiden tuottama teho on kasvanut ja tämä kehitys jatkuu myös tulevaisuu-nessa (kuva 3). Voimaloiden kehitystä on nopeuttanut nykyinen uusiutuvien energioi-den suosiminen energian tuotannossa. (1.)



Kuva 3. Tuulivoimaloiden koon ja tehon kehitys vuosien aikana. (6.)

Tuulivoima luokitellaan uusiutuvaksi energiaksi ja on hyvin vähäpäästöinen energiantuotantotapa, jonka hiilidioksidipäästöt ovat vain noin 10 g/kWh. Nämäkin päästöt syntyvät tuulivoimalan rakentamisesta, rakennuspaikalle kuljettamisesta sekä tuulivoimalan huollosta. Rakennusvaiheessa syntyviin päästöihin vaikuttaa myös tuulivoimalan sijoituspaikka. Esimerkiksi teollisuuskohteeseen rakennettaessa syntyy ympäristölle vähemmän rasitusta. Tuulivoima onkin hyvin ympäristöystävällinen vaihtoehto verrattuna hiilivoimaloihin tai muihin polttolaitoksiin. Tuulivoimaa markkinoidaankin nimenomaan sen ympäristöystävällisyyden avulla. (7.)

Tuulivoiman negatiivisia puolia ovat sen vaikutus voimalan ympäristöön, kuten esimerkiksi lintuihin sekä sen melu- ja varjostushaitat. Tuulivoimaloiden haittapuolet ovat osittain hidastaneet tuulivoiman rakennusta. Tuulivoimalalle on vaikea löytää sopivaa rakennuspaikkaa, jossa edellä mainittuja haittoja ei olisi ja paikan tuuliolosuhteet olisivat sopivat. Tuulivoimalan käyttöikä on laskettu 20 vuotta, mutta usein tästä tavoitteesta jäädyään. Käyttöikä vaikuttaa voimalan sijaintiin ja käyttöasteeseen. Hyvin suunniteltu voimala, jolle on tehty tuulimittaukset rakennuspaikkaa varten, välttyy turhilta turbulenssivaikutuksilta ja on käyttöikänsä pidempi. Varsinkin voimalan vanhetessa sen viat lisääntyvät ja käyttöprosentti laskee. Lopulta on taloudellisesti kannattavampaa purkaa voimala kuin ylläpitää sitä. (7.)

Tuulivoimassa on myös haasteellista sen sähköntuotannon ajallinen vaihtelu, joka vaihtelee päivittäin ja tunneittain tuulisuuden mukaan. Tätä vaihtelua sähköntuotan-

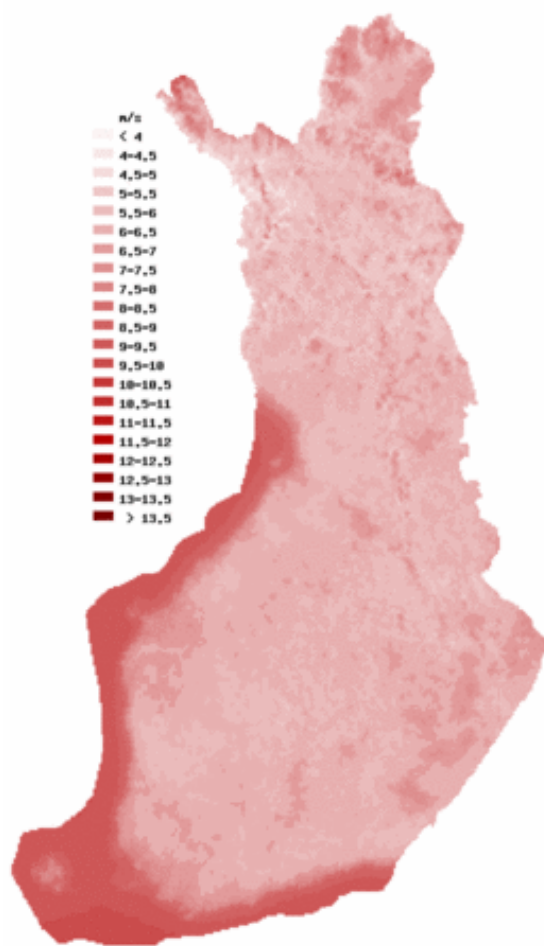
nossa on tasoitettava säätämällä muiden voimaloiden tuotantoa. Tuulivoimalla tuotetun sähkön määrän kasvaessa tarvitsee lisätä myös säätövoimaa tuotannon huonon ennustettavuuden takia. (8.)

Tuulivoimalla tuotetun vaihtosähkön pitää olla myös sähköverkon taajuudella, joten turbiinin pyörimisnopeutta pitää saada tuuliolosuhteista riippumatta säädettyä vakaaksi. Pyörintänopeuden vakautta voidaan säätää voimalaitoksen lapojen kulmaa muuttamalla. Tuulivoimalat sijaitsevat usein pitkienkin matkojen päässä sähköverkosta vaikeuttaen tuulivoimalalla tuotetun sähkön siirtoa. Suuret tuulivoimapuistot auttavat siirroista syntyviin kuluihin, joten tuulivoimaa rakennetaankin lähinnä tuulipuistoprojekteina. Tuulivoiman tuotantoa tarkastellaan huipunkäyttöajan avulla. Huipunkäyttöajassa jaetaan vuosituotanto nimellisteholla. Esimerkiksi Euroopassa tavanomainen huipunkäyttöaika tuulivoimalalle on 23 %. (9.)

2.2 Tuulivoima Suomessa

Suomessa tuulivoima on saanut alkunsa vuonna 1991, kun Imatran Voima rakensi ensimmäisen tuulivoimalan Inkoon Kopparnäsiin. Tuulivoimarakentamisen kehitys oli 2000-luvulle asti melko vähäistä, mutta on siitä lähtien kiihtynyt. Varsinkin 2000-luvun loppupuolella tuulivoiman rakentaminen on kiihtynyt Euroopan unionin asettamien uusiutuvien energioiden käyttötavoitteiden sekä Suomen valtion tuulivoimalle maksaman tuen ansiosta.(10.)

Tuulivoima sijoittuu Suomessa suurimmaksi osaksi rannikkoalueelle lähelle sähkönkulutuskeskuksia. Rannikkoalueelle on kannattavampaa rakentaa tuuliolosuhteiden takia. Kuva 4 esittää kuinka Suomen rannikkoalueilla tuulen nopeus on keskimäärin kovempaa kuin sisämaassa. Tuulen nopeus onkin tärkeimpiä valinta-kriteereitä uuden voimalan rakennuspaikkaa suunniteltaessa. (6.)



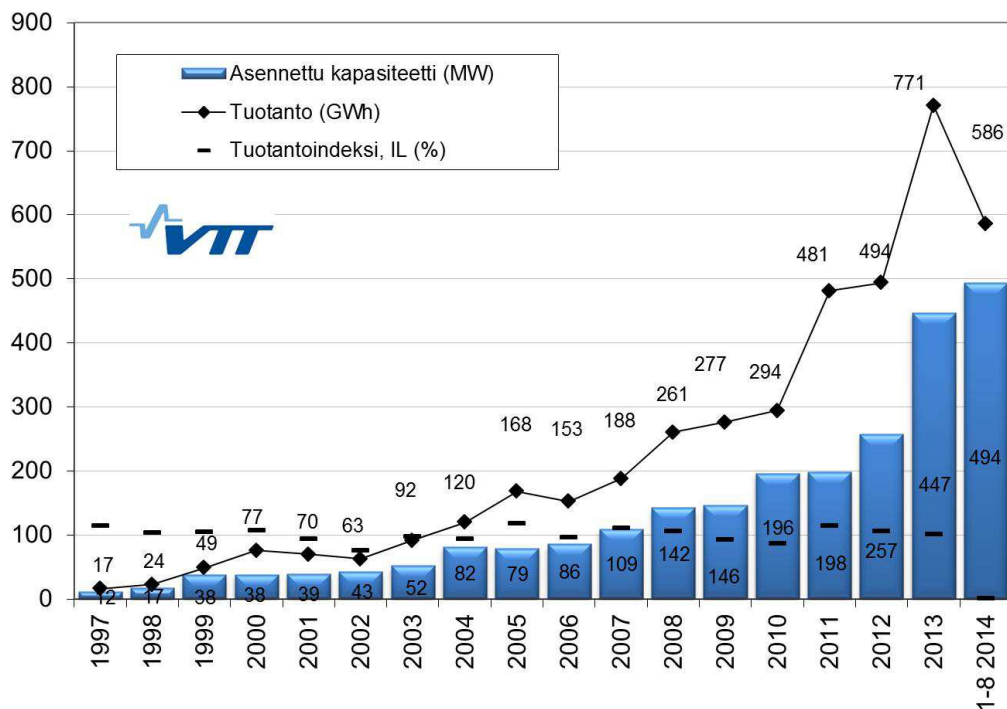
Kuva 4. Suomen tuulen keskinopeus 100 metrin korkeudessa. (6.)

Uudet tuulivoimalaprojektit sijoittuvat rannikkoalueen lisäksi entistä enemmän myös sisämaastoon sekä merelle. Uusimmat voimalat ovat kooltaan suurempia, jopa 150 metriä korkeita. Voimaloiden tuottama teho on lisääntynyt voimalan korkeuden ja la-
 pojen koon kasvaessa. Suurimmat nykyaikaiset voimalat ovat teholtaan jopa viisi me-
 gawattia. Tuulivoimaloiden kehittyminen edesauttaa tuulivoiman lisäämistä energian-
 tuotannossa sekä mahdollistaa sen, että tuulivoimaloista tulee entistä kustannustehok-
 kaampia ja niitä kannattaa rakentaa entistä enemmän myös sisämaahan. Tuulivoima-
 loiden koon suureneminen tuo lisähaasteita tuulivoimaprojekteihin. (8.)

Tuulivoiman kustannukset syntyvät pääosin rakennusvaiheessa sekä suunnittelussa
 kuten tuulenmittauksissa. Koko tuulivoimaprojektin toteutukseen voi kulua useita
 vuosia. Käyttökustannukset sen sijaan ovat melko pienet ja ne koostuvat lähinnä huol-
 loista. Tuulivoima ei ole kannattavaa sähköntuotantoa itsessään nykyisellä sähköhin-
 nalla, vaan sen tuottavuus saadaan sille myönnettävän sähkötariffin avulla. Tariffi-
 maksulla taataan tuulivoimalla tuotetulle sähkölle 83,50 €/MWh hinta. Valtio maksaa

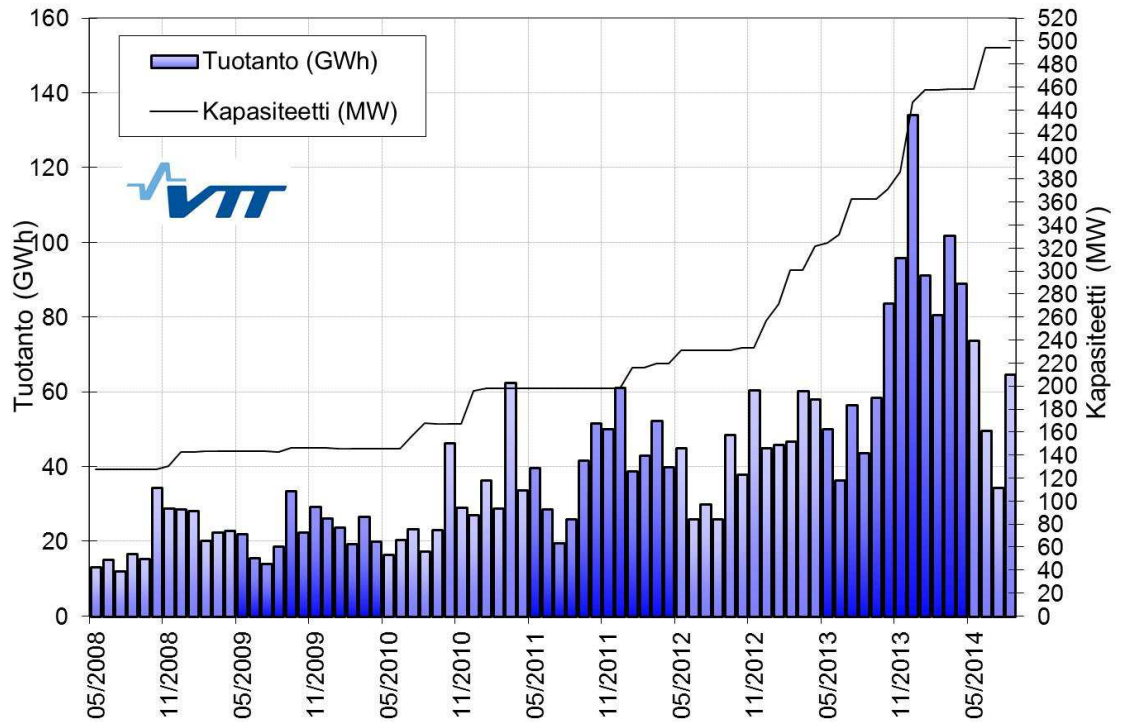
sähköstä saadun ja tariffin välisen erotuksen. Tariffin maksamisella halutaan lisätä uuden tuulivoiman rakentamista Suomessa. Lisäksi Suomi maksaa 105,30 €/MWh vuoden 2015 loppuun asti vauhdittaakseen tuulivoimatuotannon rakentamista. (11; 12)

Suomen hallituksen tavoitteena on lisätä tuulivoiman määrää nykyisestä 3500 Megawattista 6000 Megawattiin vuoteen 2020 mennessä ja 9 TWh vuoteen 2025 mennessä. Suomen uusiutuvien energioiden lisäys varsinkin tuulivoiman kohdalla on hidastellut. Monista tuulivoimapuistoista on tehty suunnitelmia mutta vain harvat niistä ovat toteutuneet. Rakentamista on yritetty nopeuttaa jouduttamalla suunnittelua ja lupien saamista, mutta lentoestelupien ja tutkavaikutusten selvittäminen voi olla tuulivoimaprojektissa hidastavana tekijänä. (12; 13)



Kuva 5. Suomen tuulivoimatuotannon kehittyminen.(14.)

Vuonna 2013 tuulivoima kattoi noin 0,9 % Suomen vuotuisesta sähkönkulutuksesta. Kyseinen tuotanto saavutettiin 211 tuulivoimalalla, joiden yhteisteho oli 448 MW. Tuulivoimalla tuotettu sähkönmäärä oli 777 GWh. Euroopassa tuulivoiman käyttöenergian tuotannossa on paljon kehittyneempää kuin Suomessa. Varsinkin sellaiset EU-maat kuten Saksa ja Espanja ovat panostaneet tuulivoimatuotantoon. Eniten maailmassa on asennettu tuulivoimaa Kiinaan, jonka kapasiteetti vuonna 2013 oli 91424 MW. Tällaisessa tilastossa vertailtuna Suomen tuulivoimatuotanto oli vähäistä asukaslukuunkin suhteutettuna. (12.)



Kuva 6. Suomen tuulivoimatuotanto ja asennettu tuulivoima. (14.)

Tuulivoiman lisäys luo tarvetta tuulenmittaukselle, jota tarvitaan tuuliolosuhteiden määrittelyyn uusille voimaloille. Mittaustuloksien mukaan saadaan määriteltyä rakennuspaikalle sopiva voimala. Erilaisia mittaustapoja on monia ja niistä etämittaukset ovat tällä hetkellä yleistymässä niiden helppouden ansiosta. (7.)

3 TUULENMITTAUSTAVAT

Tuulta mitataan, koska halutaan selvittää tuuliolosuhteita paikassa, jonne tuulivoimalaa suunnitellaan rakennettavaksi. Rakennuspaikan tuuliolosuhteita vuoden ympäri pystytään arvioimaan esimerkiksi ilmatieteenlaitoksen tuuliatlaksen avulla. Kuitenkin nämä arvot ovat vain viitteellisiä ja ne ovat mitattu usein kymmenen metriä maanpinnan yläpuolelta. Lisäksi ne voivat vaihdella paikasta riippuen paljonkin eikä niissä ole huomioitu tuulen vaihtelevuutta eri korkeuksissa. (15.)

Onkin tärkeitä mitata tarkasti tuuliolosuhteet paikassa, jonne voimalaa suunnitellaan rakennettavaksi. Mittauksia kannattaa suorittaa ympäri vuoden, jotta saataisiin selville mahdollisimman tarkasti tuulen vaihtelevuus alueella. Mittauksen pitäisi kestää vähintään kolme kuukautta. Pidempään kestäville mittauksille saavutetaan kuitenkin pa-

remmat mittaustulokset. Saatua mittaustuloksia on kyettävä vertaamaan pitkältä aikaväliltä oleviin alueentuulitietoihin tarkkojen tulosten saamiseksi. (15.)

Mitattujen tuulitietojen perusteella saadaan selville tuulivoimahankkeen kannattavuus sekä saadaan valittua sopiva tuulivoimalatyyppi rakennuspaikalle. Tärkein mittauksista selviävä asia on tuulen määrä mitatussa kohdassa. Sen avulla voidaan laskea saata-va energia ja siitä tuotettava sähkönmäärä. Yleensä mitataan monesta eri korkeudesta ainakin kymmenen minuutin välein tuulennopeus, tuulen suunta, turbulenssiaste sekä tuulen vertikaalinen nopeusjakauma. Näillä mittaustuloksista saaduilla tiedoilla pystytään tarkastelemaan kannattaako tuulivoimalan rakentaminen kyseiselle alueelle. (15.)

Tuulta mitattaessa on huomioitava myös eri korkeuksissa voimalan lapoihin vaikuttavat voimat eli tuuligradietti. Tuuligradietti kertoo voimalan lapoihin kohdistuvan kuormituksen, joka voi osaltaan vaikuttaa voimalanlapojen ennenaikaiseen väsymiseen. Lapoihin kohdistuvat voimat onkin syytä saada selville mittauksissa ja ottaa huomioon paikanvalinnassa. Tarkkojen mittaustietojen perusteella pystytäänkin valitsemaan oikeanlainen voimala paikalle rakennettavaksi. Mittauksien perusteella pystytään valitsemaan voimala, jonka käyttöikä olisi mahdollisimman pitkä ja päästäisiin lähelle suunniteltua 20 vuoden käyttöikää. Merivoimaloilla käyttöikä lasketaan olevan 20 – 40 vuotta, jonka jälkeen laitos puretaan tai tilalle rakennetaan uusi. Todellinen käyttöikä saattaa vaihdella huomattavasti eri sääoloista riippuen. Varsinkin vanhentumissaan voimalan huoltotarve kasvaa ja käyttötunnit vähenevät. (15.)

Mittauksen laatu eli tulosten tarkkuus ja vertailukelpoiset mittaustulokset ovatkin suurassa roolissa koko tuuliprojektissa. Jos onnistutaan tarkkojen tulosten perusteella valitsemaan oikeanlainen voimala ja rakennuspaikka, saadaan taattua mahdollisimman pitkäikäinen ja tuottava tuulivoimala. (15.)

3.1 Tuulen etämittaus

Alla kerrotaan tuulenmittauslaitteista, joista osa on etämittauslaitteita. Etämittauksella tarkoitetaan sitä, että mittalaite ei ole fyysisesti kosketuksissa mitattavan ilmakerroksen kanssa. Tuulenmittauslaitteissa mittaus lähtöpisteen ja mitattavan kohteen välillä tapahtuu akustisten tai optisten aaltojen avulla. Esimerkkeinä Lidar- ja Sodar-laitteet, joiden mittapiste ei ole kosketuksissa mittalaitteen kanssa. Vastaavasti mastomittaus ei

ole etämittaus, koska siinä mittausta suorittava anometri on kosketuksissa ilmakerroksen kanssa. (16.)

3.2 Mastomittaus

Mastomittauksella tarkoitetaan tuulenmittausta kuppimittarin tai kapillaarimittarin avulla, joka on kiinnitetty korkean maston päähän tuulenmittauspaikalla. Tämä mittaus tapa on jäämässä pois, koska mittauskorkeudet ovat kasvaneet. Lisäksi voimaloita rakennetaan merelle, jonne mastomittausmenetelmä ei sovi. Mastojen pystyttäminen tarvitsee myös lupia, mikä paikasta riippuen hidastaa projektia tai tekee siitä jopa mahdottoman. (19.)



Kuva 7. Tuulenmittauksissa käytettävä masto. (17.)

Mastoon voidaan sijoittaa anometri ja suunta-anturi yhdistelmä. Ultraäänianometri mittaa sekä suunnan että nopeuden. Siinä ei ole liikkuvia osia, joten saadaan parempi huoltovarmuus eikä siitä synny tuulenvastusta, jolloin mittaustulos saadaan välittömästi. Muita yleisiä anometrejä ovat kuppianometri ja propellianometri. Kummassakin hyödynnetään tuulennopeudesta riippuvaa pyörimisliikettä. Kuppianometri vaatii kalibrointia ja sen mittaustuloksia voi vääristää anometrin jäätyminen. Jäätymistä voidaan ehkäistä mittalaitteen lämmityksellä. Näiden nopeusmittauksien lisäksi käytössä voi olla tuulen suuntasensori eli tuuliviiri. Suuntasensorilla pystytään mittaamaan tuulen suunta. (19.)



Kuva 8. Ultraäänianometri THIES 2D. (18.)

Mastomittauksen huonoja puolia on sen pystyttämisen ja purkamisen kalleus. Siksi se sopiikin parhaiten pitkäaikaisiin mittauksiin. Masto pitää saada myös nostettua tarpeeksi korkeaksi, jotta se mittaa tuulta sinne sijoitettavan tuulivoimalan korkeudelta. Tämä tarkoittaa, että mastojen mittalaite pitäisi saada uusimpien voimaloiden kohdalla jopa 150 metriin asti. Maston on myös kestettävä mittauspaikan ympärivuotisia sääolosuhteita. Mastomittaus tarvitsee laajan alueen asennukseen ja sen pystytykseen kuluu runsaasti aikaa eikä ole ihan vaivaton tehtävä. Vaihtoehtoina on pystyttää masto haruksien avulla, jolloin harukset pitävät maston pystyssä. Mastolle voidaan myös rakentaa perustus, joka tekee asennuksesta tukevampaa mutta koko maston kasausprosessiin menee silloin enemmän aikaa. Koko mastomittausprojektin suunnitteluun ja toteutukseen kuluu huomattavasti enemmän aikaa kuin tuulen etämittauslaitteilla suoritettuihin projekteihin. (19.)

3.3 Doppler-ilmiö

Doppler-ilmiötä hyödynnetään tuulen etämittauslaitteissa. Sodar- ja Lidar-laitteen tuulenmittaus perustuu Doppler-ilmiöön, joka on nimetty itävaltalaisen Christian Dopplerin mukaan. Doppler-ilmiö on aallon taajuuden muutos. Se on ominaista kaikelle aaltoliikkeelle riippumatta aallon aiheuttajasta. Doppler-ilmiötä voi havainnollistaa aallon lähettäjän ja vastaanottajan välisellä liikkeellä. Äänen aiheuttajan lähestyessä ää-

niaallot menevät kasaan ja vastaanottajan kuulema taajuus muuttuu. Vastaavasti kauemmas liikkussa ääniaaltojen taajuus muuttuu suhteessa äänen vastaanottajaan. (16.)

Tuulenmittauksessa Sodar- ja Lidar-laitteilla hyödynnettävä Dopplerin kaava on esitelty alapuolella. Mittauksen lähetyspiste eli mittalaite pysyy paikoillaan ja on havainnoitsijana, kun lähetetty signaali liikkuu pois päin ja siroaa ilmassa takaisin. (16.)

$$f = f_0 * \frac{v}{v-v_l} \quad (3)$$

missä

f_0 on alkuperäinen taajuus, [Hz]

v on äänen nopeus, [m/s]

v_l on äänilähteen nopeus, [m/s]

3.4 Sodar

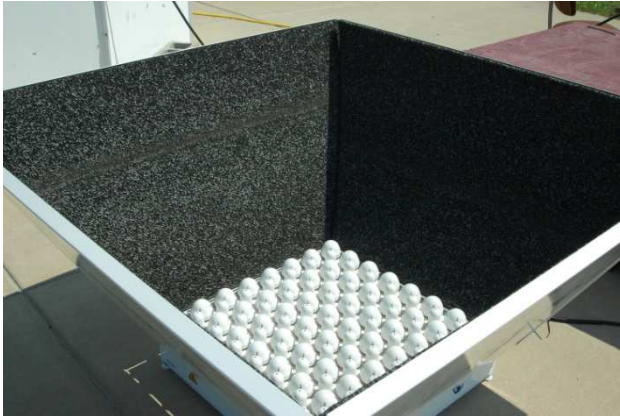
Sodar (Sonicdetection and ranging) mittauslaitteita käytetään tuulen mittaukseen. Sodar luokitellaan etämittauslaitteeksi Lidarin tavoin, koska se ei tarvitse paikallista sensoria mittauspisteessä. Sodarin mittaus toimii samalla periaatteella kuin Lidar (Lightdetection and ranging) tai radar (radio detection and ranging). Mittaus perustuu Sodarissa äänen takaisin sirontaan. Laite lähettää äänipulsseja ilmaan, jossa ääni heijastuu takaisin laitteelle. Äänen takaisin heijastumista tallennetaan mikrofoneilla. Sodarilla voidaan mitata tuuliolosuhteita kolmiulotteisesta tuulikentästä. Kolmiulotteista mittausta varten tarvitsee ääntä lähettää ja mitata eri kulmissa. Analysoidun signaalin avulla saadaan selville mitatun alueen tuulen nopeus, tuulen suunta sekä tuulen turbulenttiset ominaisuudet. Etämittauslaitteita on ollut olemassa jo kauan ja niitä on hyödynnetty erityisesti meteorologisiin ja ilmakehän mittauksiin mutta vasta viime vuosikymmeninä niitä on ruvettu hyödyntämään tuulenmittauksessa tuuliprojekteja varten. (7.)



Kuva 8. Liikuteltava Sodar-mittalaite. (20.)

Sodar saa mitattua tuulennopeutta lähettämällä äänipulsseja ilmaan monesta eri pisteestä ja usein monessa kulmassa hieman laitteesta riippuen. Sodar-laitteessa on vähintään kolme äänigeneraattoria lähettämässä ääntä eripisteistä. Uusissa laitteissa voi olla jopa 64 kappaletta äänisensoreita suorittamassa mittausta. Niissä saadaan toteutettua tuulenmittaus eri kulmissa ohjelmallisesti, joten laitteessa ei ole liikkuvia osia. Niinpä ei tarvita fyysistä kalibrointi mittaustureille. Tällä saavutetaan parempi huolto- ja toimintavarmuus laitteille. Mittaus perustuu ilman tiheydenvaihteluun, josta lähetetty ääni heijastuu takaisin. Takaisin heijastuvasta äänestä mitataan taajuudenmuutos ja saaduista mittaustuloksista saadaan selville tuulen nopeus ja suunta. Lähetetyn ja vastaanotetun äänen kulkuajan perusteella saadaan selville korkeus mittauksessa.

Yleisesti halutaan mitata tuulennopeutta tuulivoimalan turbiinin korkeudelta sekä lapojen pyörimisalalta, mutta Sodarilla voi mitata jopa 200 metriin asti. Kaikkein uusimmille laitteille luvataan mittauskorkeus jopa 500 metriin asti. (7.)



Kuva 9. Sodar-mittalaitteen mittausanturit.(21.)

Sodarin mittatuloksen tarkkuudessa saattaa olla pientä heittoa, varsinkin mittauskorkeuden kasvaessa. Laite onkin syytä kalibroida tuulitunnelissa tai kalibroituja laitetta vastaan sekä tarvittaessa uusia kalibrointi. Mittaustuloksia on myös syytä verrata esimerkiksi ilmatieteenlaitoksen tuulitietoihin kohteesta. Huonoon paikkaan sijoitettu laite voi myös vääristää tuulimittauksen tuloksia. Sodar olisi hyvä sijoittaa mittausta varten mahdollisimman esteettömään paikkaan. Yksinkertaisena sääntönä mittalaitteen pitää olla esteen korkeuden mittaisen matkan päässä esteestä. Esimerkiksi 15 metriä korkeasta puusta tarvitsee mittauslaitteen olla 15 metrin päässä. Esteettömällä ympäristöllä saadaan varmistettua mahdollisimman häiriötön mittaus. (7.)

Sodar soveltuu tuulenmittaukseen hyvin silloin, kun halutaan arvioida erityisesti tuuli-gradienttia ja saada valittua kaikkein tuottoisin voimala rakennettavaksi. Laitteilla voidaan mitata tuulen nopeutta sekä tuulen suuntaa yhtä aikaa eri korkeuksista. Laitteet ovat myös melko pienikokoisia ja niitä on mahdollisuus saada perävaunuun liitettäväksi, jolloin niiden kuljetus mittauspaikalle helpottuu. Helpon liikutettavuuden ansiosta niillä voidaan suorittaa halutessa lyhytaikaisiakin mittauksia ja niillä pystytään mittaamaan paikoissa, joissa mastomittaus ei olisi mahdollista. (22.)

Sodar-laitteella tapahtuvan mittauksen heikkona puolena on sen aiheuttama melu, josta voi olla haittaa mittapaikan lähiasukkaille. Samoin ympäristön äänet voivat häiritä Sodarin mittausta aiheuttamalla laitteen tulkitsemaan taustäänen paluusignaalksi. Taustääni voi myös vääristää paluusignaalia Sodarille, jolloin laite ei vastaanota paluusignaalia. Mittauspaikan valinnassa onkin syytä välttää paikkoja, jotka sijaitsevat melun aiheuttajien, kuten teiden tai tehtaiden lähetyvillä. Erityisesti haittaa on Sodarin oman taajuuden 2500 - 5000 Hz suuruudesta taustamelusta. Sodarin käyttämä taa-

juus riippuu laitteesta. Edellä mainitut haitat on syytä ottaa huomioon mittauspaikkaa valittaessa. Kova lumi- tai vesisade voi vaikuttaa mittauksiin mutta uusissa laitteissa sekin on huomioitu. (15.)

3.5 Lidar

Lidar (Lightdetection and ranging) on hyvin samantapainen etämittaussjärjestelmäkuin Sodar. Lidarissa käytetään valoa tuulenmittaukseen. Lidarin käyttämä valo siroaa ilman aerosoleista takaisin mittalaitteeseen, jossa mittaustulokset analysoidaan. Lidarin toimintaperiaate perustuu Sodarin tavoin Doppler-ilmiöön. Niinpä Doppler-ilmiö onkin tärkeä peruste tuulenmittauksen toteuttamisen kannalta.



Kuva 10. NaturalPowerZephIR 300 Lidar-laite maastossa. (23.)

Tuulenmittaukseen käytettävissä Lidar-laitteissa on kahta erilaista toimintaperiaatetta. Jatkuva-aaltainen Lidar, joka lähettää koko ajan tasaista aaltoa. Jatkuva-aaltainen Lidar säätää mittausta muuttamalla tunnistimen tarkennusta. Toinen toimintaperiaate on sellainen, että tunnistin pysyy paikallaan ja lähettää signaaleja pulsseina mitataksaan korkeutta. Myös Lidar-mittalaitteilla saadaan mitattua tuulen nopeutta ja suuntaa samaan aikaan monelta korkeudelta. Mittaustuloksia pystytään saamaan Sodarin tavoin 200 metristä asti. Lidarin mittauksesta ei aiheudu Sodarin tavoin lähistölle haittaa, sillä nykyisin Lidarin käyttämä laserin valon taajuus on silmälle vaaratonta. (7.)

Mittalaite lähettää mittaukseen käytettävää signaalia ilmaan. Sodar in tapauksessa ilmaan lähetetystä äänestä siroaa ilmassa osa takaisin mittalaitteelle. Tätä takaisin siroutuvaa signaalia mitataan mittalaitteella. Mitattua signaalia analysoidaan Doppler-ilmion avulla. Analysoiduksi tulokseksi saadaan tuulen nopeus tietyllä korkeudella. Mittauksien määrää lisäämällä eri kulmissa saadaan muodostettua kolmiulotteinen tuulikartta mittauskohdasta. (7.)

4 TUULENMITTAUS KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULUSSA

4.1 Tuulenmittaus

Tuulenmittaus Kymenlaakson ammattikorkeakoulussa tapahtuu Sodar-mittalaitteen avulla. Sodar-mittalaite on hankittu Hafmex Engineering Oy:lta vuonna 2012. Laite on ollut käytössä Kymenlaakson ammattikorkeakoulun tutkimusosastolla siitä lähtien erilaisissa tuuliprojekteissa. Tämä opinnäytetyö on osana kehittämässä laitteen käyttöä ja hyödyntämistä myös tulevaisuudessa.

Laitetta voidaan vuokrata eri tahoille, kuten yrityksille käytettäväksi tuulenmittaukseen tuuliprojekteissa. Sodar in pienen koon ansiosta se on helppo toimittaa mittauspaikalle. Myös laitteen mittauskuntoon saaminen ja mittauksen aloittaminen onnistuu melko nopeasti. Tärkein osa tuuliprojektissa, joka kiinnostaa yrityksiä, on mittaus tulokset. Kymenlaakson ammattikorkeakoulun käytössä olevalla ohjelmistolla saadaan mitatut tulokset vertailtua ja analysoitua sekä raportoitua selkeässä muodossa mittauksen tilaajalle. Tuulenmittauksen tulosten analysoinnista on tehty opinnäytetyö Pasi Hämäläisen toimesta vuonna 2014. Työssä käsitellään mittaus tulosten analysointia ohjelmien avulla sekä niiden vertailua ja raportointia.

Tämä opinnäytetyö koostuu ohjeen teosta Sodar in käyttöön. Ohjeessa on selitetty eri vaiheet laitteen valmistelusta mittaukseen, laitteen kuljetuksesta mittauspaikalle sekä mittauspaikalla laitteen toimintakuntoon saattamiseksi. Lisäksi ohjeet kattavat mittauksen aikana tehtävät toimenpiteet sekä laitteelle tehtävät huollot ja niiden kirjaamisen. Ohjeet on tehty mahdollisimman yksinkertaisiksi ja selkeiksi, jotta niitä olisi kokemattomankin käyttäjän helppo tulkita.

4.2 Käytössä oleva tuulenmittauslaitteisto

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun käytössä oleva Sodar on Wind collector₂ mallinen laite, jonka on valmistanut Toragon AB (kuva 11). Laitteen valinnasta on vuonna 2012 Asta Peltola toimesta opinnäytetyön. Opinnäytetyön pohjalta kilpailutettiin eri toimittajat ja tarjousten perusteella tehtiin ostopäätös nykyisen laitteen hankinnasta.



Kuva 11. Kymenlaakson ammattikorkeakoulun Sodar-mittalaite tuulenmittauspaikalle asennettuna.

Laitteen hyviä puolia ovat sen liikuteltavuus, mittaustarkkuus, mittaussmahdollisuus syrjäisissäkin paikoissa. Laitteen tietokonetta voi käyttää etäyhteyden avulla, mikä helpottaa huomattavasti laitteen käyttöä mittauksen aikana. Laite on liikuteltavissa auton perässä vedettävän karryn avulla. Mittauspaikalla laite voidaan nostaa jalkojen varaan ilmaan mittausta varten. (24.)

Laite on suunniteltu kestävämpään ympärivuotista käyttöä eri sääoloissa ja soveltuukin sen takia hyvin Suomen talveen. Mittaus tapahtuu 64 kiinteän antennin avulla, jotka mittaavat tuulta yhdeksästä eri kulmasta. Eri mittauskulmat saadaan aikaan ohjelmallisesti. Kiinteän antenni ratkaisun ansiosta laitteessa on parempi kestävyys ja säästyään huollolta ja mittalaitteiden kalibroimiselta. (24.)

5 OHJEEN TEKO KYAMKIN SODAR-LAITTEELLE

Ohjeiden teon tarkoitus oli saada tehtyä yksinkertaiset ja helposti ymmärrettävät ohjeet Kymenlaakson ammattikorkeakoulun Sodar-laitteelle. Ohjeiden avulla pystyy kokematonkin käyttäjä valmistelemaan Sodarin mittausta varten sekä suorittamaan mittauksen. Laitteen toimittajalla on kattavat ohjeet englannin kielellä, niissä on kerrottu laitteesta monipuolisesti. Nyt tehdyt ohjeet käyvät yksityiskohtaisemmin läpi nimenomaan mittaukseen ja laitteen käyttöön tarvittavat kohdat. Käyttöohjeissa panostettiin selkeyteen ja havainnollistettiin toimenpiteiden toteutusta kuvilla. Ohjeet koostuvat viidestätoista osasta, joista on kerrottu seuraavassa luvussa pääkohdittain. Käyttöohjeeseen lisäksi tehtiin huoltopäiväkirja, jonka avulla pystytään seuraamaan laitteen huoltokertoja.

5.1 Sodar-laitteelle tehtävät valmistelut mittausta varten

Mittauksen valmistelut alkavat jo hyvissä ajoin ennen itse mittauksen aloittamista. Valmistelut alkavat, kun tuuliprojektille tarvitsee suorittaa tuulimittauksia. Voimalan rakennuspaikan valintaan on vaikuttanut paikan tuuliolosuhteet, liityntämahdollisuudet sähköverkkoon, rakentamista ja huoltoa tukeva infrastruktuuri. Tuuliolosuhteita rakennuspaikasta on arvioitu jo paikkaa valittaessa esimerkiksi tuuliatlaksen avulla. Vasta rakennuspaikan valittua on syytä suorittaa tarkempia tuulimittauksia mahdollisille voimalan rakennuspaikoille. (25.)

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun Sodar-laitteen käytöstä mittauksissa tehdään sopimus, jossa määritellään kummankin osapuolen velvoitteet. Sopimuksen tekovaiheessa käydään läpi mittauksen vaatimukset ja tavoitteet sekä aikataulu. Tuuliprojektista riippuen mittausaika voi vaihdella kolmesta kuukaudesta useisiin vuosiin. Näin ollen laitteen käytöstä on syytä tehdä aikataulu ja mittaustuloksista raportointisuunnitelma, joiden mukaan toimitaan. Mittaustuloksia saa analysoida jo kesken mittauksen, jolloin mittauksen tilaaja saa tuulitietoja jo mittauksen aikana. (25.)

Ohjeissa käydään läpi eri yhteystapojen muodostus Sodarin Field-PC:lle. Omalta tietokoneelta on mahdollista ottaa etäyhteys laitteeseen sen ollessa mittausspaikalla. Etäyhteyden avulla voidaan tallentaa ja analysoida mittauksesta saatua tietoa jo kesken mittauksen. Tuloksien perusteella voidaan arvioida mittauksen tarkkuutta. Kesken mittauksen voidaan havaintojen perusteella arvioida ovatko mittaustulokset luotettavia

vai tarvitseeko tehdä muutoksia mittalaitteen säätöihin mittauksen parantamiseksi.
(25.)

Ennen laitteen mittauspaikalle vientiä on käytävä tarkistamassa mittauspaikan soveltuvuus mittaukselle. Sodar-laite pitää saada kuljetettua mittauspaikalle. Helpoiten kuljetus tapahtuu laitteen ollessa peräkärkyssä, jolloin sen siirtäminen onnistuu auton perässä vetämällä. Mittauspaikassa on otettava huomioon ympäristöstä aiheutuvat haitat mittaukselle sekä mittauksesta aiheutuvat äänihaitat ympäristöön. Mittauspaikan soveltuvuuden varmistaminen mittausta varten on mittaustulosten tarkkuuden kannalta tärkeätä. Alustan mittauspaikalla tarvitsee olla mahdollisimman tasainen mittausta varten, sillä laite pitää saada säädettyä aivan vaakatasoon mittaamista varten. Pienikin kulma laitteen sijoittelussa vaikuttaa mittauspisteessä jo valtavasti. Tasaisuuden säätö tapahtuu laitteen jalkojen avulla. Tasaisuus todetaan laitteessa olevan vatupassin avulla. (25.)

Sodaria käytettäessä pitää miettiä sen käyttämä energianlähde. Sodari saa käyttövoimansa akuista, joiden varaustilaa pidetään yllä. Akkuja voidaan ladata Sodarin oman generaattorin ja aurinkopaneelin avulla. Mittauspaikasta riippuen laitteelle voidaan tuoda ulkoinen kolmivaihesähköpistoke akkujen lataamista varten. Aina ei kuitenkaan ole käytännöllistä tuoda ulkoista sähkölähdettä laitteelle. (25.)

Mittalaitteen asetukset tehdään etukäteen ohjelmistoon. Näitä asetuksia ovat tallennuskansion sekä mittausasetusten teko. Laitteelle suoritetaan omat toimenpiteet kuljetukseen valmistelussa. Toimenpiteissä käydään läpi ohjeissa oleva lista turvallisen kuljetuksen varmistamiseksi. Kuljettamisessa mittauspaikalle on huomioitava laitteen paino, joka voi mittauspaikan maastosta riippuen vaikeuttaa laitteen siirtelyä. Laitteen kuljettamiseen liikenteessä pätee normaalit liikennesäännöt ja rajoitukset. (25.)

5.2 Mittauksen aloittaminen

Ennalta laitteelle hyvin suoritettut valmistelut nopeuttavat mittauksen aloittamista mittauspaikalla. Mittauspaikalla laite saadaan mittausvalmiuteen noudattamalla ohjeissa kerrottuja kohtia. Kun laite on saatu mittausvalmiiksi voidaan se kytkeä päälle. On tärkeää huomioida turvallisuus kaikissa laitteen kasaussvaiheissa ja varsinkin laitetta käynnistäessä on huomioitava kuulosuojainten käyttö. Käynnistyessään laite suorittaa Self-checkin, jolla Sodar testaa toimintaansa. Self-checkin suoritettua voi laitteella

aloittaa mittauksen. Aluksi pitää tarkkailla, että laite toimii oikein ja mittaustulokset tallentuvat niille tehtyyn tallennustilaan. (25.)

Käyttöohjeissa on selitetty edellä mainittuja kohtia tarkemmin ja kattavammin. Tärkeimpiä asioita, joita ohjeista pitää ymmärtää, ovat turvallisuustekijät. Tehtyä käyttöohjetta noudattamalla saadaan laitetta käytettyä oikein ja vältetään aiheuttamasta vahinkoa laitteelle tietämättömyyden takia. Ohjeita noudattamalla vältetään myös ihmiselle aiheutuvalta tapaturmalta.

6 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli käyttöohjeen teko Kymenlaakson ammattikorkeakoulun käytössä olevalle Sodar-laitteelle. Opinnäytetyössä selvennettiin tuulen hyödyntämistä energian tuotannossa sekä Suomessa että globaalisti. Käytiin läpi eri tapoja toteuttaa tuulenmittaus, sekä toimintaperiaate niiden toiminnan takana. Tärkeimpinä tuulenmittaus laitteista oli Sodar, johon myös opinnäytetyössä tehty ohje on.

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun käytössä olevaan Sodar-laitteeseen tutustuin siihen olevien englanninkielisten ohjeiden pohjalta. Näistä ohjeista selkeni laitteen perustoiminta sekä tarkempia mittaustulosten analysointiin tarvittavia tietoja. Olennaisena osana laitteeseen tutustumiseen oli laitteen toimittaminen mittauspaikalle. Siinä pääsin osalliseksi suorittamaan laitteelle mittausta varten tehtäviä valmisteluita sekä kuljettamaan laitteen mittauspaikalle. Mittauspaikalla laitetta kasatessa pystyi itse toteuttamaan toimet, joita tarvitsi suorittaa sekä moni tärkeitä turvallisuus asioita, joita pitää laitetta käytettäessä huomioida. Näiden kerättyjen tietojen pohjalta pystyi alkamaan toteuttamaan käyttöohjeen luomista Sodaria varten. Kymenlaakson ammattikorkeakoulun insinööri-toimiston Erja Tuliniemi oli luonut ohjeelle osioita, joissa käytiin varsinkin tietokoneohjelman käyttöä läpi.

Tavoitteena ohjeelle oli saada siitä selkeä ja havainnollinen, jotta sen avulla pystyi helposti aloittamaan mittauksen Tätä tavoitetta lähdin toteuttamaan lisäämällä paljon kuvia havainnollistamaan tehtäviä toimintoja. Pyrin myös korostamaan ohjeissa kohtia, joiden tunsin olevan tärkeimpiä. Varsinkin laitteelle mittausta varten tehtävät ennakkovalmistelut nopeuttavat mittauksen aloittamista mittauspaikalla huomattavasti. Muodostuneiden ohjeiden avulla pystyy suorittamaan mittaukseen vaadittavat toimenpiteet tuntematta laitteen toimintaa ennalta. Tämä mahdollistaa sen, että laitteelle ei

synny käyttövirheen takia vaurioita ja laitetta on helpompi käyttää. Tulevaisuudessa ohjeita tullaan muokkaamaan ja päivittämään tarpeen mukaan. Tätä varten ohjeet tehtiin eri osioihin, jolloin niiden muokkaaminen on helpompaa.

Työn tavoitteisiin päästiin ohjeiden luonnin osalta. Saatiin muodostettua käyttökelpoiset ohjeet, joita voidaan hyödyntää myös tulevaisuudessa. Ohjeiden avulla laitteen käyttö helpottui ja mittauksen aloittaminen nopeutui. Laitteen ohjelman käyttöä käytiin ohjeessa läpi vain mittauksen suorittamisen kannalta. Raportoinnissa käytiin laajasti läpi tuulen hyödyntämistä energian tuotannossa ja tuulivoiman rakentamisen kehittymistä. Lisäksi käytiin perusteellisesti läpi miksi tuulta tarvitsee mitata ja miten mittaus onnistuu.

LÄHTEET

1. Haapanen, E.; Holttinen, E.; Holttinen, H.; Laakso, T.; Paakkari, M.; Malmgren, F. & Tammelin, B. 2004. Tuulivoiman tietopaketti. Saatavissa: http://www.tuulivoimatieto.fi/tuulivoima_tietopaketti [viitattu 8.9.2014]
2. Mitä tuuli on? Tuulivoimatietosivusto. Tuulivoiman tietopaketti. Suomen tuulivoimayhdistys ry:n internetsivut. Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/tuuli> [viitattu 14.9.2014]
3. Haapanen, E. 2004. Tuulivoimatekniikka. Kevät 2014. Saatavissa: www.tuulitaito.fi/Artikkelit/tuulivoimatekniikkaa_luento.ppt [viitattu 19.9.2014]
4. Betz limit. REUK The Renewable Energy internetsivut 2010. Saatavissa: <http://www.reuk.co.uk/Betz-Limit.htm> [viitattu 19.9.2014]
5. Huhtinen, M; Korhonen, R; Pimiä, T; & Urpalainen, S; 2013. Voimalaitostekniikka. Opetushallitus 2008.
6. Mitä on tuulivoima. Suomen tuuliatlas internetsivut. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/tuulivoima> [viitattu 23.9.2014]
7. Manwell, J; McGowan, J & Rogers A. (2009). Wind Energy Explained: Theory, design and application.
8. Tuulivoima. Energiatieteollisuus internetsivut 2014. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/tuulivoima> [viitattu 1.11.2014]
9. Tuulivoimasanastoa. Suomen tuulivoimayhdistys ry:n internetsivut 2013. Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/sanasto> [viitattu 1.11.2014]
10. Suomen tuulivoimalat. Tietoportin internetsivut 2014. Saatavissa: http://www.tietoportti.com/Suomen_tuulivoimalat.html [viitattu 4.11.2014]

11. Tuet tuulivoiman rakentamiselle. Tuulivoimaopas internetsivut 2013. Saatavissa:
http://www.tuulivoimaopas.fi/tuulivoima_suomessa/tuet_tuulivoiman_rakentamiselle [viitattu 4.11.2014]
12. Tuulivoima. Energiateollisuuden internetsivut 2013. Saatavissa:
<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/tuulivoima> [viitattu 6.11.2014]
13. Tietoa tuulivoimasta. Suomen tuulivoima Oy:n internetsivut 2013. Saatavissa:
<http://www.suomentuulivoima.fi/tietoa-tuulivoimasta/> [viitattu 6.11.2014]
14. Suomen tuulivoimatilastot. VTT:n internetsivut 2013. Saatavissa:
<http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/index.jsp> [viitattu 6.11.2014]
15. Haapanen E. Tuulimittausten merkitys ja mahdollisuudet tuulipuiston suunnittelussa ja käytössä 2010. Saatavissa:
<http://www.tuulitaito.fi/Artikkelit/tuulimittauksista.pdf> [viitattu 6.11.2014]
16. Järvinen, S.: Tuulen nopeuden etämittausta LIDAR-tekniikan avulla. Diplomityö 2011. Tampereen teknillinen yliopisto.
17. KapasystememsKy:n valmistama teleskooppimasto. Weltestsystems internetsivut 2014. Saatavissa:
http://weltestsystems.com/joomla/index.php?option=com_content&task=section&id=10&Itemid=36 [viitattu 6.11.2014]
18. Ultrasonic anemometers. Ammonit internetsivut 2014. Saatavissa:
<http://www.ammonit.com/en/products/sensors/ultrasonic-anemometers> [viitattu 6.11.2014]
19. Bailey, B; McDonald, S; Bernadett, D; Markus, M.& Elsholz, K. 1997. Wind Resource Assessment Handbook.

20. PCS.2000-24/LP Trailer Sodar-laite. Meteorologischesstechnik GmbH internetsivut 2014. Saatavissa: <http://www.metek.de/product-details/pcs2000-24lp-trailer.html> [viitattu 7.11.2014]
21. SODAR. University of Notre Dame: Environmental Fluid Dynamics program internetsivut 2014. Saatavissa: <http://www3.nd.edu/~dynamics/efd/sodar.html> [viitattu 7.11.2014]
22. About Sodar 2013. Saatavissa: http://sodar.com/about_sodar.htm [viitattu 5.11.2014]
23. Tuulen mittaus. Saimaa Gardens Services internetsivut 2014. Saatavissa: <http://www.tuulisaimaa.fi/drupal/?q=fi/node/11> [viitattu 5.11.2014]
24. Toragon AB 2012. Wind collector₂ user manual versio 3.02
25. Tuulivoima. Tuulivoimalan mitoitus Suomen tuuliatlas internetsivut 2011. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html> [viitattu 12.11.2014]