

OPINNÄYTETYÖ

SASKA PITKÄNEN 2012

PIENTUULIVOIMA JA SEN KÄYTTÖ



**Rovaniemen
ammattikorkeakoulu**
University of Applied Sciences
LUC

KONE- JA TUOTANTOTEKNIikka

Opinnäytetyö

PIENTUULIVOIMA JA SEN KÄYTTÖ

Saska Pitkänen

2012

Toimeksiantaja Rovaniemen ammattikorkeakoulu

Ohjaaja Kai Ryyänen

Hyväksytty _____ 2011 _____

Työ on kirjastossa lukusalikappale

Tekijä	Saska Pitkänen	Vuosi	2012
Toimeksiantaja	Rovaniemen ammattikorkeakoulu		
Työn nimi	Pientuulivoima ja sen käyttö		
Sivu- ja liitemäärä	36 + 8		

Opinnäytetyön tavoitteena oli koota tietoa pientuulivoimasta ja sen käyttösovelluksista. Työssä selvitettiin, mitkä asiat vaikuttavat pientuulivoimalan toimintaan, ja miten pientuulivoimala voidaan mitoittaa kohteen tarpeiden mukaan.

Työssä käsitellään tuulta ja pientuulivoimaa teoriassa ja käytännössä. Teoriaosuudessa tutustutaan tuuleen, pientuulivoimaan ja sen käyttösovelluksiin sekä pientuuliturbiineihin. Käytännön osuudessa käsitellään pientuulivoimalan mitoitusta ja siihen liittyviä asioita esimerkkien avulla. Opinnäyte antaa tietoa siitä, mitä on hyvä ottaa huomioon pientuulivoimaa hankittaessa, miten pientuulivoimala voidaan mitoittaa, sekä miten pientuulivoimalan asennus voidaan suorittaa.

Tuulivoima tarjoaa hyvän ratkaisun sähköverkon ulkopuolisten kohteiden sähköistämiseen ja sähköverkkoon kuuluvien kohteiden omavaraisuuden parantamiseen. Tuulivoiman tuotantotehokkuus riippuu kohteen tuuliolojen ja ympäristön soveltuvuudesta tuulivoiman tuotannolle. Yhdistämällä aurinko ja tuuli energia hybridivoimalaksi, voidaan luoda tehokas ja varma energian lähde pieniin energian tarpeisiin.

Author	Saska Pitkänen	Year	2012
--------	----------------	------	------

Commissioned by Rovaniemi University of Applied Sciences

Subject of thesis Small wind turbines and their use

Number of pages 36 + 8

The goal of this thesis was to gather information about small scale wind power production and its applications. Aim was to study which factors affect the operation of small wind turbine and how they can be sized up and calculated to the needs of the desired use.

In this thesis wind and small scale wind power production are reviewed in theory as well as in practice. Theory is gathered from different sources. It introduces the basic information of wind, small scale wind power production, wind turbines and applications of wind power. In the practical section of the text, the sizing up and calculating part of small scale wind power production is presented with case studies. The thesis provides information on what should be taken into account when purchasing small wind turbines, how small wind turbine can be sized up and calculated properly and how the small wind turbine installation can be performed.

Wind power provides good solutions in cases where sites outside the power grid are electrified or electrical self-sufficiency is wanted to be improved. The efficiency of the wind power production depends on the suitability of sites wind conditions and environment. Reliable way of producing electricity can be created by combining solar- and wind power to so called hybrid power plant. Hybrid power plants can provide solid energy source for small energy needs.

Key words: wind, small wind power systems

SISÄLLYSLUETTELO	
KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO.....	1
1 JOHDANTO.....	2
2 TIETOA TUULESTA	3
2.1 Tuuli.....	3
2.2 Tuulen nopeus.....	3
2.3 Tuulen suunta	4
2.4 Geostrofinen tuuli	4
2.5 Tuulen rajakerros.....	5
2.6 Turbulenssi	5
2.7 Suomen tuuliolot.....	6
3 TUULIVOIMA.....	8
3.1 Tuulienergian valjastaminen	8
3.2 Tuulivoimalan osat.....	8
3.3 Tuulienergian laskeminen.....	10
4 PIENTUULIVOIMA	11
4.1 Pientuulivoimala	11
4.2 Pysty akseliset tuulivoimalat.....	12
4.3 Vaaka-akseliset tuulivoimalat.....	12
5 KOHTEEN SÄHKÖISTÄMINEN PIENTUULIVOIMALLA.....	14
5.1 Pientuulivoimala energiantarpeen ratkaisuksi.....	14
5.2 Kohde	14
5.3 Invertterin ja akuston valinta	20
5.4 Tuulivoimalan valinta	21
5.5 Kahden erilaisen voimalan soveltuvuus esimerkkikohteeseen	21
5.6 Yhteenvedo kohteen sähköistämisestä	23
6 ROVANIEMEN AMMATTIKORKEAKOULUN TUULITURBIINIT.....	24
6.1 Tuuliturbiinien toimintakunnon selvittäminen	24
6.2 Tuuliturbiinit	25
7 ASENNUSSUUNNITELMA.....	27
7.1 Asennuspaikka	27
7.2 Tuuliturbiinien mastot.....	28
7.3 Kiinnitysholkit.....	28
7.4 Kiinnitys	29
8 YHTEENVETO	31
LÄHTEET	33
LIITTEET	36

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

KUVA 1. AIR403 -POTKURITURBIINI.....	26
KUVA 2. WINDSIDE WS-0,30C -TUULIRUUVITURBIINI.	26
KUVA 3. TUULITURBIINIEN ASENNUSPAIKKA.	27
KUVA 4. MASTON TYVI	28
KUVA 5. WINDSIDE -TUULIRUUVITURBIININ KIINNITYSHOLKKI JA MASTOON LUKITUS.	29
KUVIO 1. SÄÄASEMAN TUULI JAKAUMA: TUULIRUUSU JA NOPEUSJAKAUMA.....	4
KUVIO 2. TUULEN KERROSTUMINEN	5
KUVIO 3. KESKIMÄÄRÄINEN GEOSTROFINEN TUULI [M/S] EUROOPASSA.....	7
KUVIO 4. ESIMERKKI KOHTEEN TUULIRUUSU	15
KUVIO 5. ESIMERKKI KOHTEEN TUULEN NOPEUSPROFIILI 50M.....	16
KUVIO 6. TUULEN NOPEUSPROFIILI HAILUODON LENTOKENTTÄLLÄ.....	17
KUVIO 7. MITTAUSTULOKSET: HAILUODON LENTOKENTTÄ [KN.]	17
KUVIO 8. AIR403 -KUVAAJA: TEHO / TUULEN NOPEUS.	3
TAULUKKO 1. MÖKIN ENERGIANKULUTUS KWH/VRK	20

1 JOHDANTO

Fossiilisten energianlähteiden ehtyessä on keksittävä korvaajia yhä kasvavalle energiantarpeelle. Ennen energianpulan lopullisen ratkaisun löytymistä, on energiantarve tyydytettävä jollain tavalla. Uudet ja vanhat energiantuotantomuodot kamppailevat rintarinnan, jokaisella on etunsa ja haittansa.

Tässä opinnäytteessä keskitytään tuulivoimaan, joka on yksi vanhimmista uusiutuvan energian tuotantomuodoista. Tuulivoimaa on todistettavasti käytetty jo 600 vuotta ennen ajanlaskumme alkua vedennostamiseen viljelyksille (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009). Suuren mittakaavan tuulivoima ei vielä tarjoa kovinkaan kannattavaa ratkaisua globaalin energiakriisin ratkaisuksi, mutta se tarjoaa hyviä mahdollisuuksia ratkaisuksi pienempiin energiantarpeisiin.

Tämän työn tarkoituksena on niin sanotusti palata tuulivoiman juurille, ja tarkastella, mikä on sen potentiaali nykyään, pienen yhteisön tai yksilön energian tarpeita ratkaistaessa, esimerkiksi sähköverkon ulkopuolisen kesämökin sähköistämässä.

2 TIETOA TUULESTA

2.1 Tuuli

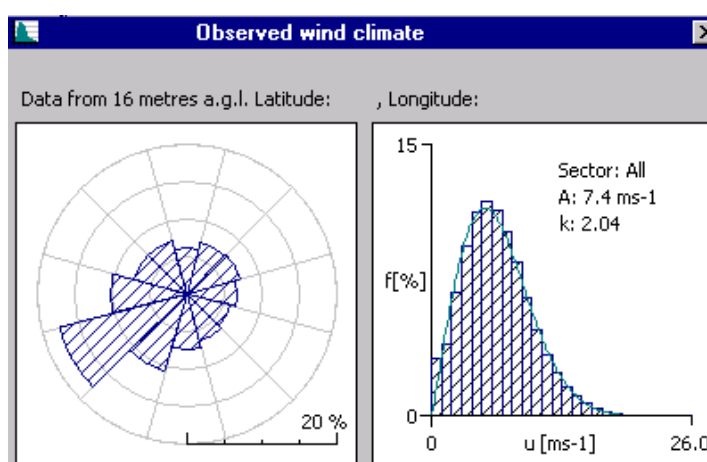
Suurin osa maailman energiasta on peräisin auringon säteilystä. Auringon säteilyteho maan ilmakehässä on noin 1370 W/m^2 , josta noin 1-3 % muuttuu tuulienergiaksi eli tuuleksi. Auringon säteily lämmittää maapallon pintaa eri tavalla eri leveysasteilla. Leveysasteiden 38°N ja 38°S välinen alue saa enemmän säteilyenergiaa kuin menettää sitä ulossäteilynä. Koska ilmakehä pyrkii säilyttämään lämpötasapainon, siirtyy lämpö subtrooppiselta ja trooppiselta vyöhykkeeltä kohti maapallon napoja. Navoilla auringon säteilyn lämmittävä vaikutus on huomattavasti pienempi, kuin esimerkiksi päiväntasaajalla. Noin 70 % säteilyn lämmöstä siirtyy tuulien mukana. Paikallisiin tuulioloihin vaikuttavat lämpötilaerot, maan ja meren suhde, maan pinnanmuodot sekä matalapainetoiminta ja niiden keskuksien liikeradat. Tuuli on siis ilmakehässä liikkuva maanpinnan suuntainen ilmavirtaus. (Ilmatieteenlaitos, Risö DTU, Vaisala Oyj, Wpd Finland Oy, Ålands Vindenergi Andelslag ja Motiva 2009.)

2.2 Tuulen nopeus

Tuulen nopeus ilmoitetaan yleisesti SI -järjestelmän mukaan metreinä sekunnissa [m/s]. Tuulen nopeus mitataan 10 metrin korkeudelta maanpinnasta World Meteorological Organizationin suosituksen mukaan. Käytännössä mittauskorkeus kuitenkin suhteutetaan mittauspistettä ympäröivän maaston mukaan. Esimerkiksi metsäisessä maastossa mittaus suoritetaan 10 metriä latvuston yläpuolelta. (Ilmatieteenlaitos ym. 2009.)

2.3 Tuulen suunta

Tuulen suunta on ilmansuunta, josta tuulee. Jos tuulen suunta on 0° pohjoisesta, nuotion savu leviää tuulen mukana 180° etelään. Ilmaston kuvauksissa voidaan käyttää tuuliruusua kuvaamaan tuulen suhteellisia osuuksia eli suunnan ja nopeuden jakaumia eri ilmansuunnista (Kuvio 1). (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)



Kuvio 1. Sääaseman tuuli jakauma: tuuliruusu ja nopeusjakauma.

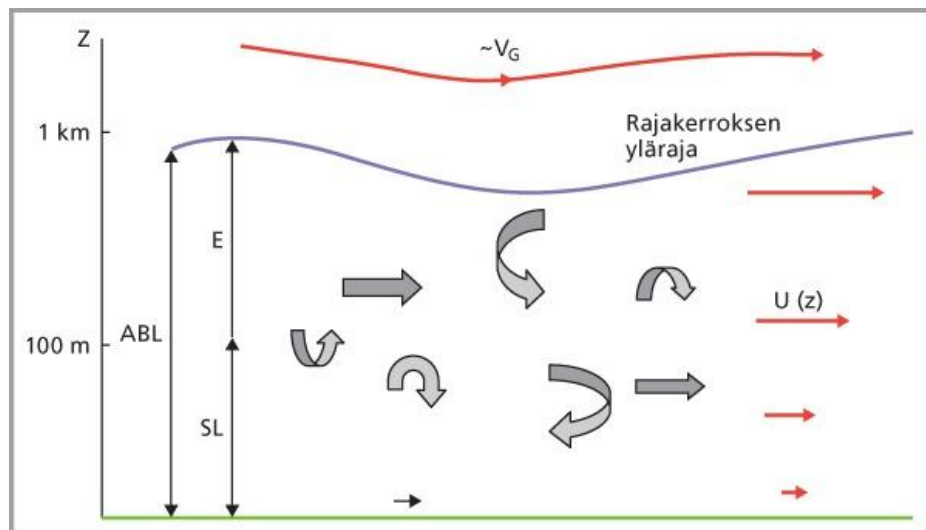
(Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009)

2.4 Geostrofinen tuuli

Geostrofinen tuuli on ilman liikettä matalapaineen alueen sisällä. Geostrofisen tuulen suuntaan ja nopeuteen vaikuttavat isobaarit, coriolisvoima, ilmanpaine ja ilmantiheys. Lämpötilaeroista johtuva ilman paine-ero saa ilmamassan liikkumaan korkeapaineen alueelta matalapaineen alueelle. Paine-eron kasvaessa tuulen nopeus kasvaa. Geostrofiset tuulet vaikuttavat niin sanotun tuulen rajakerroksen yläpuolella noin 1000 metrin korkeudessa maanpinnasta. (Ilmatieteenlaitos ym. 2009.)

2.5 Tuulen rajakerros

Suomessa tuulen rajakerros eli Atmospheric Boundary Layer on tyypillisesti alue, joka alkaa maanpinnasta ja jatkuu noin 100–1000 metriin maanpinnan yläpuolelle. Tuulen rajakerroksen korkeuden vaihtelu johtuu ilmakehän mukautumisesta maan pinnan muotoihin. Tuulen rajakerros on maanpinnan ja vapaan ilmakehän välinen puskurialue, jossa ilman virtaukset ovat lähes aina turbulenttisia. Rajakerros koostuu kahdesta pienemmästä alueesta, Surface Layerista eli pintakerroksesta ja Ekmanin kerroksesta (Kuvio 2). (Ilmatieteenlaitos ym. 2009.)



Kuvio 2. Tuulen kerrostuminen

(Ilmatieteenlaitos ym. 2009.)

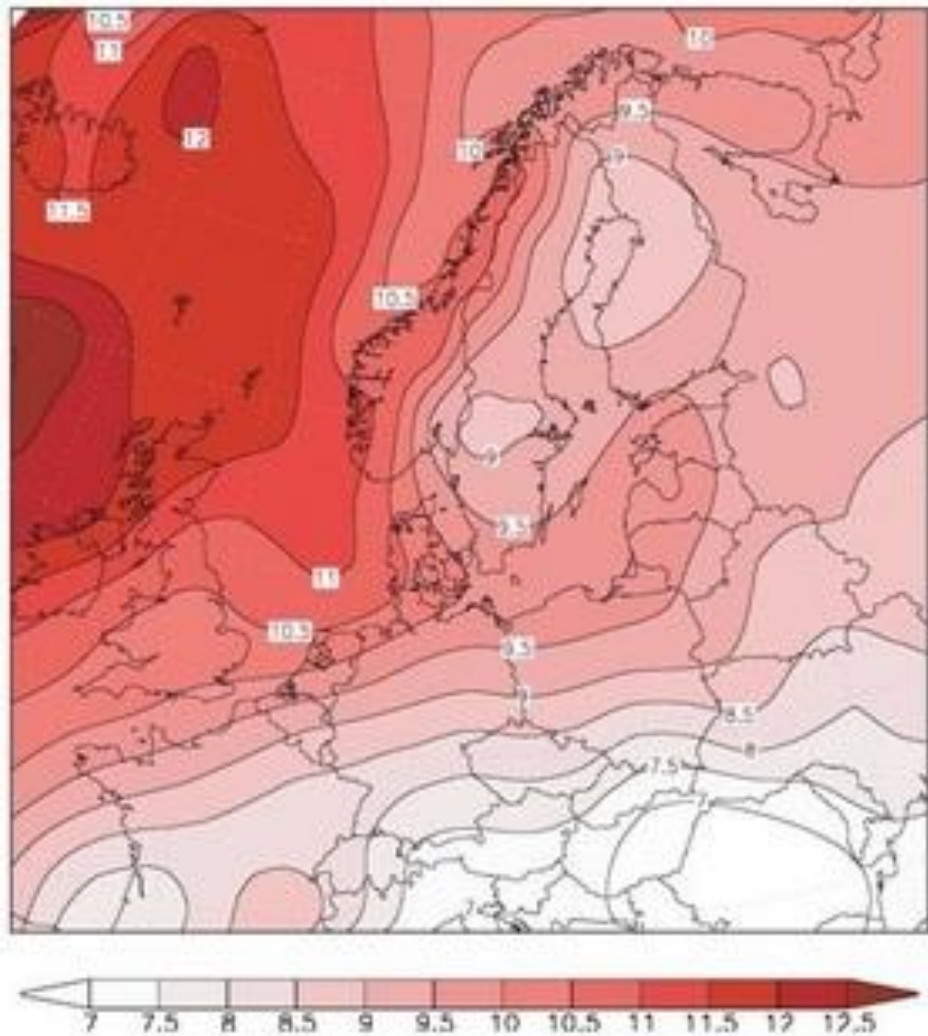
2.6 Turbulenssi

Turbulenti virtaus eli pyörteinen virtaus on ilman liikettä, jossa tuulen nopeus ja suunta vaihtuvat koko ajan. Nämä vaihtelut ovat kolmiulotteisia. Turbulenti virtaus syntyy kahdella tavalla: termisesti tai mekaanisesti. Terminen turbulenssi johtuu ilman tiheyden vaihteluista, jolloin kylmä ilma pyrkii virtaamaan pystysuoraan alaspäin ja lämmin ilma ylöspäin. Mekaaninen turbulenssi aiheutuu maaston rosoisuudesta ja tuulen nopeuden

muutoksesta maanpinnan korkeuden mukaan. (Ilmatieteenlaitos ym. 2009.) Turbulenssin määrä ja voimakkuus vaikuttavat tuulivoimalan käyttöikään. Mitä enemmän turbulenssia esiintyy ja mitä voimakkaampaa turbulenssi on, sitä suuremmalle rasitukselle voima joutuu. Merellä turbulenssi on usein vähäisempää kuin maalla. Rannikolla turbulenttisuus voi olla erittäin voimakasta, vaikka tuuliolot muuten olisivatkin tuulivoimalalle erittäin suotuisat, sillä pinnan- ja meteorologisen rosoisuuden muutos mereltä maalle on huomattava. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

2.7 Suomen tuuliolot

Suomen tuulioloihin vaikuttavat pääasiassa maantieteellinen sijaintimme, Atlantilta suuntautuvat matalapaineen alueet ja Golf-virta. Golf-virran ansiosta maamme keskilämpötila nousee korkeammalle kuin idempänä, esimerkiksi Siperiassa. Korkeammasta keskilämpötilasta johtuen geostrofisen tuulen keskimääräinen nopeus kasvaa korkeaksi, jopa 9 - 9,5 m/s (Kuvio 3). Tuulen keskinopeus vaihtelee suuresti. Merialueilla tuuli voi puhaltaa jopa 8 m/s, kun sisämaassa tuulennopeus yltää vain noin 3 m/s. Suomessa lounas on vallitseva tuulensuunta. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)



Kuvio 3. Keskimääräinen geostrofinen tuuli [m/s] Euroopassa.

(Ilmatietenlaitos ym. 2009)

3 TUULIVOIMA

3.1 Tuulienergian valjastaminen

Tuulivoima on tuulen eli ilman virtauksen liike-energian muuttamista tuuliturbiineilla sähköenergiaksi. Tuulivoimaloissa roottorin lavat ovat aerodynaamisesti muotoiltuja ja roottorin liikkeelle panevana voimana on tuulen aiheuttama nostevoima tai ilmanvastuksen ero lavan eri osissa.

Ennen tuulesta valjastettiin käyttövoimaa esimerkiksi myllynkiven pyörittämiseksi, jotta vilja saatiin jauhettua jauhoksi. Nykyään tuulen voima käytetään pyörittämään sähkögeneraattoreita. Generaattoreiden tuottama sähkö voidaan siirtää sähköverkkoja pitkin muualle tai käyttää tuotantopaikalla, kuten pientuulivoima yleensä käytetään. Tuulivoima on ehtymätön energian lähde ja sitä on saatavilla kaikkialla, mutta koska sen rakentaminen on vielä kallista, voimaloita kannattaa pystyttää vain paikoille, jossa tuuliolot ovat voimalalle suotuisat. Suomessa suotuisimmat tuulivoimalan paikat ovat merellä, rannikolla sekä tuntureiden ja korkeiden vaarojen huipuilla.

3.2 Tuulivoimalan osat

Tuulivoimala tarkoittaa tuotantoyksikköä, johon kuuluvat kaikki osat ja komponentit, jotka ovat osana tuottamassa, siirtämässä, muokkaamassa, varastoimassa ja tukemassa tuulienergian tuotantoa.

Mastolla tuuliturbiini pyritään sijoittamaan paikkaan, jossa tuuliolot ovat mahdollisimman suotuisat sähkön tuottamisen kannalta. Esimerkiksi tuuliturbiini voidaan nostaa mastolla ylös puiden latvuston yläpuolelle, jossa tuulee esteettömämmin kuin maassa. Masto voidaan valmistaa lähes mistä tahansa materiaalista, joka kestää jatkuvaa tuulen ja turbiinin aiheuttamaa räsitusta.

Harukset ovat yleensä teräsvaijerista valmistettuja tukia, jotka vähentävät mastoon kohdistuvien voimien vaikutusta ja estävät mastoa taipumasta.

Siivet ja lavat ovat voimalan osia, jotka valjastavat tuulen liikkeen generaattorille sopivaksi. Esimerkiksi tuuli jonka suunta on vaakasuorassa maan pintaan, muutetaan pyöriväksi liikkeeksi.

Napa on osa, johon voimalan siivet tai lavat kiinnittyvät. Tuulivoimalan napakorkeus on korkeus, jolla ilmoitetaan voimalan korkeus maasta.

Roottori on voimalan navan ja siipien tai lapojen yhdessä muodostava osa, joka kiinnittyy generaattorin akseliin. Akseli pyörittää generaattorin roottoria.

Pientuulivoimaloissa käytetään Permanent Magnet Generator - **generaattoreita** eli kestopagneettigeneraattoreita, jotka muuttavat mekaanista liike-energiaa sähkövirraksi. Generaattori muodostuu kahdesta pääosasta: staattorista ja pyörivästä roottorista. Yksinkertaisessa generaattorissa kestopagneetoitu staattori ympäröi käämitettyä roottoria. Roottori muodostuu ohuista rautalevyistä, joiden uriin silmukoidaan käämi. Roottorin pyöriessä sen käämeihin indusoituu sähkövirtaa. (Aura. L & Tonteri. A. J 1996. 222–223.)

Pientuulivoiman käytössä yleisin käyttösovellus on akkujen lataaminen. Generaattorien tuottama sähkövirta suunnataan **tasasuuntaajalla** tasavirraksi riippumatta siitä, onko kyseessä tasa- vai vaihtovirtageneraattori. Tasasuuntaaja on laite, jolla vaihtosähkö muutetaan tasasähköksi joko puoli- tai kokoaaltotasasuuntauksella. (Aura. L & Tonteri. A. J 1996. 380 - 383.)

Latauksensäädin on laite, joka valvoo akuston varauksen tilaa. Akkujen jännitteen laskiessa liian alhaiseksi laite voi rajoittaa sähkölaitteiden käyttöä. Kun akuston jännite nousee liian korkeaksi, laite voi syöttää ylimääräisen energian keinokuormalle esimerkiksi vastukselle, jolloin akuston yllätilaus tilannetta ei pääse syntymään. Lataussäädin parantaa akuston käyttöikää huomattavasti.

Vaihtosuuntaajaa eli invertteriä käytetään, kun akustosta purettava tasavirta lataus halutaan muuttaa käytettäväksi vaihtovirralla toimiville laitteille sopivaksi (Aura. L & Tonteri. A. J. 1996. 414). Invertterien hyötysuhde on yleensä noin 85–90% (Genergia ky 2009).

3.3 Tuulienergian laskeminen

Tuulivoimalan karkeaa mitoitusta voidaan laskea dynamiikkaan perustuvilla kaavoilla. Suureina toimivat ilman tiheys, ilman virtausnopeus ja pinta-ala, johon voimat vaikuttavat. Kun kohteen energiantarve tiedetään, voidaan sijainnin tuuliolojen perusteella laskea, kuinka suurikokoinen voimala kohteeseen tarvitaan. Voimalan koon perusteella voidaan ennakoida sen tuotantopotentiaali tietyissä olosuhteissa. Myös turbulenttisen virtauksen vaikutusta tuulivoimalan energiantuotantoon voidaan arvioida laskemalla. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

4 PIENTUULIVOIMA

4.1 Pientuulivoimala

Pientuulivoimalat ovat tehoiltaan pienempiä kuin teolliseen sähkön tuotantoon suunnitellut tuuliturbiinit. Ne tuottavat niin sanottua ”on-site” eli paikallista sähköä. Nimensä mukaan paikallinen sähkö käytetään tuotantopaikalla. Pientuulivoimaa ja aurinkoenergiaa käytetään useimmiten sähköverkon ulkopuolisissa kohteissa kuten vapaa-ajan asunnoissa ja veneissä. Kuitenkin niitä käytetään esimerkiksi maatalouksissa parantamaan omavaraisuutta ja vähentämään ostettavan energian tarvetta. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

Yleisin käyttösovellus pientuulivoimalle on akkujen lataus, jossa ladatuista akuista muunnetaan sähköä invertterin avulla soveltumaan 12 V-, 14 V-, 48 V- ja 230 V -järjestelmiin. Lisäksi tuulivoimalla voidaan tuottaa lämmitysenergiaa rakennusten lämpimän käyttöveden varaajaan tai rakennuksen lämmitysjärjestelmän varaajaan. Myös suora sähköntuotanto omakotitalon sähköverkkoon on mahdollista. Tällöin tuotettu tuulisähkö muutetaan tavalliseksi verkkosähköksi. Jos tuotanto on liian vähäistä, voidaan alijäämänsähkö ostaa verkosta. Ylimääräisenä tuotettu sähkö voidaan myydä takaisin verkkoon. Koska pientuulivoimaloiden tehoalue alkaa siitä, mihin aurinkokennojen tehoalue päättyy, voidaan niillä tukea toistensa sähköntuotantoa. Pientuulivoimalat ovat suuruusluokaltaan yleensä enintään 20 kW tehoisia. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

4.2 Pystyakseliset tuulivoimalat

Selkein tapa erotella tuulivoimalat toisistaan on jakaa ne pysty- ja vaaka-akselisiin voimaloihin. Jaottelun voi myös tehdä toimintaperiaatteen ja säätötavan perusteella on mahdollista. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

Pystyakselisten voimaloiden toiminta perustuu ilmanvastuseron maksimointiin. Pystyakselisissa tuulivoimaloissa roottori on kohtisuorassa tuulta vastaan. Roottori muodostuu kehästä, jossa on esimerkiksi kuppeja, siipiä, pusseja tai muita laitteita. Ne vastustavat tuulta mahdollisimman tehokkaasti kehän toisella sivulla ja palaavat alkuasentoonsa tuulen yläpuolelle huomaamattomasti ja mahdollisimman vähäistä ilmanvastusta aiheuttaen. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

Yleisin pystyakselinen turbiinimalli on Savonius – turbiini. Savonius – turbiinin kehittyneempi versio on niin sanottu tuuliruuvi. Tuuliruuvissa Savoniuksen pahimmat ongelmat, eli käynnistysmomentin riippuvuus tuulen suunnasta, epätasainen käyminen ja sivuttaisvoimat rakenteisiin ja turbiinin on eliminoitu kääntämällä turbiininsiipi ruuvimaiselle kierteelle. Tämän vuoksi siiven tuulta vastustava pinta-ala on vakio riippumatta siiven asennosta. Pystyakselisten turbiinien etuja ovat toiminta alhaisillakin tuulennopeuksilla ja riippumattomuus tuulen suunnasta. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

4.3 Vaaka-akseliset tuulivoimalat

Vaaka-akseliset turbiinit eli potkuriturbiinit toimivat ohivirtaavan ilman siipeen aiheuttaman paine-eron avulla. Siipeen kohdistuva voima kasvaa, kun ohivirtaavan ilman nopeus kasvaa. Lisäksi siiven oma pyörimisliike kasvattaa siiven suhteellista nopeutta ilmavirtaan nähden. Jotta potkurivoimala toimisi korkeimmalla mahdollisella hyötysuhteella, on potkuri käännettävä tuulta kohti. Pientuulivoimaloissa kääntäminen toteutetaan pyrstön avulla. Tuulta

kohti kääntyvään turbiiniin kohdistuu pyörimisestä johtuva voima, joka pyrkii kiertämään potkurin akselia erityisesti kaksilapaisissa potkureissa. Voiman aiheuttamaa tärinää voidaan vähentää lisäämällä lapoja potkuriin, jolloin kääntymistä vastustavat voiman aiheuttamat hitausvoimat ovat tasaisemmat akselin suhteen. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

Vaaka-akselisten voimaloiden etu on suuri pyyhkäisyypinta-ala, jolloin tuulesta voidaan saada talteen enemmän energiaa. Teoriassa potkurivoimaloilla on parhaat mahdollisuudet päästä ihanteelliseen hyötysuhteeseen, vaikka ne ovat suunniteltu toimimaan parhaiten määrätyissä tuulen nopeuksissa. (Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009.)

5 KOHTEEN SÄHKÖISTÄMINEN PIENTUULIVOIMALLA

5.1 Pientuulivoimala energiantarpeen ratkaisuksi

Pientuulivoima voi kuulostaa houkuttelevalta vaihtoehdolta suunniteltaessa syrjäisen kohteen sähköistämistä, mutta se ei ole aivan niin yksinkertaista kuin monet voimaloiden valmistajat antavat ymmärtää. Jotta tuulivoimalasta saadaan edes pientä hyötyä, on tärkeää tehdä hieman taustatyötä ja selvittää, soveltuuko kyseinen kohde tuulivoimalalla sähköistettäväksi. Tärkein yksittäinen seikka voimalan kannalta on tietenkin tuuli. Ilman riittävän tasaista ja nopeaa tuulta tuulivoimaa ei voi tuottaa. Suurin osa pienvoimaloista ei käynnisty tuottamaan sähköä alle 3 m/s puhaltavalla tuulella.

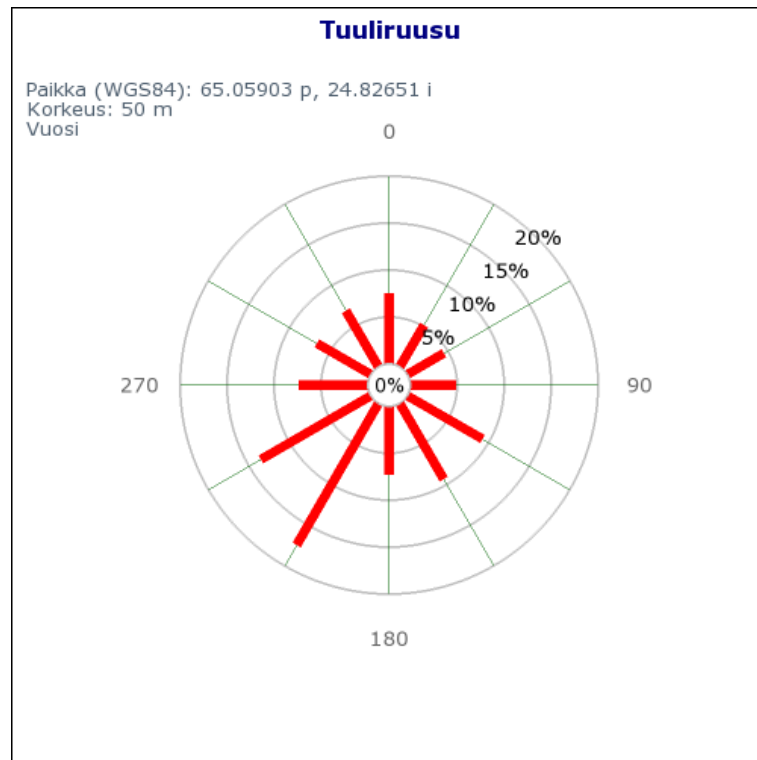
Tässä luvussa esitellään esimerkin kautta, miten tuulivoimalan hankintaa edeltävää taustatyötä voi tehdä ja miten sopiva voimalan kokoluokka voidaan valita kohteen energiankulutuksen mukaan. Kaikki esimerkkien tulokset ovat suuntaa antavia. Ilman kohteessa suoritettua tarkkaa tuulimittausta, tarkkoja arvoja on mahdotonta ennustaa.

5.2 Kohde

Esimerkkikohteeksi valittiin Hailuodossa sijaitseva mökki. Koska mökki on sähköverkossa, vain sen sijaintia ja tuulioloja on otettu huomioon esimerkissä. Verkkosähköllä sähköistetyssä mökissä mukavuuksien määrää ei tarvitse rajoittaa, kuten pelkällä on-site -sähköllä sähköistetyssä mökissä. Mökin sähkövarustus on rajattu valaistukseen, kylmälaitteistoon, liesituulettimeen ja vähän kuluttavien viihde-elektronisten laitteiden lataukseen ja käyttöön. Mökki on käytössä maksimissaan kaksi päivää viikossa.

Kohteen tuuliolojen määrittäminen:

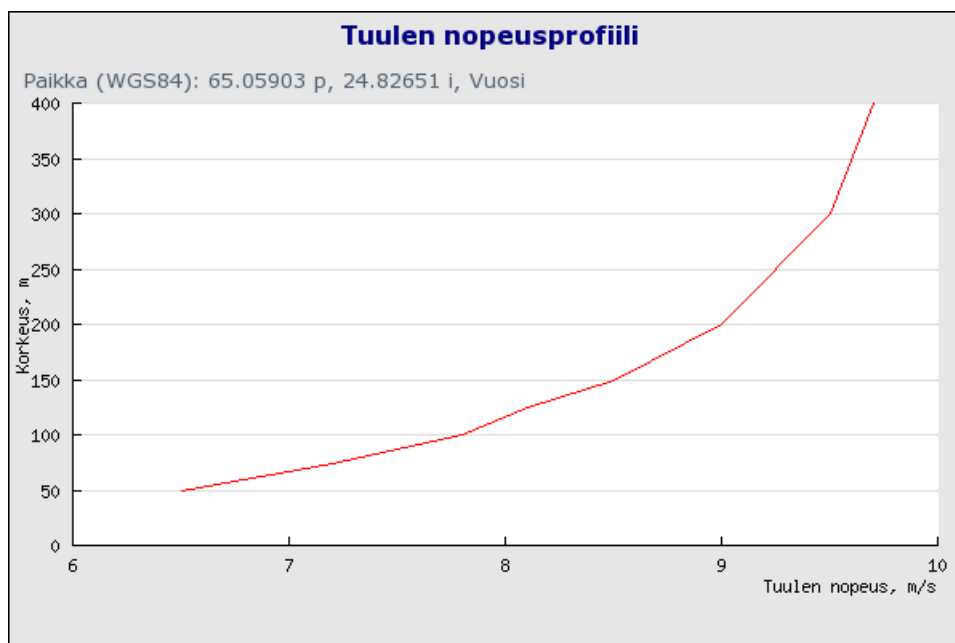
Tuulivoimalan kannalta mökin paikka on otollinen. Ranta on puutonta kalliota, josta avautuu lahti. Tuuli voi puhaltaa rantaan lähes esteettömästi itä-lounas väliseltä sektorilta (Kuvio 4). Paikan hallitseva tuulensuunta on lounas, josta tuulee noin 30 % ajasta. Vaikka hallitseva tuulensuunta on lahden vastarannan suunnassa, sen vaikutus on pieni, sillä maa on viljelyskäytössä ja muutamaa puusaarekettä lukuun ottamatta täysin paljas (ks. Kohteen sijainti. Google Maps 2012).



Kuvio 4. Esimerkki kohteen tuuliruusu

(Ilmatieteenlaitos ym. 2009)

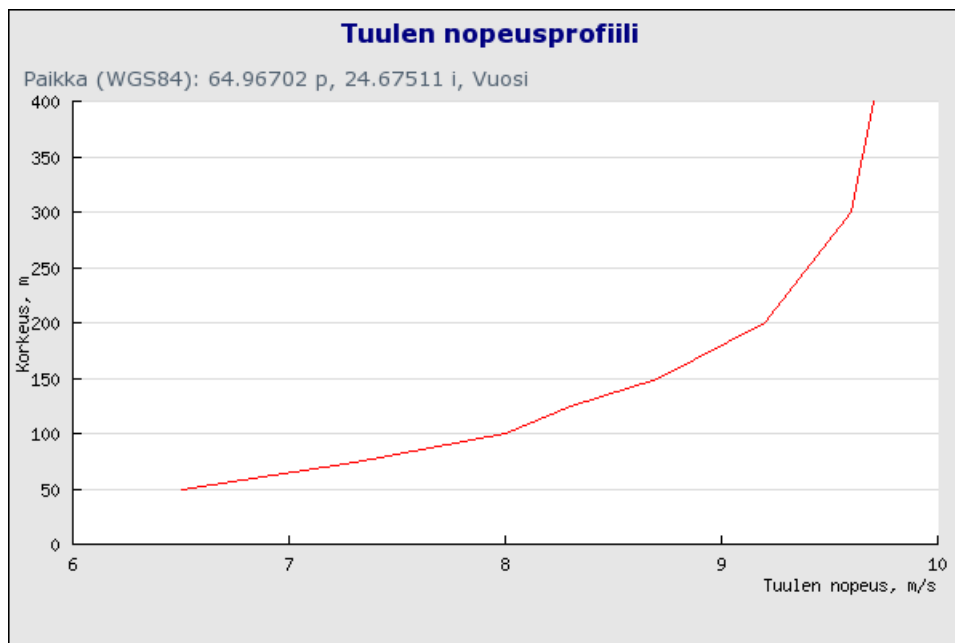
Tuulen nopeusprofiili alueella on hyvä. Suomen tuuliatlaksesta saatujen tietojen mukaan alueen tuulen vuotuinen keskinopeus 50 metrin korkeudella on noin 6,5 m/s (Kuvio 5). Tuulivoimalan tuotanto on hyvä, jos turbiini saadaan asennettua niin, että siihen osuva tuulennopeus yltää edes puoleen siitä mitä 50 metrin korkeudessa oleva tuulennopeus.



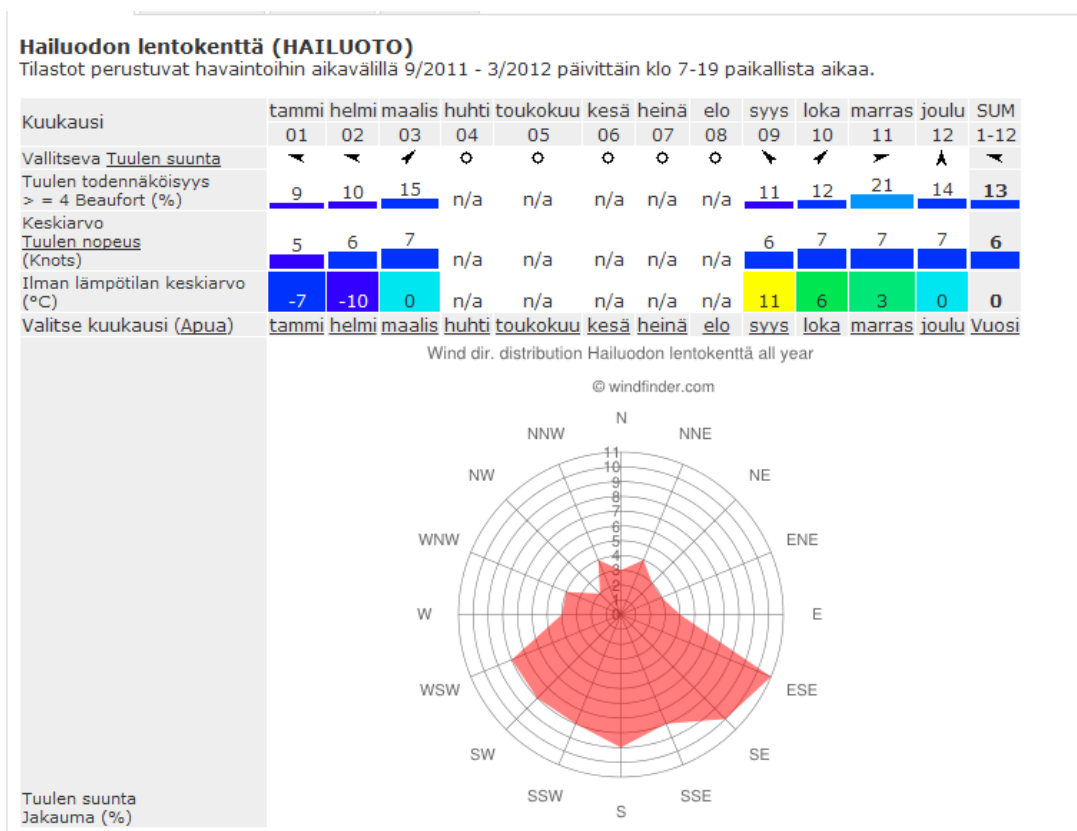
Kuvio 5. Esimerkki kohteen tuulen nopeusprofiili 50m

(Ilmatieteenlaitos ym. 2009)

Koska kohteen vuotuista tuulen nopeusprofiilia 50 metrin alapuolelle ei ole, sille määritellään suuntaa antava arvio. Arvio perustuu Suomen tuuliatlaksen 50 metrissä vaikuttavaan nopeusprofiiliin Hailuodon lentokentällä (Kuvio 6), sekä Hailuodon lentokentän mittauspisteeltä mitattuihin arvoihin. Mitattuja arvoja verrataan Suomen tuuliatlaksen nopeusprofiiliin.



Kuvio 6. Tuulen nopeusprofiili Hailuodon lentokentällä
(Ilmatieteenlaitos ym. 2009).



Kuvio 7. Mittaustulokset: Hailuodon lentokenttä [kn.]
(Verwaltungsgesellschaft mbH 2012).

Kuvioista 6 näkyy, että Suomen tuuliatlaksen mukaan Hailuodon lentokentällä tuulen nopeusprofiili on noin 6,5 m/s ja 7 metriä merenpinnan yläpuolelta mitattuna tuulen keskinopeus on noin 6,4 kn, eli 3,5 m/s (ks. kuvio 7). Lentokentän maaston profiili on tuulen kannalta epäsuotuisampi, kuin esimerkkikohteen. Alueella on huomattavasti enemmän puustoa, joka hidastaa tuulen nopeutta (ks. Hailuodon lentokenttä. Google Maps 2012). Tästä voidaan päätellä, että tuulen nopeus lähempänä maanpintaa, paikassa jossa esimerkkikohta sijaitsee, tuulee vähintään yhtä voimakkaasti kuin Hailuodon lentokentällä.

Kohteen sähkönkulutuksen määrittäminen:

Kohteen valaistus on toteutettu kymmenellä energiansäästölamppulla, keittiössä on liesituuletin, kahvinkeitin ja pieni jääkaappi ilman pakastelokeroa. Mökissä on radio sekä mahdollisuus ladata kannettavaa tietokonetta sekä matkapuhelinta. Osa ilmoitetuista tehoista on laskettuja arvoja, osa on otettu Eri laitteiden sähkönkulutus – taulukosta (Energiapolar Oy, Rovakaira Oy, Rovaniemen Energia, Torniolaakson Sähkö Oy, Muonion MSO, Enontekiön Sähkö Oy, Pellon Sähkö Oy & Tunturiverkko Oy 2011).

Laitteiden käyttämät tehot lasketaan kaavasta:

$$P = U * I$$

missä

$$P = \text{teho [W]}, \text{Watti}$$

$$U = \text{jännite [V]}, \text{Voltti}$$

$$I = \text{virta [A]}, \text{Ampeeri}$$

Energiansäästölamppu (IKEA) (10 kpl) yhteisteho

$$U = 230 \text{ V}$$

$$I = 0,055 \text{ A}$$

$$P = 10 * (230 \text{ V} * 0,055 \text{ A}) = 126,5 \text{ W} \approx 127 \text{ W}$$

Puhelimen lataus (Samsung)

$$U = 230 V$$

$$I = 0,15 A$$

$$P = (5 V * 0,7 A) = 3,5 W$$

Kannettava tietokone (MSI U100)

$$U = 20 V$$

$$I = 2 A$$

$$P = 20 V * 2 A = 40 W$$

Liesituuletin Deekax Ultra

$$P = 221 W$$

Vuorokautinen kulutus saadaan laskemalla laitteen teho P vuorokautisella käyttötuntimäärällä.

Liesituuletin kWh/vrk

$$Kulutus = P * \frac{\text{käyttötuntia}}{\text{vrk}} = 221W * \frac{1h}{\text{vrk}} = \frac{221Wh}{\text{vrk}} = 0,221kWh/\text{vrk}$$

Taulukosta näkee muiden laitteiden vuorokautisen kulutuksen kWh/vrk, laitteiden vuorokautisen yhteiskulutuksen $Kulutus_{\text{kok.}}$ ja maksimiottotehon $P_{\text{kok.}}$, jonka laitteet ottavat yhteensä.

Taulukko 1. Mökin energiankulutus kWh/vrk

Laite / Käyttö	Teho (W)	Teho (kW)	Aika h/vrk	Kulutus kWh/vrk
Energiansäätölamppu (10 kpl)	130	0,13	3	0,39
Jääkaapi 150l, ei pakastinta	350	0,35	24	8,4
Liesituuletin	221	0,221	1	0,221
Kahvinkeitin	600	0,6	0,1	0,06
Radio	40	0,04	12	0,48
Kannettavatietokone	40	0,04	12	0,48
Puhelimen lataus	3,5	0,0035	3	0,0105
	$P_{\text{kok.}}$	1,3845	$Kulutus_{\text{kok.}}$	10,0415

5.3 Invertterin ja akuston valinta

Kun sähköjärjestelmän vuorokautinen kulutus tiedetään, voidaan laskea kuinka suuri akuston kapasiteetti pitää olla, jotta sähköä riittää koko mökkiviikonlopun tarpeisiin, vaikka lataukseen riittävää tuulta ei olisi.

$$Purku \frac{akuita}{vrk} = \frac{Kulutus_{\text{kok.}} * \text{hyötysuhde}}{U}$$

$$= \frac{(10042 * 1,1)Wh}{230V} = 48,03 Ah \approx 48,1 Ah$$

$$Purku \text{ akuilta/vkl} = 2 * \text{purku akuila/vrk} = 96,2Ah \approx 97Ah$$

Akusto pitää siis olla vähintään 97 Ah. Tuulivoimaloiden valmistajat suosittelevat, että voimalat asennetaan lataamaan vähintään 200 Ah akustoa.

Invertteri kannattaa mitoittaa hieman yli maksimiottotehon, jolloin ylikuormituksilta vältytään varmasti. Koska mökin maksimiottoteho on noin 1400 Wattia, kannattaa valita laite, joka kestää vähintään 1500 Watin jatkuvan kuormituksen. 1500 Watin invertterillä mökin kaikkia sähkölaitteita voidaan käyttää tarvittaessa yhtä aikaa, sillä hyvälaatuiset laitteet kestävät hetkellisesti jopa kaksinkertaista kuormitusta (SW-Energia 2011–2012).

5.4 Tuulivoimalan valinta

Pientuulivoimalan hankintakustannukset voivat olla tavalliselle kuluttajalle suuret. Halvimmillaan turbiini-lataussäädin – paketit saa noin 1000 €, kun taas kalliimmat paketit voivat maksaa jopa 6000 €. Jotta voimalan soveltuvuus voidaan määrittää, on tuuliturbiinista hyvä tietää eri tuulen nopeuksien vaikutus turbiinin tuottoon. Osa tuulivoimaloiden valmistajista ei kuitenkaan ilmoita tuotteidensa valinnan kannalta oleellisia tuotantoarvoja kovinkaan tarkasti. Kun kohteen tuuliolot ja energiankulutus on määritelty, ja tuuliturbiinin tuotantoarvot ovat tiedossa, voidaan turbiinin soveltuvuutta kohteeseen arvioida.

5.5 Kahden erilaisen voimalan soveltuvuus esimerkkikohteeseen

Alaluvussa tarkastellaan kahden erilaisen tuuliturbiinin soveltuvuutta kohteeseen. Tuuliturbiinien suurin tekninen ero on niiden tyyppi. Molemmat turbiinit ovat teholuokiltaan alle 300 Wattia. Toinen turbiineista on vaak akselinen potkuriturbiini ja toinen pysty akselinen tuuliruuviturbiini. Turbiinit sijoittuvat edellä mainituissa hintaluokissa ääripäihin.

Minimitehot P_{\min} ovat liitteiden 6 ja 8 arvoja, joilla tuuliturbiini kehittää vähintään 1 A latauksen, ja saa akuston ladattua täyteen varaukseen. Akustoa on kuormitettu kahden päivän aikana edellä mainitulla tavalla. Lisäksi mukaan on laskettu lataussäätimen aiheuttama jatkuva virrankulutus.

Latausteho:

$$I = \frac{P_{min.}}{U}$$

missä

$P_{min.}$ = lataus minimi tuulen nopeudella [W]

Ladattavaa:

$I_{lat.}$ [Ah] = Purku akulta/vkl [Ah] + lataussäätimen virrankulutus [Ah]

Latausaika:

$$A_{lat.} = \frac{I_{lat.}}{P_{min.}/12 V}$$

Tuuliruuviturbiini:

Lataussäätimen virrankulutus = 3 mA (Oy Windside Production LTD., 7)

$$I_{lat.ruuvi} = 97 Ah + \left(\frac{3 mA}{1000}\right) * 168 h = 97,5 Ah$$

$P_{min.ruuvi}$ = 12 W @ 5 m/s (Liite 7)

$$A_{lat.ruuvi} = \frac{I_{lat.ruuvi}}{P_{min.ruuvi}/12 V} = 97,5 h$$

Potkuriturbiini:

Lataussäätimen virrankulutus = 20 mA (Liite 6)

$$I_{lat.ruuvi} = 97 \text{ Ah} + \left(\frac{20 \text{ mA}}{1000} \right) * 168 \text{ h} = 100,4 \text{ Ah}$$

P_{min.potkuri} = 12 W @ 3 m/s (Liite 6)

$$A_{lat.potkuri} = \frac{I_{lat.potkuri}}{P_{min.potkuri}/12 \text{ V}} = 100,4 \text{ h}$$

5.6 Yhteenveto kohteen sähköistämisestä

Potkuriturbiini on nimelliseltä maksimiteholtaan noin kolme kertaa tehokkaampi kuin esimerkin tuuliruuviturbiini. Vastaavan teholuokan tuuliruuviturbiinin paino on kuitenkin noin 800 kg, joten se ei sovellu mökkikäyttöön (Windside Oy). Jos potkuriturbiinin teho halutaan saavuttaa, on parempi vaihtoehto hankkia useampi pienempi tuuliruuviturbiini. Molemmat voimalat teoriassa ehtivät ladata akuston täyteen sinä aikana, jolloin mökki ei ole käytössä. Mitä lähempänä maanpintaa ollaan, sitä tärkeämmäksi pienissä nopeuksissa lataaminen muodostuu. Potkuriturbiini onnistuu tehtävässään paremmin, vaikka sen nimellinen käynnistymisnopeus onkin suurempi.

Tuulen turbulentsisuuden vaikutusta tuotantoon on vaikea vertailla, sillä kummankaan tuuliturbiinin valmistaja eivät ilmoita tietoa. Luultavasti turbiinien välinen ero kuitenkin kaventuu erittäin turbulentsissa olosuhteissa, sillä tuuliruuviturbiinin reagoitiherkkyys tuulen nopeuksien- ja suunnan muutoksiin on parempi.

6 ROVANIEMEN AMMATTIKORKEAKOULUN TUULITURBIINIT

6.1 Tuuliturbiinien toimintakunnon selvittäminen

Opinnäytteen haluttiin sisältävän teorian lisäksi myös käytäntöä, tutkittiin pitkään varastoitujen tuuliturbiinien toimintakuntoa ja suunniteltiin niiden uudelleen asennus Arctic Power Laboratoryn tiloihin. 2000 - luvun alussa Rovaniemen ammattikorkeakoululle ostettiin koekäyttöön kaksi pientä tuuliturbiinia Jokiväylän kampukselle. Tuuliturbiineilla ladattiin akkuja kampuksen Kemijoen puoleisella piha-alueella. Huonoista tuulioloista johtuen turbiinien tuotto jäi vähäiseksi. Windside -tuuliruuviturbiini tuotti energiaa 602 tunnin aikana 992 Wh, eli vain noin 1,64 Watin teholla (MU 2001). Vähäisen energian tuoton vuoksi akut, joita turbiinien oli tarkoitus ladata, kuoleutuivat. Koekäytön jälkeen tuuliturbiinit varastoitiin useaksi vuodeksi.

Turbiinien toimintakunto pyrittiin selvittämään, jotta mahdolliset viat ja ongelmat saataisiin ratkaistua ennen turbiinien asennusta Arctic Power Laboratoryn katolle. Turbiinien testaus suoritettiin Rovaniemen ammattikorkeakoulun Arctic Power Laboratory -kylmätestauslaboratorion tiloissa.

AIR403 -potkuriturbiinin mittaukset suoritettiin kylmähuoneessa. Tuulta simuloitiin ajoviimapuhaltimella ja kanavalla, jolla ilmavirta suunnattiin suoraan turbiiniin ja vähennettiin ilman pyörteilyä tilassa. Windside WS-0,30C -tuuliruuviturbiinin testaus toteutettiin pienemmällä puhaltimella, ilman kanavaa, sillä Arctic Power Laboratoryn muut käynnissä olleet projektit vaativat käyttöönsä kylmähuoneessa sijaitsevaa alustadynamometria. Lisäksi huomattiin, että kanavassa virtaava ilma oli niin turbulenttista, että siitä mitattu ilman virtausnopeus ei ollut vertailukelpoinen valmistajien mittaamiin tuulennopeuksiin. Tällöin tuuliturbiinin teho suhteessa tuulen nopeuteen ei ollut vertailtavissa.

Mittauksissa turbiinit kytkettiin valmistajien antamien ohjeiden mukaisesti lataamaan 230 Ah/12 V akkua. Akkua kuormitettiin, jotta turbiinilaitteistojen lataussäätimet eivät rajoittaisi turbiinien tehoja kesken mittauksen. Mittaukset suoritettiin käsimittareilla, joilla mitattiin tuulennopeutta (m/s), jännitettä U (V) ja virtaa I (A). Mittauksista saadut tulokset ja mittalaitteiden tekniset tiedot löytyvät liitteistä 1 ja 2.

6.2 Tuuliturbiinit

AIR403 -potkuriturbiini

Turbiineista tehokkaampi Southwest Windpower Inc. valmistama AIR403 -potkuriturbiini on kevytrakenteinen laite ja sen paino ilman kaapelointia on vain 6 kg. Kevyteen on päästy valmistamalla turbiininrunko kokonaan alumiinista valamalla. Roottorin siivet ja kärkikupu ovat hiilikuidulla vahvistettua termoplastista kestumuovia. Kevydestä johtuen turbiini käynnistyy potkuriturbiinille matalassa noin 3,2 m/s puhaltavassa tuulessa. Valmistajan mukaan turbiini saavuttaa 400 Watin nimellisen maksimitehonsa 12,5 m/s tuulessa. AIR403 -potkuriturbiinissa koko säätöelektronikka on sisällytetty turbiinin rungon sisälle. Turbiinin siivet on suunniteltu niin, että tuulennopeuden ylittäessä 17,9 m/s nopeuden, siipi sakkaa ylimääräisen ilman ohitse. Sakatessaan turbiini rajoittaa pyörimisnopeuttaan niin, että maksimiteho säilyy. Kun akkujen lataustaso nousee halutulle tasolle tai tuulen nopeus on niin suuri, että sakkaus ei enää riitä, turbiini sammuu Autobreak™ -elektronikan avulla. Autobreak™ -elektronikka rajoittaa turbiinin pyörimistä oikosulkemalla generaattorin negatiivisen ja positiivisen navan, jotta akkujen yllilatausta tai turbiinin ylikierroksille karkaamista ei pääse tapahtumaan. Turbiini voidaan pysäyttää manuaalisesti tappokatkaisijalla, joka Autobreak™ -elektronikan tavoin oikosulkee generaattorin esimerkiksi huoltotöiden ajaksi. (Southwest Windpower , Inc., 1999. 20–21.)



Kuva 1. AIR403 -potkuriturbiini

Windside WS-0,30C -tuuliruuviturbiini

Pysty akselisiin turbiineihin kohdistuvat voimat ovat paljon suuremmat kuin vaaka-akselisiin turbiineihin. Tästä johtuen Windside WS-0,30C – tuuliruuviturbiini on huomattavasti raskasrakenteisempi kuin AIR403 - potkuriturbiini. Roottorin siivet ovat jäykkää lasikuitua ja ne on tuettu napaan alumiinisilla tuilla. Turbiinin akseli on laakeroitu generaattorin molemmin puolin metalliseen runkoon, joka nostaa turbiinin kokonaispainon 43 kg. (Windside Oy.)

Jotta sähköntuotanto Windside -tuuliruuviturbiinilla onnistuu, tarvitaan turbiinin lisäksi virranohjain laite WGC-10. Windside WS-0,30C - tuuliruuviturbiini käynnistyy tuottamaan energiaa jo noin 2,8 m/s tuulessa ja se kestää maksimissaan 30 m/s puhaltavan tuulen. Nimellisen maksimitehonsa 108 Wattia WS-0,03 –tuuliruuviturbiini saavuttaa noin 15 m/s puhaltavassa tuulessa. (Windside Oy.)



Kuva 2. Windside WS-0,30C -tuuliruuviturbiini.

7 ASENNUSSUUNNITELMA

7.1 Asennuspaikka

Tuuliturbiinit asennetaan mahdollisimman korkealle ja esteettömälle paikalle. Paikaksi valittiin Arctic Power Laboratoryn etelän puoleinen kattolippa, joka oli tässä tapauksessa paras vaihtoehto. Tuuliturbiineille täytyi suunnitella sopivat mastot asennuspaikka huomioonottaen. Mastot suunniteltiin mahdollisimman helposti asennettaviksi ja siksi ne ovat molemmissa turbiineissa identtiset. Harusvaijereita ei haluttu käyttää, koska niiden asennus kyseiseen paikkaan on lähes mahdotonta.

Ennen kuin asennus voidaan toteuttaa, on katon lippaan tehtävä kaksi vähintään 150x150 mm reikää. Koska katon vesieristys vaatii kattotulityöluvat, on eristys tehtävä ammattilaisen toimesta. Asennuksessa tarvitaan henkilönostin sekä erillinen nostin mastojen pystytystä varten.



Kuva 3. Tuuliturbiinien asennuspaikka.

7.2 Tuuliturbiinien mastot

Materiaaliksi mastoihin valittiin 6000x100x100x4 mm kuumasinkitty RHS – putkipalkki. Se valittiin, koska sen materiaalivahvuus ja pinnoite kestävät hyvin sään ja tuuliturbiinien siihen kohdistaman rasituksen. Mastoon kiinnitettiin hitsaamalla kaksi 600x100x4 mm lattarautaa, jotka tuettiin teräskolmioilla. Lattarautojen etäisyys toisistaan on 2000 mm. Lattarautoista alempi on kiinni maston tyvessä (ks. Kuva 4.). Lattarautoihin porattiin 6 kpl reikiä kansiruuvi kiinnitystä varten. Hitsausta varten sinkitty putki piti hioa puhtaaksi. Kun hitsaukset oli saatu valmiiksi, saumat puhdistettiin ja pohjamaalattiin. Lopuksi hitsausalueet päälle maalattiin sinkkimaalilla, jotta maston pinta olisi yhtenäinen.



Kuva 4. Maston tyvi

7.3 Kiinnitysholkit

Molemmille tuuliturbiineille tehtiin asennusta helpottamaan asennusholkit. Asennusholkkien avulla tuuliturbiinit voidaan irrottaa tai kiinnittää mastoon ilman, että mastolle tarvitsee tehdä mitään toimenpiteitä. Tuuliturbiinit voidaan siis kiinnittää mastoihin vasta mastojen pystyttämisen jälkeen. Holkit helpottavat myös tuuliturbiinien huoltoa tilanteessa, jossa tuuliturbiinin

huoltoa ei voida suorittaa mastossa, esimerkiksi laakerin vaihtoa. Perusrakenteeltaan holkit ovat samanlaiset. RHS -putkipalkki on 250 mm pitkä ja sen muut mitat ovat 110x110x4 mm ja se mahtuu liukumaan maston päälle. Holkki kiinnittyy mastoon yhdellä 12 mm pultilla mastoon poratun läpireiän ja holkkiin hitsatun mutterin avulla (ks. Kuva 5). Koska AIR403 -potkuriturbiini on suunniteltu asennettavaksi pyöreään putkeen, hitsattiin holkin päähän 650 mm pitkä putki, jotta turbiinin siivet eivät häiriinny paksun maston aiheuttamasta ilman pyörteilystä. Putken päähän tehtiin puslamainen sovite silikonista vaimentamaan turbiinin aiheuttamaa värinää. Windsiden tuuliruuviturbiinin asentamiseen valmistutettiin laserleikkaamalla valmistajan ohjeiden mukainen laippa, joka hitsattiin kiinni holkkiin. Laippaan tuuliruuviturbiinin runko kiinnittyi kuudella 12 mm mutterilla. Kiinnitys varmistettiin Nord-lock -lukituslaatoilla.



Kuva 5. Windside -tuuliruuviturbiinin kiinnitysholkki ja mastoon lukitus

7.4 Kiinnitys

Turbiinien ja mastojen yhteispaino on lähellä 200 kg, piti niiden seinäkiinnitykseen kiinnittää erityistä huomiota. Seinäkiinnitys suunniteltiin niin, että se kestää monentyyppisiä rasituksia. Mastojen- ja tuuliturbiinien paino, tuuliturbiinien aiheuttama värinä ja tuulen aiheuttama vääntövoima rasittavat mastojen kiinnityksiä. Mastot kiinnitetään ulkoseinälle, noin 12

metrin korkeuteen, joten niiden alta päin tukemista ei voi toteuttaa yksinkertaisesti. Seinän ulkovuorauksen päälle ruuvataan kaksi 4,5 metriä pitkää 2x6 tuuman sään kestäväksi käsiteltyä lankkua. Lankut kiinnitetään ulkovuorauslevyjen läpi 6x160/70 mm ruuveilla seinän kantavaan koolaukseen. Mastot ruuvataan kiinni lankkuihin 10x80/60 mm kansiruuveilla. Tuulivoimaloiden asennukseen liittyvät liitteet 3 – 5 sisältävät käsin piirrettyjä periaatekuvia ja laskelmia ruuvien pitovoimista.

8 YHTEENVETO

Koska tuulivoima on riippuvainen tuulioloista, on niihin hyvä perehtyä tarkkaan ennen tuulivoimalan hankkimista. Tuuliolojen selvittämiseen on olemassa hyviä keinoja. Varmin tapa selvittää kohteen tuuliolot on vuokrata tuulen nopeuden mittaamiseen tarkoitettu mittari, jolla voi tehdä pitempiaikaisia seurantajaksoja paikallisista tuulioloista. Muita keinoja on käyttää valmiita tietokantoja, kuten tässä opinnäytteessä tai tehdä omia havaintoja paikanpäällä. Omien havaintojen tekoon on saatavilla useita hyviä oppaita ja taulukoita, kuten ”Griggs – putnam index” (Wade & Baker. 1977) (Liite 8) ja ”tuulen voimakkuus” – taulukko (Kervinen, M. & Smolander, J. 2000, 83). Jos kohteen tuuliolot ovat heikot, voidaan niitä parantaa hankkimalla tarpeeksi korkea masto. Voimala toimii paremmin esimerkiksi puurajan yläpuolella, jossa ilman liikkuminen on vapaampaa ja nopeudet suurempia.

Vaikka pientuulivoimalat vaikuttavat hyvin samanlaisilta, niissä on yllättävän suuria eroja. Tuulivoimalaa valittaessa kannattaa niiden teknisiin tietoihin tutustua, erityisesti niiden toimintaan eri tuulen nopeuksilla. Suurimmat erot voimaloiden välillä näkyvät silloin, kun toimitaan pienillä tuulen nopeuksilla.

Pientuulivoimalat ovat yleensä huoltovapaita. Joissain malleissa vuosittainen laakereiden rasvaus on kuitenkin hyvä tehdä, jotta tuulivoimalan hyötysuhde ei kärsi ylimääräisistä rasituksista. Ladattavaan akustoon kannattaa kiinnittää huomiota. Huonolaatuisten akkujen elinikä on lyhyt silloin, kun niiden lataus- ja purkusykli toistuvat tiheään. Hyvälaatuisten aurinko- tai tuulivoimakäyttöön tarkoitettujen akkujen kestoikä on moninkertainen tavallisiin akkuihin verrattuna.

Sähköistäminen pientuulivoimalla on järkevä ratkaisu esimerkiksi rannikko- ja saaristo alueilla, joissa sähköverkkoon liittyminen ei ole mahdollista tai se ei ole kannattavaa. Tuuli- ja aurinkovoimaloita yhdistämällä voidaan tuottaa

energiaa myös isompaan energian tarpeeseen. Laitteiden valmistajat tarjoavatkin valmiita paketteja niin sanottua hybridivoimalaa varten, jossa tuuliturbiinit ja aurinkokennot tukevat toistensa tuotantoa. Hybridivoimala on paras tapa varmistaa omavarainen energian tuotanto. Lisätutkimuksena pientuulivoima aiheeseen soveltuisi juuri hybridivoimala ratkaisut, sillä tietoa niistä löytyy vielä hyvin niukasti.

LÄHTEET

Aura, L. & Tonteri, A. J. 1996. Teoksessa Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Helsinki. WSOY, 222–223, 380 – 383, 414.

Energiapolar Oy, Rovakaira Oy, Rovaniemen Energia, Torniolaakson Sähkö Oy, Muonion MSO, Enontekiön Sähkö Oy, Pellon Sähkö Oy ja Tunturiverkko Oy 2011. Teoksessa Eri laitteiden sähkönkulutus. Saatavilla verkossa: <URL: <http://www.energiapollari.fi/loader.aspx?id=ed5993ec-1e9e-458e-9032-9f628ad13b64> >. (Luettu: 20.4.2012).

Genergia ky 2009. Saatavilla verkossa: <URL: <http://www.genergia.fi/aurinkosahkojarjestelma> >. (Luettu: 23.4.2012).

Hailuodon lentokenttä. Google Maps 2012. Saatavilla verkossa: <URL: <http://maps.google.fi/maps?q=hailuoto+lentokentt%C3%A4&hl=fi&ie=UTF8&ll=64.970337,24.706535&spn=0.009787,0.042014&sll=62.593341,27.575684&sspn=10.861793,43.022461&t=h&hq=hailuoto+lentokentt%C3%A4&z=15> >. (Katsottu: 21.4.2012).

Ilmatieteenlaitos, Risö DTU, Vaisala Oyj, Wpd Finland Oy, Ålands Vindenergi Andelslag ja Motiva 2009. Teoksessa Suomen tuuliatlas. Saatavilla verkossa: <URL: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html> >. (Katsottu: 25.4.2012).

Kervinen, M. & Smolander, J. 2000. Teoksessa MAOL – taulukot. Keuruu. Otava, 65 – 124.

Kohteen sijainti. Google Maps 2012. Saatavilla verkossa: <URL: <http://maps.google.fi/maps/myplaces?ll=65.04158,24.816055&spn=0.037376,0.168056&ctz=-180&t=h&z=13> >. (Katsottu: 21.4.2012).

Motiva Oy & Suomen tuulivoimayhdistys ry 2009. Teoksessa Tuulivoima tietopaketti. Saatavilla verkossa: <URL: <http://www.tuulivoimatieto.fi/> >. (Luettu: 25.4.2012).

MU 2001. Muistiinpanot. Windside -tuuliturbiinien käyttö- ja huolto-ohjekirja. Kansilehti.

Oy Windside Production LTD. Teoksessa Windside -tuuliturbiinien käyttö- ja huolto-ohjekirja. Pihtipudas, 7.

Puuinfo.fi 2010. Teoksessa Pohjoismaisen havupuun tekniset ominaisuudet Pohjois-Amerikan ja Japanin puulajeihin verrattuna. Saatavilla verkossa: <URL: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/rakennesahatavara/POHJOISMAISEN%2520havupuun%2520tekniset%2520ominaisuudet.pdf> >. (Luettu: 16.4.2012).

Southwest Windpower , Inc. 1999. Teoksessa AIR403 – The New 400 watt turbine! Owner’s Manual Version 3.3. USA, 20–21.

Suomen rakentamismääräyskokoelma 2000. B10 puurakenteet. Ohjeet 2001. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki. Saatavilla verkossa: <URL: <http://www.finlex.fi/data/normit/6363-B10.pdf> >. (Luettu: 17.4.2012).

SW-Energia 2011–2012. Saatavilla verkossa: <URL: <http://www.swenergia.fi/tuotteet/energiantuottaminen/invertterit.html> >. (Luettu: 21.4.2012).

Tuulivoimala.com Finland Oy 2012. Saatavilla verkossa: <URL: <http://www.tuulivoimala.com/Tuulivoimala.com.asp> >. (Luettu: 21.4.2012).

Verwaltungsgesellschaft mbH. Saatavilla verkossa: <URL: <http://www.windfinder.com/> >. (Luettu: 21.4.2012).

Windside Oy. Saatavilla verkossa: <URL: <http://www.windside.com/fi>>. (Luettu: 17.4.2012).

LIITTEET

LIITE 1. MITTALAITTEISTO

LIITE 2. MITTAUSTULOKSET

LIITE 3. VOIMALOIDEN PAINOT

LIITE 4. ASENNUKSEN KIINNITYSTEN LASKELMAT

LIITE 5. KIINNITYKSEN PERIAATEKUVAT

LIITE 6. TUULIVOIMALA.COM WPE300 + WPH300 – PAKETTI

LIITE 7. TUULIRUUVIN TEKNISET TIEDOT

LIITE 8. GRIGGS – PUTNAM INDEX (WADE & BAKER. 1977)

Liite 1. Mittalaitteisto

Mittaustila:

Tuulikanava:

- Kanava koko: 1170mm x 1170mm

Kylmähuone:

- Korkeus: 3,5m
- Pituus: 12m
- Leveys: 5,5m

Ajoviimapuhallin:

- Maksimi tuulen nopeus: 120 km/h

Tuulen nopeuden mittaus:

Mittari: VelociCalc Plus 9555

- Kalibroitu 10.5.2011

Nopeusmittaus (kuumalanka):

- Mittausalue: 0-50 m/s
- Tarkkuus: ± 3 % lukemasta tai $\pm 0,015$ m/s, kumpi suurempi
- Resoluutio: 0,01 m/s

Kanavan koko: 10–6350 mm, 1 mm:n välein

Kuumalanka-anturi:

- Pituus: 1015 mm
- Pään halkaisija: 7 mm
- Juuren halkaisija: 13mm

Turbulenssimittaus:

- Turbulenssimittaus suoritetaan kuumalanka-anturilla. Mittauksessa mittari tekee automaattisen 3 minuutin pituisen mittauksen.

Mittauksen tuloksena saadaan:

- ilman nopeuden keskiarvo [m/s]
- nopeuden keskihajonta
- turbulenssiprosentti

Virtamittaus:

Mittari: Agilent U1213A -pihtiampeerimittari

- Tekniset tiedot (< 40A tasavirta):
- Mittausalue: 0-40 A DC
- Resoluutio: 0,01 A DC
- Tarkkuus: 1,5% + 15
- Maksimi ylikuorma: 1000 A R.M.S.

Jännite- ja resistanssimittaus:

- Mittari: Agilent (HP) 971A multimeter
- Tekniset tiedot (<40 V tasavirta):
- Mittausalue: 400mV-40V

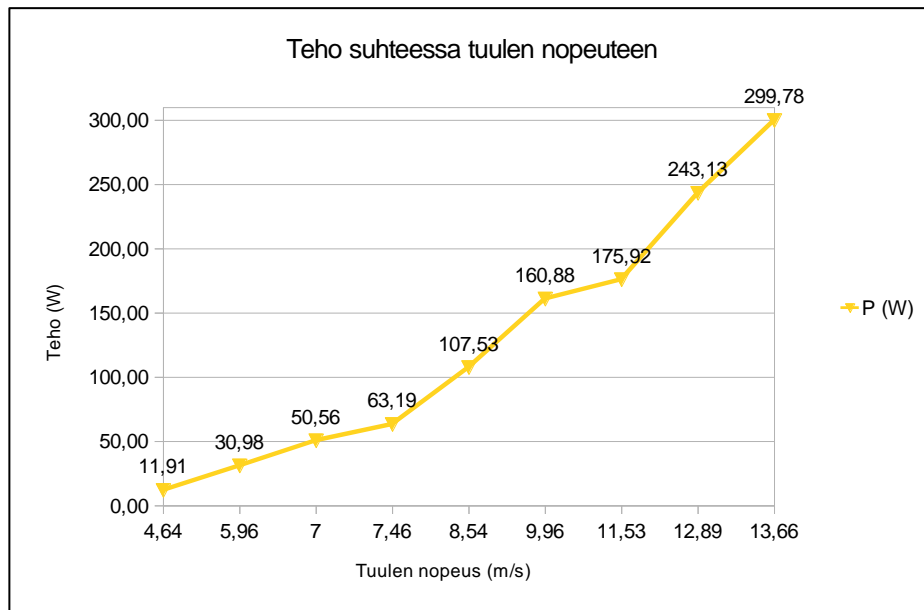
Resoluutio:

- 100 μ V @ 400mV
- 1mV @ 4V
- 10mV @ 40V
- Tarkkuus: $\pm(0,3\% + 1)$
- Tuloresistanssi:
- 10M Ω @ 400mV
- 11M Ω @ 4V (nimellinen)
- 10M Ω @ 40V (nimellinen)

Liite 2. Mittaustulokset

Taulukko 2. AIR403 -mittauspöytäkirja

AIR 403				
vp (km/h)	vt (m/s)	I (A)	U (V)	P (W)
35	4,64	1,3	9,16	11,908
45	5,96	3,31	9,36	30,9816
50	7	4,51	11,21	50,5571
55	7,46	5,84	10,82	63,1888
65	8,54	9,27	11,6	107,532
75	9,96	13,09	12,29	160,8761
85	11,53	14,13	12,45	175,9185
95	12,89	18,76	12,96	243,1296
100	13,66	22,54	13,3	299,782



Kuvio 8. AIR403 -kuvaaja: teho / tuulen nopeus.

Liite 3. Voimaloiden painot

Massa m :

$$m = V * \rho$$

Tilavuus V :

$$V = [m^3]$$

Raudantiheys ρ :

$$\rho_{rauta} = 7,87 * 10^3 kg/m^3 \text{ (Kervinen \& Smolander 2000, 74)}$$

Turbiinit

$$m_{Air403} = 6kg \text{ (Southwest Windpower, Inc. 1999, 26)}$$

$$m_{Windside} = 42kg \text{ (Windside Oy)}$$

Masto

m_{salko}

$$V_{salko} = (0,1 * 0,1 * 6)m - (0,092 * 0,092 * 6)m = 0,01m^3$$

$$m_{salko} = 0,01m^3 * \rho_{rauta} = 78,6kg$$

m_{latta} – 6 kpl 10mm reikiä

$$V_{latta} = (0,1 * 0,6 * 0,004) - \left(6 * \frac{\pi}{4} 0,005^2 * 0,004\right) \\ = 2,38 * 10^{-4} m^3$$

$$m_{latta} = 2,38 * 10^{-4} m^3 * \rho_{rauta} = 1,87 kg$$

m_{kolmio}

$$V_{kolmio} = \left(\frac{0,08 * 0,08}{2} * 0,004\right) m - \left(\frac{0,04 * 0,04}{2} * 0,004\right) = 9,6 * 10^{-6} m^3$$

$$m_{kolmio} = 9,6 * 10^{-6} m^3 * \rho_{rauta} = 0,075 kg$$

m_{masto}

$$m_{masto} = m_{salko} * (2 * m_{latta}) * (8 * m_{kolmio}) = 82,94 kg \approx 83 kg$$

Kiinnitysholkit

$m_{perusholkki}$

$$V_{perusholkki} = (0,11 * 0,11 * 0,25) m - (0,102 * 0,102 * 0,25) m \\ = 4,24 * 10^{-4} m^3$$

$$m_{perusholkki} = 4,24 * 10^{-4} m^3 * \rho_{rauta} = 3,33 kg$$

$m_{Windside\ laippa}$

$$V_{Windside\ laippa} = \left(\left(\frac{\pi}{4} * 0,29^2\right) * 0,004\right) m - (0,11 * 0,11 * 0,004) m \\ = 2,156 * 10^{-4} m^3$$

$$m_{\text{Windside laippa}} = 2,156 * 10^{-4} m^3 * \rho_{\text{rauta}} = 1,69 kg$$

$m_{\text{Air403 laippa}}$

$V_{\text{Air403 laippa}}$

$$\begin{aligned} &= (0,102 * 0,102 * 0,004) + (2 * 0,04 * 0,04 * 0,004) \\ &+ ((\pi * 0,024^2 * 0,6) - (\pi * 0,022^2 * 0,6)) \\ &= 1,9 * 10^{-4} m^3 \end{aligned}$$

$$m_{\text{Air403 laippa}} = 1,9 * 10^{-4} m^3 * \rho_{\text{rauta}} = 1,49 kg$$

$m_{\text{Windside holkki}}$

$$m_{\text{Windside holkki}} = m_{\text{perusholkki}} * m_{\text{Windside laippa}} = 5,02 kg$$

$m_{\text{Air403 holkki}}$

$$m_{\text{Air403 holkki}} = m_{\text{perusholkki}} * m_{\text{Air403 laippa}} = 4,82 kg$$

Lankut

Puuntiheys $\rho_{m\ddot{a}nty}$:

$$\rho_{m\ddot{a}nty} = 540 \text{ kg/m}^3 \text{ (Puuinfo.fi 2010)}$$

$$V_{lankku} = (4,5 * 0,15 * 0,05) \text{ m} = 3,375 * 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$m_{lankku} = 3,375 * 10^{-2} \text{ m}^3 * \rho_{m\ddot{a}nty} = 18,225 \text{ kg}$$

Kokonaisasennuspaino

Taulukko 3. Voimaloiden osien paino

	Air403		Windside	
Turbiini	6	m_{Air403}	42	m_{Windside}
Holkki	4,82	$m_{\text{Air403 holkki}}$	5,02	$m_{\text{Windside holkki}}$
Masto	78,6	m_{masto}	78,6	
Lankku	18,225	m_{lankku}	18,225	

$$m_{kok} = 2 * m_{masto} + 2 * m_{lankku} + m_{\text{Air403}} + m_{\text{Air403 holkki}} \\ + m_{\text{windside}} + m_{\text{windside holkki}} = 251,49 \text{ kg} \approx 252 \text{ kg}$$

Liite 4. Asennuksen kiinnitysten laskelmat

Ruuvi- ja pulttiliitokset

Ruuvipituus = h (mm)

Ruuvin kokonaishalkaisija = d (mm)

Sydänläpimitta = d , kierreosassa mitattu kierteen pohjasta

Aluslevyn sivu = keskireijän reunan ja ulkoreunan välinen etäisyys (mm)

Kierreosan pituus = L (mm)

Ruuvi 6x160/70 = $d \times h/L$

Ruuvin kannan puoleisen puun paksuus = t (mm)

Esireikä = ruuvin kierreosan sydänläpimitta

Aluslevy = sivunpituus vähintään $3d$. Paksuus $0,3d$; kuitenkin $\geq 5\text{mm}$

Ankkurointi pituus = puussa olevan kierre osan pituus $\geq 8d$

(Huuhtanen 2001, 12–13).

Puun- ja kuusiokantaruuvien pitovoima (N)

$$F = (15 + 7,5d) * (L - 1,5d) \text{ (Huuhtanen 2001. Kaava 5.14)}$$

Kansiruuvi 10x80/60

$$F_{kansiruuvi} = (15 + 7,5 * 10) * (60 - 1,5 * 10) = 4050N$$

Ruuvi 6x160/70

$$F_{ruuvi} = (15 + 7,5 * 6) * (70 - 1,5 * 6) = 3660N$$

Ruuveihin vaikuttavat voimaloiden painon aiheuttamat voimat (N)

$$g = 9,81m/s^2$$

$$G = mg$$

Kansiruuvit 10x80/60

AIR403

$$G_{Air403} = (m_{Air403} + m_{Air403\ holkki} + m_{masto}) * g = 877,2N$$

Windside WC-0,30C

$$G_{Windside} = (m_{Windside} + m_{Windside\ holkki} + m_{masto}) * g = 1232N$$

Ruuvi 6X160/70

$$G_{kok.} = m_{kok.} * g = 2472N$$

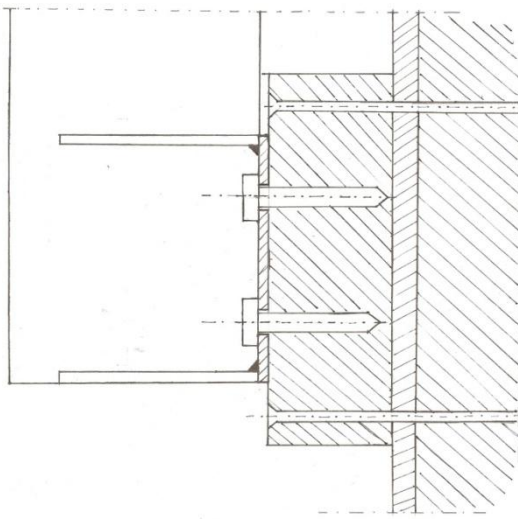
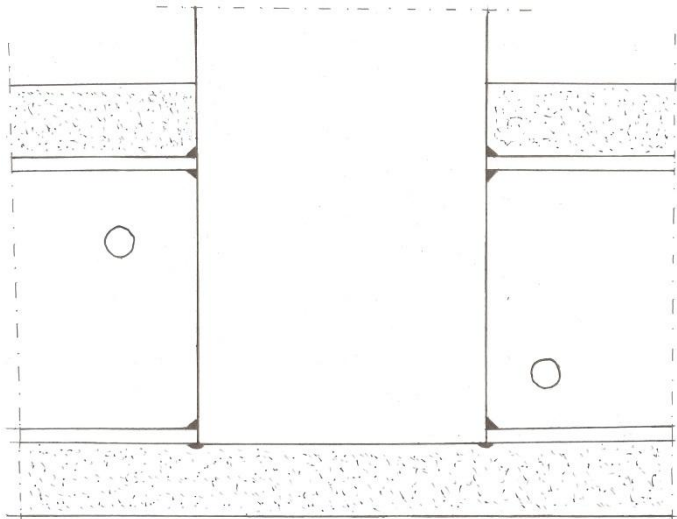
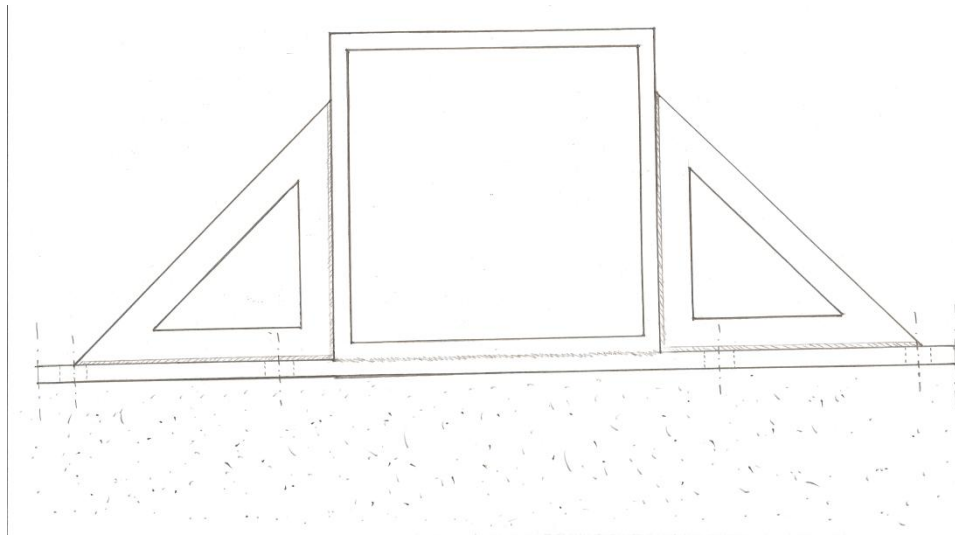
Tuulivoimaloiden rakenteeseen on suunniteltu kuuluvaksi 12 kansiruuvia/masto ja yhteensä 14 ruuvia/lankku. Varmuuskertoimet on laskettu ruuvien pitovoiman ja voimaloiden painosta aiheutuvien voimien suhteesta.

$$\frac{12 * F_{kansiruuvi}}{G_{Air403}} = 55,4$$

$$\frac{12 * F_{kansiruuvi}}{G_{Windside}} = 39,4$$

$$\frac{28 * F_{ruuvi}}{G_{kok.}} = 41,45$$

Liite 5. Kiinnityksen periaatekuvat



Liite 6. Tuulivoimala.com WPE300 + WPH300 – paketti

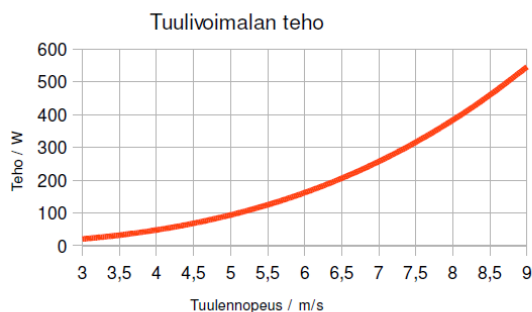


WPE300W Tekniset tiedot

Akkukytkenä



- Korroosiosuojattu, säänkestävä metallirunko.
- Varmatoiminen ohjaus ja myrskysuojaus peräsimellä.
- Alhainen tuoton aloitustuulennopeus.
- Kaapelin kiertymisenesto liukurenkaalla.
- Hiljainen äänitaso.
- Suuri lapahalkaisija-> parempi tuotto myös sisämaassa.
- Arvioitu vuosituotanto 400-2000 kWh.



Malli	WPE300W
Lapojen halkaisija	2,2 m
Lapojen rakenne	Lasikuitu
Lapojen lukumäärä	3
Nimellisteho / maksimiteho	300 W / 500 W
Nimelliskierrosnopeus	450 RPM
Nimellistuulennopeus	7,5 m/s
Aloitustuulennopeus	3 m/s
Toimintatuulennopeus	3-25 m/s
Maksimituulennopeus	45 m/s
Jännite	DC 12 V
Generaattorin tyyppi	Kolmivaiheinen kestmagnetoitu generaattori
Myrskysuojaus	Tuulesta pois kääntyminen ja jarrutus
Suosittelun maston korkeus	Min. 6 m
Paino	40 kg

Oikeudet muutoksiin pidätetään.

Tuulivoimala.com Finland Oy
Kutojantie 3
02630 Espoo

Tel/fax: (09) 4259 8898 / 8893
sähköposti: info@tuulivoimala.com
<http://www.tuulivoimala.com>

Alv rek.FI 20927751
VAT reg.FI 20927751



Hybridi lataussäädin WPH300W Pientuulivoimalalle ja aurinkopaneeleille

WPH300W hybridi lataussäädin on suunniteltu pientuulivoimalan ja aurinkopaneelin kytkemiseksi 12V akkuun. Lataussäädin käyttää PWM säätöä rajoittamaan akun latausvirtaa ja jännitettä.



Malli	WPH300W
Akkujännite	12V
Tuulivoimalan nimellisteho	300W
Sisääntuloimpedanssi alue	1~10/15S
Tuulivoimalan suurin sisääntulovirta	40A
Tuulivoimalan suurin teho	500W
Tuulivoimalan latauksen aloitusjännite	Asetettavissa
Latausjännite (oletus)	Asetettavissa (13,6V)
Latausvirta	Asetettavissa 0-25A
Aurinkopaneelin suurin teho / virta	150W / 10A
Akun alijännitesuojaus (tehtaan oletus)	Asetettavissa (11V)
Akun alijännitesuojauksen nollaus jännite (tehtaan oletus)	Asetettavissa (12V)
Ulostulon ylijännitesuojaus	16V
Aurinkopaneelin pimeän ajan jännite (tehtaan oletus)	Asetettavissa (1V)
Aurinkopaneelin valoisan ajan jännite (tehtaan oletus)	Asetettavissa (1,5V)
Ulostulon 1 suurin virta	10A
Ulostulon 2 suurin virta	10A
Näytön tyyppi	LCD
Näytön tiedot	Akun jännite, tuulivoimalan jännite, aurinkopaneelin jännite, tuulivoimalan virta, aurinkopaneelin virta, tuulivoimalan teho, aurinkopaneelin teho, ylijännite, alijännite, ylikuorma, oikosulku.
Tietoliikenneportin tyyppi	RS-232C (RS-232-USB kaapeli lisävarusteena)
Toimintalämpötila alue / kosteus	-20~+55°C / 35~85% RH (Ei kondensatiota)
Tyhjäkäyntivirta	20±2mA
Suosittelun vähimmäis akkukapasiteetti	100Ah / 12V

Oikeudet muutoksiin pidätetään.

Tuulivoimala.com Finland Oy
Kutojantie 3
02630 Espoo

Tel/fax: (09) 4259 8898 / 8893
sähköposti: info@tuulivoimala.com
<http://www.tuulivoimala.com>

Alv rek.
VAT reg
FI 2092775

WINDSIDE WS-0,30C mitat ja tekniset tiedot

Windside WS-0.30C tekniset tiedot:

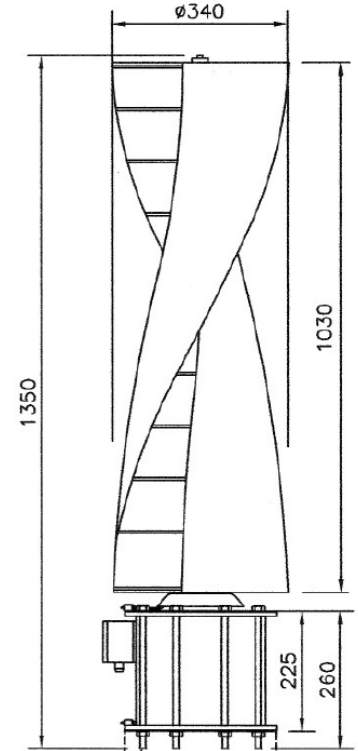
- Paino: n. 43 kg
- Tuulipinta-ala: 0,3 m²
- Generaattori: 9A kolmiossa, 6A tähdessä
- Jännite: 12V:n akunlataustila 15V
24V:n akunlataustila 30V
- Turbiinin kiinnitys 6 kpl M12 pulttia
- Tuulikuorma sivuttain siiven keskipisteestä laskettuna 0,5 m generaattorista ylöspäin: 100 kg
- Perustuksen massa riippuu maston korkeudesta eli momenttivarren pituudesta.
- WS-0,30C-mallin maksimi pyörimisnopeus 1500 rpm
- WS-0,30C-malli kestää jatkuvaa tuulta 30 m/s

Materiaalit:

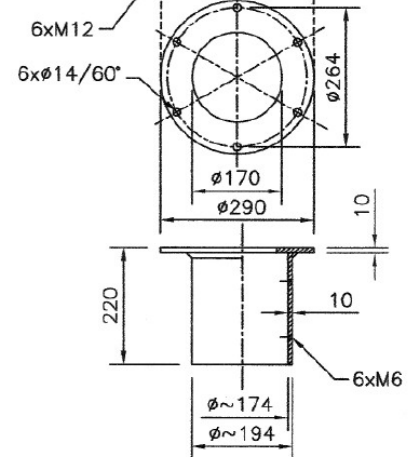
- Siivet: lasikuitua
- Kiinnikkeet: Kromattua alumiinia
- Akseli: Ø25mm kovakromattua terästä
- Generaattori ja laipat: kuumasinkittyä terästä ja merialumiinia
- Kaikki pultit joko ruostumatonta terästä tai kuumasinkittyä (A4, A2 tai KZn)

Ominaisuudet:

- Ei tarvitse pysäyttää myrskyssä, eikä tarvitse myrskysuojausta
- Tuottaa myös myrskyssä
- Ei tarvitse kääntää tuulen mukaan
- Äänetön (0 dB, mitattuna 2 m siivestä)
- Ei jäädy talvella pyöriessään
- Kestää hiekkamyrskyjä Saharassa
- Voidaan asentaa talojen läheisyyteen
- Pitkäikäinen kuten rakennukset
- Vähäinen huollontarve, ainoastaan rasvaus
- Vaaraton ihmisille, eläimille ja luonnoille



ASENNUS MITAT



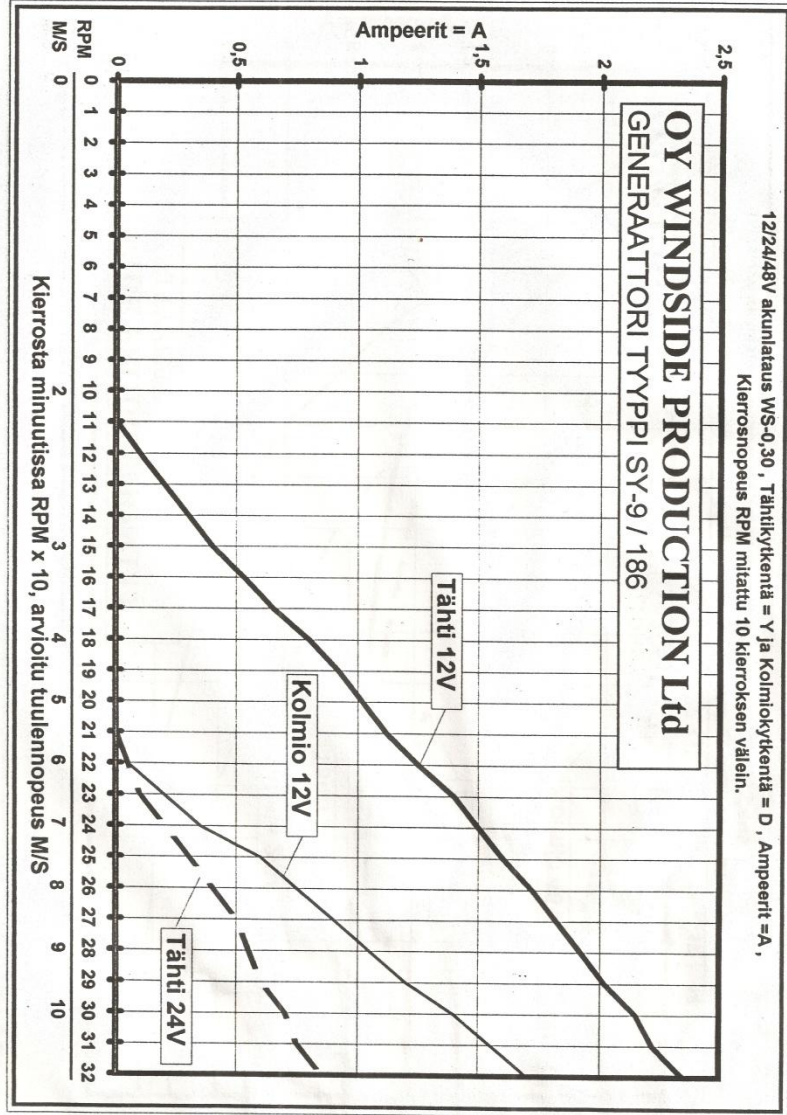
windside

OY WINDSIDE PRODUCTION Ltd

Sähköposti ja internet
finland@windside.com
www.windside.com

Tel.: 0208-350 700
Fax: 0208-350 701
Mobile: 0400-315 037

Valmistaja pidättää itsellään oikeuden kaikkiin muutoksiin ilman eri ilmoitusta



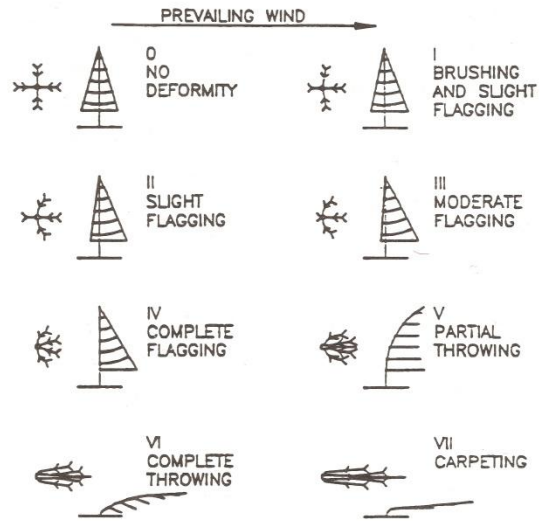
Puhelin: 0208-350 700
 Telefax: 0207-350 700
 GSM: 0400-315 037

LYT: 1049307-2
 Krno: 675809
 Pankki: PSP 800015-70448663

Tel: +358-208-350 700
 Fax: +358-207-350 700
 GSM: +358-400-315 037

VAT No: FI-10493072
 Reg. in Finland No: 675809
 Bank: Postbank 800015-70448663

Liite 8. Griggs – putnam index (Wade & Baker. 1977)



WIND SPEED RATING SCALE BASED ON THE SHAPE OF THE CROWN AND DEGREE TWIGS, BRANCHES AND TRUNK ARE BENT (GRIGGS-PUTNAM INDEX: WADE AND BAKER, 1977)

MEAN ANNUAL WIND SPEED VERSUS THE GRIGGS-PUTNAM INDEX

GRIGGS-PUTNAM INDEX	0	I	II	III	IV	V	VI
PROBABLE MEAN ANNUAL WIND SPEED RANGE (mph)	0-7	7-9	9-11	11-13	13-16	15-18	16-21
WIND SPEED RANGE (m/s)	0-3	3-4	4-5	5-6	6-8	7-9	8-10

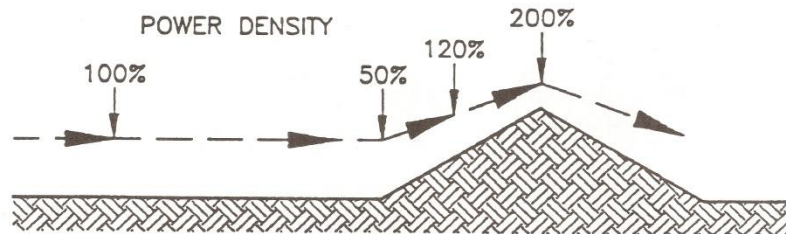


Figure 9