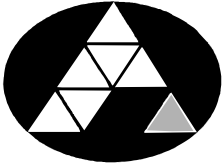


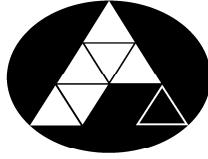
POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jorma Turunen

PIENTUULIVOIMALAN VALINTA KÄYTTÖTARKOITUKSEN JA
TERTTULANVAARAN TUULIOLOJEN MUKAAN

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2012

 <p>POHJOIS-KARJALAN AMMATTIKORKEAKOULU</p>	<p>OPINNÄYTETYÖ Maaliskuu 2012 Sähkötekniikan koulutusohjelma</p> <p>Karjalankatu 3 80200 JOENSUU p. (013) 260 6906</p>
<p>Tekijä(t) Jorma Turunen</p>	
<p>Nimeke Pientuulivoimalan valinta käyttötarkoituksen ja Terttulanvaaran tuuliolojen mukaan</p> <p>Toimeksiantaja Jakokosken kyläyhdistys</p>	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työn tarkoituksena oli valita käyttöpaikan tuulimittauksiin ja Suomen tuuliatlaksen pitkäaikaisiin tuulisuustietoihin perustuen pientuulivoimala, joka olisi myös käyttötarkoitukseensa ja käyttöpaikalle sopiva. Voimalan sijoituspaikkana tulee olemaan Jakokosken Terttulanvaara ja käyttötarkoituksena on tuottaa lämmitysenergiaa noin 200 m:n päässä voimalasta olevaan kokoustilaan.</p> <p>Ensimmäisenä tehtävänä oli järjestää Terttulanvaaralle tuulimittaus, jonka tuloksia ja Suomen tuuliatlasta hyväksikäyttäen määritettiin mittauspaikan tuulennopeuksien pitkäaikainen jakauma ja tuulivarat. Tuulivoimalan teho määriteltiin lämmitettävien tilojen tehontarpeen mukaan. Tämän jälkeen voitiin laskea valitun tuulivoimalan tehokäyrää ja tuulennopeuksien jakaumaa soveltaen tuulivoimalan vuotuinen energiantuotto sekä syntynyt säästö sähkön ostossa.</p> <p>Tuloksena saatiin määriteltyä Terttulanvaaran tuulioloihin sopivan tuulivoimalan, jonka laskennallinen tuotto, lähes 86 % kokoustilojen lämmitysenergiasta, vastasi hyvin toivottuja tuottotavoitteita. Myös voimalan tuottaman sähköenergian talteenottoa vesivarajaan pidetään hyvänä ajatuksena, koska sähkön laadulla ei silloin ole niin suurta merkitystä. Tuulimittaus Terttulanvaaralla jatkuu edelleen, jotta voidaan tarkentaa laskelmia ja voimalan ominaisuuksia lähempänä voimalan tilausajankohtaa.</p>	
<p>Kieli suomi</p>	<p>Sivuja 61 Liitteet 1 Liitesivumäärä 1</p>
<p>Asiasanat Tuulienergia, tuulimittaus, tuulivoimala</p>	

 <p data-bbox="276 389 695 443">NORTH KARELIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</p>	<p data-bbox="812 203 1302 495">THESIS March 2012 Degree Programme in Electrical Engineering Karjalankatu 3 FIN 80200 JOENSUU FINLAND Tel. 358-13-260 6906</p>
<p data-bbox="233 512 454 580">Author(s) Jorma Turunen</p>	
<p data-bbox="233 647 1477 748">Title Choosing a Wind Turbine According to the Purpose of Use and Wind Conditions at Terttulanvaara</p> <p data-bbox="233 790 852 824">Commissioned by Jakokosken kyläyhdistys</p>	
<p data-bbox="233 833 357 866">Abstract</p> <p data-bbox="233 904 1477 1122">The purpose of this thesis was to choose a wind turbine which would be suitable for the purpose of use and the location, based on wind measurements at the place of use and Finnish long term wind atlas data. The location for the wind turbine will be in Terttulanvaara, Jakokoski. The purpose of the wind turbine will be producing heat energy for a meeting space. The distance between the wind turbine and the meeting space is about 200 meters.</p> <p data-bbox="233 1160 1477 1377">The first task was to organize wind measurement in Terttulanvaara. With these results, long-term wind speed distribution and wind resources were determined. The power of the wind turbine was defined based on the power consumption of the heated areas. Thereafter, the wind turbine's annual energy production and economic benefits in electricity purchase were calculated by applying a wind turbine power's curve and the wind speed distribution.</p> <p data-bbox="233 1415 1477 1632">As the result, wind turbine suitable for Terttulanvaara wind conditions was defined. The calculated energy production corresponded well to the expected target rate for return. It is also considered a good idea to recover electrical energy produced by the wind turbine for a water boiler where the power quality is not as important. Wind measurements are still continuing in Terttulanvaara in order to define the calculations and properties of the turbine closer to the time of delivery.</p>	
<p data-bbox="233 1682 379 1749">Language Finnish</p>	<p data-bbox="927 1682 1257 1789">Pages 61 Appendices 1 Pages of Appendices 1</p>
<p data-bbox="233 1796 892 1890">Keywords wind energy, wind measurement, wind turbine</p>	

Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenne- ja käsiteluettelo	5
1 Johdanto	7
2 Työn tavoitteet	10
3 Tuuli	10
3.1 Tuulen nopeus	11
3.2 Tuulensuunta	12
3.3 Rajakerros.....	13
3.4 Vertikaalinen tuuliprofiili	13
4 Tuulivarojen mittausta.....	14
4.1 Tuulimittauslaitteita	16
4.2 Weibull-jakauma.....	17
5 Tuulivoimaloiden ympäristövaikutukset.....	19
5.1 Tuulivoimalarakentamisen maisemavaikutukset	19
5.2 Näkökohtia tuulivoimaloiden sijoittamisesta maisemallisesti	20
5.3 Vaikutukset linnustoon	21
5.4 Tuulivoimaloiden äänet	22
6 Tuulivoimatuotanto.....	23
7 Tuulivoimaloiden rakennetyyppejä.....	25
7.1 Vaaka-akseliset voimalat	25
7.2 Pystyakseliset voimalat	25
8 Ohjeita tuulivoimalan suunnitteluun	27
9 Tuuliturbiinin teho ja energia	28
9.1 Tuulen liike-energia.....	28
9.2 Tuulen teho	28
9.3 Turbiinin teho	29
9.4 Tuulivoimalan energian tuotto	29
10 Tutustumiskäynti pientuulivoimalalle.....	31
11 Terttulanvaaran tuulivoimala.....	33
11.1 Voimalan käyttötarkoitus	33
11.2 Voimalan paikan valinta	34
11.3 Voimalan tuotannon siirto käyttöpaikkaan.....	35
11.4 Tuulimittaukset Terttulanvaaralla	35
11.5 Tuulidatan analyysi ja tuulivarat	38
11.6 Kahvion lämmitystehon tarve	44
11.7 Tuulivoimalan tehon määrittäminen.....	45
11.8 Voimalan valinta ja tuottolaskenta.....	45
11.9 Maston valintakriteerit	50
11.10 Voimalasta johtuvia mahdollisia ympäristövaikutuksia.....	51
11.11 Rakennuslupa	55
12 Tulosten yhteenveto.....	56
13 Johtopäätökset	57
Lähdeluettelo	59

Liitteet

Liite 1 Ilmari 10 kW tuulivoimalan esite

Lyhenne- ja käsiteluettelo

HAWT

Vaaka-akselinen turbiini (*Horizontal-Axis Wind Turbine*). [1, s.10.]

Huipunkäyttöaika

Tuulivoimaloiden yhteydessä vuotuinen huipunkäyttöaika kuvaa sen ajan pituutta, joka kuluisi vuodessa tuotetun energian tuottamiseen, mikäli tuulivoimala toimisi koko ajan nimellistehollaan. [2]

Maisema

Maisema muodostuu elollisista ja elottomista tekijöistä sekä ihmisen tuottamasta vaikutuksesta. Euroopan maisemasopimuksen mukaan maisema tarkoittaa aluetta sellaisena kuin ihmiset sen mieltävät ja jonka ominaisuudet johtuvat luonnon ja/tai ihmisen toiminnasta ja vuorovaikutuksesta. [3, s. 13.]

Napakorkeus

Napakorkeus on etäisyys maan pinnasta roottorin keskipisteeseen.

Rajakerros

Ilmanvirtausten mukautuessa maanpinnan olosuhteisiin syntyy rajakerros ilman vapaan virtauksen ja maanpinnan aiheuttaman kitkan välille. [4]

Roottorin lavassa rajakerros on profiilin pinnan välittömässä läheisyydessä oleva hyvin ohut kerros, jossa ilman nopeus on pienentynyt pinnan vaikutuksesta. Pinnan karheus ja muodon epäpuhtaudet lisäävät rajakerroksen paksuutta. Rajakerros laahautuu profiilin mukana ja tämä vaatii energiaa. Mitä paksumpi rajakerros sitä suurempi on energiahäviö eli vastus. [5, s. 12.]

Tehokäyrä

Käyrä kuvaa tuulivoimalan tuotantotehon kehitystä suhteessa tuulen nopeuteen [6]

Tuuliatlas

Tietokonemallinnukseen perustuva tuulisuuskartoitus, jonka työn koordinaation Työ- ja elinkeinoministeriö on tilannut Motivalta ja jonka toteutuksen on tehnyt Ilmatieteenlaitos alihankkijoineen.

Tuuliatlas-työn tuloksena on valmistunut WWW-pohjainen karttaliittymä, johon on tuotettu tietoa Suomen tuuliolosuhteista. Karttaliittymän avulla voidaan tarkastella paikkakohtaisia pitkän ajan tuuliolosuhteita koko Suomen alueelta. [7]

Tuuligradientti

On matemaattinen termi ja tarkoittaa kulmakerrointa. Sitä käytetään myös puhuttaessa jonkin asian muutoksen jyrkkyydestä. Tuuligradientti kuvaa tuulen nopeuden kasvun jyrkkyyttä korkeuden kasvaessa. [8]

Tuuliruusu

Kuvaaja, joka kertoo tuulen suhteelliset osuudet eri tulosuunnista yksittäisessä pisteessä tietyllä aikavälillä. [9, s. 19.]

Tuulisuus

Tarkoittaa tuulen nopeuden keskimääräistä jakaumaa vuoden tai vuosien aikana. [10, s. 2.]

VAWT

Pystyakselinen turbiini (*Vertical-Axis Wind Turbine*). [1, s.72]

Weibull-jakauma

Tilastollinen funktio jolla kuvataan tuulen jatkuvaa nopeusjakaumaa mittauskohteessa. Se saadaan siten, että pitkäaikaisista tuulimitaustuloksista muodostetaan tasavälinen histogrammi, joka kertoo kuinka usein tietty tuulen nopeus esiintyy. Jakauma ilmaisee mittauspaikan tuulisuutta. [11]

1 Johdanto

Suomen Kylätoiminta ry valitsi Jakokosken Suomen valtakunnalliseksi kyläksi 1998. Valinta ei varmaan ole ollut sattuma, vaan täysin ansaitusti saatu. Jakokoski on tunnetusti ja tunnustetusti aktiivisten, osaavien ja innovatiivisten ihmisten kylä. Kylällä ideoidaan ja toteutetaan erilaisia kylän kehittämishankkeita talukoivoimin sekä useiden yhteistyökumppaneiden tuella. Jakokoskella toimitaan ”tehdään eikä meinata” – mentaliteetilla. Kyläläisten tekemistä voi hyvin kuvata sanoilla ”kun itse tekee, niin saa mitä haluaa”.

Keväällä 2010 etsiessäni opinnäytetyöni aihetta huomasin aivan sattumalta, että Jakokosken kyläsuunnitelma 2009 sisältää idean oman tuulivoimalan rakentamisesta. Tiedustelin asian tiimoilta kyläpäällikkö Pentti Seudulta, kuinka pitkälle kyläsuunnitelmassa mainittu tuulivoimalahanke on jo edennyt. Selvisi, että ei vielä yhtään sen pidemmälle kuin mitä kyläsuunnitelmaan on kirjattu.

Ehdotin silloin Pentti Seudulle, että voisin tehdä voimalasta opinnäytetyön. Ehdotus tuntui tulleen kuin tilauksesta oikeaan aikaan. Sovimme tuolloin hänen kanssaan selvittävämme, mitä tehtäviä, suunnitelmia ja esityksiä työhön tulisi kuulumaan ja kuinka hankkeen toteuttamisessa tultaisiin etenemään. Asiaa käsitellään tarkemmin kohdassa 2 Työn tavoitteet.

Jakokosken kylällä on ollut hienoinen tuulimyllyimago jo vuosikymmeniä. Kylämiljööseen jo parin vuosikymmenen ajan kuulunut, kylätalon vieressä oleva tuulimylly (kuva 1), on ollut muistuttamassa ohikulkevia matkalaisia menneiden aikojen tuulimyllyistä. Vuosikymmeniä sitten näillä sähköttömien kylien ”voimakoneilla” jauhettiin jyvät, pumpattiin vettä ja pyöritettiin tahkoakin.

Kuvan 1 mylly on rakennettu 1920-luvulla Lehmossa jossa sitä on käytetty jauhomylllynä Hovilan tilalla. Tilan poika Erkki Pitkänen muutti 1930-luvulla Jakokoskelle ja sai myllyn perintönä isältään. Tällöin mylly kuljetettiin osiin purettuna Lehmossa Jakokoskelle. Mylly oli kylällä käytössä useita vuosikymmeniä. Sotaaikana Pitkänen oli jauhanut jyvät yöaikaan, sillä venäläisten pommituslentäjien

pelättiin havaitsevan pyörivät myllynsiivet. Myllyn käydessä tarpeettomaksi oli Pitkänen lahjoittanut myllyn siirrettäväksi nykyiselle paikalleen kylätalon viereen. [12]



Kuva 1. Jakokosken kylätalon seurana eläkepäiviään viettävä tuulimylly.

Myös kyläyhdistyksen logoa koristaa sen etualalla oleva tuulimylly (kuva 2). Logon suunnittelija Päivi Karhu-Sormunen on varmaankin saanut innoituksen kylälogon suunnitteluun edellä mainitusta kylätalon vierellä olevasta tuulimyllystä.



Kuva 2. Kyläyhdistyksen tuulimyllylogo. Päivi Karhu-Sormunen on sen aikanaan piirtänyt kyläpaitaa varten. [13].

Sähköä tuottavien tuulimyllyjen kanssa on Jakokoskella touhuttu ennenkin. Muun muassa kyläseppä Toivo Rynnänen rakensi itse sähköä tuottavan tuulimyllyn 1940– ja 1950–lukujen taitteen tienoilla (kuva 3) käytyään sitä ennen tuulimyllyihin perehdyttävän kurssin. Tarkoituksena oli saada navettaan sähkövalot kun yleistä sähköverkkoa ei vielä ollut lähimailla. Akkujen puute kuitenkin haittasi toimintaa niin, että ainut mahdollisuus valojen saamiseen oli kytkeä generaattori suoraan navetan sähkövalaisimiin [14]. Arvata saattaa, että valot ovat olleet ihan kirjaimellisesti tuulella käyviä.



Kuva 3. Kyläseppä Toivo Rynnänen sähköä tuottavan tuulimyllynsä vierellä. Kuva on Toivo Rynnäsen albumista [14]

Tämän opinnäytetyön on myös toivottu tukevan Jakokosken imagoa tuulimyllyjen kylänä. Voimalan suunniteltu sijoituspaikka, Terttulanvaara lähiympäristöineen, hämmästyttää alueella vierailevia moninaisilla historiallisilla ja nykyisilläkin erikoisuuksilla. Tässä ympäristössä tuulivoimala olisi oivallinen kurioositeetti lisää rikastuttamassa alueen luonnetta.

2 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena oli mitata ja määrittää tuulivoimalan sijoituspaikaksi kaavaillun Terttulanvaaran tuulisuus sekä valita tuulioloihin soveltuva pientuulivoimala. Voimalan tuli myös olla käyttötarkoitukseensa sopiva sekä lisäksi sopia rakenteellisesti ja esteettisesti käyttöpaikalleen.

Käyttötarkoitukseksi määriteltiin Tähtikallion kahvion (kokoustilan) lämmitys siten, että kovimpien pakkasten ja tuulettomien aikojen lämmitys järjestetään muulla tavoin. Siis lisälämpö tuotetaan ostosähköllä, puulämmitteisellä uunilla ja ilmalämpöpumpulla.

Työssä selvitettäviä ja huomioitavia asioita listattiin seuraavasti:

- Terttulanvaaran tuulivarojen arviointi
- syötettävän sähkölaitteiston määrittäminen (teho)
- voimalan kokoluokan valinta (teho)
- ympäristöarviointi (melu, linnut, ym. haitat)
- voimalan sopivuus käyttöpaikalle (esteettisyys)
- alustava rakennuslupaselvitys

Tämän työn tuloksena syntyvän voimalavalinnan on tarkoitus olla ohjeellinen ja antaa perusteet sekä valintametodit lopullisen voimalan valitsemiseksi. Vertailevat laskennat ja sopivuuden arvioinnit käyttötarkoitukseen eri voimaloiden kesken tehdään kyläyhdistyksessä tämän työn pohjalta. Lopulliseksi voimalavalinnaksi voi myös muodostua työssä ehdolla ollut voimala.

3 Tuuli

Tuuli on maanpinnan suuntainen ilmavirtaus ilmakehässä ja se on pohjimmiltaan aurinkoenergiaa. Tästä maapallolle saapuvasta auringon energiasta muut-

tuu tuulienergiaksi eli tuuleksi arviolta 1–3 %. Auringon säteily lämmittää maanpintaa päiväntasaajan alueella huomattavasti enemmän kuin napaseuduilla sijaitsevia alueita. Toisaalta pitkäaaltoisen ulossäteilyn vaikutuksesta maan napa-alueet menettävät lämpöenergiaa enemmän kuin saavat sitä auringosta ja napa-alueiden välinen alue saa enemmän säteilyenergiaa kuin menettää. Ilmakehä maapallolla kuitenkin pyrkii säilyttämään lämpötasapainon, minkä seurauksena lämpöä kulkeutuu päiväntasaajan alueilta kohti napaseutuja. Tämä lämmönsiirtyminen tapahtuu atmosfäärin tuulien ja valtameren virtauksien muodossa. Tuulten kuljettamana tästä lämmöstä siirtyy noin 70 %. [15]

3.1 Tuulen nopeus

Tuulen nopeuden yksikkönä käytetään Suomessa yleisesti SI-järjestelmän mukaisesti metriä sekunnissa (m/s). Lentoliikenteessä ja merenkulussa tuulennopeuden yksikkönä käytetään solmua (kt), eli meripeninkulmia tunnissa. Useissa maissa on käytössä myös tuulennopeusyksiköt kilometriä tunnissa (km/h) tai mailia tunnissa (mph). [15]

Suomessa Ilmatieteenlaitoksella tuulen nopeutta mitataan 10 m:n korkeudella maanpinnasta, meteorologian alan kansainvälisen suosituksen mukaan. Taulukossa 1 on ilmatieteen laitoksen säätiedotusten yhteydessä käyttämä tuulennopeusasteikko tuulennopeuksien kuvauksineen ja vaikutuksineen. [15]

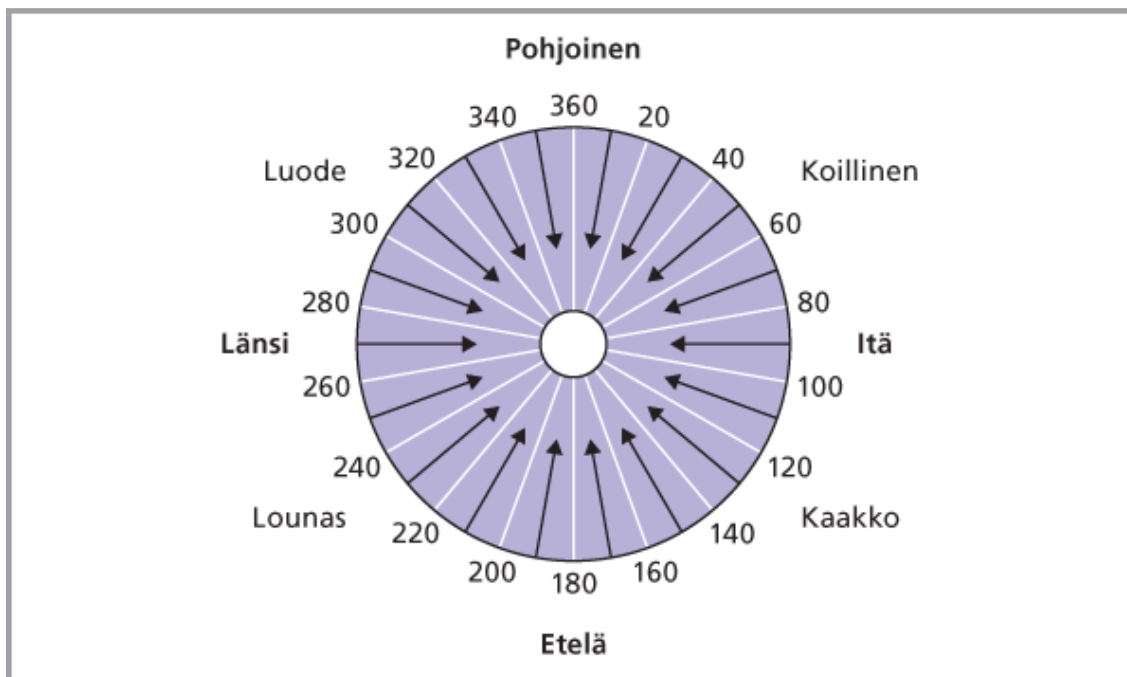
Taulukko 1. Sää tiedotuksissa käytettyjä tuulen nopeuden kuvauksia. [15]

Sää tiedotuksen tuulen nopeudet		
m/s	Kuvaus	Tuulen vaikutukset maalla ja avomerellä
0–3	Heikko tuuli	1 m/s: savu menee tuulen suuntaan 3 m/s: puiden lehdet kahisevat; lyhyitä aaltoja
4–7	Kohtalainen tuuli	Lippu oikenee; aallon harjat murtuvat
8–13	Navakka tuuli	8–10 m/s: pienet lehtipuut heiluvat; meri kohisee 11–13 m/s: suuret oksat heiluvat; meri kumisee
14–20	Kova tuuli	14–17 m/s: puut heiluvat; aaltojen huiput murtuvat 18–20 m/s: katkoo puiden oksia
21–24	Myrsky	Katkoo puita; aallot korkeita, meri pauhaa
25–28	Kova myrsky	Kiskoo puita juurineen; merellä aaltovuoria
29–32	Ankara myrsky	Kaataa metsää; merenpinta täysin valkoisena
>32	Hirmumyrsky	

3.2 Tuulen suunta

Tuulen suunta ilmaistaan sen ilmansuunnan mukaan josta tuuli tulee. Tuulen suuntaa mitataan Ilmatieteen laitoksella 3 asteen tarkkuudella 10 minuutin keskiarvona. [15]

Tuulen suunta jaetaan tuulienergiasovellutuksissa yleisesti kahteentoista 30 asteen sektoriin. Sektori 1 kattaa 15 astetta karttapohjoisen molemmin puolin, siis tuulen suunnat 346 – 15 astetta. Toinen sektori tuulensuunnat 16 – 45 astetta ja seuraavat sektorit siitä edespäin 30 asteen välein kiertäen myötäpäivään. [15]



Kuva 5. Tuulen suunta ilmoittaa ilmansuunnan josta tuuli tulee. [15]

3.3 Rajakerros

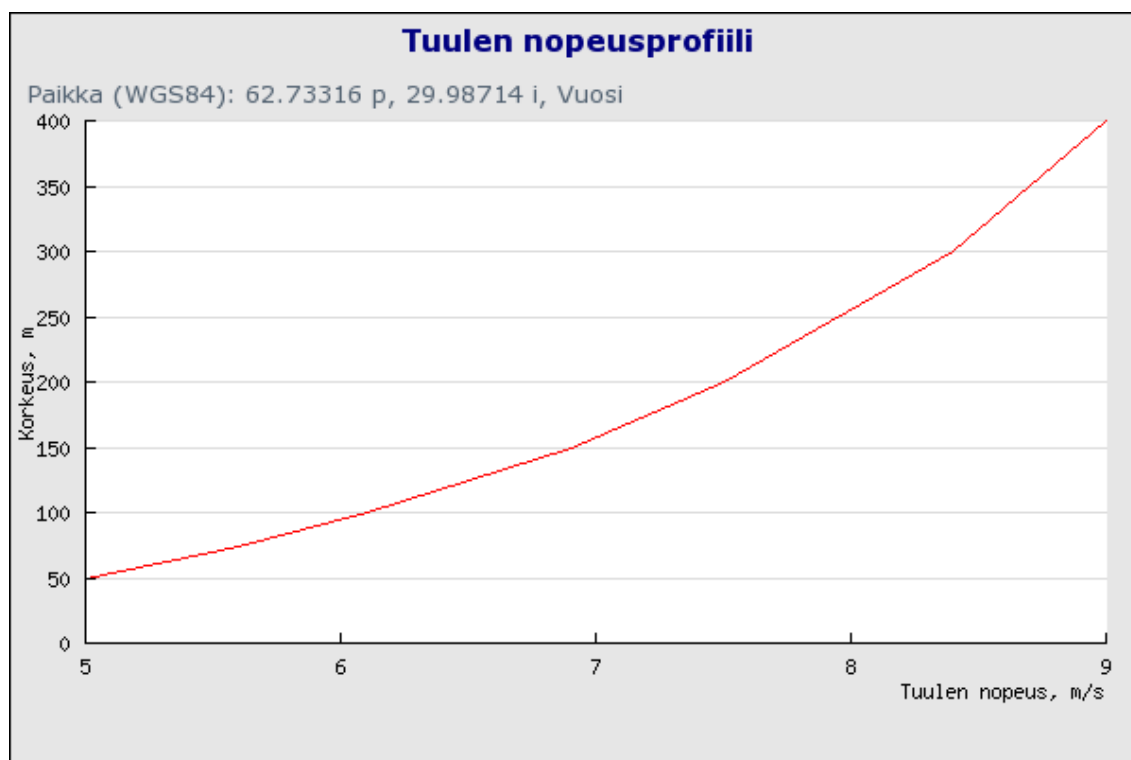
Ilmakehän rajakerroksen tarkka simulointi on keskeisintä tuulienergiaan liittyvässä ilmatieteellisessä mallinnuksessa. Rajakerros muodostuu ilmakehän muokautuessa pinnan olemassa oloon ja se toimii tavallaan puskurina vapaan ilmakehän ja pinnan välisille vuorovaikutuksille. Rajakerroksessa on virtaus miltei aina turbulენტista kun taas vapaassa ilmakehässä, jossa maanpinnasta aiheutuva kitka ei enää vaikuta virtauksiin, turbulენტisuutta on silloin tällöin. [4]

3.4 Vertikaalinen tuuliprofiili

Modernien tuulivoimaloiden napakorkeus voi olla jopa 100 – 130 m. Tällöin tuotantoarvioita varten on tuulen nopeuskin tunnettava näistä samoista korkeuksista. Ilmatieteen laitoksen sääasemillaan mittaamia tuulennopeuksia 10 m:n korkeudesta ei voi soveltaa tuotantoarviolaskelmissa suoraan. [16]

Tuulen nopeus voidaan kuitenkin laskea sääasemien tuulimittauksista tarvittavalle korkeudelle, kun tunnetaan tuulen nopeuden pystysuoran muutoksen lainalaisuudet ja siihen vaikuttavat seikat. [16]

Kuvan 6 mukainen paikkakohtainen tuulen nopeusprofiili 50 – 400 m:n korkeuteen on nähtävillä ja tulostettavissa Suomen tuuliatlaksesta.



Kuva 6. Vertikaalinen tuuliprofiili Jakokoskella, Kuva tulostettu Suomen tuuliatlaksesta. [17]

4 Tuulivarojen mitta

Tuulimittausten tarkoituksena on hankkia riittävästi tietoa voimalan sijoituspaikan tuulioloista, jotta tarvittavat suunnittelun lähtöarvot ovat käyttökelpoisia. Ensisijaisesti selvitetään tuulienopeuksien jakauma ja suunta. Voimala valitaan siten, että sen tuotto on sijoituspaikan tuuliolojen mukaan mahdollisimman hyvä ja että se kestää myös tuuliolot vähintään suunnitellun käyttöikänsä. Rannikolle

tai tuntureille suunniteltu voimala tuottaa huonosti sisämaassa, mutta kestää varmasti hyvin tuuliolot. [8, s. 2, 17,19 ja 23.]

Koska voimala on sijoitus, on myös voimalan omistajan tiedettävä voimalan tuottoarvio jotta hän voi arvioida hankkeen kannattavuuden. [8, s.17.]

Tuulimittaukset tulisi tehdä tulevan voimalan sijoituspaikalla ja napakorkeudelta. Suurissa voimaloissa mittaus tulisi tehdä useammalta korkeudelta koko roottorin alueelle, jotta voitaisiin arvioida roottorin lapoihin muodostuvia rasitusvoimia lavan ylä- ja ala-asennoissa. Mittausten olisi kestettävä vähintään vuoden ja samalla tulisi myös kyetä vertaamaan omia mittaustuloksia pitkän ajan aikasarjaan. Tällöin korrelaatiotarkastelun avulla on mahdollista saada pitkän ajan tuottoarviot. [8, s. 18 ja 22.]

Pienvoimaloiden tuulimittauksiksi riittää yleensä roottorin napakorkeudelta mitatut keskituulennopeus 10 minuutin mittausjaksolla ja tuulen suunta. Mittausten keston tulisi olla yksi vuosi.

Suurissa voimaloissa tulee edellisten lisäksi mitata myös turbulenssiaste ja tuulen vertikaalinen nopeusjakauma josta saadaan määritetyksi tuuligradietti. Mittausten tulisi kestää vähintään vuoden ajan. [8, s. 23.]

4.1 Tuulimittauslaitteita

Kuppianemometri ja suunta-anturi ovat kuvassa 7 oikealla. Mittalaitteet ovat suhteellisen halpoja, mutta vaativat mittausmaston joka on kallis pystyttää ja purkaa. Halvoissa mittareissa mittausdatan tallennus on useimmiten data-loggerityyppinen ja tulosten analysointi tapahtuu tietokoneella.

Ultraäänianemometrillä voi mitata tuulennopeuden lisäksi myös sen suunnan. Toiminta perustuu äänennopeuden muutosten tunnistamiseen ilmassa. Anturille ominaisen, erittäin nopean näytteenottotaajuuden vuoksi se soveltuu hyvin turbulenssitutkimuksiin. Anturissa ei ole liikkuvia osia ja anturi vaatii mittausmaston. Kuva 7. [18, s. 4.]



Kuva 7. Ultraäänianturi [18] vasemmalla ja kuppianemometri suunta-anturilla [19] oikealla.

Sodar (*Sonic Radar*) on äänitutka joka mittaa tuulen nopeuden 5 m portain aina 200 metriin saakka. Se on luotettava mittausväline, joka ei välitä jäädä, lumesta tai pakkasesta ja se kulkee peräkärrynä henkilöauton perässä. Mittauslaitteisto toimii valovirralla, aurinkopaneelilla tai dieselaggregaatilla, kuva 8. [8, s. 15.]

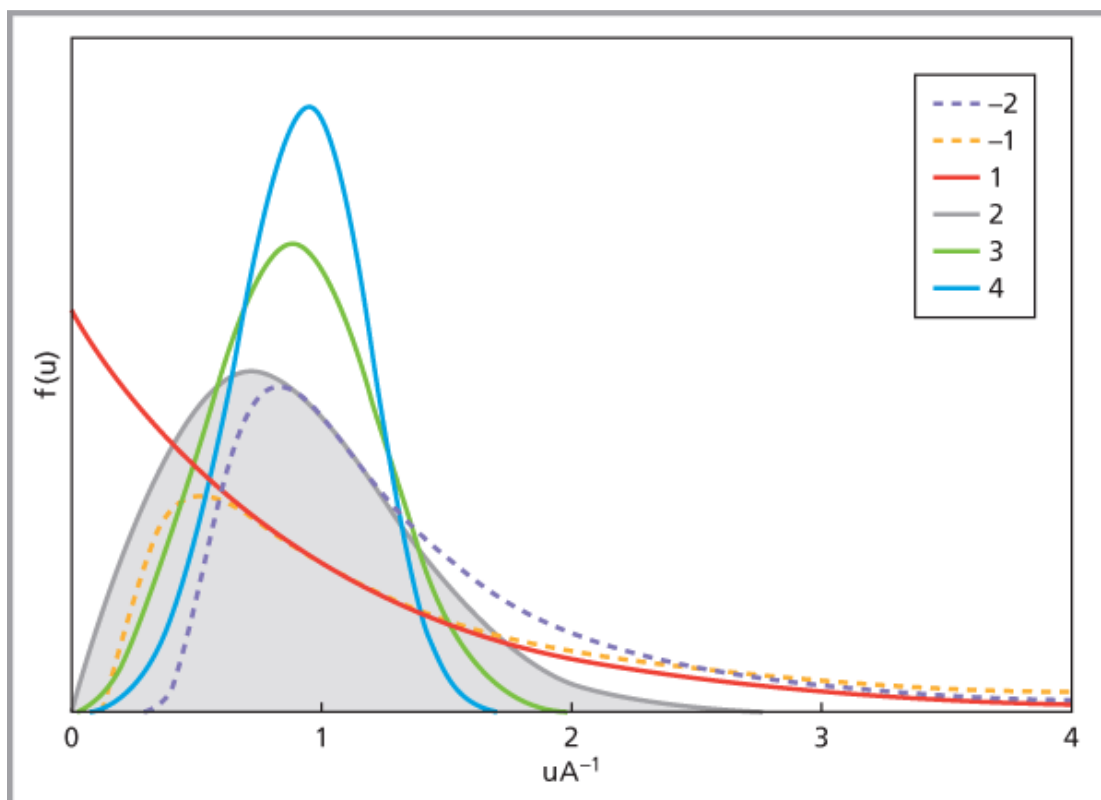


Kuva 8. Vasemmalla Sodar-äänitutka [20, s. 2.], mittaa äänipulssin avulla tuulen nopeutta ja suuntaa. Oikealla Lidar- lasertutka[]. Molempien mitta-alueet ulottuvat 200 m asti eivätkä ne vaadi minkäänlaisia mastorakenteita.

Lidar (*Light Detection and Ranging*) kuvassa 8, on optinen laite joka lähettää laservalopulsseja taivaalle ja mittaa aerosolihiukkasista laitteistolle takaisin si-ronneesta valosta tuulennopeuden. Mittalaitteisto ei vaadi mastoa. Laitteisto on kallis, mutta kohtuuhintaisia tuulimittaus-LIDAR laitteistoja on jo kehitteillä tuuli-voimatuotannon tarpeisiin. [21, s. II].

4.2 Weibull-jakauma

Tuulisuutta kuvataan Weibull-jakauman avulla, joka ilmentää jatkuvaa tilastollis-ta todennäköisyysjakaumaa. Mitatuista tuulennopeuksista muodostetaan tasa-välinen histogrammi, joka kuvaa kuinka usein tietty tuulennopeus ilmenee. Wei-bull-jakauman käyttö on muodostunut vallitsevaksi menettelytavaksi erityisesti tuulienergiasovellutuksissa.[9, s. 27].



Kuva 9. Weibull-jakauman muoto erällä k:n arvoilla. [11]

Tuuliatlaksessa on annettu Weibull-jakaumasta A- ja k-parametrien arvot suuntasektoreittain. A on niin sanottu skaalaparametri ja se osoittaa tuulen keskinopeuden sijainnin jakaumassa. Muotoparametri k kuvaa jakauman kallistumaa oikealle tai vasemmalle. Suuremmilla k:n arvoilla jakauman muoto on lähellä normaalijakaumaa (kuva 9). Mitä pienempi k:n arvo on, sitä enemmän käyrä on kallistunut vasemmalle. Käytännössä se tarkoittaa, että mitä vähemmän tuulen edessä on esteitä, sitä pienempää on tuulen nopeuden hajonta ja sitä kapeampi on jakauma sekä sitä suurempi on k:n arvo. Tyypillisesti sisämaassa käytetään arvoa $k = 2$, rannikolla $k = 3$ ja saaristossa $k = 4$. [9, s. 28; 22.]

Tuuliatlaksen A ja k parametrit on laskettu tuulen keskinopeuden ja tuulen nopeuden keskihajonnan perusteella [9, s. 28]. Tuulen keskinopeus on $\sim 0,9 \times A$ ja tyypillinen k on ~ 2 Suomessa [10, s. 3].

Tuulivoimalan vuotuinen energiantuotto lasketaan tavallisesti voimalan tuottokäyrää ja voimalan sijoituspaikan Weibull-jakaumaa hyödyntäen.

5 Tuulivoimaloiden ympäristövaikutukset

Tuulivoimarakentamisen merkittävimmät vaikutukset kohdistuvat yleensä maisemaan. Tämän lisäksi ympäristövaikutuksia kohdistuu tapauskohtaisesti myös useisiin muihin tekijöihin kuten esimerkiksi eläimistöön ja kasvistoon sekä kulttuuriperinnön säilymiseen. [23, s. 11.]

5.1 Tuulivoimarakentamisen maisemavaikutukset

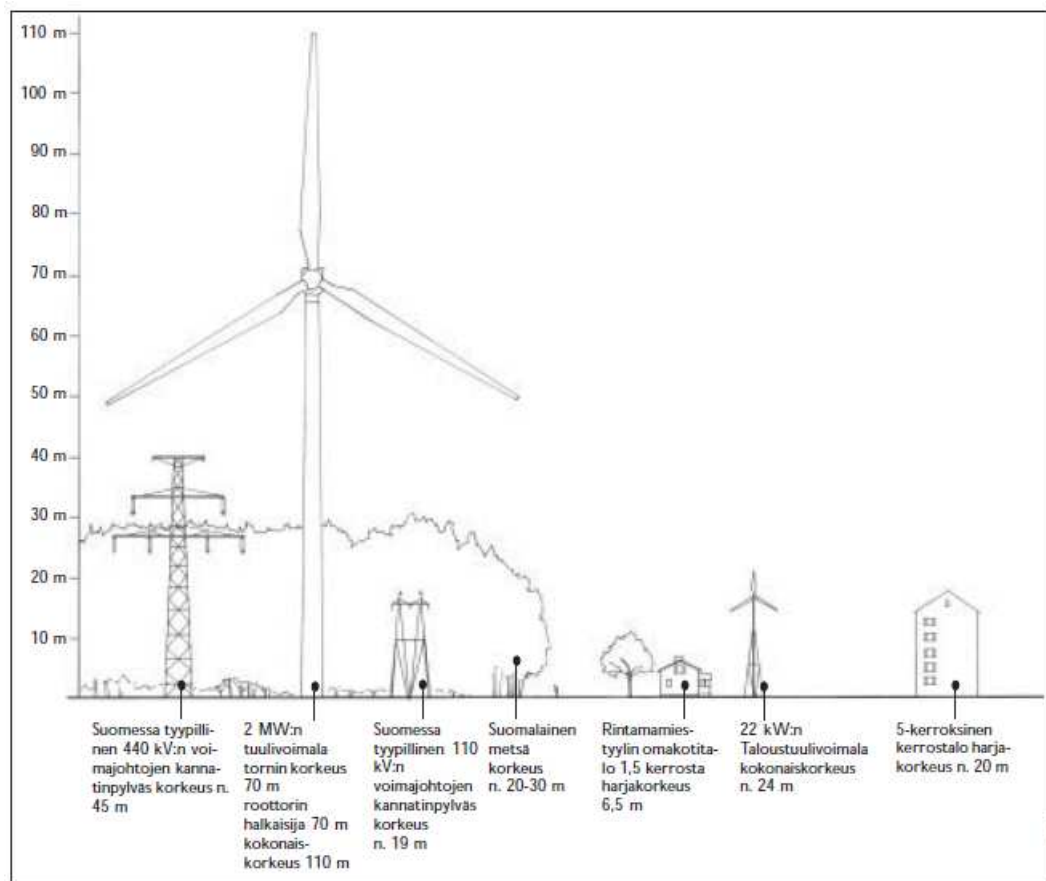
Tuulivoimarakentamisen huomattavimmat ja laajimmalle kantavat vaikutukset kohdistuvat maisemakuvaan. Muut vaikutukset ovat enimmäkseen paikallisia, kuten voimalan käyntiäänet, eläimistövaikutukset sekä mahdolliset talviaikaan putoavan jään vaikutukset. [3, s. 10.]

Tuulivoimalan rakentamiseen ja ylläpitoon tarvittavalla tiestöllä on suora vaikutus lähiseutuun ja sen ohella maisemakuvaan. Yleensä nämä vaikutukset rajautuvat rakennuspaikan lähimaiseman tienoolle. [3, s. 10.]

Ongelmallisiksi maisemavaikutukset muuttuvat tilanteissa, joissa tuulivoimala alkaa hallita maisemakuvaa tai sen huomattavia yksittäisiä elementtejä. Esimerkiksi kulttuurimaiseman ominaispiirteet voivat kadota ja maiseman historiallinen ilmapiiri mitätöityä voimalan rakentamisen ohella. Tällöin maiseman sietokyky on ylittynyt. [3, s. 10.]

Tuulivoimaloista koituvia maisemavaikutuksia ei tule nähdä yksinomaan negatiivisina. Voimalat ovat teknisiä rakennelmia, jotka poikkeavat usein ilmeeltään ja materiaaleiltaan lähistöstään ja aikaansaavat ympärilleen teknistä maisemakuvaa. Harkitusti sijoitettuna ja maisema huomioiden voimalat saattavat tuoda lähiseudulle lisääarvoa. [3, s. 10.]

Kuvassa 10 on tuulivoimaloiden mittakaavavertailua yleisesti maisemassa nähtäviin muihin rakenteisiin.



Kuva 10. Tuulivoimalan mittakaavavertailu. [23, s. 14.]

5.2 Näkökohtia tuulivoimaloiden sijoittamisesta maisemallisesti

Tuulivoimaloiden sijoituspaikoiksi suositellaan alueita jotka jo sisältävät teknisiä laitteita. Mittakaavaltansa huomattavia teknisiä rakennelmia sisältävä ympäristö kestää useimmiten mainiosti tuulivoimaloiden sijoittamisen alueelle. Tällaisia alueita ovat muun muassa satamien, teollisuus- ja voimalaitosten sekä moottori-teiden lähistöt. Myös laskettelukeskusten yhteydessä jäävät tuulivoimaloiden maisemavaikutukset suhteellisen vähäisiksi. [3, s. 15.]

Yleisluonteisesti sopivana tuulivoimaloiden sijoittamisalueena pidetään myös maatalousmaisemaa. [3, s. 18.]

Huonosti tuulivoimaa sietävänä pidetään esimerkiksi rantamaisemaa, jonka kauneutta ja erityisesti luonnontilaisuutta arvostetaan korkealle. Myös merialu-

een avoimella horisontilla on usein vertauskuvallista arvoa. Saariston ja ranta-viivan ilmeelläkin on huomionarvoinen merkitys tuulivoiman sijoittamisen sietokykyyn. [3, s. 16.]

5.3 Vaikutukset linnustoon

Linnut ovat se eläinryhmä johon tuulivoimalasta eniten syntyy vaikutuksia. Vaikutukset jakaantuvat lintujen törmäyksiin tuulivoimaloihin sekä muutoksiin ja häiriöihin linnuston pesimis- ja elinympäristöissä. [23, s. 15.]

Linnut törmäävät lähistöään korkeammalla sijaitseviin rakennelmiin vaihtelevassa määrin. Lintujen riski törmätä sähkölinjoihin, linkkimastoihin tai korkeisiin rakennuksiin on huomattavasti suurempi kuin törmäys tuulivoimalaan. [23, s. 15.]

Tuulivoimalan sijoituspaikka vaikuttaa merkittävästi törmäysriskiin. Muuttoaikana lintujen törmäysriski muuttoreiteillä on muita alueita huomattavampi. Petolinnut saattavat olla törmäysalttiita lajeja, jotka pyydystävät tarkkaamalla maastoa tähystyspisteestä. Linnuille soveltuvat istuskelupaikat tuulivoimaloissa ja mastoissa lisäävät törmäysriskiä erityisesti roottorin pyöriviin lapoihin. [23, s. 15.]

Tuulivoimalan ympäristöä pesimäalueenaan pitävillä linnuille voi myös olla jonkin verran haittaa voimalan rakentamisen aikaansaamasta elinympäristön muutoksesta sekä valmiin voimalan käyntiäänistä. [23, s. 15.]

Vaikutus linnustoon on huomattavampi seuraavilla alueilla ja niiden lähistöllä:

- uhanalaisten kantojen ainoilla pesimispaikoilla
- kosteikkoalueilla, joilla havaitaan epätavallisen runsaita vesi- ja kahlaajalintumääriä
- poikkeuksellisen suuria lintukeskittymiä käsittävillä niityillä ja peltoaukeilla, varsinkin jos alue on uhanalaisen lajin säännöllinen lepäilyalue
- lintuluodoilla ja lintujen ruokailumatalikoilla
- suurten muuttovirtojen keskittymäalueet [23, s. 15.]

5.4 Tuulivoimaloiden äänet

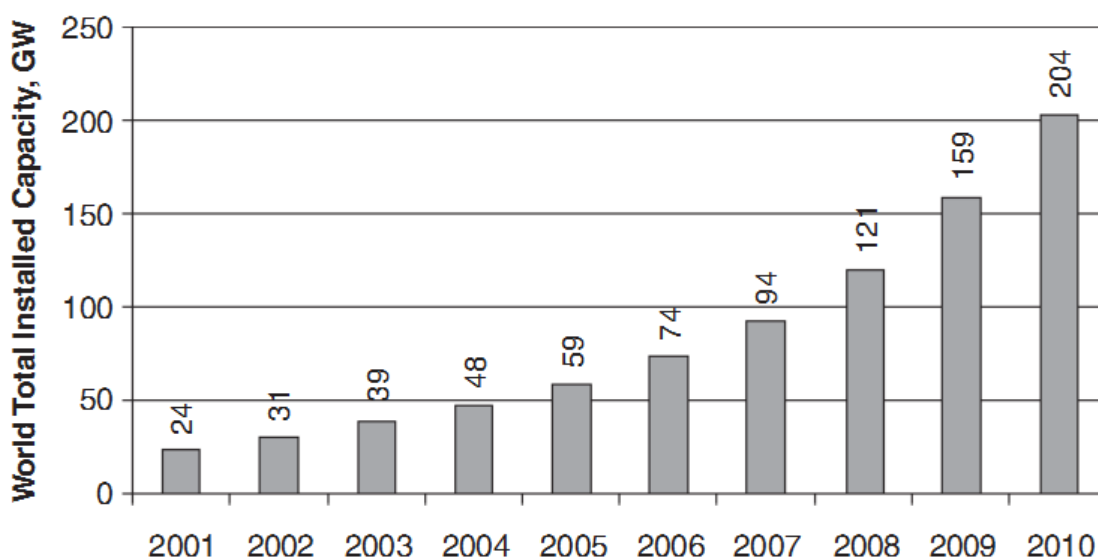
Tuulivoimalan äänet muodostuvat pääasiallisesti sen roottorinlapojen liikkeestä. Roottorin pyörimisestä aiheutuu jaksollinen käyntiääni, jonka taso muuttuu roottorin pyörimisnopeuden vaihdella. Toinen, puuskuttava ääni muodostuu roottorin lavan sivuuttaessa tornin. Tämän äänen voimakkuuteen vaikuttaa lavan ja tornin välinen etäisyys – mitä lähempänä ne käyvät toisiaan, sitä vahvempi on ohitusääni. [24, s. 8.]

Tuulivoimalan koneisto on modernin tekniikan ansiosta entistä hiljaisempi. Generaattori, vaihteisto ja jäähdytysjärjestelmä eivät aikaansaa yhtä hallitsevia ääniä kuin turbiinin käyntiäänet. Ohjeellisesti voidaan todeta megaluokan voimalaitoksen äänenvoimakkuuden olevan 300 metrin etäisyydellä samalla tasolla kuin jääkaapin kompressorin. [24, s. 8.]

Tuulenopeuden yltyessä, voimistuu tuulen aiheuttama taustaääni nopeammin kuin tuulivoimalan aiheuttama käyntiääni. Tuulivoimalan käyntiääni erottuu suurilla tuulenopeuksilla tuulen kohinasta vain laitoksen välittömässä läheisyydessä. [23, s. 16.]

6 Tuulivoimatuotanto

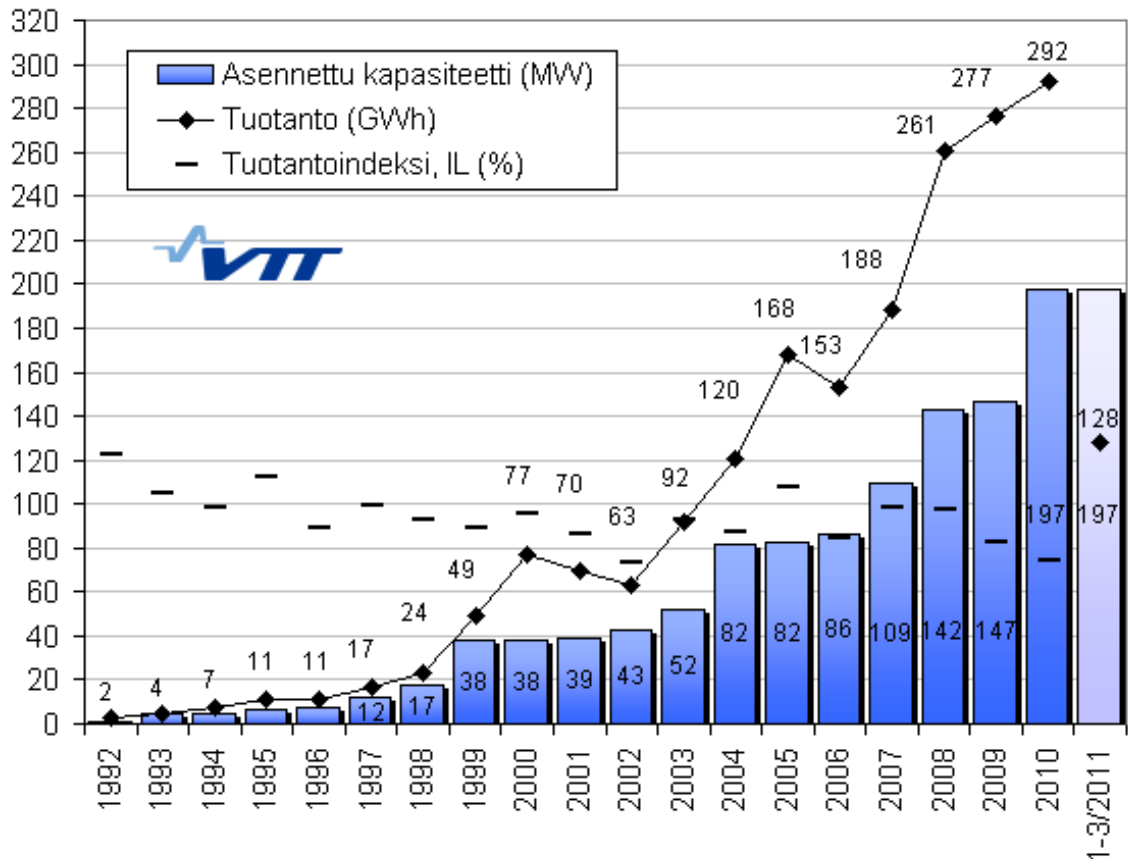
Tuulivoiman tuotantokapasiteetin kehityssuunta on jyrkässä kasvussa sekä Suomessa, että muualla maailmassa [1, s. 2] (kuva 11). Tuulivoima onkin tätä nykyä maailman nopeimmin kasvava uusiutuvan energian tuotantomuoto. [25]



Kuva 11. Tuulivoiman asennettu kokonaiskapasiteetti maailmanlaajuisesti. Vuoden 2010 tiedot on ennuste [1, s. 2].

Suomessa on tuulivoimatuotantoon soveltuvia alueita rannikoilla, merellä ja tuntureilla. Myös sisämaasta löytyy alueita joilla tuulivoimatuotanto on mahdollista. Näillä edellä mainituilla alueilla tuulivoimakapasiteetin merkittävä lisääminen on mahdollista. [26]

Vuoden 2010 lopussa oli Suomessa 130 tuulivoimalaa joiden yhteenlaskettu teho oli 197 MW. Voimalat tuottivat n. 0,3 prosenttia Suomessa kulutetusta sähköstä, kuva 12. [27, s. 10.]



Kuva 12. Asennettu tuulivoimakapasiteetti Suomessa 2010. [28]

Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n lehdistötiedotteen (10.1.2012) mukaan Suomen tuulivoimasähkön tuotanto kasvoi vuonna 2011 noin kolmanneksen vuoteen 2010 verraten. Se tarkoittaa myös sitä, että tuulivoimalla tuotetaan tällä hetkellä noin 0,5 % Suomen vuotuisesta sähkön kulutuksesta. [29]

Uudessa ilmasto- ja energiastategiassa on tavoitteeksi asetettu tuulivoimalla tuotetun sähkön osuuden nostaminen kuuteen terawattituntiin vuoteen 2020 mennessä. Tämä merkitsee tuotantokapasiteetin nostamista noin 2 000 MW:iin kyseisenä ajanjaksona. [26]

7 Tuulivoimaloiden rakennetyyppejä

Rakenteensa mukaan voimalat voidaan jakaa vaaka-akselisiin HAWT (*Horizontal-Axis Wind Turbine*) ja pystyakselisiin VAWT (*Vertical-Axis Wind Turbine*) voimaloihin. [1, s. 72].

7.1 Vaaka-akseliset voimalat

Vaaka-akselisiä 3-lapaisia voimaloita käytetään tyypillisimmin sähköntuotannossa voimaverkkoon ja talouskohtaisessa energiantuotannossa. [30, s. 21.]

Vaaka-akselisen tuulivoimalan turbiini on aina käännettävä tuulta vasten, jotta voimala toimisi. Suuntaus tuuleen tapahtuu käyttämällä pyrstöä, kääntömootoria tai poikittaista kääntöpotkuria joka toimii tuulen tullessa sivusta. [30, s. 7]

Vaaka-akselisista voimaloista eräs harvinaisempi muoto on niin sanottu alatuulivoimala, josta käytetään myös nimikettä takatuulivoimala. Tässä voimalassa turbiinin akseli on likimain vaakatasossa ja turbiini on tuulen tulosuunnasta katsottuna maston takana. Tämän tyyppisessä voimalassa potkuria tuuleen kääntävää suuntauskoneistoa tai peräsintä ei tarvita, sillä lavat käyttäytyvät tuuliviirin tavoin ja suuntaavat voimalan aina tuulta vasten. [30, s. 7]

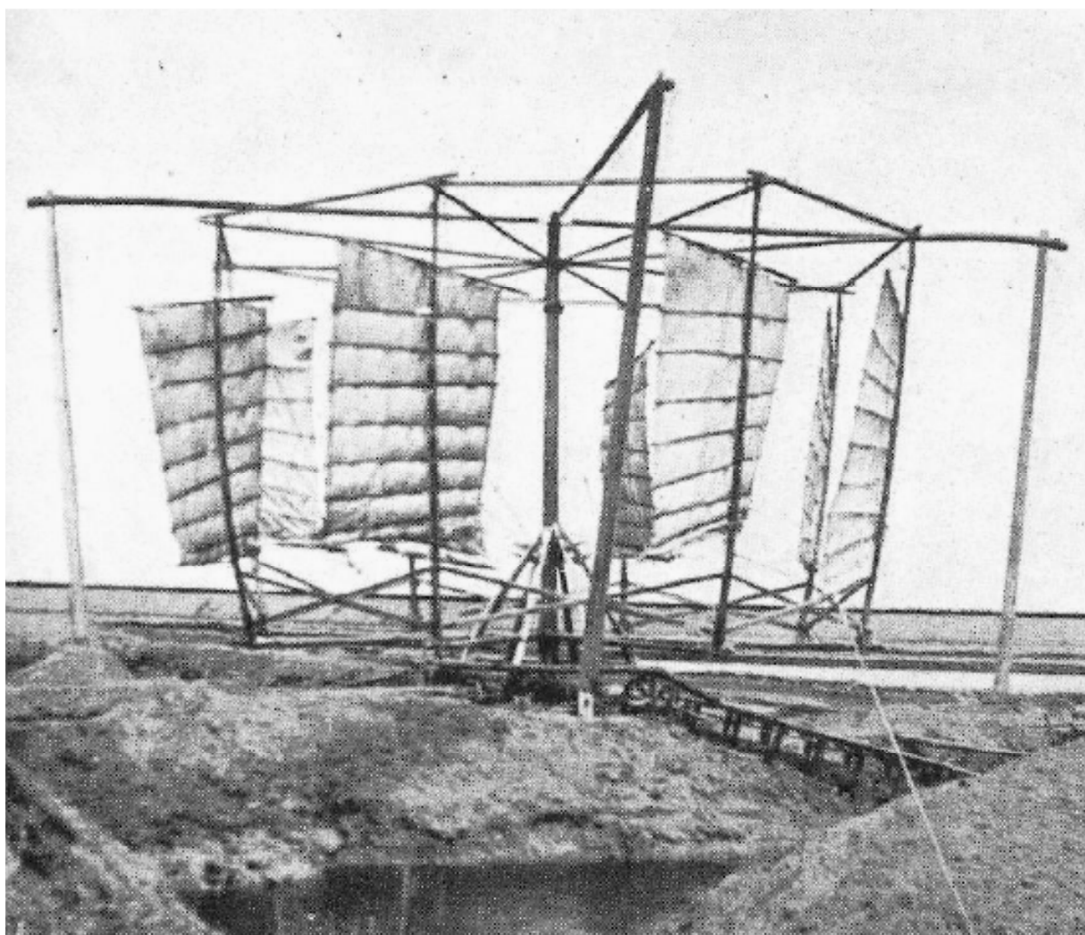
7.2 Pystyakseliset voimalat

Pystyakselisiä voimaloita käytetään yleisesti veden pumppaamiseen, piensähköntuotantoon ja akkujen lataukseen. Myös tuulimittauksissa käytetty kuplianemometri kuuluu tähän kategoriaan. [30, s. 8]

Voimalatyyppien hyviä puolia vaaka-akseliseen verraten on se, etteivät ne vaadi myrskysuojausta ja sähköä tuottava koneisto voidaan sijoittaa alas, jolloin voimalan huoltotyöt helpottuvat.

Pystyakseliset voimalat toimivat kaikilla tuulen suunnilla sekä turbulenttisilla tuu-
lilla, eivätkä ne tarvitse minkäänlaista tuuleensuuntausmekanismia. Ne myös
käynnistyvät pienillä tuulennopeuksilla ja antavat hyvän vääntömomentin.

Varhaisimmat tuulimyllyt ovat ehkä olleet juuri pystyakselisia rakenteita sovellet-
tuna veden pumppaukseen tai viljan jauhantaan. Kuvan 13 mukaiset, pyörivältä
pyykinkuivaustelineeltä näyttävät, varhaista halpatuotantoa olevat tuuli-
vesipumppu-konstruktiot lienevät olleet yleisiä. Uudenmallisista pystyakselisista
voimaloista löytyy runsaasti kuvia alan kirjallisuudesta ja tietoverkoista hakemal-
la.



Kuva 13. Vanha kiinalainen tuuli-vesipumppu. [31, s. 2]. Ei enää tuotannossa.

8 Ohjeita tuulivoimalan suunnitteluun

Tuulivoimalan suunnitteluun on tuotettu ohjeistot voimalan sijoituspaikalla vallitsevien ilmastollisten olosuhteiden huomioon ottamiseksi. Ohjeistoista mainittakoon. [32]

- EN 61400-1:Wind Turbine Safety and Design
- EN 61400-1 ed. 3:2005: Wind turbines. Design requirements.
- EN 61400-2:2006: Wind turbines. Design requirements for small wind turbines.
- EN 61400-3:2009. Wind turbines. Design requirements for offshore wind turbines.

Mitoittavia ilmatieteellisiä vakiosuureita olosuhteiden perusluokituksessa ovat tuulen nopeus, tuulennopeuden jakauma, tuulen vertikaaliprofiili, turbulenssin intensiteetti, tuulensuunnan muutosnopeudet ja toiminnan aikainen tuulen puuskaisuus. Muita huomioonotettavia seikkoja ovat ilman tiheys, ilman lämpötila, ilman kosteus, auringon säteily, sade, lumi, rakeet, jää, kemialliset vaikutukset, mekaanisesti aktiiviset partikkelit ilmassa, salamointi ja maanjäristykset. [32]

Yleensä tuulivoimalan toimintalämpötila on -20 - 40 °C. Tavallisesti voimalan tuotto arvioidaan käyttämällä ilman lämpötilaa 15 °C vastaavaa ilman tiheyttä tehokaskennassa. [32]

Mahdollinen ajoittainen lapojen jäätyminen täytyy ottaa huomioon kaikkialla Suomessa. Voimalan rakenteisiin kerääntyy jäätä varsinkin tuntureilla, jossa alijäähtyneiden pisaroiden muodostama jäätyminen on erityisen tuntuva. Sama jäätymisongelma on tämän tästä myös eteläisellä rannikolla yli 150 - 200 m korkeudella merenpinnasta. [32]

9 Tuuliturbiinin teho ja energia

9.1 Tuulen liike-energia

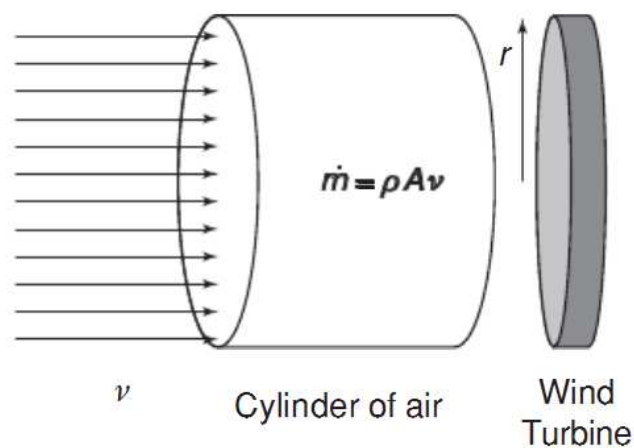
Tuulen liike-energia eli kineettinen energia e , voidaan laskea yhtälöstä:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1)$$

jossa m on ilman massa (kg) ja v tuulen nopeus (m/s). [1, s. 9.]

9.2 Tuulen teho

Roottorin pyyhkäisyypinnan läpi kulkevan tuulen teho voidaan johtaa vaakakselisessä turbiinissa (HAWT) kuvan 14 mukaan seuraavasti: [1, s. 10]



Kuva 14. Ilmasylinteri roottorin edessä. [1, s. 10.]

Turbiinin läpi virtaava massa \dot{m} sekunnissa on:

$$\dot{m} = \rho Av \quad (2)$$

Energia sekunnissa \dot{E} on silloin:

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m}v^2 = \frac{1}{2} \rho A v v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3)$$

Koska energia sekunnissa \dot{E} on teho P , ja A on turbiinin pyyhkäisyypinta-ala, saadaan tuulen tehoksi P_{wind} , silloin:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v_{wind}^3 \quad (4)$$

jossa: ρ on ilman tiheys, r roottorin säde ja v_{wind} tuulen nopeus. Tuulivoimalaskennassa käytetään normaalipaineisen, 15 °C:n ilman tiheyttä 1,225 kg/m³. [1, s. 10. ja 39.]

9.3 Turbiinin teho

Vuonna 1919 Albert Betz osoitti, että turbiinin roottori ei kykene muuttamaan kuin 59,3 % roottorin läpi kulkevan ilmamassan kineettisestä energiasta mekaaniseksi energiaksi. Tätä kutsutaan Betzin rajaksi ja roottorin tehokertoimeksi C_p . Teoreettinen maksimi tälle kertoimelle C_p on 16/27 eli noin 0,593. [1, s. 19.] Turbiinin teho saadaan silloin laskettua seuraavasta kaavasta:

$$P_{turb} = C_p P_{wind} \quad (5)$$

Joskus C_p luku ilmoitetaan generaattorin navoista mitattuna sähköisen tehon suhteena tuulen tehoon. Tällöin häviöt tuulivoimalan laakereissa, vaihteistossa ja generaattorissa huonontavat kerrointa niin, että kolmilapaisissa roottoreissa kokonaishyötysuhde on noin 50 %. [1, s. 20 - 21.]

9.4 Tuulivoimalan energian tuotto

Tuulivoimalan vuotuinen energiatuotto saadaan usein suoraan tuulimittausdatan analysointiohjelmista. Usein näissä tapauksissa ohjelman ylläpitäjä antaa oh-

jelmaan laskennassa tarvittavat tuulivoimaloiden tehokäyrät ja muut tarvittavat arvot.

Tuulivoima-alalla tunnetulla tanskalaisella WAsP-ohjelmalla (Wind Atlas Analysis and Application Program) voidaan analysoida Suomen Tuuliatlaksesta saatavaa tuulidataa ja laskea tuulivoimaloiden tuottoja.

Pitkäaikaisista tuulennopeusmittauksista muodostettua Weibull-jakaumaa ja tuulivoimalan tehokäyrää hyväksikäyttäen, voidaan myös taulukkolaskentaohjelmalla laskea voimalasta saatava vuosienenergia.

Taulukkoon lasketaan voimalan vuotuinen energiantuotto kutakin tuulennopeutta vastaavan antotehon ja tuulen vuotuisen vallinta-ajan tulona. Voimalan vuotuinen energiantuotto saadaan, kun taulukkoon lasketut osaenergiat summaataan.

Esimerkinä energian tuottolaskenta tuulennopeudelle 7 m/s:

Tuulen keskinopeus:	7 m/s
10 kW:n voimalan tehokäyrän mukainen antoteho P_{out7} :	5.2 kW
Tuulen vallinta-aika vuodessa 7 m/s tuulella t_7 :	536,99 h/a

$$E_7 = P_{out7} * t_7 = 5,2 \text{ kW} * 536,99 \text{ h/a} = 2792,34 \text{ kWh/a}$$

Esimerkkilaskennassa käytetyn voimalan tehokäyrä on kuvassa 26 sivulla 46.

10 Tutustumiskäynti pientuulivoimalalle

Tutustumiskohteena ollut voimala sijaitsee Kontiolahdessa Pielisjoen rantamaisemissa Kotalahdessa (kuva 15). Voimalan käyttötarkoituksena on akkujen lataus tai vain lämmityskäyttö.



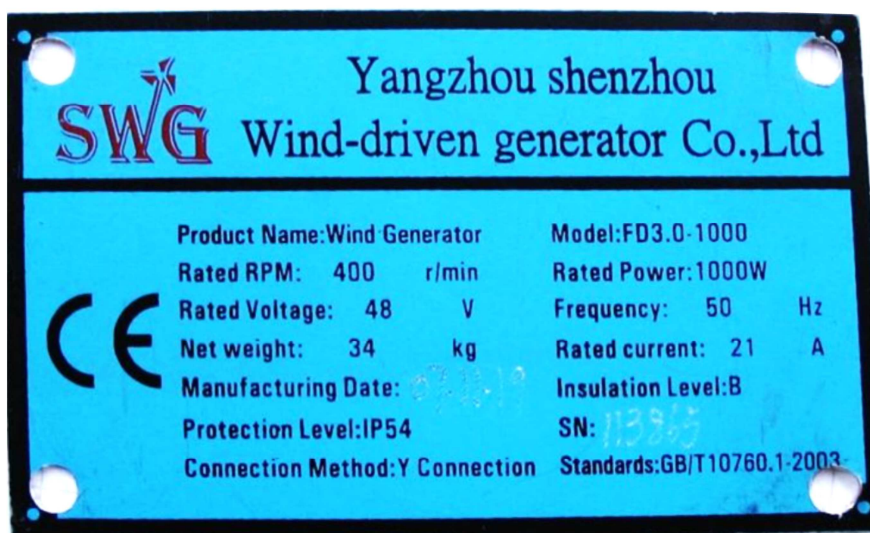
Kuva 15. Pientuulivoimala Kotalahdessa Pielisjoen rantamaisemassa.

Voimalan sijoituspaikka ei ole tuuliatlaksen mukaan kovinkaan tuulinen, minkä käyttäjä on myös itsekin todennut. Voimalan testaukset ovat kesken – se ei siis ole vielä tuotantokäytössä. Voimalaa haitanneen yhden ongelman voi jo nähdä kuvastakin – liian lyhyt masto. Turbiini kokonaisuudessaan jää puiden latvojen alapuolelle jossa ilmvirtaukset ovat erittäin turbulenttisia. Vaaka-akselinen pot-

kuriturbiini vaatii toimiakseen laminaarisen tuulivirtauksen, sillä voimalan kääntömekanismi (pyrstö) ei ehdi aina kääntää turbiinia tarpeeksi nopeasti pyörteistä tuulta vasten. Roottorin halkaisija on noin 3 m ja napakorkeus n. 9 m.

Puiden ympäröimällä sijoituspaikalla tuulet ovat aina turbulenttisia. Sellaisessa ympäristössä parhaiten toimisi pysty akselinen turbiini joka ottaa tuulen vastaan kaikista suunnista.

Voimala on nimellisteholtaan 1 kW ja se antaa 48 V:n ja 50 Hz:n vaihtojännitteen. Kuvassa 16 on po. voimalan generaattorin arvokilpi.



Kuva 16. Edellä esitetyn pientuulivoimalan generaattorin arvokilpi.

Voimalan omistajan mietteitä hankkeesta:

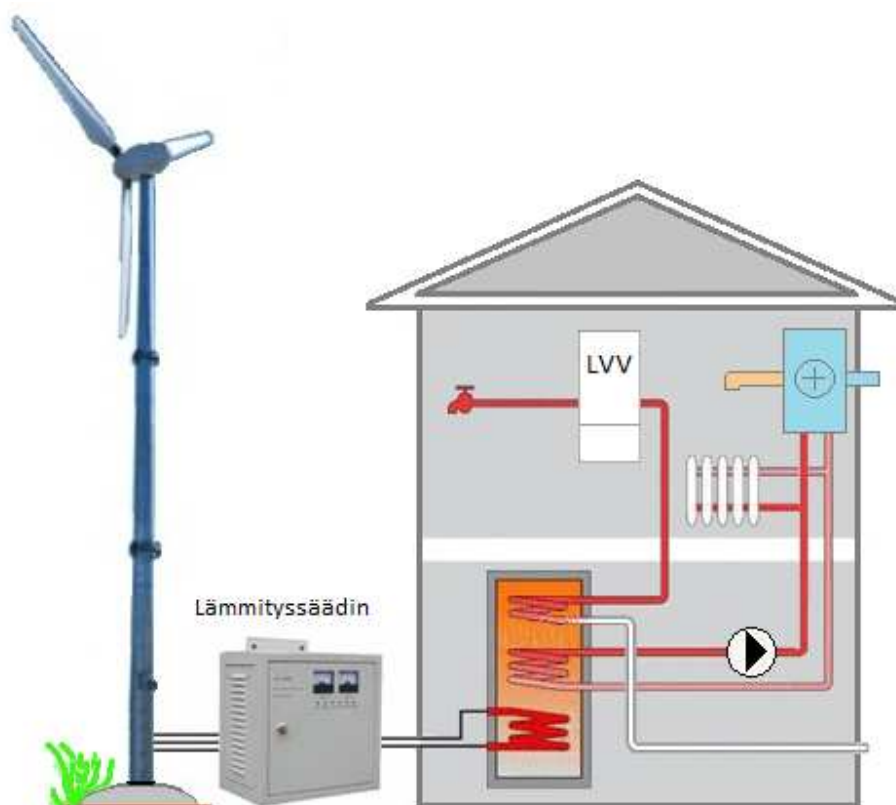
- Voimalan hankintaperusteena on ollut sähkön hinnannousu sekä kokeilunhalu ja kiinnostus tuulivoimaa kohtaan.
- Positiivisena kokemuksena on ollut tuulivoimalan edullinen hankintahinta itseasennettuna (n. 1000 €) ja huoltovapaus - Laakerit ovat ainoa huoltoon vaativa osa.
- Pettymyksenä on ollut voimalan hankinnan mukana tulleen maston liian lyhyt mitta, josta johtuen tuulivoimala ei ole toimintakykyinen, ennen kuin mastoa jatketaan.

11 Terttulanvaaran tuulivoimala

11.1 Voimalan käyttötarkoitus

Terttulanvaaran tuulivoimalan käyttötarkoituksena tulee olemaan kokoontumistilojen lämmitysenergian tuottaminen siten, että voimala syöttää kaiken sähkötehonsa kokoontumistilojen ilmanvaihtohuoneeseen sijoitettuun vesivaraajaan.

Kuvassa 17 on periaatteellinen kuvaus tavoitellusta lämmitysjärjestelmästä. Lämmön siirtämiseksi kokoustiloihin on ajateltu käytettäväksi tuloilmakanavaan sijoitettavaa lämmönvaihdinta, jolla lämpö siirretään suoraan tuloilmaan. Tällä ratkaisulla päästään pienimpään muutostarpeeseen kokoustilojen osalta kun tiloihin tulisivat ainoastaan lämmitystä ohjaavat lämpötila-anturit. Järjestelmään voi myös liittää pienin lisäyksin ja muutoksin lämpimän käyttöveden esilämmityksen sekä lämpöpattereita.



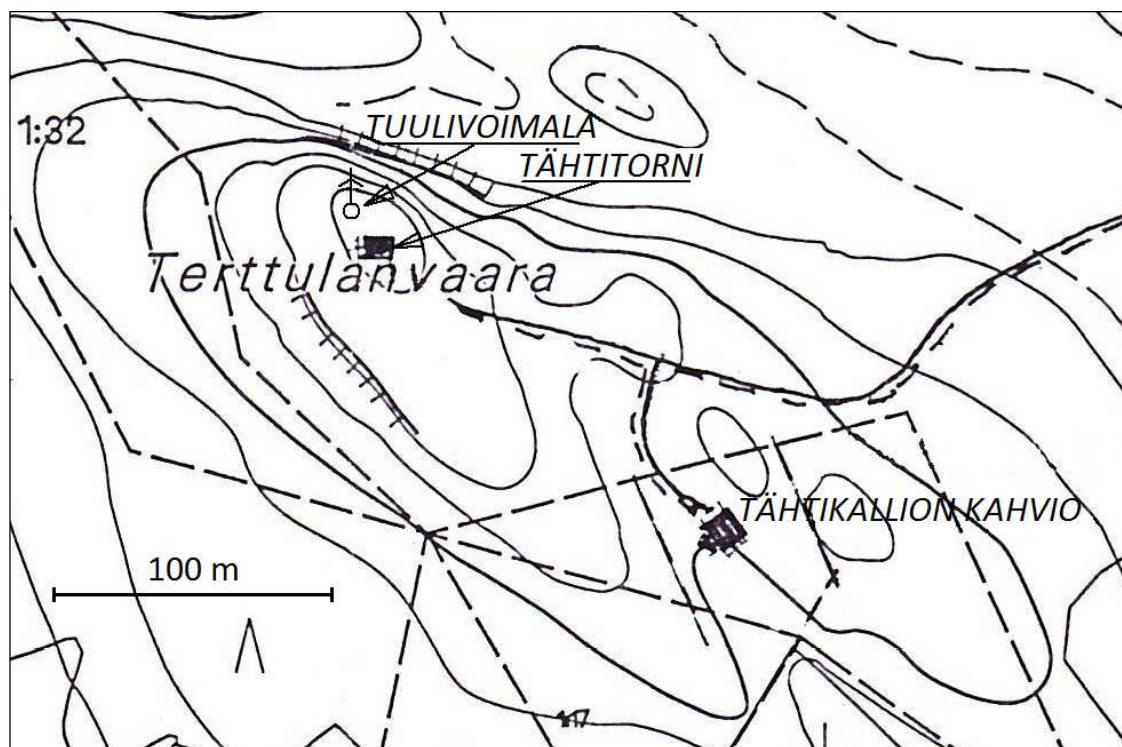
Kuva 17. Periaatteellinen kytkentäkuva tuulivoimalan liittämiseksi varaavaan sähkölämmitysjärjestelmään.

Kokoontumistilojen (kahvio) nykyinen lämmitysjärjestelmä koostuu suorasähkölämmityspattereista, katossa olevista säteilylämmityselementeistä, ilmalämpöpumpusta ja sähkölämmityskaapelein toteutetuista sauna-/pesutilojen lattia-
lämmityksestä sekä luonnonkivistä muuratusta tulisijasta. Tilojen lämmitys on siis lähes yksinomaan ns. suorasähkölämmitystä.

11.2 Voimalan paikan valinta

Voimalan sijainti on ensiarvoisen tärkeä tieto, koska tuulimittaus ja tuulivarojen arviointi tulisi tehdä nimenomaan voimalan sijoituspaikalla ja mittaus tunnetusti on pitkäaikainen toimenpide.

Kuvassa 18 on nähtävissä tuulivoimalan oletettu tuleva sijaintipaikka sekä Tähtikallion kahvio, jonka lämmityssähkö voimalalla tuotetaan. Paikka on tuulivoimalalle ihanteellinen sen korkeuden ja avoimuuden johdosta juuri niihin ilmansuuntiin, joista tuuli yleisimmin tulee. Myös tuulimittaukset on suoritettu tällä paikalla.



Kuva 18. Tuulivoimalan suunniteltu sijoituspaikka. Myös tuulimittaukset on tehty kyseessä olevalla paikalla.

11.3 Voimalan tuotannon siirto käyttöpaikkaan

Voimalan tuottama sähkö siirretään kahviolle kahvion entistä liittymiskaapelia hyväksikäyttäen. Kaapeli on jätetty aikanaan varalle maahan kun kahvion sähköntarpeen kasvaessa on liittymisjohtoa jouduttu suurentamaan. Entinen liittymä on ollut kooltaan 3 x 25 A, joten kaapeli riittää mainiosti voimalan tuotannon siirtoon. Tämä maakaapelin olemassaolo hankkeen kannalta on suuri etu, koska voimalan ja kahvion välinen matka on lähes 200 m.

11.4 Tuulimittaukset Terttulanvaaralla

Alkuun kiireisimpiä toimenpiteitä oli voimalan sijoituspaikan selvittäminen, jotta tuulimittaukset kyseisellä paikalla saataisiin mahdollisimman nopeasti käyntiin. Työn onnistumisen kannalta oli ensiarvoisen tärkeä saada tuulimittausdataa mahdollisimman pitkältä ajalta. Opinnäytetyötä ajatellen ei kuitenkaan ollut mahdollista pitää tuulimittausta yllä useaa vuotta, vaikka se olisi hyvinkin tarpeellista.

Tuulimittausten toteuttamiseksi oli aivan ensiksi hankittava tuulimittari ja mittausmasto. Kohtuuhintainen ja nimenomaan tuulivoimatarkoitukseen suunniteltu mittalaite löytyikin markkinoilta, kuva 19.

Mastot olivat kuitenkin niin kalliita, että päätin rakentaa sen itse, etenkin kun suuri osa siihen tarvittavasta materiaalista löytyi omasta takaa.



Kuva 39. Opinnäytetyön tuulimittauksissa käytetty Power Predictor tuulimittauslaite [19].

Maston rakentaminen alkoi jo elokuussa 2010 ja ensimmäinen koepystytys jo syyskuun alussa omalla pihalla. Noston helpottamiseksi lisäsin myöhemmin mastoon vielä ns. apumaston vipuvoimaa lisäämään, jolloin 13 m korkean maston noston voi suorittaa aivan yksinkin.

Maston pystytys Terttulanvaaralle (kuva 20) suoritettiin kuitenkin kylän miesten kanssa porukalla lokakuussa 2010 ja niin alkoi mittari laskea kuppiturbiinin antamia pulsseja muistikortille.



Kuva 204. Pystytysporukka ja Terttulanvaaralle juuri pystytetty 13 metrinen tuulimittausmasto.

Tuulimittaukset Terttulanvaaralla osoittautuivat kuitenkin uskomattoman haasteellisiksi. Noin kuukauden kuluttua oli yksi harusköysistä irronnut ja masto kaatunut. Syy irtoamiseen ei selvinnyt, koska kaikki haruksen osat olivat aivan ehjät. Mittalaite ja masto sen sijaan kärsivät sen verran vahinkoa, että ne olivat tuotava kotiin kunnostettavaksi. Mittalaitteiden uudelleen asennus oli kuitenkin jätettävä siltä talvelta opiskelukiireiden vuoksi kevääseen.

Keväällä 2011 kunnostin maston ja mittalaitteen käyttökuntoon. Uusi takaisku kohtasi tuulimittauksia heti kun menin mittalaitteeni pystyttämään mastoa. Joku oli kiskonut maasta irti kahdet harusankkurit ja vienyt ne köysineen ja muine varusteineen mennessään. Maston pystytys viivästyi, sillä oli hankittava uudet ankkurit ja köydet. Sain tuulimittauksen viimeinkin kesäkuun alussa 2011 toimintatilaan.

Syyskuun alussa tuli seuraava takaisku. Mittalaitteen paristo, jonka pitäisi kestää puolivuotta, olikin tyhjä. Ajattelin, että paristo oli kai jotenkin heikko yksilö ja vaihdoin se ”laadukkaampaan” paristoon. Myös apumaston köysi oli katkaistu jollakin teräesineellä. Tämä ei onneksi vaikuta maston pystytukevuuteen, mutta tuo ongelmia siinä vaiheessa kun mastoa aikanaan puretaan pois.

Lokakuussa oli taas seuraavien ongelmien vuoro astua esiin. Silloin huomasin tarkistuskäynnillä, että mittaus ei toimi ja lukemia ei tule tallennuslaitteelle vaikka turbiini pyörii. Ajattelin sen johtuvan alastulojohdon liittimiin joutuneesta vedestä, koska vettä oli satanut useita päiviä peräjälkeen. Mittalaitteessa oleva auringonvaloanturi kuitenkin toimi, joten itse tallennuslaite oli kunnossa.

Lähes kaikilla tarkistuskäynneillä otin mittalaitteen keräämän mittausdatan tallenteen tietokoneelle. Siitä saattoi heti tarkistaa oliko mitään pulsseja muistikortille tallentunut. Aina oli, mutta tuuli datassa oli pitkiä ”nolla”-rivejä, joista saattoi päätellä, ettei mittaus ollut onnistunut toivotulla tavalla.

Ongelmat eivät suinkaan loppuneet vielä tähän. Pakkasten tullessa ja kuivatesa ilman, mittaus toimi taas moitteetta jonkin aikaa, kunnes märkä lumi pysäytti turbiinin jäätäessään sen. Ajattelin sen olevan vain tilapäistä, niin kuin olikin. Tuulitiedoksi tuli kuitenkin pelkkä nollarivi siltä ajalta.

Parin viikon kuluttua oli sitten taas uusien ongelmien vuoro esittäytyä. Laadukas paristo ei osoittautunutkaan hintansa arvoiseksi, ja mittarin valmistajan lupaama puolen vuoden toiminta-aika jäi neljään kuukauteen. Olin kuitenkin saanut mittausdataa noin puolen vuoden ajalta ja ajattelin sen riittävän keskimääräisten tuulien laskemiseen mittausdatan analysointiohjelmalla.

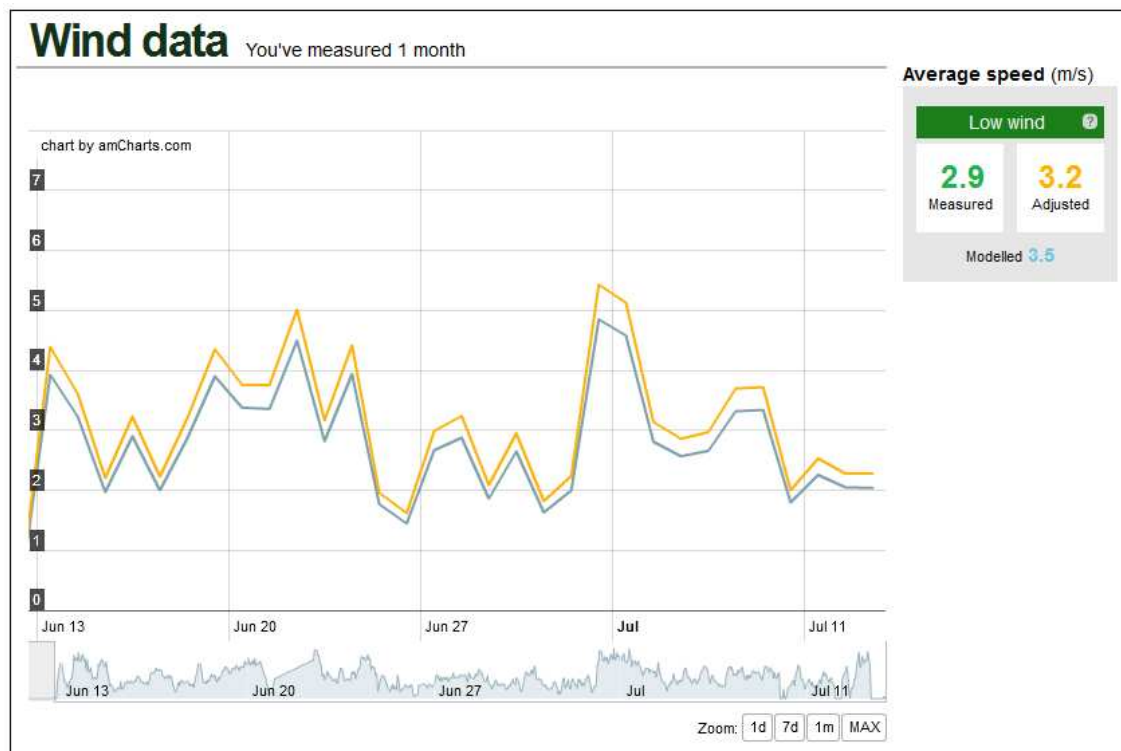
11.5 Tuulidatan analyysi ja tuulivarat

Tuulimittausten kesto tulisi olla mielellään vähintään yksi vuosi jotta saataisiin koko vuoden tuuliolot kattava mittausaineisto Weibull-jakauman laskemiseksi.

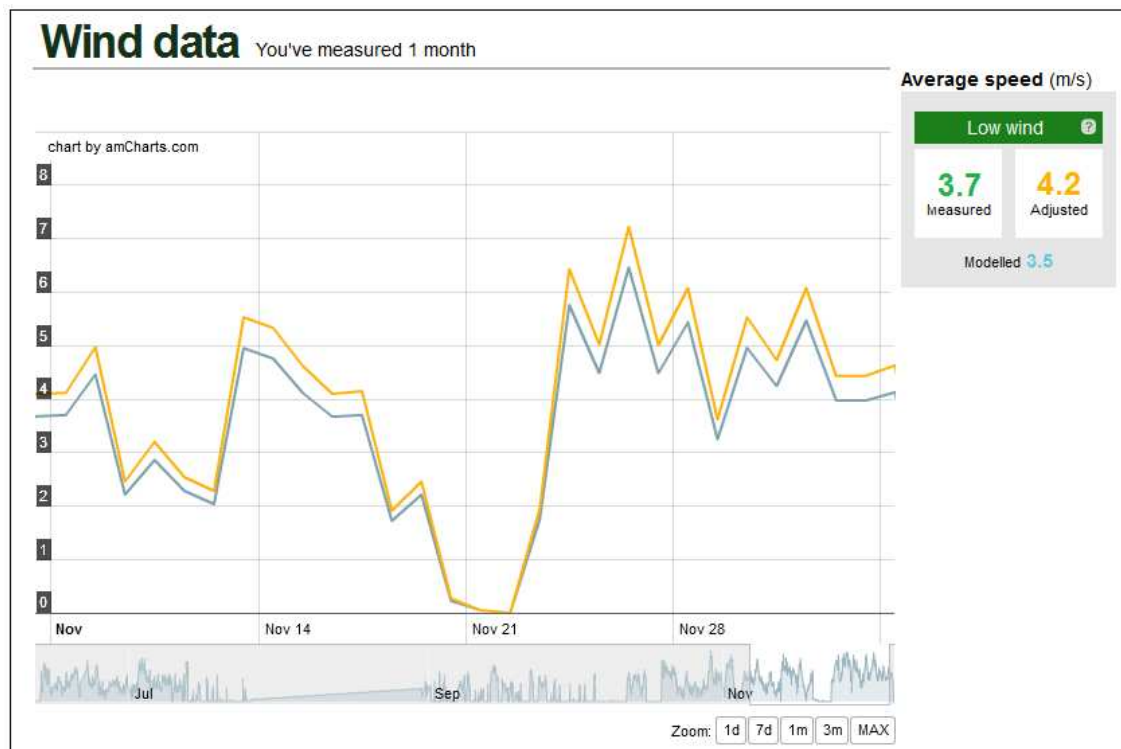
Koska mittausdatasta ei saatu ehjää ja yhtenäistä vuoden mittausjaksoa, katsoin parhaimmaksi etsiä mittausdatasta ehjiä mittausjaksoja ja suhteuttaa niitä Tuuliatlaksesta saatavaan, saman paikan ja saman ajanjakson pitkäaikaiseen keskituulennopeuteen 50 m:n korkeudessa.

Mittaustulokset:

Kuvassa 21 ja 22 on kesä – heinäkuun ja marraskuun 2011 tuulimittausdatasta analysointiohjelmalla lasketut tuulidiagrammit. Alempi kuvaaja on tuulen keskinopeus 13 m:n korkeudelta ja ylempi kuvaaja laskennallinen keskinopeus 20 m:n korkeudelta.



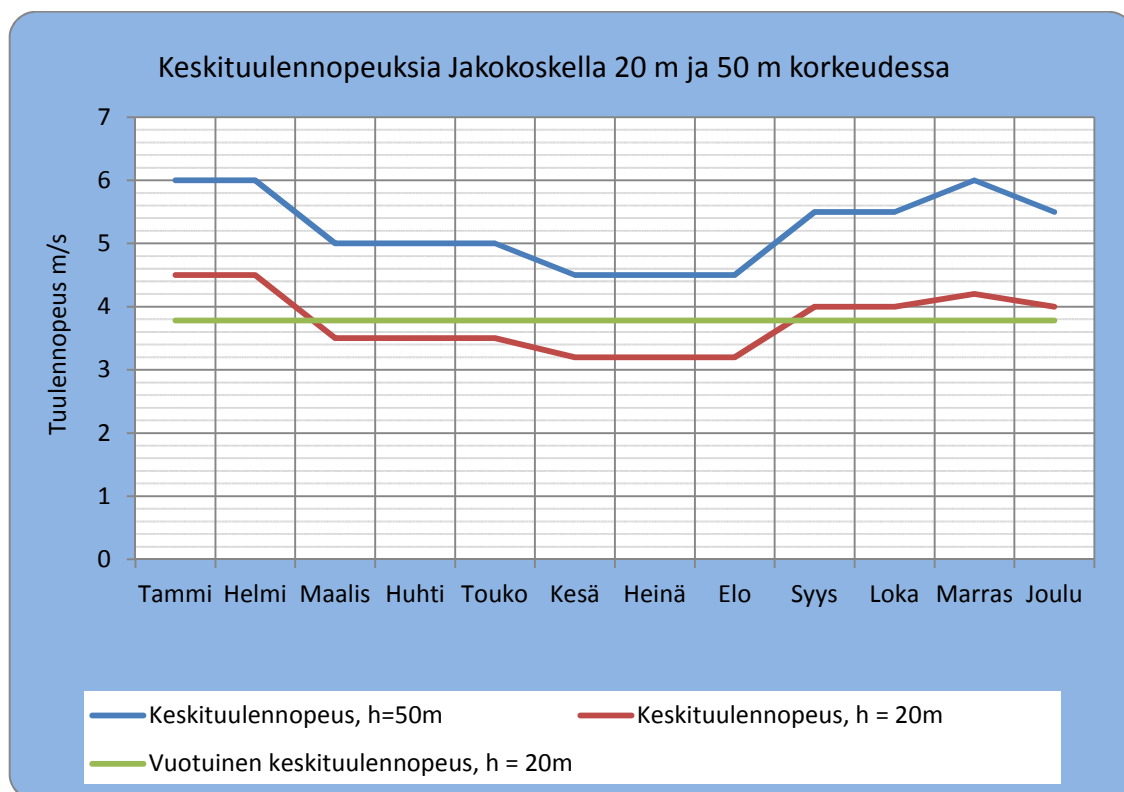
Kuva 21. Kesäkuun tuulennopeuskuvaajat Terttulanvaaralta v. 2011.



Kuva 22. Marraskuun tuulenopeuskuvaajat Terttulanvaaralta v. 2011.

Edellisissä diagrammeissa esitetyt kuukausittaiset keskimääräiset tuulenopeusarvot 20 m:n korkeudessa siirsin Tuuliatlaksen tuulidatasta samalta paikakunnalta muodostettuun tuulidiagrammiin. Kuukaudet, joista en saanut ehjää tuulidataa ja siten oikeansuuntaista keskituulenopeuslukemaa, suhteutin Tuuliatlaksesta saataviin pitkäaikaisiin keskituulenopeuksiin 50 m:n korkeudessa. Näin muodostui koko vuoden kattava, mittauspaikan kuukausittaisia keskimääräisiä tuulenopeuksia 20 m:n korkeudessa kuvaava diagrammi. Kuva 23.

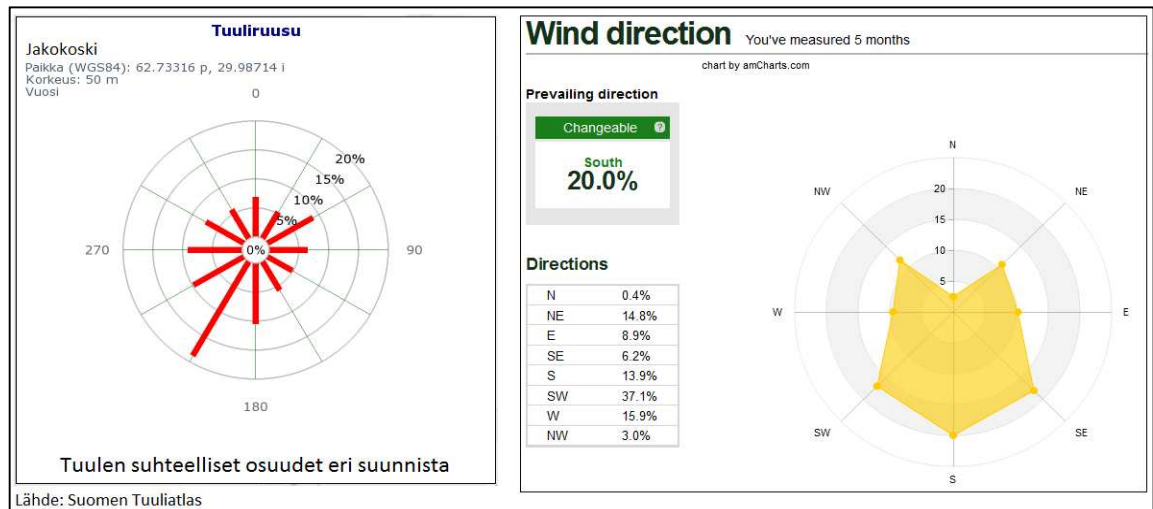
Diagrammista oli nyt luettavissa mittauspaikan vuotuinen keskimääräinen tuulenopeus 3,78 m/s, joka tarvitaan muodostettaessa tuulenopeuksien toistuvuutta kuvaava Weibull-jakauma.



Kuva 23. Kuukausittaisia keskituulennopeuksia 20 m:n ja 50 m:n [17] korkeudessa Jakokoskella v. 2011 sekä vuotuinen keskimääräinen tuulennopeus 3,78 m/s.

Tuulen suuntadiagrammi mittauspaikassa

Tuulidatan analysointiohjelma laski myös mittauspaikalle tulevien tuulien suhteelliset osuudet eri ilmansuuntasektoreista. Tätä diagrammia kutsutaan tuuliruusuksi. Jotakuinkin samansuuntaiset, paikkakunta-kohtaiset tuulensuuntatulokset sain myös Tuuliatlaksesta. Tässä työssä ei kuitenkaan tarvita suuntatietoja muuten kuin toteamalla, että voimalan sijainnin huomioon ottaen runsaimmat tuulet tulevat juuri avoimimmista suunnista, joka on tietenkin hyvä asia. Kuvassa 24 on molemmat tuuliruusut vertailtavissa.



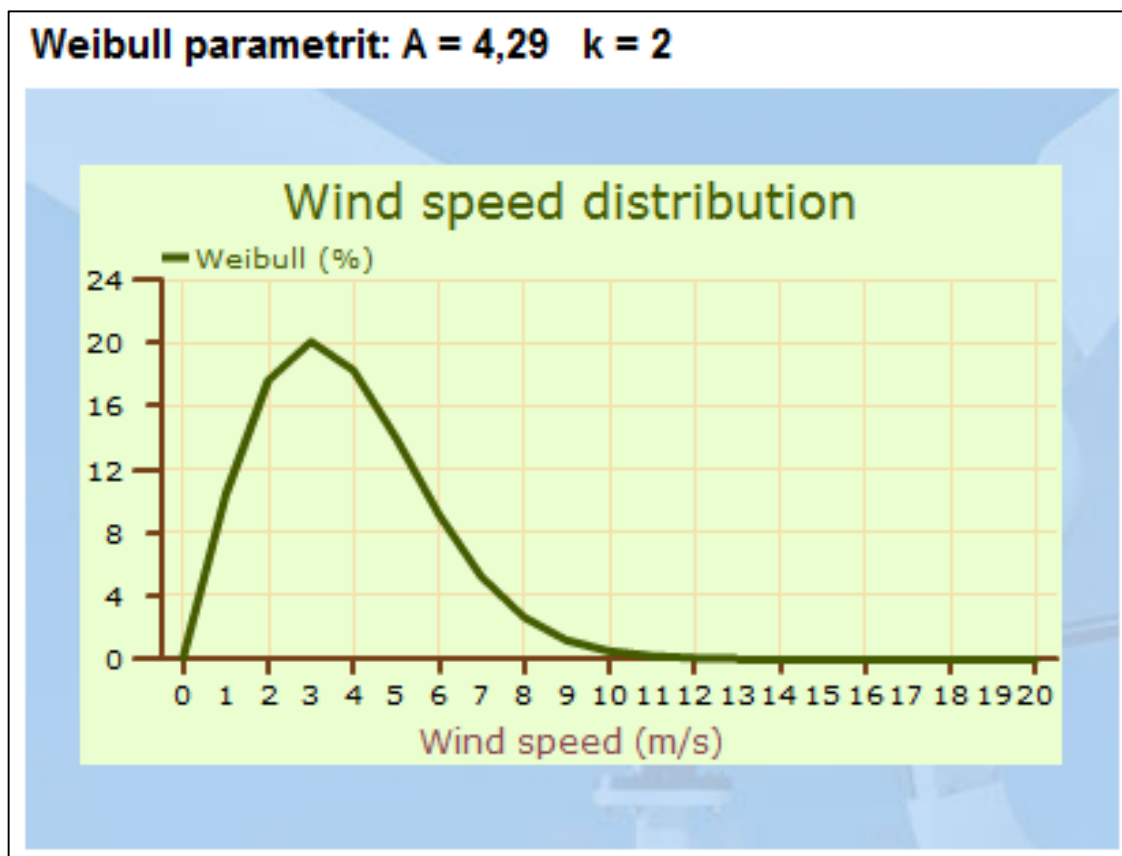
Kuva 24. Jakokosken [17] ja mittauspaikan tuuliruusu.

Weibull-jakauman muodostaminen

Weibull-jakaumalla kuvataan jatkuvaa eri tuulennopeuksien toistuvuutta (frekvenssiä) mittauspaikassa. Jakauman parametrit saadaan seuraavalla tavalla: $k = 2$, joka saadaan Tuuliatlaksesta. Tämä on ns. muotoparametri ja se kuvastaa jakauman leveyttä sekä kallistumaa. Käytännössä se tarkoittaa, että mitä vähemmän tuulen edessä on esteitä, sitä pienempää on tuulen nopeuden hajonta ja sitä kapeampi on jakauma sekä sitä suurempi on k :n arvo.

A on ns. skaalaparametri ja se kuvastaa tuulen pitkäaikaista keskinopeutta sekä osoittaa tuulen keskinopeuden sijainnin jakaumassa. A parametri saadaan pitkäaikaisten tuulimittausten tuulikeskinopeudesta. Tuulen keskinopeus on $\approx 0,9 \times A$.

Kuvan 25 Weibull-jakauma Terttulanvaaran tuulioloista on laskettu tuulivoimalan energian tuoton arviointiin tarkoitetulla web-ohjelmalla. Myös kuva on tulostettu ohjelmasta. [22]



Kuva 25. Web-ohjelmalla laskettu Weibull-jakauma Terttulanvaaran tuulioloista.

Terttulanvaaran tuulivarat

Web-ohjelma antoi kuvan 25 Weibull-jakaumalle tarkat frekvenssiarvot prosentteina tuulennopeuden eri arvoille 1 m/s välein. Frekvenssiarvot on taulukoitu taulukkoon 2. Frekvenssiarvot voi laskea myös 0,5 m:n välein. Silloin arvot ovat tietenkin puolta pienemmät ja laskenta tuplasti työläämpi.

Taulukossa 2 on laskettuna tuulennopeuden ja sen toistuvuuden (frekvenssin) mukaiset vuotuiset tuulennopeuden vallinta-aika (h) ja energia neliometriä kohden (kWh/m^2) sekä kulloistakin tuulennopeutta vastaava tuulen teho pinta-alayksikköä kohden.

Taulukosta saadaan laskettua Terttulanvaaran tuulivarat, summaamalla tuulen vuotuisen energiasarakkeen osaenergiat. Näin vuotuisiksi tuulivaroiksi neliometriä kohden muodostuu n. 648 kWh.

Esimerkkilaskenta taulukon 2 tuulennopeusriville 1 m/s:

Tuulennopeuden vallinta-aika (h), kun vuoden tuntien määrä on 8760 h :

$$Vallinta - aika = \frac{9,42}{100} * 8760 h = 825,19 h$$

Tuulen teho 1 m²:n alalla, käytetään kaavaa 3 s. 29.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v_{wind}^3$$

$$P_{wind} = \frac{1}{2} * 1,225 \frac{kg}{m^3} * 1m^2 * 1^3 \frac{m^3}{s^3} = 0,61W$$

Tuulen vuotuinen energia 1 m²:n alalla saadaan kun tuulen teho kerrotaan tuulen vallinta-ajalla.

$$E_{wind} = 0,61 W * 825,19h = 505Wh = 0,505kWh$$

Laskennan tulokset näkyvät taulukon 2 rivillä 1m/s. Taulukon laskenta on suoritettu Excel-ohjelmalla edellä esitettyjen laskentamallien mukaisesti.

Taulukko 2. Tuulen frekvenssi, teho ja energia Terttulanvaaralla. Weibull-parametrit: $k = 2$; $A = 4,29$; Keskituulen nopeus $3,8$ m/s.

Tuulen nopeus (m/s)	Frekvenssi (%)	Vuotuinen tuulen vallinta-aika (h/a)	Tuulen teho (W/m ²)	Tuulen vuotuinen energia kWh/m ²
1	9,42	825,19	0,61	0,51
2	16,24	1422,62	4,90	6,97
3	19,02	1666,15	16,54	27,55
4	17,94	1571,54	39,20	61,60
5	14,36	1257,94	76,56	96,31
6	10,00	876,00	132,30	115,89
7	6,13	536,99	210,09	112,81
8	3,33	291,71	313,60	91,48
9	1,62	141,91	446,51	63,37
10	0,70	61,32	612,50	37,56
11	0,27	23,65	815,24	19,28
12	0,10	8,76	1058,40	9,27
13	0,03	2,63	1345,66	3,54
14	0,01	0,88	1680,70	1,47
				647,62

11.6 Kahvion lämmitystehon tarve

Tuulivarojen ohella toinen välttämätön tieto voimalan mitoittamiseksi on voimalan syöttämän sähkölaitteiston tarvitsema teho. Tässä tapauksessa voimalan mitoitusstehon perustana käytetään Tähtikallion kahvion lämmitystehotarvetta. Lasketaan ensin kahvion lämmitettävä tilavuus, jota tarvitaan määrittettäessä lämmitystehoa.

Kahvion pinta-ala (A) on n. 156 m^2 ja korkeus (h) keskimäärin n. 3 m . Lämmitettävä tilavuus (V) on silloin:

$$V = A * h = 156 \text{ m}^2 * 3 \text{ m} = 468 \text{ m}^3$$

Kahviossa on suuri kiviuuni ja ilmalämpöpumppu sekä säteilylämmittimet katosissa. Tarkoituksena on tuottaa tuulisähköä niin paljon, että talviaikana vain keskimääräistä matalammilla lämpötiloilla, ja tietysti silloin kun ei tuule, tarvitsisi käyttää säteilylämmittimiä tai muuta ostosähkölämmitystä kahviossa. Lämmitystehontarpeeksi tilavuusyksikköä kohden (p) valitsin 20 W/m^3 . Tämä teho riittäisi

mainiosti nykyaikaisissa asuintaloissa mutta kahviossa se ei ole yksistään riittävä, koska tiloista suuri osa on kivipintaa (kalliota) joka sitoo runsaasti lämpöä. Tarvittaessa lämpövaje ”paikataan” tulisijalla ja ilmalämpöpumpulla. Tarvittava lämmityslaitteiston mitoitusteho (P) saadaan nyt laskettua:

$$P = V * p = 468 \text{ m}^3 * 20 \frac{\text{W}}{\text{m}^3} = 9\,360 \text{ W} \approx 9,5 \text{ kW}$$

11.7 Tuulivoimalan tehon määrittäminen

Edellä laskettua lämmityslaitteiston tehoa tarvitaan nyt määritettäessä tuulivoimalan tehoa. Tuulivoimalan antoteho (nimellisteho) on oltava suurempi kuin sen syöttämän laitteiston vaatima teho, ettei generaattori ylikuormittuisi.

Valitaan generaattoritehoksi 10 kW, joka on varsin tyypillinen pientuulivoimalateholuokka. Täten jää vielä 500 W siirto johdon ja lämmityssäätimen häviöiden kattamiseen.

11.8 Voimalan valinta ja tuottolaskenta

Tuottolaskentaan valitsin Kodin Energialla myynnissä olevan ”Ilmari 10 kW” mallinimellä olevan tuulivoimalan. Tuulivoimalasta on esite liitteessä 1. Voimala on suunniteltu nimenomaan matalia tuuliolosuhteita silmälläpitäen, jonka vuoksi se soveltuu hyvin sähköntuotantoon sisämaan heikkotuulisille alueille.

Seuraavassa laskennan kannalta tärkeitä teknisiä tietoja voimalasta:

- nimellisteho 10 kW
- nimellistehon tuulennopeus 9,5 m/s
- roottorin halkaisija 9,5 m
- roottorin pyyhkäisy pinta-ala 70,9 m²
- käynnistymistuuli 2,5 m/s
- maston korkeus 18 m tai 24 m

Tuulen teho roottorissa

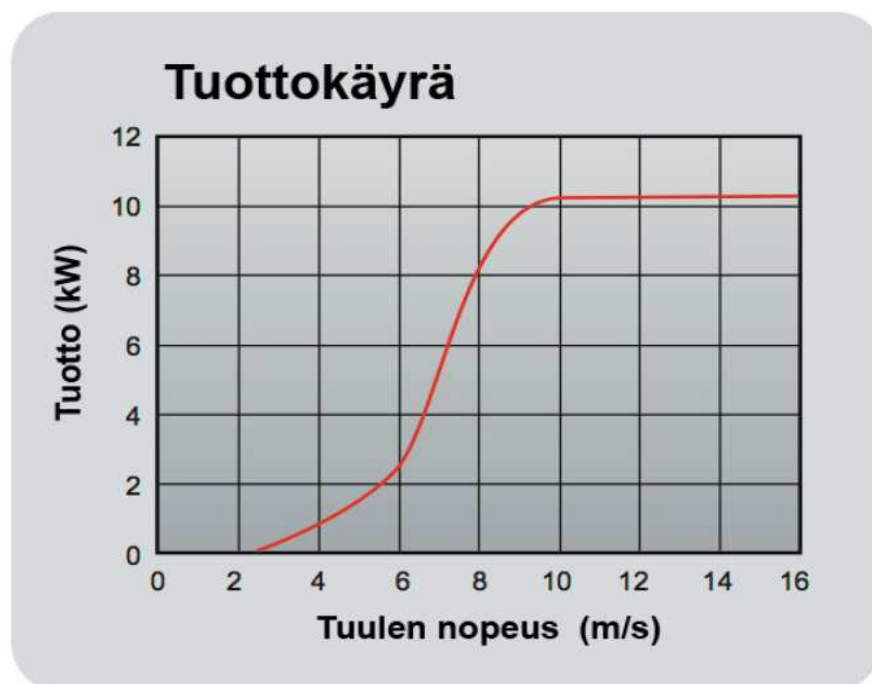
Lasketaan ensin tuulen teho roottorin pyyhkäisyypinta-alalla kaikille tuulennopeuksille 1 m/s välein. Laskenta voidaan tehdä kertomalla taulukosta 2 saatavan tuulen teho pinta-alayksikköä kohden (W/m^2) roottorin pyyhkäisyypinta-alalla tai kaavaa 4 käyttäen. Käytetään tässä ensin mainittua tapaa. Tuulen tehoksi roottorissa 1 m/s tuulennopeudella saadaan tällöin:

$$P_{rotor} = P_{wind}\pi r^2 = 0,61 \frac{W}{m^2} * \pi * 4,75^2 m^2 = 43,2 W$$

Lasketaan tuulen teho roottorilla kaikille taulukon 3 tuulennopeusriveille aina 14 m/s asti käyttäen Excel-taulukkolaskentaohjelmaa. Taulukoidaan tulokset taulukkoon 3.

Voimalan antoteho

Tutkitaan voimalan valmistajan tehotuottokäyrästä (kuva 26) kutakin tuulennopeutta edustava antoteho ja merkitään se taulukkoon 3.



Kuva 26. Ilmari 10 kW:n tuulivoimalan tehotuottokäyrä.

Voimalan hyötysuhde

Lasketaan voimalan kokonaishyötysuhde ($C_p \times \eta_{mek.}$), joka sisältää häviöt roottorista generaattorin napoihin asti.

Hyötysuhde saadaan taulukon 3 sarakkeiden ”tuulen teho roottorin alalla” ja ”voimalan antoteho” välisenä suhteena. Lasketaan hyötysuhde tuulennopeudelle 4 m/s, joka on lähellä mitattuja keskituulennopeuksia voimalan sijoituspaikalla.

$$C_p * \eta_{mek} = \frac{P_{out}}{P_{rotor}} * 100\% = \frac{0,8 \text{ kW}}{2,78 \text{ kW}} * 100\% = 28,79 \%$$

Lasketaan hyötysuhde kaikille taulukon 3 tuulennopeusriveille aina 14 metriin sekunnissa asti käyttäen Excel-tilukkolaskentaohjelmaa. Taulukoidaan tulokset taulukkoon 3. Voimalan paras hyötysuhde, yli 37 %, sattuu tuulennopeudelle 8 m/s joka on vähän alle voimalan nimellistehon tuulennopeudetta 9,5 m/s.

Voimalan vuotuinen energiantuotto

Voimalan vuotuinen tuotto lasketaan kullekin tuulennopeudelle antotehon ja tuulen vuotuisen vallinta-ajan tulona. Esimerkkinä tuottolaskenta tuulennopeudelle 4 m/s.

$$E_4 = P_{out4} * t_4 = 0,8 \text{ kW} * 1571,54 \text{ h} = 1257,24 \text{ kWh}$$

Lasketaan vuotuinen energiantuotto kaikille taulukon 3 tuulennopeusriveille aina 14 m/s asti käyttäen Excel-tilukkolaskentaohjelmaa. Taulukoidaan tulokset taulukkoon 2.

Voimalan vuotuinen energian tuotto saadaan nyt tuottosarakkeen kutakin tuulennopeutta edustavan osaenergian summana, joka on 13 727 kWh.

Taulukko 3. Voimalan teho, hyötysuhde ja energiantuotto

Tuulen nopeus (m/s)	Tuulen teho roottorin alalla (kW)	Voimalan antoteho (kW)	Voimalan hyötysuhde % ($C_p + \eta_{mek.}$)	Voimalan vuotuinen tuotto (kWh)
1	0,04	0	0,00	0,00
2	0,35	0	0,00	0,00
3	1,17	0,3	25,59	499,85
4	2,78	0,8	28,79	1257,24
5	5,43	1,6	29,48	2012,70
6	9,38	2,7	28,79	2365,20
7	14,89	5,2	34,92	2792,34
8	22,23	8,3	37,34	2421,18
9	31,65	9,7	30,65	1376,55
10	43,41	10,3	23,73	631,60
11	57,78	10,3	17,82	243,62
12	75,02	10,3	13,73	90,23
13	95,38	10,3	10,80	27,07
14	119,13	10,3	8,65	9,02

Voimalan huipunkäyttöaika

Tuulivoimalan vuotuinen huipunkäyttöaika kuvaa sen ajan pituutta, joka kuluisi vuodessa tuotetun energian tuottamiseen jos tuulivoimala toimisi koko ajan nimellistehollaan.

Voimalan vuotuiseksi tuotoksi Terttulanvaaran tuulioloissa muodostui edellisessä kohdassa laskettu 13 727 kWh. Kun voimalan nimellisteho on 10 kW, saadaan näistä laskettua huipunkäyttöajaksi:

$$\text{Huipunkäyttöaika} = \frac{\text{Vuosienergia}}{\text{Nimellisteho}} = \frac{13\,727\text{ kWh}}{10\text{ kW}} = 1\,373\text{ h}$$

Siis täydellä 10 kW:n teholla käydessään tuottaisi tuulivoimala 13 727 kWh vuosienergiansa 1 373 h:ssa. Se on 15,7 % vuoden tunneista. Voidaan myös sanoa, että voimalan vuotuinen energiantuotto vastaa 15,7 % kokoaikaista nimellistehoa. Jos voimala kävisi koko vuoden (8760 h) täydellä teholla, saisi sillä teholla tuotettua vuodessa 87 600 kWh.

Voimalan käyttöaste

Käyttöasteella tarkoitetaan sitä ajanjakson pituutta vuodesta, jona voimala tuottaa energiaa. Voimala tuottaa silloin kun tuulen nopeus on yli käynnistysnopeuden ja alle pysäytysnopeuden. Käyttöaste ilmoitetaan yleensä prosenteissa, mutta sen voi ilmoittaa myös tuntia/vuosi. Käyttöastetta vähentävät huollot ja toimintahäiriöt.

Esimerkivoimalan käynnistymistuulennopeus on 2,5 m/s, jolloin tuotanto alkaa noin 3 m/s tuulennopeudella.

Käyttöaste saadaan laskettua summaamalla taulukon 1 referenssiprosenttiluvut tuulennopeusarvosta 3 m/s lähtien.

Voimalan käyttöasteeksi tulee 73,5 %. Käyttöaste tunneissa on 6439 h/a.

Sähkön ostossa syntyvä säästö vuodessa

Jos sähkön ostotariffina olisi ns. yleistariffi (PKS Oiva), muodostuisi energian hinnaksi 13,88 snt/kWh (15.2.2012), sisältäen myös sähkön siirron ja verot. Kun voimalan tuottama 13 727 kWh:n sähköenergia jäisi pois sähkölaskuista, merkitsisi se säästöinä seuraavaa:

$$\begin{aligned} \text{Säästö} &= \text{Voimalan vuosituotto} * \text{Sähkön hinta} \\ \text{Säästö} &= 13\,727 \text{ kWh} * 13,88 \frac{\text{snt}}{\text{kWh}} = 1\,905 \text{ €/vuosi} \end{aligned}$$

Voimalan tuotto-osuus kahvion lämmityssähköstä

Tähtikallion kahvion sähkönkulutus vuosina 2006 – 2008 on sähkölaskuista todettuna ollut keskimäärin noin 19 000 kWh/vuosi. Tästä taloussähkön osuudeksi olen arvioinut n. 3 000 kWh. Taloussähköä on kulunut mm. valaistukseen se-

kä sisällä että ulkona, lämpimän käyttöveden valmistukseen, keittiökoneiden käyttöön ja ilmanvaihtolaitteistoon.

Lämmityssähkön osuudeksi jää siis n. 16 000 kWh/vuosi, joka on suurempi kuin vastaavan kokoisen sähkölämmitetyn pientalon. Lämmityssähkön suuri osuus tilavuuteen nähden selittyy tilan kallioseinillä, joka otettiin myös huomioon aiemmin kohdassa 12.4 lasketussa kahvion lämmityksen tehontarvelaskennassa.

Laskennallinen voimalan tuottama osuus kahvion lämmityssähköstä on

$$Tuotto \% = \frac{Voimalan\ tuotto}{Kahvion\ lämmitys} = \frac{13\ 727\ kWh}{16\ 000\ kWh} * 100\% = 85.8\ \%$$

11.9 Maston valintakriteerejä

Terttulanvaara on kylän yhteinen näköalapaikka lähiympäristöön sekä myös avaruuden saloista kiinnostuneiden tähtientutkijoiden kohtausta. Tästä syystä vaaralla oleilee usein luonnossa retkeileviä ja vapaa-aikaa viettäviä kyläläisiä sekä kauempaakin tulleita vieraita.

Harustettu masto on kevyt ja halpa ratkaisu pientuulivoimalan mastoksi, mutta Terttulanvaaran kapealla ja kallioisella laella se muodostaisi harusköysineen useita esteitä ja vaaranpaikkoja laella liikkujille sekä olisi myös esteettisesti huono ratkaisu. Tuulivoimalan ja siis myös maston pitkä käyttöaika n. 15 – 20 vuotta tekisi siitä pitkäaikaisen ”rumistuksen” näköalapaikallemme.

Edellä mainituista syistä on itseseisova, harustamaton putki- tai ristikkomasto paras ratkaisu mastovalinnaksi. Myös vaaran kallioinen laki tarjoaa hyvät edellytykset itseseisovan maston vaatiman vahvan perustuksen rakentamiseen.

Laskentaan valittuun esimerkkivoimalaan on saatavissa joko itseseisova ristikko- tai putkimasto. Kuvassa 33 on voimala havainnollistettu Terttulanvaaralle putkimastoisena. Maston perustukset tullaan aikanaan suunnittelemaan ja rakentamaan voimalan ja maston valmistajan ohjeiden mukaisesti.

11.10 Voimalasta johtuvia mahdollisia ympäristövaikutuksia

Näkyvyys maisemassa

Tuulivoimalan merkittävin ympäristövaikutus on yleensä sen näkyvyys. Selvitystyön kohteena oleva voimala on kuitenkin kokoluokaltaan sen verran pieni, että sen korkein osa ei juuri horisontin yläpuolelle nouse. Voimala tulee kyllä näky-mään joihinkin ilmansuuntiin suurelle alueelle. Pohjoispuolella oleva harva männikkö rajoittaa voimalan näkyvyyttä pohjoisen suuntaan.



Kuva 27. Tuulivoimalan sijoittuminen Terttulanvaaran maisemaan.

Kuvassa 27 on tuulivoimala visualisoitu tähtitornin pohjoispuolelle likimain oikeassa mittakaavassa kuvan muihin objekteihin suhteutettuna. Kuvakulmasta tarkastellen voimala näyttäisi olevan huomattavasti puita pidempi, mutta koska kuva on otettu useita metrejä voimalan perustusta alemmalla, syntyy silloin vaiku-

telma korkeasta rakennelmasta. Voimalan takana oleva männikkö on suurin piirtein samankorkuista kuin voimala itse. Voimalan napakorkeus on 18 m, jota ylemmäs nousevat roottorin noin viisi metriset lavat pyöriessään.

Kuvassa 28 on tähtitorni kuvattu luoteesta, Lieksantieltä 1,2 km:n etäisyydeltä teleobjektiivilla. Tähtitornin edessä olevat männyt ovat samoja puita kuin kuvassa 27 tornin takana olevat. Kuva on siis otettu vastakkaisesta suunnasta kuvaan 27 verraten. Tästä kuvakulmasta puuston takana olevasta voimalasta näkyisi ainoastaan sen lavat roottorin pyöriessä. Ei siis kovinkaan merkityksellinen ympäristövaikutus.



Kuva 28. Näkymä Lieksantieltä. Tuulivoimala on havainnollistettu Terttulanvaaralle tähtitornin viereen.

Voimala tulisi jonkin verran näkymään myös idän suuntaan Terttulanvaaralta katsoen, kuva 29. Tähän suuntaan vaikutusalue olisi noin puoli kilometriä.

Käynnissä olevan pienvoimalan pyörivä roottori on myös joskus todettu häiritseväksi sen näkyessä lähinaapureille. En kuitenkaan usko tämän olevan tässä tapauksessa häiritsevää, sillä voimalan tuotto menee kyläläisten yhteiseksi hyväksi eikä kenenkään yksityiseksi eduksi.

Tarkastelun alla oleva tuulivoimala ei muodostuisi maisemavaikutuksiltaan millään tavalla epäedullisen hallitsevaksi Jakokoskella. Voimala pikemminkin tukisi kylän imagoa tuulimyllyjen, erikoisuuksien ja aktiivisten asukkaiden kylänä.



Kuva 29. Näkymä Palovaarantieltä. Voimala havainnollistettu Terttulanvaaralle idästä päin nähtynä.

Melu

Tuulivoimalan äänihaitat syntyvät enimmäkseen roottorinlapojen aerodynaamisesta melusta sekä vaihteistosta ja generaattorista.

Työhön valitussa voimalassa ei ole vaihteistoa ja generaattorinkin ääni on niin hiljainen, ettei se juuri voimalan käyttöpaikkaa kauemmas kuulu. Ainoaksi äänihaitaksi jää roottorin viuhuna ja puuskuttava ääni, joka syntyy lavan ohittaessa maston. On myös muistettava, että lavoissa syntyvän äänen voimakkuuteen vaikuttaa suuresti lapojen pituus. Megaluokan voimaloissa lavat voivat olla 50 metriä pitkät ja pidemmätkin, kun puheena olevassa voimalassa lapojen pituus on vain vajaa viisi metriä.

Voimalaa lähin asuttu talo on noin 80 m päässä vaaran rinteessä. Tämän talon pihalle voimalasta voi kuulua roottorin ääniä ja niitäkin vain silloin kun tuulee. Silloin kun tuulee, kuuluu viuhunaa ja huminaa puista, antenneilta, ilmajohdoista ja muistakin rakenteista. Nämä tuulen äänet vaientavat tehokkaasti voimalan aiheuttamaa melua.

Vaikutus linnustoon

Linnut ovat se eläinryhmä johon tuulivoimalasta eniten syntyy vaikutuksia. Kontiolahdella on kaksi pienehköä FINIBA - lintualuetta, joista toinen (IBA 056 Pitkäranta) on kansainvälisesti tärkeä lintualue. Tämä alue on Terttulanvaaralta yli viiden kilometrin etäisyydellä etelän suunnassa ja sen kriteerilajina on Jänkäruppa.

Voimalasta ei liene suurta haittaa Pitkärannalla pesiville linnuille eikä muillekaan siivekkäille. Linnut törmäilevät voimaloissa lähinnä pyörivän roottorin lapoihin, joiden kehänopeus on nimellispyörimisnopeudella huima näennäisestä verkkaisesta pyörimisnopeudesta huolimatta. Esimerkkivoimalan 9.5 m halkaisijaltaan olevan roottorin kehänopeus 120 rpm nimellisnopeudella on noin 60 m/s, joka vastaa noin 216 km:n tuntinopeutta.

Terttulanvaaran rinteitä pesimäalueenaan pitävälle linnuille voi olla jonkin verran haittaa rakentamisen aikaansaamasta elinympäristön muutoksesta sekä valmiin voimalan käyntiäänistä.

Voimalan masto ei itsessään aiheuta linnuille ongelmia, ne osaavat kyllä väistää sitä siinä missä metsän puitakin. Kuitenkin maston mahdolliset istuskelupaikat voivat olla kohtalokkaita etenkin petolinnuille, jotka keskittyneesti tarkkailevat ympäristöä saalista etsien jolloin huomio pyörivään roottoriin herpaantuu. [23, s. 15.]

Edellä mainitusta syystä ristikkomaston käyttö Terttulanvaaran tuulivoimalassa ei ole suositeltava vaihtoehto.

11.11 Rakennuslupa

Kontiolahden kunnan rakennusjärjestyksen liitteenä olevan suunnittelutarvealueiden rajauskartan mukaan Jakokosken kylä ja näin ollen myös Terttulanvaara kuuluvat niin sanottuun suunnittelutarvealueeseen. Rakennusjärjestyksestä selviää myös, että tuulivoimalan rakentaminen tälle alueelle vaatii toimenpideluvan hakemisen, jos voimalan korkeus on 20 – 50 m. [24]. Laskentaan otettu voimala on roottorinlapoineen noin 23 m korkea jos maston korkeudeksi on valittu 18 m.

Terttulanvaaralle rakentamisessa on otettava huomioon myös naapurit ja tähti-harrastajat, joita tulevan voimalan olemassaolo koskettaa.

Toimenpidelupa ja siihen tarvittavat selvitykset tehdään sitten kun päätös voimalan hankinnasta on tehty.

12 Tulosten yhteenveto

Alla on kooste työprosessissa syntyneistä tärkeimmistä tuloksista.

- Terttulanvaaran vuotuinen keskimääräinen tuulennopeus on 3,78 m/s
- Vuotuiset tuulivarat neliometriä kohden ovat n. 648 kWh/m²
- Tarvittava lämmityslaitteiston mitoitusteho \approx 9,5 kW
- Valitun tuulivoimalan teknisiä tietoja ja ominaisuuksia:
 - Malli: Ilmari 10kW
 - Tyyppi: HE-WT-10A
 - Roottorin halkaisija: 9,5 m
 - Siipien materiaali: Vahvistettu lasikuitukomposiitti
 - Käynnistymistuuli: 2,5 m/s
 - Nimellinen antoteho: 10 kW
 - Nimellistehon tuulennopeus: 9,5 m/s
 - Nimellistehon pyörimisnop. 120 RPM
 - Generaattori: Kestomagneettigeneraattori
 - Tuulivoimalan paino: 950 kg
 - Syöttöjännite: 230 VAC 50hz 3-vaihe
 - roottorin pyyhkäisyypinta-ala: 70,9 m²
 - Alatuuligeneraattori seuraa aina tuulta, ei vaadi peräsintä
 - Tuulitunnelissa testattu siipiprofiili
 - Suunniteltu sisämaan matalien tuulien olosuhteita varten
 - Mekaaninen lapakulman säätö tuulennopeuden mukaan
 - Käyttöikä 20 vuotta
- Voimalan hyötysuhde tuulennopeudella 8 m/s on yli 37 %.
- Voimalan vuotuinen energian tuotto on n.13 727 kWh.
- Voimalan huipunkäyttöaika on 1 373 h.
- Voimalan vuotuinen energiantuotto vastaa 15,7 % kokoaikaista nimellistehoa.
- Voimalan käyttöaste on 73,5 %. Käyttöaste tunneissa on 6439 h/a.
- Sähkön ostossa syntyvä vuotuinen säästö on 1905 €, tammikuu 2012 hinnoilla.
- Voimalan tuotto-osuus kahvion lämmityssähköstä on n. 86 %.

13 Johtopäätökset

Tuloksena saatiin määriteltyä Terttulanvaaran tuulioloihin sopivan tuulivoimalan, jonka laskennallinen tuotto, lähes 86 % kokoustilojen (kahvio) lämmitysenergiasta, vastasi hyvin toivottuja tuottotavoitteita.

Työn tuloksena valittu vaaka-akselinen ja kolmilapainen alatuulityyppinen voimala on suunniteltu nimenomaan sisämaan heikkotuulisille alueille. Voimala on ilman tuuleenkääntöpyrstöä ja putkimastoisena esteettisesti tyylikäs ja siten myös tarkoituksen mukainen.

Selvää oli alussa vain, että tuotettu sähkö käytetään kokonaisuudessaan itse hyödyksi. Sitä ei siis ollut tarkoitus myydä. Myös käyttötarkoitus lämmityssähköinä selvisi hyvin pian, sillä ei tuntunut järkevältä varata sähköä akkuihin kiinteistössä jossa on jo sähköliittymä. Akkujen käytön suurimittaiseen sähkövarastointiin tekee kannattamattomaksi akkujen kallis hinta ja lyhyt käyttöikä.

Järkevimmäksi vaihtoehdoksi muodostui ajatus tuulisähkön tallettamisesta vesivaraajaan. Kokoustilathan lämpenivät ennestäänkin sähköllä ja varaajalle oli jo valmiina sopiva tila ilmanvaihtokonehuoneessa.

Työn tuloksena muodostunut voimalavalinta on ohjeellinen. Valituksi tuleva voimala voi olla myös pienempi kuin mikä tässä työssä on esitetty. Pienempi voimala maksaa vähemmän mutta se myös tuottaa vähemmän, jolloin lämmityssähkön ostossa syntynyt säästökin on pienempi. Vertailevat laskennat ja sopivuuden arvioinnit käyttötarkoitukseen eri voimaloiden kesken tehdään kyläyhdistyksessä tämän työn pohjalta. Lopulliseksi voimalavalinnaksi voi myös muodostua työssä ehdotettu voimalatyyppi.

Tuulimittaus Terttulanvaaralla jatkuu vielä kevättalven 2012, jotta voimme tarkentaa laskelmia ja voimalan ominaisuuksia lähempänä voimalan tilausajankohdaksi.

Suunniteltuun lämmitysjärjestelmään kuuluvien varaajan, ilmanvaihtokanavien, vesiputkien ja lämmityksen ohjausjärjestelmän suunnittelu, muutos- ja rakennustyöt toteutetaan kyläläisten ja yhteistyökumppaneiden toimesta.

Voimalahanke on herättänyt kyläläisissä mielenkiintoa ja keskusteluja. Vastustavia tai epäileviä näkökantoja ei vielä ole kuulunut ja voinee jo olettaa, että kyläläiset ovat voimalan suhteen varsin yksituumaisia. Tämä on positiivinen piirre ja varmaan osaltaan siivittää Jakokosken mainetta ennakkoluulottomien ja idearikkaiden asukkaiden sekä aktiivisen kyläyhdistyksen kylänä.

Työ voimalan toteuttamiseksi tulee jatkumaan tästä eteenpäin kyläyhdistyksen ja innokkaiden kyläläisten yhteistyönä.

Lähdeluettelo

1. Jain, Pramod. 2010. e-kirja, Wind Energy Engineering. McGraw-Hill Companies.
<http://www.scribd.com/doc/53254428/103/Design-Loads-of-Wind-urbines>.
2. Motiva Oy ja Suomen tuulivoimayhdistys ry. Tuulivoiman tietopaketti.
<http://www.tuulivoimatieto.fi/sanasto>. Luettu 25.3.2012.
3. Weckman, Emilia. 2006. Raportti, Tuulivoimalat ja maisema. Ympäristöministeriö. Luettu 10.3.2012.
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=49861&lan=fi>.
4. Suomen tuuliatlas. 2009. http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus_4.html.
5. Haapanen, Erkki. 2010. Esitys, Profiilitheoriaa 1, osa 2. Tuulivoimalan lavan profiilin suunnittelusta ja valinnasta. Tuulitaito. <http://www.tuulitaito.fi/>.
6. Suomen tuuliatlas. 2009. <http://www.tuuliatlas.fi/teho/index.html>. Luettu 17.2.2012
7. Suomen tuuliatlas. 2009. <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>. Luettu 17.2.2012.
8. Haapanen, Erkki. 2010. Esitys, Tuulimittausten merkitys ja mahdollisuudet tuulipuiston suunnittelussa ja käytössä. Tuulitaito. <http://www.tuulitaito.fi/>.
9. Työ- ja elinkeinoministeriö, Ilmatieteen laitos, Motiva Oy. 2010. Suomen tuuliatlas yhteenvetoraportti.
http://www.tuuliatlas.fi/linked/fi/Tuuliatlas_yhteenvetoraportti.pdf.
10. Haapanen, Erkki. 2001. Esitys, Tuulen nopeuden vaikutus tuulivoimalan tuottoon. <http://www.tuulitaito.fi/>.
11. Suomen tuuliatlas. 2009.
http://www.tuuliatlas.fi/mallinnus/mallinnus_2_1.html. Luettu 12.1.2012.
12. Seutu, Pentti. Kyläpäällikkö. Jakokosken kyläyhdistys. Haastattelu 6.3.2012.
13. Sormunen, Saara. Puheenjohtaja. Jakokosken kyläyhdistys. Haastattelu 15.2.2012.
14. Ryytänen, Osmo. Jakokosken kyläläinen. Haastattelu 14.2.2012.
15. Suomen tuuliatlas. 2009. http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus_2.html. Luettu 7.2.2012.
16. Motiva Oy ja Suomen tuulivoimayhdistys ry. Tuulivoiman tietopaketti.
<http://www.tuulivoimatieto.fi/vertikaalinen>. Luettu 9.3.2012.
17. Suomen tuuliatlas. 2009. Karttaliittymä. <http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/>.

- 18 Antikainen, Petteri; Vignaroli, Andrea. 2010. Esitys, Tuulivoimalan tuotannon arviointi ja mittaukset. VTT Technical Research Centre of Finland.
- 19 Kodin Energia, Kuva Power Predictor tuulimittari-esitteestä.
<http://sites.google.com/site/kodinvihreaenergia/tuulimittaus>. Luettu 13.1.2012.
- 20 Haapanen, Erkki. 2010. Esitys, Sodar tuulimittaustekniikka.
<http://www.tuulitaito.fi/>.
- 21 Järvinen, Samu. 2011. Tuulen nopeuden etämittausta LIDAR-tekniikan avulla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. Teknisen luonnontieteellinen koulutusohjelma. Tampere. 2011. 82 sivua.
- 22 WindSpot by Sonkyo Energy. 2011. <http://finland.windspot.es/calc.php>. Luettu 10.1.2012.
- 23 Ympäristöministeriö. 2002. Ympäristölainsäädännön soveltaminen tuulivoimarakentamisessa.
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=8570&lan=fi>. Luettu 25.1.2012.
- 24 Motiva Oy, wpd Finland Oy. 2010. Tuulen voimalla Suomessa.
http://www.motiva.fi/files/3322/Tuulen_voimalla_Suomessa.pdf. Luettu 25.1.2012.
- 25 Motiva Oy (ylläpito), Tuulivoimaopas.
http://www.tuulivoimaopas.fi/yleista_tuulivoimasta. Luettu 13.3.2012.
- 26 Motiva Oy. 2011. Tuulivoima.
http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/tuulivoima. Luettu 13.3.2012.
- 27 Stenberg, Anders & Holttinen, Hannele. 2011. VTT, Tuulivoiman tuotantotilastot, Vuosiraportti 2010.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2011/W178.pdf>. Luettu 17.2.2012.
- 28 VTT. 2012. Suomen tuulivoimatilastot.
<http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/>. Luettu 13.3.2012.
- 29 Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2012.
<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tiedotteet>. Luettu 25.1.2012.
- 30 Haapanen, Erkki. 2004. Esitys, Tuulivoimatekniikkaa.
<http://www.tuulitaito.fi/>

- 31 Böhmeke, Georg. 2010. Future Power Oy. Esitys, Tuulivoimalan konseptit ennen, nyt ja tulevaisuudessa.
- 32 Suomen tuuliatlas. 2009. <http://www.tuuliatlas.fi/mitoitus/index.html>.
Luettu 17.2.2012.



Ilmari 10kW tuulivoimala

Ilmari 10 kW on yksityiskäyttöön tarkoitettu tuulivoimala. Tuulesta saatava sähkö syötetään verkkolaitteella suoraan kiinteistön sähköverkkoon. Tuulivoimalan tuottama sähkö näkyy selvänä säästönä sähkölaskussa.

Ilmari tuulivoimala on tarkoitettu omakotitalon, maatalouden tai teollisuuden omaan sähköntuotantoon.

Ilmari 10kW tuulivoimalan tuottoarvio on Suomen olosuhteissa 15.000 - 40.000 kWh vuodessa. Vuosituotanto riippuu asennuspaikan tuuliolosuhteista ja maston korkeudesta.

Ominaisuudet

- Tyylikäs design ilman peräsintä
- Alatuuligeneraattori seuraa aina tuulta
- Tuulitunnelissa testattu siipiprofiili
- Aerodynaaminen tehokkuus suunniteltu matalien tuulien 5 - 8 m/s olosuhteita varten
- Mekaaninen lapakulman säätö tuulenopeuden mukaan
- Korkealaatuiset SKF ja NSK laakerit
- Käyttöikä 20 vuotta

Tekniset tiedot

Malli	Ilmari 10kW
Tyyppi	HE-WT-10A
Roottorin halkaisija	9,5 m
Siipien materiaali	Vahvistettu lasikuitukomposiitti
Käynnistymistuuli	2,5 m/s
Nimellisteho	10 kW
Nimellistehon tuulenopeus	9,5 m/s
Nimellistehon pyörimisnopeus	120 RPM
Generaattori	Kestomagneettigeneraattori
Tuulivoimalan paino	950 kg
Verkkosyöttö	230 VAC 50hz 3-vaihe
Suosittelvat mastot	18 tai 24 m saatavana eri malleja
Takuu	2 vuotta, jatkettavissa 5 vuoteen

