



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

KALLE SUONIEMI
PIENTUULIVOIMAN SUUNNITTELU JA TUOTANNON
ENNUSTUS KULUTTAJAN NÄKÖKULMASTA
Diplomityö

Tarkastajat: professori Sami Repo
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
18. toukokuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

SUONIEMI, KALLE: Pientuulivoiman suunnittelu ja tuotannon ennustus kuluttajan näkökulmasta

Diplomityö, 110 sivua, 143 liitesivua

Kesäkuu 2014

Pääaine: sähköenergia

Tarkastajat: professori Sami Repo

Avainsanat: tuulivoima, pientuulivoima, mikrotuotanto

Nykypäivän energiantuotantomalleissa painotetaan usein kestäviä ja luonnonmukaisia ratkaisuja. Historian saatossa taloudellinen hyöty on ollut energiaratkaisuissa painopisteistä merkittävä. Taloudellisen hyödyn optimoinnin seurauksena ja tekniikan kehittymisen mahdollistamana on kasvatettu energiantuotantoyksiköiden kokoa yhä suuremmiksi. Ilmastotavoitteiden myötä on kuitenkin alettu jo poliittisillakin keinoilla ohjalla energiantuotantoa uusiutuvien energialähteiden pariin painottaen hajautettuja energiantuotantoratkaisuja.

Nykypäivän tekniikka on avannut kuluttajille energiamarkkinat uudelta sektorilta. Kuluttaja pystyy uusien energiaratkaisujen myötä itse tuottamaan kuluttamaansa energiaa sekä valitsemaan omaan arvomaailmansa sopivan tuotantomuodon. Tämä kuitenkin vaatii kuluttajalta suuren taloudellisen panostuksen alkuinvestointeihin ja tuotetusta energiasta maksettu hinta saadaan tietää vasta laitteiston elinkaaren loppupäässä.

Tässä työssä tutkitaan pientuulivoiman soveltuvuutta kuluttajan sähköenergian lähteeksi. Työn tarkoitus on avata pientuulivoimaloiden nykytilaa ja käytettyä tekniikkaa sekä tuotantoyksiköitä koskevia ohjeistuksia ja määräyksiä. Kuluttajaa pyritään opastamaan optimaalisen pientuulivoimalan suunnittelussa teorian ja käytännön esimerkkien pohjalta. Työn markkinakatsauksessa käydään läpi eri pientuulivoimapakettien hintoja sekä tehdään kartoitusta verkkoyhtiöiden näkökulmasta pientuulivoimaloiden yleisyydestä ja käytänteistä.

Työn pohjalta rakennettiin pientuulivoimalaympäristö, johon kuuluu neljä eri pientuulivoimalaa. Tuulivoimaloiden tuotantoa sekä tuulennopeutta seurattiin useamman vuoden ajan. Mittaustuloksia vertailtiin ja analysoitiin työssä esitetyn teoreettisen pohjan perusteella.

Tutkimuksessa pystyttiin vertailemaan valmistajien antamien tehon arvojen ja tuulennopeuden suhteita ja tutkimaan niiden paikkaansa pitävyyttä käytännössä. Lisäksi ennustettiin suuntaa antavasti tuotetun energian taloudellista arvoa sekä laitteistojen takaisinmaksuaikaa. Tutkittavilla laitteistoilla tuotetun sähköenergian hinta oli sähkön markkinahintaa verrattuna moninkertainen, eivätkä investoinnit maksa itseään takaisin ennustetun elinkaarensa aikana.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

SUONIEMI, KALLE: Estimating the energy production and planning a micro wind turbine for a private consumer

Master of Science Thesis, 110 pages, 143 Appendix pages

June 2014

Major: Electrical energy

Examiners: Professor Sami Repo

Keywords: wind energy, micro wind turbine, micro energy production

Historically, energy consumption units have grown bigger and bigger. Developing techniques made it possible and economic gain desirable. Lately, however, environmental concerns have led politicians to favor also solutions that use renewable energy. With the help of modern technology a private consumer can produce energy. This, however, requires significant investments.

The aim of this thesis is to study the suitability of micro wind turbines as a source of energy for consumers. This is done by studying the present status of and techniques used in micro wind turbines today and by looking at the guidelines and regulations concerning wind turbines. A plan for making an optimal wind turbine was created and a review of the market prices made.

Four wind turbines were installed in Tampere, Finland. Over several years, the data on the wind speed and the power the micro wind turbines produced was gathered. The results were compared and analyzed together based on the theory of the wind power. The ultimate price of the electricity was much more expensive than the price of the electricity in the market fair. It was also found out that the repayment period was much longer than the predicted age of the micro wind turbines.

ALKUSANAT

Sanoiksi puettuna diplomityön tekeminen oli hieno, antoisa ja erittäin opettavainen tutkimus. Työtä tehdessä tuntui siltä, että näin käytännön läheisesti mikrotuulivoimantuotantoa ei tieteellisesti ja luotettavasti ole Suomessa vielä tutkittukaan.

Työn ohessa sain rakennettua oppimisympäristön Tampereen ammattikorkeakoululle ja toivon, että tämä ympäristö motivoi ja innovoi uusiin ideoihin ja tutkimuksiin, sekä antaa uutta näkökulmaa ja intoa niin opiskelijoille kuin yrityksillekin.

Kiitokset kuuluvat kaikille vähänkin työhön osallistuneille, mutta tässä haluan poimia niitä henkilöitä ja yrityksiä, joita ilman työ ei olisi edes onnistunut.

Suurin kiitos Mika Pekkiselle, jonka idea koko tutkimus oli. Kiitän häntä myös hyvästä ja kannustavasta ohjauksesta. Kiitos kuuluu myös koko Tampereen Sähkölaitos-konsernille. Yhteistyömme pelasi moitteettomasti kaikkien tytäryhtiöiden kanssa. Kiitän Tampereen Särkänniemi Oy:tä osallistumisesta, tuesta ja tilanvuokrasta. Tampereen ammattikorkeakoulua haluan kiittää vastuunannosta ja luottamuksesta, joita ilman en olisi päässyt toteuttamaan itseäni ja ideoitani. Kiitos Rejlers Oy:lle ja etenkin Lasse Martikaiselle avusta, tuesta ja hyvästä yhteistyöstä.

Suuri kiitos myös niille henkilöille, jotka matkan varrella ovat kyselleet, että koska se työ oikein valmistuu, koska ilman teitä työ ei ehkä koskaan olisi tullut valmiiksi.

Tampereella 21. toukokuuta 2014

Kalle Suoniemi

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
1.1 Työn taustat	1
1.2 Alueen kuvaus	3
1.3 Työn tavoitteet ja painopisteet	4
2 TUULIVOIMAN HYÖDYNTÄMINEN	5
2.1 Tuulen synty	5
2.1.1 Tuuleen vaikuttavat voimat	5
2.2 Tuulivoima teoriassa	11
2.2.1 Virtauksen dynamiikka	11
2.2.2 Ilmavirtauksen mallintaminen	14
2.2.3 Ilmavirtauksen teho ja pinta-alamenetelmä	16
2.2.4 Hyötysuhde ja Betzin laki	19
2.2.5 Ilmavirtauksen energiasisältö tehokäyrämenetelmällä	20
2.3 Tuuliolosuhteiden arviointi	22
2.3.1 Suomen tuuliolosuhteet	23
2.3.2 Suomen Ilmatieteen laitoksen havaintoasemat	23
2.3.3 Suomen Tuuliatlas	25
2.3.4 WAsP- laskentaohjelma	28
2.3.5 Suomen tuulivoimatilastot	29
3 PIENTUOTANTO YLEISESTI	31
3.1 Keskitetystä energiantuotannosta mikrotuotantoon	31
3.2 Historia, nykytila ja näkymät Suomessa	33
3.3 Markkinakatsaus	34
3.3.1 Markkinakatsaus internetissä	35
3.3.2 Kysely verkkoyhtiöille	37
4 PIENTUULIVOIMALOIDEN LAITTEISTOT	41
4.1 Laitteistojen tekniset ominaisuudet	41
4.1.1 Pientuulivoimaloiden luokittelut	41
4.1.2 Toimintatavan eroavaisuudet	43
4.1.3 Säättötapojen mukainen jaottelu	45
4.2 Liitäntäteknikka	47
4.2.1 Lainsäädännölliset vaatimukset	47
4.2.2 Pientuulivoimaloiden liitäntäteknikka	49
4.3 Sopimukselliset asiat	52
4.3.1 Rakennus- ja toimenpideluvat	52

4.3.2 Sähköverkonhaltijan kanssa tehtävä sopimus	52
4.4 Huolto ja ylläpito	53
5 LAITTEISTOJEN VERTAILU TEORIASSA.....	54
5.1 Tutkittavien laitteistojen esittely	54
5.1.1 Tuulivoima 1, Kaleva, TAMK	54
5.1.2 Tuulivoima 2, Särkänniemi, niemen kärki	59
5.1.3 Tuulivoima 3, Nekala, lämpökeskus	60
5.1.4 Tuulivoima 4, Särkänniemi, Onkiniemi	62
5.2 Tuuliolosuhteiden arviointi	67
5.2.1 Keskimääräisen tuulen ja rosoisuuden arviointi napakorkeudella	67
5.2.2 Tuuliruusujen ja maaston analysointi.....	71
5.3 Teoreettisten tuottoennusteiden arviointi	75
5.3.1 Ilmavirtauksen energia pinta-alamenetelmällä	75
5.3.2 Energian arviointi tehokäyrämenetelmällä	77
5.3.3 Energian arviointi WASP- laskentaohjelmalla	80
6 LAITTEISTOJEN VERTAILU MITTAUSTEN PERUSTEELLA.....	85
6.1 Mittausjärjestelyt	85
6.1.1 Energiamittauksien toteutus	85
6.1.2 Tuulivoimaloiden tuulimittauksien toteutus	86
6.1.3 Tuulimittaustuloksien vertailua teorian arviointeihin.....	88
6.2 Tuotannon vertailua energia- ja tuulimittausten perusteella.....	89
6.2.1. Tuulivoima 1, Kaleva, TAMK	89
6.2.3 Tuulivoima 2, Särkänniemi, niemen kärki	91
6.2.4 Tuulivoima 3, Nekala, lämpökeskus	94
6.2.5 Tuulivoima 4, Särkänniemi, Onkiniemi	97
6.3 Tulosten analysointi	99
6.3.1 Tuloksien vertailu.....	99
6.3.2 Tulosten vertailua tuulivoimaloiden tuotantotilastoihin.....	102
6.3.3 Taloudellista vertailua.....	103
7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	106
LÄHDELUETTELO	108
Liite 1: Markkinakatsaus tuotteista	
Liite 2: Markkinakatsaus; Verkkoyhtiöiden kyselylomakkeen saate	
Liite 3: Markkinakatsaus; Verkkoyhtiöiden kyselylomake	
Liite 4: Huoltoraportti Särkänniemi niemen kärki	
Liite 5: Tuuli- ja tehomittaukset 7.10.2011-22.4.2014	

LYHENTEET, TERMIT JA MERKINNÄT

Termit

advektio	Tuulen mukana tapahtuva lämmön siirtyminen
aerodynaaminen	ilmavirtauksen kannalta pieni ilmanvastuskerroin
Betzin laki	Teoreettinen maksimihyötysuhde potkurimallisen tuulivoimalan ilmavirtauksen saamasta tehosta
Coriolisvoima	Näennäisvoima, joka syntyy maapallon pyörimisliikkeestä
etutuulipotkuri	Potkurimallinen tuulivoimala, joka ohjautuu tuulen etupuolelle mastosta katsottuna
gradienttituuli	Epäsymmetriset Coriolisvoima ja painekradienttivoima aiheuttavat syntyvän ilmavirtauksen kääntymisen Coriolisvoiman vaikutuksesta
geostrofinen tuuli	Vaakasuuntainen ilmavirtaus, joka syntyy kun Coriolisvoima ja painekradienttivoima ovat yhtä suuret
Golfvirta	Atlantin valtameren merivirta
hajautettu tuotanto	Energiantuotantoa jossa tuotantolaitokset on hajautettu pienempiin yksiköihin
hilaruutu	Koko Suomen kattava ruudukko, jossa jokaiseen ruutuun on laskettu kyseisen alueen tuulen ominaisuuksia
hydrostaattinen tila	Tasapainotila saavutetaan, kun painekradienttivoima ja gravitaatiovoima ovat yhtä suuret
kehänopeus	lapojen pyörimisnopeus mitattuna niiden kärjistä
keskitetty tuotanto	Energiantuotantoa jossa tuotantolaitokset on keskitetty suuriin laitoksiin
kiertokulma	Lavan pituussuuntaisen kiertymisen kulma
kiinteälapainen	Tuulivoimala, jonka lapojen kohtauskulmaa ei säädetä
kiinteänopeuksinen	Tuulivoimala jonka pyörimisnopeuteen ei vaikuta tuulennopeus, vaan pyörimisnopeus on tuotantotilanteessa vakio
kohtauskulma	Suhteellisen tuulen ja tuulivoimalan lavan jänneviivan välinen kulma
kärjen nopeussuhde	Kehänopeus suhteutettuna maan pällisen tuulennopeuteen
laminaarinen	Pyörteetön ilmavirtaus
lapakulmansäätö	Ohjataan tuulivoimalan tuotantoa niin, että virtaus on koko ajan laminaarista, kohtauskulma on hieman maksimaalista kulmaa pienempi

muuttuvanopeuksinen	Tuulivoimala jonka pyörimisnopeus muuttuu tuulennopeuden mukaan
myrskysuojaus	Suojaus, jonka tarkoitus on estää tuulivoimalaa vaurioitumasta kovilla tuulennopeuksilla
napakorkeus	Korkeus maasta tuulivoimalan navan keskelle
nostovoima	Voima, joka nostaa lapaa ilmavirtauksen halki
pasaatituulet	Päiväntasaajalla puhaltavat jatkuvat tuulet
pintakerros	Maan pinnan lähelle oleva ilmakerros, noin 10% rajakerroksen alaosasta
pintatuulet	Pintakerroksessa vaikuttavat tuulet
rajakerros	Maan pinnan ja vapaan ilmakehän välinen kerros
rosoisuusparametri	Parametrilla huomioidaan maaston rosoisuuden vaikutus ilmavirtaukseen, yksikkö metri (m)
sakkaus	Lavan kohtauskulman kasvaessa liian suureksi ohivirtaava ilmavirtaus muuttuu turbulenttiseksi ja lavan nostovoima alenee merkittävästi
sakkaussäätö	Ohjataan tuulivoimalan tuotantoa niin, että kohtauskulma on hieman laminaarisen virtauksen maksimaalista kulmaa suurempi
suhteellinen tuuli	Maan päällisen tuulen ja liikkeestä syntyvän ilmavirtauksen summa
Suomen Tuuliatlas	Tuulivoimaloiden suunnittelua helpottava internetpohjainen käyttöliittymä
takatuulipotkuri	Potkurimallinen tuulivoimala, joka ohjautuu tuulen takapuolelle mastosta katsottuna
tehokäyrä	Tuulivoimalan tehon tuotto tuulennopeuden suhteen
vastusvoima	Voima, joka työntää lapaa ilmavirtauksen suuntaan
Weibull-jakauma	Todennäköisyyslaskentaan perustuva matemaattinen malli, jolla kuvataan satunnaismuuttujan todennäköisyyttä saada tietty arvo

Lyhenteet

atm	normaali ilmakehän paine
CE	Tuote täyttää sitä koskevan EU:n direktiivien vaatimukset (Conformité Européene)
CENELEC	Eurooppalainen sähköalan standardoimisjärjestö (European Committee For Electrotechnical Standardization)
DTU	Tanskan teknillinen yliopisto (Danmarks Tekniske Universitet)
EMV	Energiamarkkinavirasto
ET	Energiateollisuus ry
ETA	Euroopan talousalue

EU	Euroopan unioni
IEC	Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (International Electrotechnical Commission)
ISO	Kansainvälinen standardoimisjärjestö (International Organization for Standardization)
LE	Liittymisehdot
LOM	Saarekekäytön esto (Loss Of Mains)
mpy	meren pinnan yläpuolella
MRL	Maankäyttö- ja rakentamislaki
RoHS	Tiettyjen haitallisten aineiden käytön rajoitus sähkö- ja elektroniikkalaitteissa EU:n direktiivin mukaisesti (The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment)
rpm	pyörimisnopeus kierroksia minuutissa (rotations per minute)
SFS	Suomen Standardoimisliitto (Finlands Standardiseringförbund)
TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
TLE	Tuotannon liittymisehtosopimus
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
TVPE	Tuotannon verkkopalveluehdot
toe	Energian mittayksikkö: öljykvivalenttitonnia
VPE	Verkkopalveluehdot
WAsP	Tanskalainen tuuliatlassovellus (Wind Atlas Analysis and Application Program)
YKJ	Yhtenäiskoordinaatisto

Merkinnät ja symbolit

a	virtausvaste
A_{pp}	pyyhkäisypinta-ala
C	Weibull-jakauman skaalausparametri
CF	kapasiteettikerroin
C_p	Tuuliturbiinin tehokerroin
D	roottorin halkaisija m^2
d	nollatason siirtymä
E_i	Ilmavirtauksen energiasisältö
e	tuotanto suhteessa roottorin pyyhkäisypinta-alaan
f	Weibull-jakauman esiintymistodennäköisyys
F_g	gravitaatiovoima
F_{pg}	painegradienttivoima
K	von Kármán'in vakio

k	Weibull-jakauman muotoparametri
K_a	keskiarvo
L	monin- Obukhovin pituus
\dot{m}	Massavirta
P_i	ilmavirtauksen teho
t_h	huipunkäyttöaika
U_n	Sähköverkon nimellinen jännite
v	tuulennopeus
v_{ka}	tuulennopeuden vuosittainen keskiarvo
$v_{kehä}$	kehänopeus
v_{ref}	alkuperäinen tuulennopeus
V_{pp}	ilmavirtauksen nopeus pyyhkäisypinta-alan kohdalla
v_*	kinemaattinen pintastressi
WA	Hilaruutu, tuuliatlas
z	napakorkeus
z_k	Nollatason korjaus
z_{ref}	alkuperäinen korkeus
z_o	rosoisuusparametri
η_i	Ilmavirtauksen hyötysuhde
Γ	gamma-funktio
λ	kärjen nopeussuhde
Ψ	empiirinen funktio
ρ	ilmantiheys

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan pientuulivoimaloiden mahdollisuutta toimia kuluttajien käyttämän sähköenergian lähteenä. Työssä vertaillaan teoriassa ja todistetaan käytännössä mittaustulosten perusteella pientuulivoimaloiden kannattavuutta ja tuottavuutta kuluttajan näkökulmasta. Tutkimus ja tulokset pohjautuvat neljän eri pientuulivoimalan tuuli- ja tuotantotietoihin. Kaikki voimalat sijaitsevat Tampereen keskustan tuntumassa. Kuluttajan on myös mahdollista seurata näitä tuuli- ja tuotantotietoja lähes reaaliajassa osoitteessa;

Internet-osoite:

<http://webamr.rejlers.fi/>

Käyttäjätunnus:

pientuulivoima

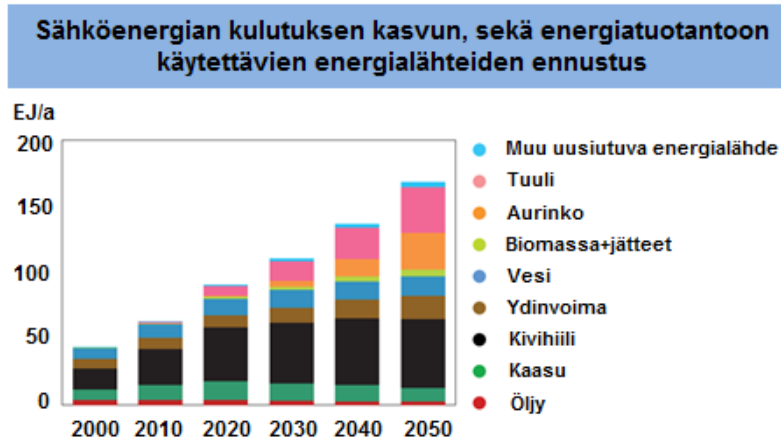
Salasana:

1234

1.1 Työn taustat

Energiantuotanto on haasteiden edessä. Monissa tuotantomuodoissa energiantuotanto ja ympäristöystävällisyys eivät kohtaa. Toisaalta ihmisten arvomaailmat ovat yhä enenevässä määrin luonnon ja ilmaston puhtauden sekä kestävien ja uusiutuvien ratkaisujen kannalla. Käsitteenä energiatehokkuus on taas avainsana nykypäivässä monissa yhteyksissä ja useiden energiaa koskevien päätösten takana. Voidaankin ajatella, että energiatehokkuus on sovittelijana perinteisten tuotantomuotojen ja luonnonmukaisten toimintamallien välillä.

Jo monissa skenaarioissa ennustetaan Euroopan sähköenergiatuotannon päästöjen vähenemistä tulevilla vuosikymmenillä. Kuvassa 1.1 on esitetty yksi Shellin näkemyksistä energian kasvun ja tuotannon jakautumisesta (Shell energy scenarios to 2050). Tutkimuksessa on esitelty kaksi erilaista näkökulmaa tulevaisuuden energiantuotannosta; toisessa energiantuotantomallissa huomioidaan ainoastaan maiden välinen kilpailu ja oman väestön energiatarpeen tyydyttäminen, kun taas toisessa (kuva 1.1) otetaan huomioon laajempi valtioiden välinen yhteistyö ja yhteinen tavoitteellisuus ympäristön resursseja kunnioittaen. Shell ennustaa jälkimmäisessä, että vuoteen 2050 mennessä sähköä tuotetaan vähintään 60 % muilla kuin fossiilisilla energialähteillä.

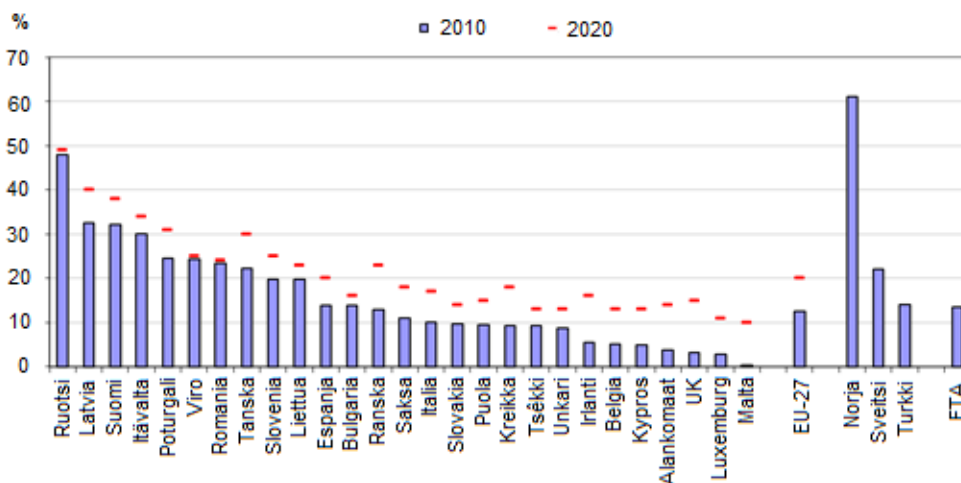


Kuva 1.1. Shell:n yksi näkemys sähköenergian tuotantomuodoista aikavälillä 2000–2050. (Shell energy scenarios to 2050)

Kuvaajasta huomataan, että eniten kasvua tuotantomuodoista ennustetaan tuuli- ja aurinkovoimalle. Kuitenkin tutkimuksessa korostetaan sitä, että ensiksi on yritettävä säästää energiaa, koska nykyisellä väestön- ja energiankasvulla ei millään tuotantomuodolla pystytä tuottamaan kasvavaa energiankulutusta. (Shell energy scenarios to 2050)

Diplomityön aiheen ajankohtaisuutta voidaan tarkastella esimerkiksi EU:n tasolla tapahtuvan lainsäädäntöprosessin valossa. Vuonna 2007 Euroopan komission julkaiseman ja vuonna 2009 lopullisesti hyväksytyyn direktiivin mukaan vuonna 2020 Euroopan kokonaisenergian kulutuksesta 20 % on oltava peräisin uusiutuvista energialähteistä. Lisäksi vuoden 2020 energiankulutus voi korkeintaan olla 1474 Mtoe primäärienergiaa ja 1078 Mtoe loppuenergiaa (Direktiivi 2012). Kuvassa 1.2 esitellään maakohtaisesti EU:n uusiutuvat energiantuotantotavoitteet vuodelle 2020.

Uusiutuvien energialähteiden käytön prosentuaalinen osuus energian loppukäytöstä vuonna 2010 ja EU:n asettama tavoite vuodelle 2020



Kuva 1.2. Uusiutuvien energiamuotojen käyttö suhteutettuna energian loppukäyttöön; vuoden 2010 toteumat ja 2020 tavoitteet. (European Environment Agency)

Kuvasta 1.2 huomataan, että EU-maiden välisessä vertailussa Suomessa uusiutuvien energiamuotojen käyttöprosentti 2010 on melko korkea, n. 33 %, kun taas EU:n keskiarvotavoitteeksi vuonna 2020 on laskettu noin 20 %. Suomen tavoiteluku on kuvan mukaan laskettu n. 38 %:iin.

1.2 Alueen kuvaus

Työn ohessa rakennettiin Tampereelle neljän tuulivoimalan tutkimusympäristö. Kaikki voimalat sijaitsevat kaupunkialueella lähellä keskustaa n. 2 km säteellä Tampereen ydinkeskustasta. Tuulivoimaloiden maantieteellistä sijaintia on havainnollistettu kuvassa 1.3.



Kuva 1.3. Tuulivoimaloiden maantieteellinen sijainti kartalla

Tampereen Särkänniemen tontin alueella tuulivoimaloita on kaksi. Tuulivoimalat sijaitsevat kuitenkin tontin ääripäissä ja niillä on eri valmistajat. Työssä näistä läntisemmästä käytetään nimitystä Särkänniemi, Onkiniemi ja itäisemmästä nimitystä Särkänniemi, niemen kärki. Tampereen ammattikorkeakoululla on tutkittavista voimaloista itäisin. Voimala sijaitsee koulun tontilla korkeiden rakennusten ja siirtolapuutarhan välimaastossa. Eteläisin tuulivoimala on Helsinkiin päin lähtevän

moottoritien kupeessa, Nekalan kaupunginosassa, Tampereen sähkölaitoksen tuotantolaitoksen katolla. Nimitys tällä voimalalla on Nekala, lämpölaite. Tuulivoimaloita esitellään tässä työssä tarkemmin kappaleessa 5.

1.3 Työn tavoitteet ja painopisteet

Työn tarkoituksena on tutkia, pystyykö kuluttaja Suomen tuuliolosuhteissa tuottamaan kotitalouteensa energiaa pientuulivoimalan avulla. Työn päätelmät perustuvat neljään tutkittavaan tuulivoimalaan (Särkänniemi, Onkiniemi; Särkänniemi, niemen kärki; Kaleva, TAMK; Nekala, lämpölaite), joiden tuotannon tuloksia esitellään tässä työssä. Työssä selvitetään myös kuluttajan näkökulmasta mikrotuulivoimalan suunnitteluun ja perustamiseen liittyviä tärkeimpiä aihealueita. Tarkoitus on, että työ toimisi tieteellisenä pohjatyönä pientuulivoimatuotantoa harkitseville kuluttajille. Kuluttajalla tässä työssä tarkoitetaan verkkoyhtiön kuluttaja-asiakasta. Lisäksi tutkimuksessa tehtiin markkinakatsaus vuonna 2011 tarjolla olevista tuulivoimaloista Suomessa.

Työssä käydään läpi verkkoyhtiöille asetettuja suosituksia ja niiden toteutumista käytännössä. Suositusten toimivuudesta sekä siitä, rajoittavatko suositukset mahdollisesti mikrotuotannon yleistävyyttä ja kasvua Suomessa, on kerätty palautetta verkkoyhtiökyselyssä (2011).

Työn lähtöajatuksena on, että murrosvaiheessa elävässä uusiutuvan energian tuotannossa on monta kompastuskiveä, joihin tulisi etsiä toimivia ratkaisuja, jotta uusiutuvan energian tuotannosta tulisi myös Suomessa kannattavampaa ja kuluttajaystävällisempää.

2 TUULIVOIMAN HYÖDYNTÄMINEN

2.1 Tuulen synty

Tuuli voidaan määritellä ilman horisontaalisena liikkeenä Maan pintaan nähden. Tuulet ovat aina kahden eri ilmanpainealueen välissä syntyvää liikettä. Ilmanpainealueiden erot taas johtuvat auringon säteiden lämpövaikutuksen epätasaisesta jakautumisesta maan pinnalle. Päiväntasaajalla olevat alueet saavat enemmän Auringon lämpösäteilyä kuin maapallon napojen lähellä olevat alueet. Ilmakehä pyrkii tasoittamaan auringon epätasaisesti jakautuvan säteilyn aiheuttamia lämpötilaeroja eri ilmanpainealueiden välillä, jolloin syntyy ilmavirtauksia. (Chiras 2010, s.17–19.; Suomen Tuuliatlas 2012)

Voidaankin todeta, että tuulivoima on sekundaarista aurinkoenergiaa. Auringon maapallolle luovuttamasta energiasta n. 1-3 % muuttuu tuulen liike-energiaksi. Tuulen liike-energialla on suuri rooli maapallon lämpötasapainon ylläpitämisessä. Kokonaisuudessaan tuulen osuus maapallolla tapahtuvasta lämmönsiirtelystä on n. 70 %. (Suomen Tuuliatlas 2012). Tuulen mukana tapahtuvaa lämmönsiirtoa kutsutaan *advektioksi*. Advektiossa lämpö siirtyy pääasiassa vaakasuunnassa ja se voi tarkoittaa myös muiden ominaisuuksien kuten kosteuden kuljetusta tuulen mukana. (Karttunen et al. 2008)

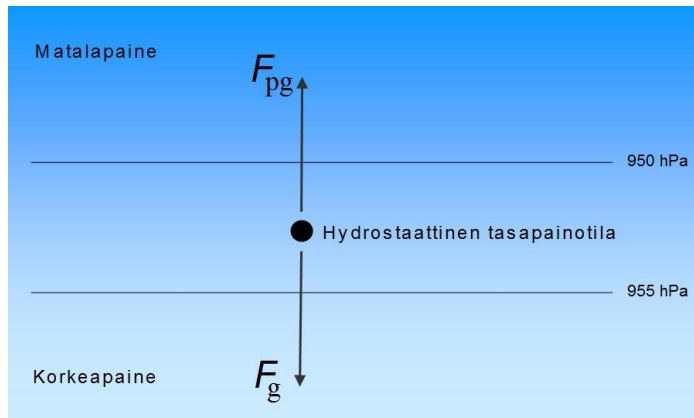
2.1.1 Tuuleen vaikuttavat voimat

Tässä kappaleessa tarkastellaan tuuleen vaikuttavia voimia. Asian helpomman ymmärrettävyyden vuoksi tarkastellaan voimia yksitellen, jonka jälkeen voimien kokonaisvaikutus on helpompi hahmottaa. Todellisuudessaan tuuli syntyy ja käyttäytyy tarkasteltavien voimien yhteisvaikutuksen johdosta.

Ilmakehässä tuulta liikuttava voima korkeapainealueesta matalapainealueeseen on painegradienttivoima (F_{pg}). Tämä voima voi olla sekä vertikaalista että horisontaalista. (Barry & Chorley 2010). Painegradienttivoima voidaan määritellä tuulen virtaukseen vaikuttavana sisäisenä voimana (Yong 2003). Gravitaatiosta johtuen lähellä maan pintaa ilma on tiheämpää ja näin ollen painavampaa ilmaa, kun taas tiheydeltään harvempi ja kevyempi ilmassa pyrkii aina ylöspäin. Gravitaatiovoima (F_g) on siis vastakkaisuuntainen vertikaaliselle painegradientille, joka nostaa ilmassaa maan pinnalta ylöspäin.

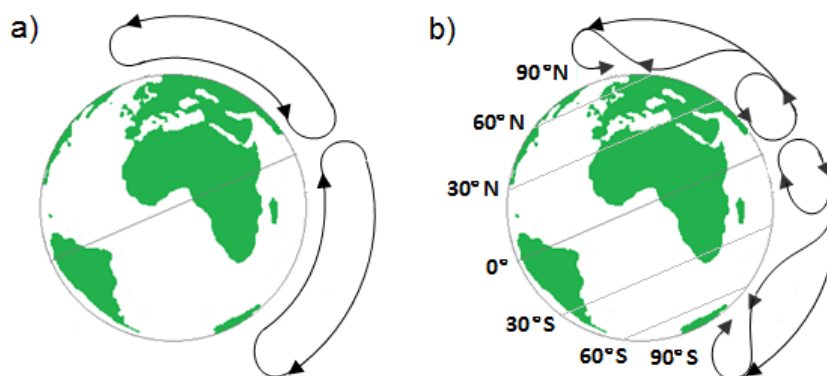
Merenpinnan korkeudella ilmanpaine on suurin, koska maan vetovoima puristaa ilmaa sitä tiiviimmäksi, mitä enemmän tarkasteltavan alueen yläpuolella on ilmassaa. Ilmakehän rakenne muodostuu, kun gravitaatiovoima pyrkii puristamaan ilmakehää kasaan ja toisaalta ilmakehän molekyylien liikkeestä aiheutuva paine pyrkii

laajentamaan ilmakehää, mikä estää ilmakehän luhistumisen. Tätä gravitaatiovoiman ja vertikaalisen painegradienttivoiman välistä tasapainotilaa kutsutaan *hydrostaattiseksi tilaksi*, jossa molemmat voimat ovat itseisarvoltaan yhtä suuret ja näin ollen kumoavat toisensa (kts. kuva 2.1). (Karttunen et al. 2008)



Kuva 2.1. Hydrostaattinen tasapainotila, jossa ylöspäin suuntautuva painegradienttivoima F_{pg} on yhtä suuri kuin alaspäin vetävä gravitaatiovoima F_g

Kun tarkastellaan tilannetta maapallon ilmakehässä, on huomioitava auringon säteilyn epätasaisesta jakautumisesta johtuvat lämpötilaerot, jotka vaikuttavat tuulen suuntaan. Jos ei huomioitaisi muuta kuin lämpötilaeroista johtuvat ilmanpaine-erot, ilmavirta liikkuisi aina päiväntasaajalta napoja kohti niin, että lämmin kevyempi ilma kulkeutuisi ylhäällä ja tiheämpi kylmempi ilma lähempänä maan pintaa. Tuulen suunta määräytyisi näin ollen kuvan 2.2a mukaisesti.

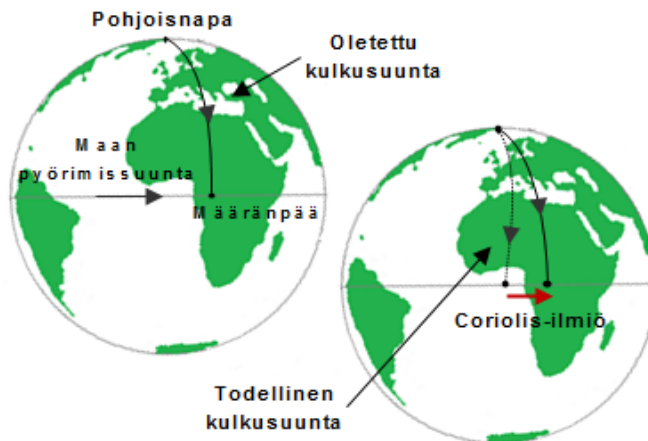


Kuva 2.2. a) Tuulen yksinkertaistettu virtausmalli, jossa tuuli kulkee lämpötilaerojen mukaisesti ja kuva b) Tuulen yksinkertaistettu virtaussuunta lämpöalueet huomioiden

Tuulen kiertokulku ei kuitenkaan selity ainoastaan sillä, että ilma yksinkertaisesti vain virtaisi päiväntasaajalta pohjois- ja etelänavoille ja takaisin. Päiväntasaajalta napaa kohti lähettäessä osa lämpimästä ilmasta vajoaa Maan pinnalle jo 30°:n leveyspiirillä. Tuulen puhaltaessa takaisin päiväntasaajalle syntyy *pasaatituulet*. Koska näin syntyvä

tuulen virtaus on jatkuvaa, pasaatituulilla on suuri merkitys ihmiskunnan energianlähteenä. Huomattava osa päiväntasaajalta lähtevästä tuulesta jatkaa kuitenkin matkaansa kohti napoja jakaantuen ylä- ja alatasen tuuliksi kuvan 2.2b:n mukaisesti. Kuten kuvasta huomataan, ylemmän ilmavirtauksen saavuttaessa maapallon navat, viilentynyt ilmamassa vajoaa kohti maan pintaa ja lähtee takaisin kohti päiväntasaajaa. (Chiras 2010, s. 20-22.)

Koska maapallo on jatkuvassa pyörimisliikkeessä, kaikkien maapallon pinnalla sijaitsevien kappaleiden liikkeen suunta on jatkuvassa muutoksessa, jolloin niiden liike on kiihtyvää. Pyörivässä systeemissä voidaan havaita voimia, jotka tekevät kappaleiden liikkeistä monimutkaisempia. Näistä tunnettuja voimia on keskipakoisvoima sekä *Coriolisvoima*, jolla on suuri vaikutus ilmakehässä tapahtuviin liikkeisiin. (Karttunen et al. 2008). Coriolisvoima johtuu maapallon pyörimisliikkeestä. Se kääntää tuulen suuntaa eteläisellä pallonpuoliskolla kulkusuunnassa vasemmalle ja pohjoisella pallonpuoliskolla oikealle, koska maapallon pyörimisliike on itään (kuva 2.3). Coriolisvoima on suurimmillaan maapallon navoilla ja heikkenee päiväntasaajalle tultaessa. (Pielou 2001). Ilmakehän virtauksissa Coriolisilmiö voidaan selvästi havaita vasta, kun tuulen liikkeet ovat suurialaisia ja pitkäaikaisia (Karttunen et al. 2008, Paasonen 2001)



Kuva 2.3. Coriolisvoiman vaikutus maapallolla

Geostrofiseksi tuuleksi sanotaan ilmavirtausta vaakasuunnassa, joka syntyy lämpötilaerojen aiheuttamista paine-eroista. Tällöin Coriolisvoima ja painegradientti ovat tasapainossa aiheuttaen tuulelle yhtä suuret vastakkaiset voimat. Tilanne, jossa tuuleen vaikuttaisi ainoastaan nämä kaksi vastakkaisuuntaista voimaa, on kuitenkin mahdollinen ainoastaan rajakerroksen yläpuolella, jolloin tuulen suuntaan ja nopeuteen ei vaikuta muita voimia. Geostrofisesta tuulesta hieman poiketen gradienttituulessa painegradientti- ja Coriolisvoima eivät ole tasapainossa, mikä aiheuttaa ilmavirtauksen kaareutumista. Epäsymmetrinen painegradientti- ja Coriolisvoimien jakautuminen aiheuttaa sen, että Coriolisvoima kääntää tuulta pohjoisella pallonpuoliskolla oikealle, jolloin tuulet kiertävät korkeapainetta myötäpäivään ja matalapainetta vastapäivään. Eteläisellä pallonpuoliskolla tuulen kiertosuunnat ovat vastakkaiset. Näin syntyy

ilmavirtausta kutsutaan *gradienttituuleksi*. (Karttunen et al. 2008). Gradienttituuli puhaltaakin tyypillisesti korkea- ja matalapainekeskuksien ympäri.

Koska geostrofinen tuuli ja gradienttituuli virtaavat rajakerroksen yläpuolella, niihin ei vaikuta kitkavoima. Maanpinnan rosoisuudesta johtuvalla kitkavoimalla on suuri vaikutus ilman liikkeisiin. Kitkavoima vaikuttaa tuulen liikkeeseen sitä hidastavasti, eli se on tuulen liikkeelle vastakkainen voima. (Barry & Chorley 2010). Ilmavirtauksen alimmat kerrokset törmäilevät maan pinnan epätasaisuuksiin, jolloin syntyvät pyörteet välittävät hidastusvaikutuksen ylempiin kerroksiin. Koska merellä kitkavoima on huomattavasti merkityksettömämpi, tuulennopeus voi olla kaksinkertainen metsäiseen sisämaahan verrattuna, vaikka paine-erot olisivatkin vertauksissa samat. (Karttunen et al. 2008)

Tämän tutkimuksen kannalta tärkeimmät tuuleen vaikuttavat voimat syntyvät *rajakerroksen* alueella. Rajakerroksella tarkoitetaan maan pinnan ja vapaan ilmakehän välistä kerrosta. Rajakerroksessa maan pinnan epätasaisuuksista johtuvat kitkavoimat aiheuttavat ilmavirtauksiin turbulensseja, kun pinta ja ilmakehä ovat vuorovaikutuksissa keskenään. Myös ilmakehän lämmön ja kosteuden vaihtelut vaikuttavat tuulen suuntaan ja nopeuteen rajakerroksessa. Rajakerroksessa ilmavirtaus onkin lähes aina turbulenttista. Rajakerros toimii ikään kuin sovittelijana maan pinnan ja ilmakehän välillä. Kun rajakerroksesta siirrytään ylöspäin, rajakerroksessa tuuleen vaikuttava kitkavoima vähenee, jolloin tuulennopeus kasvaa. Tällöin myös lämmön ja kosteuden vaihteluista syntyvät turbulenssit ovat ainoastaan ajoittaisia. (Suomen Tuuliatlas 2012)

Lisäksi rajakerroksessa esiintyy maksimituulia, jotka ovat huomattavasti nopeampia kuin virtauksen ylä- ja alapuolella olevat tuulet. Maksimituulia kutsutaan suihkuvirtauksiksi, ja niiden syntymiseen vaikuttavia mekanismeja on monia. Yleensä ilmassaan vaikuttavien voimien tasapainotila muuttuu niin, että maan kitkavoima heikkenee oleellisesti tai kun eri lämpöiset ilmassarintamat sekoittuvat nopeasti. Energiantuotantoon suunnitellut tuulivoimalat pyrkivät hyödyntämään näitä suihkuvirtauksia. Toisaalta virtaukset aiheuttavat tuulivoimaloiden suunnitteluun haasteita, koska äkilliset tuulennopeuden muutokset lisäävät tuulivoimaloilta vaadittavaa mekaanista kestävyyttä. (Suomen Tuuliatlas 2012)

Rajakerroksen korkeutta voidaan mitata ilman tasapainotilan ja sään mukaan. Normaalisti korkeus vaihtelee 0,1-2,0 km välillä. Suomessa rajakerroksen korkeus on tyypillisesti 100-1000 m välillä. Korkeutta on kuitenkin usein melko hankala määrittää ilmakehän lämpötilavaihteluiden vuoksi. (Suomen Tuuliatlas 2012)

N. 10 % rajakerroksen alaosasta on *pintakerrosta*, jossa vaikuttavat *pintatuulet*. Näihin pintatuuliin vaikuttaa hyvin paljon maaston rosoisuus, jota voidaan kuvata *rosoisuusparametrillä* z_0 , jonka yksikkö on metri (m). Rosoisuusparametri on yleinen ja merkittävä tekijä tuulivoimasta puhuttaessa ja voimaloiden tuottoennusteita määrittäessä. Rosoisuuteen vaikuttavat maaston muodot sekä alustan tyyppi. Maaston muodot vaikuttavat tuulen suuntaan ja nopeuteen, kun taas alustan tyyppi eli pintakasvillisuus ja pinnanmuodot aiheuttavat tuulen suunnalle vastakkaista kitkavoimaa jarruttaen tuulennopeutta.

Pintakerroksessa tuulennopeuden muutosta pystysuunnassa voidaan kuvata yhtälöllä;

$$v(z) = \frac{v_*}{K} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad (1)$$

jossa,

v_* on kinemaattinen pintastressi (ns. kitkanopeus)

K = von Kármán'in vakio (Suomen tuuliatlaksen mukaan suuruusluokka 0,4)

z on napakorkeus

z_0 on rosoisuusparametri

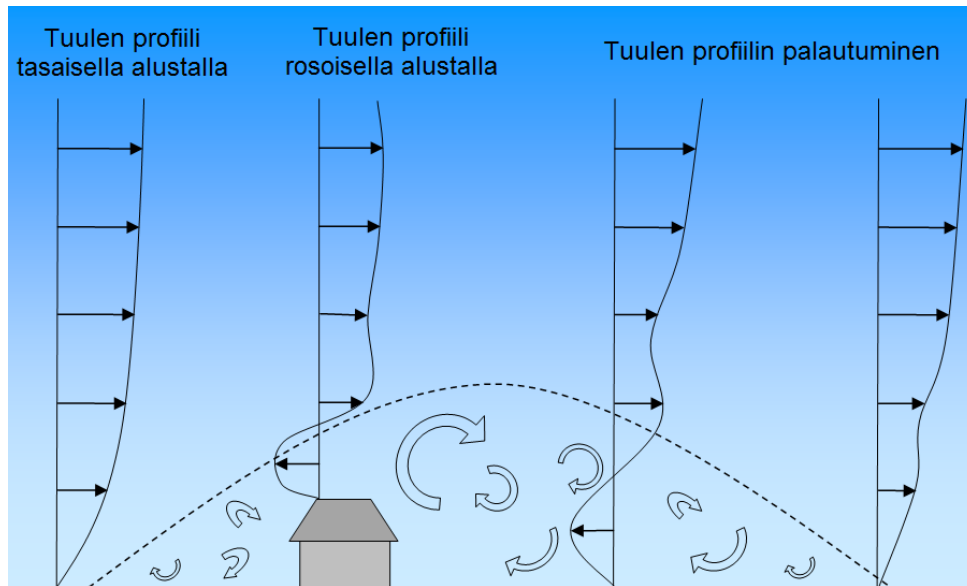
Ψ on empiirinen funktio

L on Monin- Obukhovin pituus, joka kuvaa ilman stabiilisuutta

Tämä yhtälö on voimassa pintakerroksessa, jolloin laskentaa pelkistetään siten, että maasto oletetaan homogeeniseksi eli maaston tyyppi, rosoisuus tai sijainti eivät vaihtele. $\Psi \left(\frac{z}{L} \right)$ kuvaa korkeussuunnassa ilmakehän stabiiliuden vaikutusta tuuliprofiiliin. Neutraalissa eli stabiilissa säätilanteessa termi saa arvon nolla, joten yhtälö sievennyy muotoon;

$$v(z) = \frac{v_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \quad (2)$$

Homogeenisessä maastossa tuulennopeus heikkenee pintakerroksessa korkeuteen nähden logaritmisesti vaikka tuulen suunta ei muuttuisikaan. Tuulen ilmavirtauksen mallinnussovelluksissa tämä logaritminen tuuliprofiili on yleisesti oletusarvo. Yhtälö saavuttaa nollakorkeuden silloin, kun korkeus ja rosoisuusparametri ovat yhtä suuret ($z = z_0$) eli matemaattinen kaava antaa korkeudeksi nolla, vaikka todellisuudessa asia ei olisikaan näin. Jotta kaavaa voidaan soveltaa epätasaisessa maastossa, on nollatasoa siirrettävä todellisuutta vastaavaksi. Nollatason siirtymää kuvataan symbolilla d ($z = z_0 + d$). Esimerkiksi tuulivoimalan napakorkeutta laskettaessa metsäiselle sijainnille käytetään yleisesti nollatason korkeuden korjaamiseen arvoa $d = 0,7 \times$ puuston korkeus. (Suomen Tuuliatlas)



Kuva 2.4. Maaston rosoisuudesta johtuen ilmavirtaus hidastuu ja tulee pyörteiseksi pintakerroksessa

Rosoisuus vaikuttaa siis olennaisesti rajakerrokseen ja sen korkeuden vaihteluihin, kuten kuvasta 2.4. nähdään (Tammelin 2006). Koska mikrotuulivoimaloiden maaston korkeus on suhteellisen matala ympäröivään maastoon nähden, rosoisuuden merkitys on suuri tuulivoiman tuotantoa ajatellen. Epäedullisia eli rosoisia sijoituspaikkoja mikrotuulivoimaloille ovat mm. kaupunkialueet, jyrkkäseinäiset rinteet ja korkeiden metsien reuna-alueet. On kuitenkin huomioitava, että rosoisuuskerroin voi vaihdella vuodenaikojen mukaan jää-, vesi- ja lumipeitteiden johdosta. Myös vesistöissä rosoisuuden arvoon vaikuttaa aallokon korkeus. Taulukosta 2.1. nähdään yleisimmin käytettyjä rosoisuuskertoimia. Rosoisuuskerroin tulee kuitenkin aina määrittää tapauskohtaisesti, jos halutaan tarkka mallinnus. (Tuulivoimatieto)

Taulukko 2.1. Yleisimpiä maastotyyppien rosoisuuskertoimia (Tuulivoimatieto)

Maastotyyppi	Z_0 (m)
Tyyne sisäjärvi	0.000023
Tasainen meren jää	0.0004
Rikkonainen meren jää	0,0015-0,004
Laaja peltoaukea	0.03
Luminen laaja peltoaukea	0.03
Viljapello (vilja 60 cm)	0,2-0,9
Metsä/rannikko	0,3-3
Täysikasvuinen havumetsä	1.5
Suurten kaupunkien keskusta	1-3

Tuulivoimakirjallisuudessa on johdettu pintakerroksen logaritminen tuulennopeuden muutoksen kaava 2 (Gipe, 2004, s. 55.) muotoon;

$$v(z) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (3)$$

jossa,

v_{ref} on alkuperäinen tuulennopeus

z_{ref} on alkuperäinen napakorkeus

z on tarkasteltava napakorkeus

z_0 on tarkasteltavan pinnan rosoisuusparametri

Kaavalla pystytään siirtämään jo tiedossa olevan napakorkeuden tuulennopeus halutulle korkeudelle, kun tiedetään maaston rosoisuusparametri. Kaava on erittäin käyttökelpoinen pientuulivoimaloille, koska esimerkiksi Suomen Tuuliatlas kertoo tuulen keskimääräiset nopeudet ainoastaan yli 50 metrin korkeuksissa. Kaavan avulla kuluttaja pystyy itse arvioimaan tuuliprofiiliin vaikuttavaa muutosta, kun tarkasteltava napakorkeus on alkuperäistä tarkastelukohtaa matalammalla.

2.2 Tuulivoima teoriassa

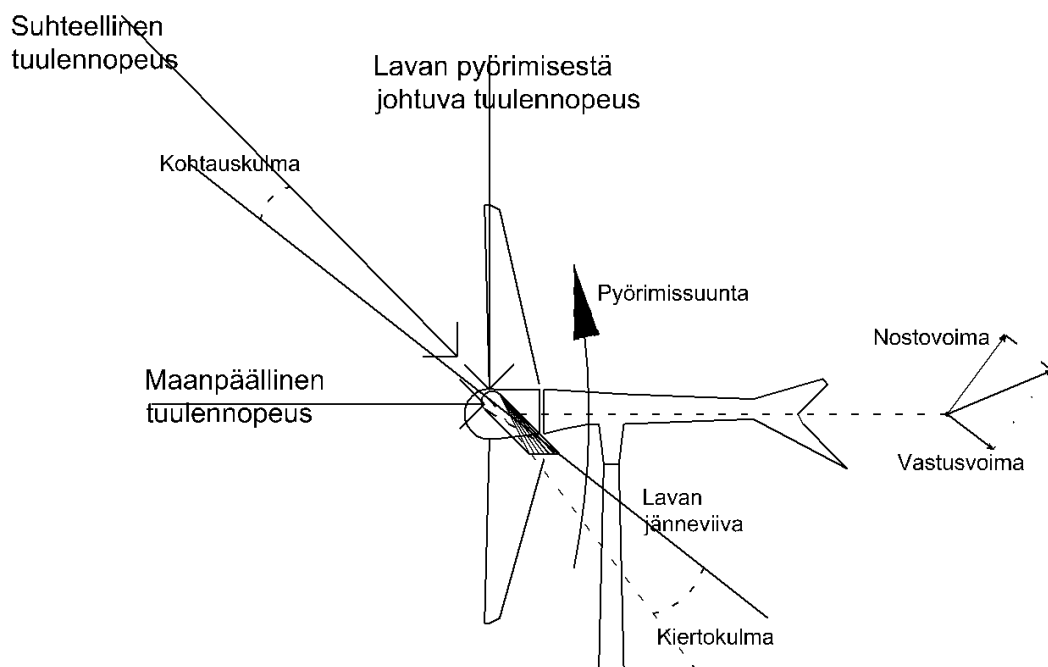
Tuulivoima tarkoittaa tuulen liike-energian talteenottoa ja sen muuntamista mekaaniseksi energiaksi ja siitä edelleen sähköenergiaksi. Jotta liike-energia voidaan muuttaa mekaanisen energian muotoon, tarvitaan tuulivoimalan siipien liikettä synnyttävä ja ylläpitävä voima. Siipien liikkeen tehtävä on hidastaa tuulen liike-energiaa, ja tuulesta otettu energia voidaan muuttaa sähköenergiaksi. Tässä työssä ei syvennyttä tarkastelemaan tuulivoimalan aerodynaamista suunnittelua, mutta on hyvä ymmärtää perusidea liikkeen synnystä. Lisäksi selvitetään teoriassa ilmapirrasta saatava tehon käsite, siihen vaikuttavat tekijät sekä teoreettinen maksimihyötysuhde. Tarkastelut rajataan vaaka-akselisen potkurimallin tuulivoimaloihin.

2.2.1 Virtauksen dynamiikkaa

Tuulivoimalan toiminnan kannalta on oleellista ymmärtää *suhteellisen tuulen* käsite. Asiaa voidaan havainnollistaa purjevene-esimerkillä. Jos aallokon suunta on pohjoisesta etelään, voidaan päätellä, että tämä on maanpäällisen tuulen suunta. Vene liikkuu lännestä itään päin, joten aallokko käy suoraan vasten veneen vasenta kylkeä. Kannella olevien matkustajien kasvot ovat veneen etenemissuuntaan ja näin he tuntevat suhteellisen tuulen kasvoissaan. Suhteellisen tuulen suunta määräytyy näiden kahden voiman vuorovaikutuksesta. Jos vene olisi hetken paikallaan, *kohtauskulma* olisi 90 astetta ja tuuli kävisi suoraan pohjoisesta päin. Matkustajat tuntisivat ainoastaan maanpäällisen tuulen kasvoissaan. Kun veneen nopeutta lähdetään kasvattamaan, sen

liikkeestä johtuva ilmavirtauksen määrä kasvaa ja kohtauskulma lähtee pienenemään. Jos nämä voimat ovat yhtä suuret, suhteellisen tuulen kohtauskulma on 45 astetta, eli suuntana koillisesta lounaaseen. Kohtauskulman ollessa pieni on maanpäällisen tuulen osuus pieni suhteessa veneen aiheuttamaan ilmavirtaukseen. (Gipe, 2004, s. 111–112.)

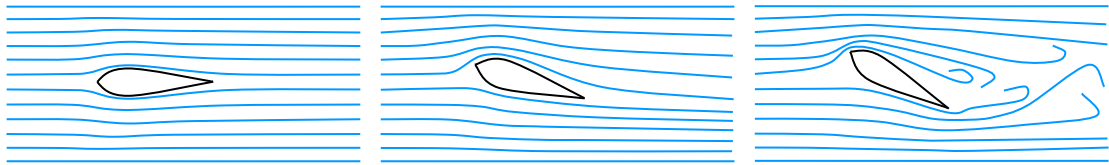
Kohtauskulmalla on oleellinen vaikutus tuulivoimaloiden kykyyn vähentää ilmavirtauksen energiaa. Kuvaan 2.5 on piirretty kolmilapainen potkurimallinen tuulivoimala sekä siihen vaikuttavat tuulet ja voimat. Lisäksi kuvaan on merkitty tuulivoimalan lapaja käsitteleviä termejä ja niiden merkityksiä. Kohtauskulma määritellään lavan poikkileikkauksen keskeltä menevän jänneviivan ja suhteellisen tuulennopeuden väliseksi kulmaksi. Teollisen kokoluokan voimaloissa kohtauskulmaa säädellään vallitsevalle tuulennopeudelle optimaaliseksi. Pientuulivoimaloissa kohtauskulma on aina lähes vakio. (Gipe, 2004)



Kuva 2.5. Potkurimallisen tuulivoimalan lapihin vaikuttavat tuulet ja voimat

Kuvassa 2.6 on esitetty ilmavirtauksen ja lavan välisen kohtauskulman vaikutusta siipeen kohdistuvan *nostovoiman* syntymisessä. Kun ilmavirtaukseen asetetaan virtauksen suuntainen levy tai lapa, tämä ei juuri vaikuta tuulen virtaukseen. Tällaista virtausta kutsutaan *laminaariseksi* eli pyörteettömäksi virtaukseksi. Laminaarisen virtauksen aiheuttama kitka on erittäin pieni, erityisesti silloin, kun liikettä vastustavien voimien minimoimiseksi lavat suunnitellaan pisaranmallisiksi. Laminaarisessa virtauksessa lapaan ei kohdistu nostovoimaa, koska ilma kulkee symmetrisesti lavan molemmin puolin. Ainoa lapaan vaikuttava voima on tällöin *vastusvoima*, joka painaa siipeä taaksepäin. Kun ilmavirtauksen ja tuulen välinen kohtauskulma kasvaa, siiven yläpuolinen ilmavirta kulkee pidemmän matkan kuin alemmanpuoleinen ilmavirta. Siiven yläpuolelle syntyy alipaine, jolloin siipeen alkaa vaikuttaa myös ylöspäin suuntautuva voima ja lavan ylä- ja alapuolen välinen paine-ero pienenee (kts. kuvat 2.5

ja 2.6). Virtaus pysyy kuitenkin edelleen laminaarisena, jolloin lapa ei vaikuta merkittävästi tuulen liikesuuntaan. (Gipe, 2004)



Kuva 2.6. Lavan kohtauskulman muutos ilman virtaukseen ja nostovoimaan

Useita vuosisatoja on jo tiedetty, että purjevereen saa kulkemaan tuulta nopeammin. Jotta tämä on mahdollista, on oltava optimaaliset nosto- ja vastusvoimat. Tämä tarkoittaa mahdollisimman suurta nostovoimaa ja pientä vastusvoimaa. Tuulivoimaloiden lavoilla ja purjevereillä on tässä suhteessa paljon yhteistä. Purjevere saavuttaa maksimaalisen nopeuden eli optimaaliset nosto- ja vastusvoimat kun se menee kohtisuorassa tuulen lävitse. Jos purjevere menisi tuulen mukana tuulen suuntaisesti, sen maksiminopeus ei voisi ylittää tuulennopeutta. Tällöin kuitenkin ilmavirtauksessa hyödynnettäisiin ainoastaan maan päällisen tuulen energia. Sama ilmiö voidaan havaita pystyakselisista tuulivoimaloista, joissa tuotto jää paljon vaaka-akselista tuulivoimalaa pienemmäksi. Vaaka-akselisissa tuulivoimaloissa hyödynnetään lavan aiheuttama ilmavirtaus sekä maan päällisen tuulen energia lävistämällä ilmavirtaus kohtisuoraan tuuleen nähden. Näin saavutetaan paras optimaalinen voimasuhde kuten purjevereelläkin. (Gipe, 2004, s. 111–112.)

Jos kohtauskulma kuitenkin nousee liian suureksi, ilmavirta muuttuu turbulენტiseksi, koska ilmavirtaus ei enää kulje lavan yläpintaa pitkin. Lavan yläpuolella vallitseva alipaine tasoittuu ja lavan nostovoima laskee merkittävästi. (Karttunen et al. 2008). Ilmiötä kutsutaan myös nimellä *sakkaus*. Tuulivoimaloissa *myrskysuojauksista* on myös toteutettu hyväksikäyttämällä edellistä ilmiötä.

Tuulivoimaloiden lavat on yleensä suunniteltu siten, että ne kapenevat kärkeä kohti ja ovat pienellä kierteellä pituussuuntaansa nähden. Kuvassa 2.5 jälkimmäistä kuvataan *kiertokulmalla*. Kiertokulma on suurimmillaan lavan tyvessä ja pienenee kohti kärkeä. Kierteisyydellä on usein muutamia syitä, josta ensimmäisenä voidaan mainita myrskysuojauksen sakkausilmiön käyttö. Lapa pystytään suunnittelemaan siten, että se ei sakkaa koko matkalta, vaan joltain siiven osalta. Näin tuulivoimala ei sakkaussäädössä täysin lakkaa tuottamasta kovilla tuulilla, vaan se pystyy hyödyntämään siipeä joltain osalta.

Toinen merkittävä syy kierteisyyteen on lavan pyörimisliikkeestä aiheutuvan ilmavirtauksen kasvu navasta siipien kärkeen mentäessä. Jos lapaprofiili olisi suora ja kohtauskulma olisi lavan tyvessä optimaalinen, lapojen kärjissä tämä optimaalisuus ei toteutuisi, koska kehänopeus ja sitä myötä lapojen aiheuttama ilmavirtaus kasvavat sitä suuremmaksi mitä kauempana keskipisteestä ollaan. Lاپoja ei kuitenkaan suunnitella siten, että kohtauskulma olisi ideaalinen lavan koko matkalta. (Gipe, 2004, s. 113.)

Lapojen *kehänopeus* on suunniteltu jokaiselle tuulivoimalamallille ominaiseksi, jotta kohtauskulma pysyisi optimaalisena. Kehänopeus ilmoitetaan yleisesti suhteessa maanpäälliseen tuuleen ja siitä käytetään nimitystä *kärjen nopeussuhde* (λ). (Gipe, 2004, s. 116–117.)

$$\lambda = \frac{v_{kehä}}{v} \quad (4)$$

Pienissä tuulivoimaloissa, joissa lapojen säätöä ei ole, kärjen nopeussuhde tulee pitää mahdollisimman vakiona, jotta kohtauskulma pysyisi mahdollisimman optimaalisena. Tämä on mahdollista, kun kehänopeus ja maanpäällinen tuulenopeus ovat synkronissa keskenään. (Gipe, 2004, s. 116–117.)

2.2.2 Ilmavirtauksen mallintaminen

Tuulisuus vaihtelee hyvin paljon vuositasolla, ja onkin vaikeaa ennustaa tulevien vuosien tuulisuutta. Tuulivoimatilastoissa on esitetty eri alueiden tuulenopeuden keskiarvoja. Nämä tuulenopeuden keskiarvot eivät kuitenkaan kerro tarkempaa tietoa eri tuulenopeuksien esiintymistiheydestä. On kuitenkin mahdollista mallintaa vuoden sisällä tapahtuvien tuulenopeuden esiintymistodennäköisyyksiä matemaattisilla kaavoilla. Yleinen työkalu tuulenopeuden todennäköisyyksien kuvaamiseen on tilastollinen Weibull-jakauma, jota käytetään mm. tuulisuuden mallintamisohjelmissa. (Burton et al., 2001, s.185–189.; Suomen Tuuliatlas; Tuulivoimatieto)

Jakauman kaava on seuraava;

$$F(v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (5)$$

$F(v)$ on hetkellisarvofunktio, jossa v tarkoittaa tuulenopeutta. Funktiota kuvataan kahdella parametrilla; C on skaalausparametri ja k on muotoparametri. Muotoparametri (k) kuvaa keskiarvon vaihtelua ja skaalausparametri (C) liittyy tuulenopeuden vuosittaiseen keskiarvoon seuraavan kaavan avulla; (Burton et al., 2001, s.185–189.)

$$v_{ka} = C \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (6)$$

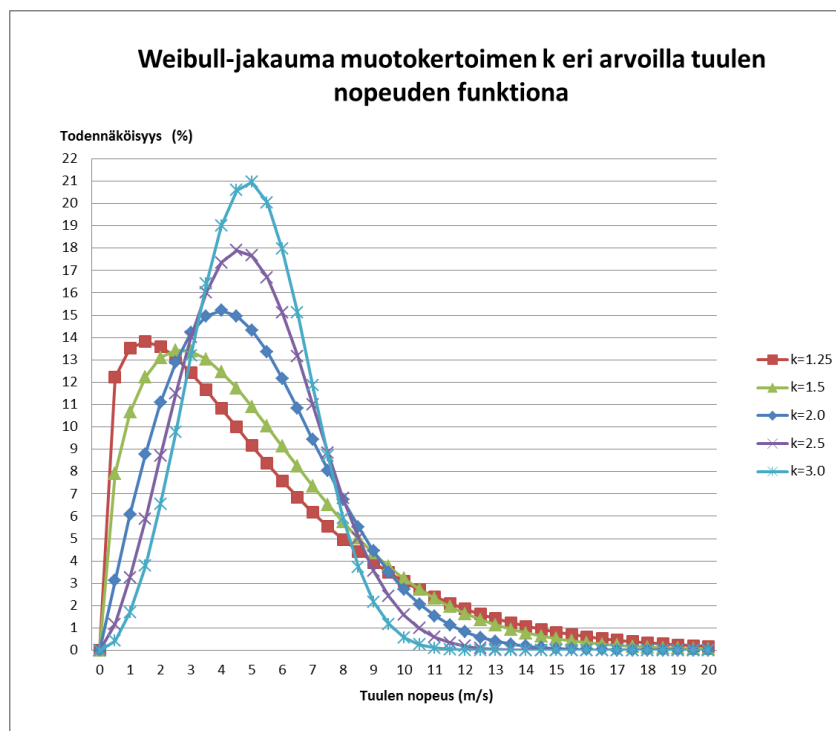
Tässä Γ on yleinen gamma-funktio ja v_{ka} on tuulenopeuden vuosittainen keskiarvo. Yhdistämällä edellä olevat kaavat ja derivoimalla tulosta tuulenopeuden v suhteen saadaan tuulenopeuden esiintymistodennäköisyyttä f kuvaava funktio; (Burton et al. 2001, s.185–189.)

$$f(v) = -\frac{dF(v)}{dv} = k \frac{v^{k-1}}{c^k} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (7)$$

Lauseketta kertomalla tuulennopeudella ja integroimalla jakson yli saadaan edellä mainittu tuulennopeuden vuotuinen keskiarvo v_{ka} ;

$$v_{ka} = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (8)$$

Kuvassa 2.7. on havainnollistettu muotoparametrin k vaikutusta Weibull-jakauman muotoon. Weibull-jakauman tuulen keskiarvoksi (v_{ka}) on annettu 5 m/s jokaisessa esimerkissä. Muotoparametrin k arvot on annettu väliltä 1,25–3,0 ja näillä arvoilla on skaalausparametri C saanut arvot väliltä 5,4–5,6. Jakauman erikoistapaus on Rayleigh-jakauma, jossa muotoparametrin arvo $k=2$. Arvo on todettu hyväksi kuvaamaan tuulen jakaumaa monissa eri kohteissa. Suomen oloissakin tuulen tyypillinen frekvenssijakauma saadaan Rayleigh-jakumalla. Suuremmilla muotokertoimen arvoilla, kuten $k=2,5$ ja $3,0$ saadaan pienempi vaihtelu tuulen keskiarvonopeuden ympärille. Silloin kyseessä ovat sijainnit, joissa tuulennopeus on hyvin muuttumaton. Pienemmillä k arvoilla, kuten $1,25$ ja $1,5$ tuulen vaihtelu taas on suurta tuulen keskiarvonopeuden ympärillä. (Burton et al., 2001, s.185–189.; Suomen Tuuliatlas; Tuulivoimatieto)



Kuva 2.7. Weibull-jakuma eri muotoparametrien arvoilla, kun tuulennopeuden keskiarvo on 5 m/s.

On kuitenkin huomioitava, että vaikka Weibull-jakauman on todettu esittävän hyvin tuulennopeuden yleisyyksiä, Weibull-jakauma on kuitenkin laskettu vuoden tuulennopeuksien keskiarvosta ja näin ollen jakauma ei välttämättä anna luotettavia arvoja. Vuotuisten tuulennopeuksien keskiarvot vaihtelevat paljon ja jo vuoden sisäisetkin olosuhdevaihtelut eivät korreloi eri vuosien välillä. Lisäksi tuulen keskiarvomittauksen sijaintipaikka ja sen maaston muodot sekä mittauskorkeus ovat

huomioitavia tekijöitä, jos jakauman arvoja käyttää tuulen energiasisällön tai tuulivoimaloiden tuottoennusteen laskemisessa. (Burton et al., 2001, s.185–189.; Suomen Tuuliatlas; Tuulivoimatieto)

2.2.3 Ilmavirtauksen teho ja pinta-alamenetelmä

Ilmavirtauksesta saatavan tehon kaava on muotoa;

$$P_i = \frac{1}{2} \rho A_{pp} v_0^3 \quad (9)$$

jossa

ρ on ilmantiheys (1.225 kg/m³)

A_{pp} on pyyhkäisyypinta-ala

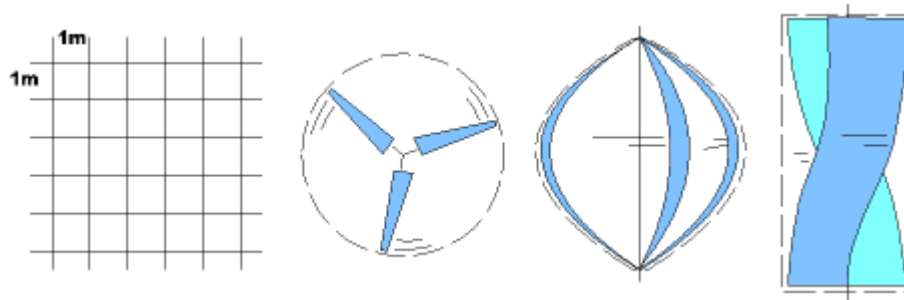
v on tuulennopeus

(Burton et al., 2001, s. 6-7.)

Kaavasta nähdään, että tuulivoimalaa ja paikkaa valittaessa pystytään vaikuttamaan helposti tehon kaavassa kahteen tekijään, jotka ovat pyyhkäisyypinta-ala ja tuulennopeus. Suurin yksittäinen tekijä tehon muutokseen on kuitenkin tuulennopeus, sillä tuulesta saatava teho on suoraan verrannollinen nopeuden kolmanteen potenssiin. Jos pystytään paikan valinnalla samaan 10 % lisää ilmavirtausta, niin tuulivoimala tuottaa 33 % enemmän tehoa. Ilmavirtauksiin ei juurikaan pystytä vaikuttamaan, mutta tuulivoimaloiden oikealla sijoittelulla ja niiden korkeudella on tässä yhteydessä merkittävä vaikutus. Koska mikrotuotannossa tuulivoimalat sijaitsevat pintakerroksessa ja siellä vallitsevat pintatuulet, tuulennopeus kasvaa lähes eksponentiaalisesti kitkan pienentyessä ja korkeuden kasvaessa. Tuulesta saatavan teho muuttuu näin ollen oleellisesti korkeuden muuttuessa.

Kaavasta 9 huomataan myös, että tuulivoimalan tuottama teho on suoraan verrannollinen potkurin pyyhkäisyypinta-alaan (kuva 2.8). Pyyhkäisyypinta-ala määritellään lapojen/siipien halkaiseman pinta-alan mukaan. Teoreettisesti 10 %:n muutos pinta-alassa vaikuttaa tehon muutokseen 10 %:lla. Mitä suurempi pyyhkäisyypinta-ala on, sitä enemmän tuuliturbiini voi ottaa talteen tuulesta saatavaa energiaa. Onkin suositeltavaa, että sopivaa tuulivoimalaa valittaessa ostaja kiinnittää huomiota tuulivoimalan pyyhkäisyypinta-alaan eikä ainoastaan ilmoitettuun generaattorin nimellistehoon. (Chiras 2010)

Lisäksi on myös huomioitava, että annettu ilman tiheys 1,225 kg/m³ on laskettu standardi-ilmakehässä merenpinnan tasolla (1atm) 15 asteen lämpötilassa. Kyseistä ilmantiheyden arvoa käytetään yleisesti tuulivoimaloiden tehon ja energian tuottoennusteissa. Vuositasoisilla ennusteilla tällä yksinkertaistamisella ei saada tehon (P_i) tuloksiin merkittäviä laskentaepätarkkuuksia, mutta tarkemmissa lyhyempijaksoisissa ennusteissa virhemarginaali kasvaa. (Tuuliatlas)



Kuva 2.8. Tuulivoimalan tuottama teho on suoraan verrannollinen sen potkurin pyyhkäisy-pinta-alaan (Finnwind, tuulivoimalan ostajan muistilista)

Tuulivoimaloiden energian tuottoennusteita laskiessa yksi yleisin tapa on laskea tuulivoimalan siipien pyyhkäisemä pinta-ala ja laskea kaavalla 11 tätä pinta-alaa vastaava ilmavirtauksen energiasisältö. Laskutavassa ei huomioida tuulivoimalaa tai sen ominaisuuksia sen enempää, vaan ainoastaan selvitetään tehon kaavalla, mikä olisi maksimissaan energia, joka voitaisiin saavuttaa pyyhkäisy-pinta-alalla. Tätä arviointitapaa kutsutaan pinta-alamenetelmäksi. (Gipe, 2004, s. 70–76.). Seuraavissa tarkasteluissa on kuitenkin huomioitu generaattorin tehon asettama tuottorajoitus pinta-alamenetelmälle.

Yhden tuulivoimalavalmistajan mukaan omakotitalokäytössä tuulivoimalan pyyhkäisy-pinta-alaksi suositellaan noin 20 m^2 , joka vastaa potkurimallisessa voimalassa 2,5 metrin siiven pituutta (Finnwind). Saman valmistajan tuulivoimaloiden generaattorin nimellinen teho mainitulla pinta-alalla on 4 kW. Kuvaan 2.9 on otettu kappaleessa 2.2.1 esille otettu tuulen Weibull-jakauma. Jakauma on laskettu tuulen keskinopeudella 5 m/s ja muotoparametrin (k) arvona on käytetty lukua 2. Jakauma esitettiin edellä prosentteina ja kuvassa 2.10. todennäköisyys on kerrottu vuoden tunteina (8760 h). Tarkastelussa ei siis huomioida huolto- tai muita keskeytystunteja, vaan ajatellaan, että voimala on toimintakunnossa vuoden jokaisena tuntina.

Energian tuottoennusteen jakauma saadaan, kun tiedetään nämä eri tuulennopeuksien tuntimäärät (h) sekä teho kullekin tunnilla erikseen (kaava 10). (Burton et al., 2001, Gipe, 2004, s.70–76.). Esimerkissä ilmantiheytenä ρ on käytetty $1,225 \text{ kg/m}^3$ ja siiven pituutena 2,5m, joka vastaa pinta-alana $19,6 \text{ m}^2$.

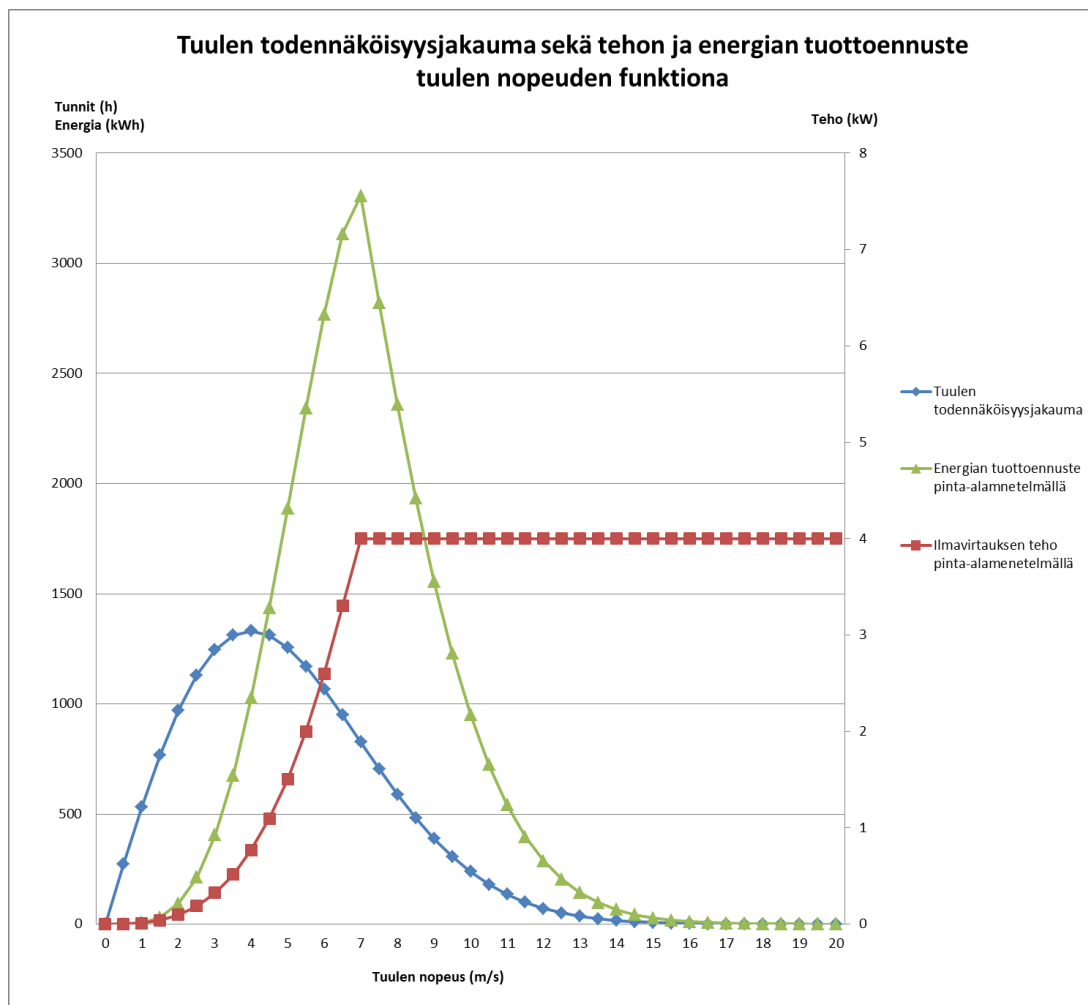
$$E_i = (f_i \times h_a) \times P_i = (f_i \times h_a) \times \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v_i^3 \quad (10)$$

Kuvasta 2.9 voidaan todeta, että Weibull-jakauma antaa tuulennopeuksille 2-6,5 m/s korkeimmat todennäköisyydet, n.1000–1300 h vuodessa. Tehon kaava 9 annetuilla lähtöarvoilla on myös piirretty kuvaajaan. Tarkastelussa käytetään tehon maksimina pientuulivoimalan generaattorin nimellistehoa, joka on 4 kW. Kuten jo kaavasta 9 huomattiin, ilmavirtauksen tehoon vaikuttavin tekijä on kuitenkin tuulennopeus v , jonka vaikutus on kuutiollista, joten kuvaajasta tulee eksponenttikuvaaja. Tarkasteltaessa näitä kuvaajia vielä samanaikaisesti, huomataan, että ilmavirtauksesta saatava maksimiteho on todella vähäistä pienillä tuulennopeuksilla. Esimerkkinä otetaan tuntijakaumasta

kaksi eri pistettä 2 m/s ja 6 m/s, joissa kummassakin tuulee vuodessa n. 1000 tuntia. Pisteessä 2 m/s saadaan tehoksi n. 100 W lähtöarvoilla ja pisteessä 6 m/s vastaavalla teholla 2,6 kW. Voidaan todeta, että ilmavirtauksen tilavuus ja sitä kautta sen teho ovat hyvin pieniä alhaisilla tuulilla. Ilmavirtauksen tilavuuden vaikutus näkyy myös energianjakauman kuvaajan huipun siirtymisellä korkeammille tuulennopeuksille kuin mitä tuulijakauman huippu oli. Suurin tuottoennuste saadaan pinta-alamenetelmällä tuulennopeuksille 6-7,5 m/s. Tuulen todennäköisyys on näillä nopeuksilla noin 10 % luokkaa.

$$E_a = \int_0^{v_{max}} E_i dv \quad (11)$$

Integroimalla energijakaumaa tuulennopeuden suhteen saadaan laskettua ilmavirtauksen energiasisältö vuoden aikana. Esimerkissä tulos on n. 15 000 kWh, joka vastaa ilmavirtauksen maksimaalista energiasisältöä annetuilla Weibull-parametreilla, 2,5 metrin lavan pituudella sekä generaattorin maksimiteholla (4 kW).



Kuva 2.9. Tuulivoimala tuottoennuste tehon- ja tuulen todennäköisyysjakaumasta pinta-alamenetelmällä

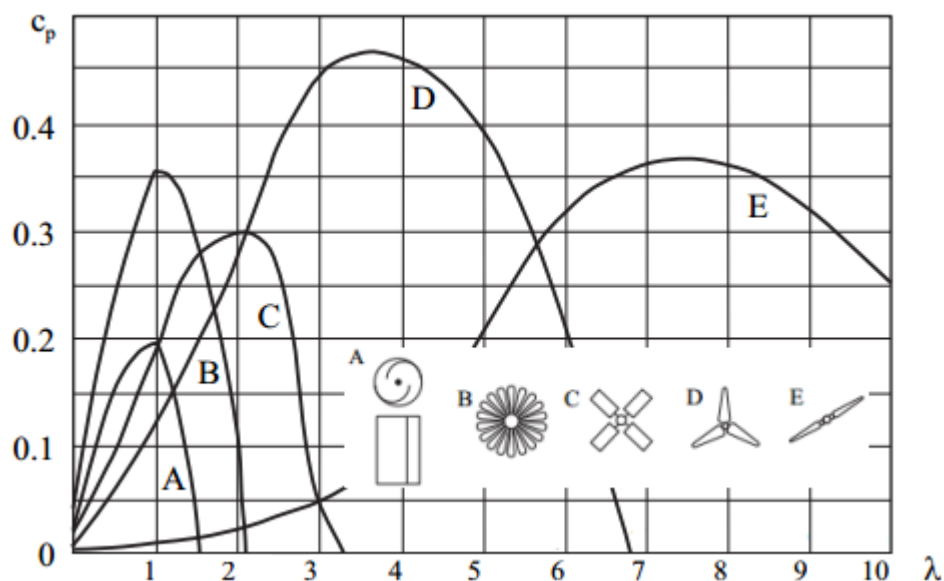
2.2.4 Hyötysuhde ja Betzin laki

Teoriassa voidaan laskea maksimiarvo sille hyötysuhteelle, jolla pystyttäisiin muuttamaan ilmavirtauksen energiasisältöä muuhun energiamuotoon potkurimallisissa vaaka-akselisissa tuulivoimaloissa. Tätä hyötysuhdetta kuvataan *Betzin lailla*.

$$C_{P \max} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (12)$$

Kaava tarkoittaa, että ideaalisella potkurimallisella tuulivoimalalla saataisiin 59,3 % tuulen ilmavirrasta muutettua tehoksi. Käytännössä ilmavirtausta ei kuitenkaan pystytä kitkattomasti ja ilman pyörteitä jarruttamaan. Tuulivoimalaa ei myöskään voida ohjata tuulta kohden jokaisella ajan hetkellä. (Burton et al. 2001, s. 43–45.)

Erityyppisten tuulivoimaloiden tehokertoimia voidaan vertailla kuvasta 2.10. Tehokertoimeen vaikuttaa tuulivoimalan rakenne ja aerodynamiikka. Vaaka-akselisissa tuulivoimaloissa päästään 0,3–0,5 tehokertoimiin. Pystyakselisissa tuulivoimaloissa tehokerroin on yleensä huomattavasti pienempi, muutamasta prosentista muutama kymmeneen prosenttiin. (Burton et al. 2001, s. 43–45.)



Kuva 2.10. Erityyppisten tuulivoimaloiden tehokertoimia (Vihriälä, 2006, s. 14.)

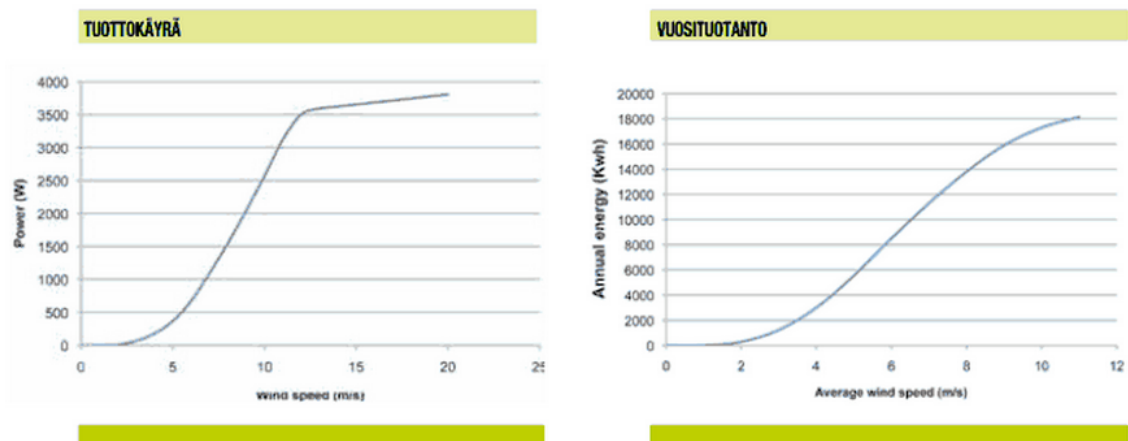
Kuvasta 2.10 nähdään, että paras hyötysuhde saavutetaan kolmilapaisella potkurimallisella tuulivoimalalla. On kuitenkin huomioitava optimaalisen kärjen nopeussuhteen merkitys. Kolmilapainen tuulivoimala tulisi suunnitella siten, että potkurin kehänopeus suhteessa maanpäälliseen tuulennopeuteen olisi noin 3-4 luokkaa. Kuten kuvasta huomataan, muiden tuulivoimalatyyppeiden hyötysuhteet jäävät alhaisemmiksi.

2.2.5 Ilmavirtauksen energiasisältö tehokäyrämenetelmällä

Tuulivoimaloiden valmistajat esittelevät ja myyvät tuotteitansa muutamilla argumenteilla. Generaattorin tehon tuotto tuulennopeuden suhteen, kuvaajan esittäminen sekä pieni taulukko ominaisuuksista ovat yksi yleisempiä tapoja. Tehon tuoton ja tuulennopeuden keskinäisistä suhteista kertovaa kuvaajaa nimitetään yleisesti tehokäyräksi.

Tehokäyrä antaa hyvän mahdollisuuden tutkia kyseisen tuulivoimalan tuottoa sijaintipaikan tuuliolosuhteisiin suhteutettuna. Loppukuluttajan on kuitenkin varmistuttava siitä, että tehokäyrä luotettavuus on varmistettu jonkin ulkopuolisen testaajan toimesta. Kuluttaja tarvitsee tehokäyrän lisäksi sijaintipaikan tuulitiedoista ainakin tuulen vuotuisen keskiarvon tuulivoimalan napakorkeudelta sekä muotokertoimen k arvon, jos maasto on hyvin poikkeava normaalista maaston muodoista. Kyseessä olevasta tuulivoimalasta on oleellista myös selvittää käyntiinlähönnopeus.

Valmistajat esittelevät joskus myös vuotuisen energiantuoton odotuksen laskettuna tehokäyrän perusteella keskimääräisen tuulennopeuden suhteen. Energiantuotannon kuvaajan lähtöarvoina toimii tuulennopeudessa Weibull-jakauma muotoparametrilla $k=2$ (Rayleigh-jakauma) ja ilmatiheys ρ on esitetty 15 °C:ssa, joka vastaa 1,225 kg/m³. Kuvassa 2.11 on esitetty tässä työssä tutkittavan generaattorin Wind Spot 3,5 kW teho- ja tuottokuvaaja.

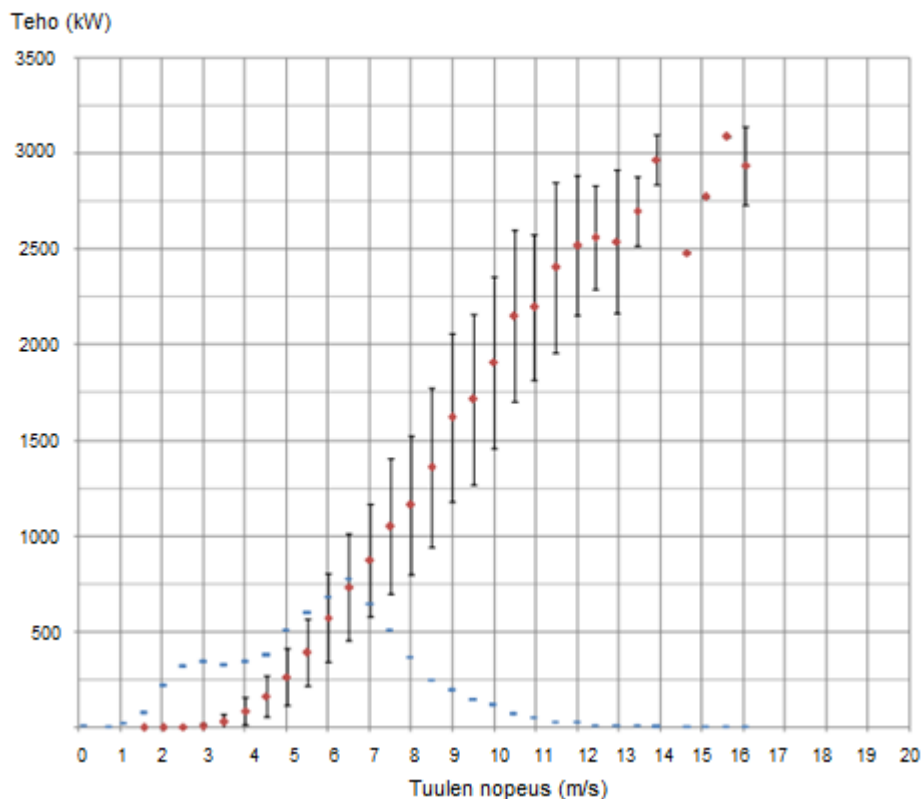


Kuva 2.11. Wind Spot 3,5 kW tuulivoimalan tuottokäyrä tuulennopeuden funktiona ja vuosituottoarviotuulen keskinopeuden suhteen (Kodin Vihreä Energia Oy)

Yksi riippumaton pienten tuulivoimaloiden tutkimuskeskus SEPEN sijaitsee Etelä Ranskassa Välimeren rannikolla. Testikentällä voidaan testata 1-10 kW tehoisia tuulivoimaloita. Valmistajien suostumuksella tutkimusraportit julkaistaan SEPEN verkkosivuilla; www.sepen-montplaisir.fr. Keskeisempiä tutkimusalueita ovat tuulivoimaloiden tuotannon- ja äänen mittaus, sekä luotettavuuden ja turvallisuuden tutkiminen. (SEPEN)

WindSpot 3,5 kW generaattoria on tutkittu SEPEN tutkimuskeskuksessa 8/2009-3/2010. Raportin mittaustulokset on otettu aikavälillä 15.1.2010- 26.2.2010. Kuvassa 2.12 on SEPEN 19.2. – Sonkyo Energy 3,5 kW raportista tehty tehokäyrän kuvaaja. Kuvaajassa mustat pystysuuntaiset janat edustavat eri mittaustapahtumia, jotka on mitattu samassa tuulennopeudessa. Punaiset pisteet ovat saman tuulennopeuden sisällä mitattuja tehon keskiarvoja ja siniset pisteet kertovat mittaustulosten lukumäärän eri tuulennopeuksilla. (SEPEN). Vertaamalla kuvaajaa valmistajan kuvaajaan huomataan hieman matalammat tuottotehot eri tuulennopeuksilla. Ainoastaan, jos tarkastellaan mittaustulosten tehon huippuarvoja, päästään lähelle valmistajan antamaa tehokäyrää.

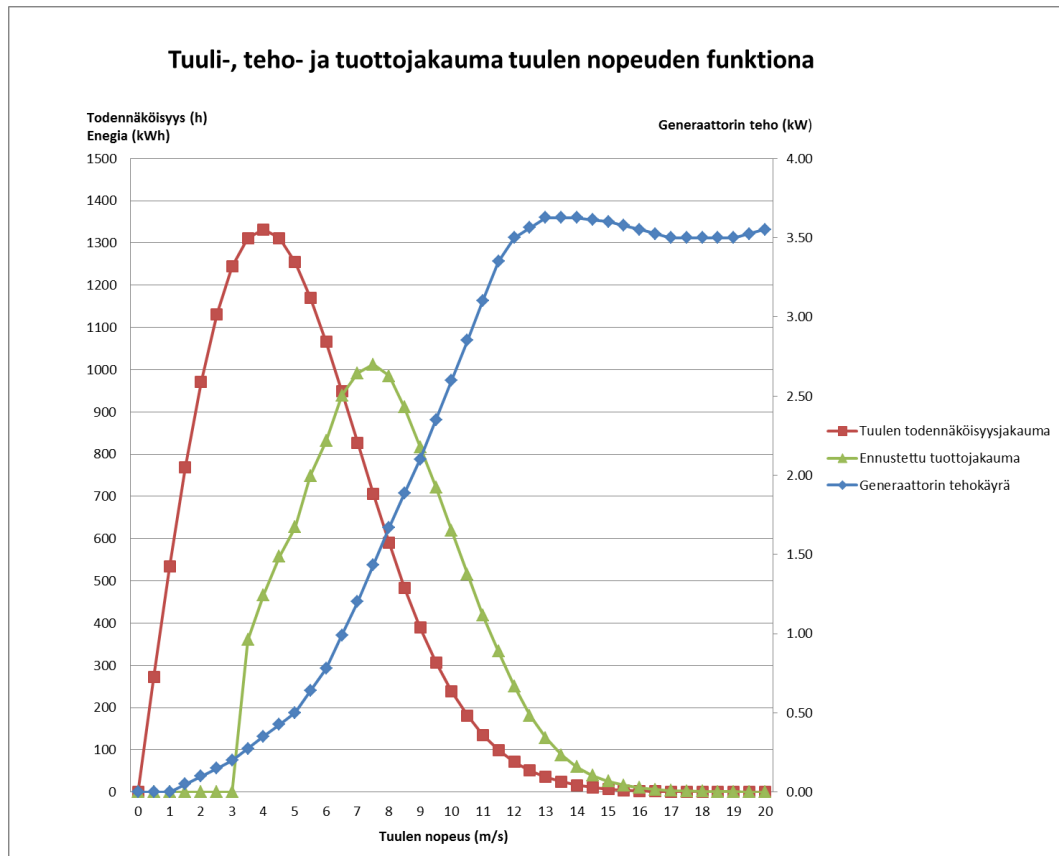
Sonkyo 3,5 kW - tehon tuotto tuulen nopeuden suhteen



Kuva 2.12. Etelä Ranskassa tehdyn ulkopuolisen tutkimuslaitoksen SEPEN tehokäyrän mittaustulokset Wind Spot 3,5 kW (SEPEN; Rapport SEPEN 19.2- Sonkyo Energy 3,5 kW- Connectee Reseau- 1)

Kuvaan 2.13 on otettu sama tuulen todennäköisyysjakauma kuin pinta-alamenetelmän laskelmissa kappaleessa 2.2.3. Lisäksi kuvaajaan on yhdistetty WindSpot 3,5 kW generaattorin tehon tuottokäyrä. Tuottokäyrä on kopioitu taulukko-ohjelmaan mahdollisimman tarkasti englanninkielisestä esitteestä. On kuitenkin huomioitava, että jo suomenkielinen esite antaa hieman erimuotoisen käyrän yli 14 m/s tuulilla. Toisaalta tarkastelussa näiden tuulien todennäköisyys on erittäin pieni, kuten kuvasta voidaan havaita. Kappaleessa 5 on vielä teoriassa laskettu tarkemmin voimaloiden tuottoennusteita.

Tuntijakauma kertoo arvion kuinka monta tuntia milläkin tuulennopeudella tuulee. Tehokäyrä ilmoittaa generaattorin tehontuoton kW kullakin tuulennopeudella. Kertomalla nämä keskenään saadaan ennustettua sijaintipaikan tuottojakauma (kWh). Tuottojakauman laskemisessa kannattaa vielä ottaa huomioon käyntiinlähönnopeus, joka on kyseisellä voimalalla 3 m/s. Kuten pinta-alamenetelmässäkin, tuottojakauman huippu siirtyy kuvaajassa oikealle verrattuna tuulen todennäköisyysjakaumaan, koska tehon tuotto on riippuvainen tuulennopeuden tilavuudesta.



Kuva 2.13. Tuulivoimalan tuottoennuste tehon ja tuulen todennäköisyysjakaumasta tehokäyrämenetelmällä

Integroimalla tuottojakaumaa tuulennopeuden suhteen saadaan laskettua vuotuisen energian arvio. WindSpot 3,5 kW generaattorin energiantuotanto 5 m/s tuulen keskinopeudella Rayleigh-jakaumalla on hieman reilu 6 000 kWh. Suomalaisen maahantuojan esitteessä (kuva 2.11) vuosituotanto 5 m/s keskituulennopeudella arvioituna on hieman alle 6 000 kWh. Tulosten tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti, kuinka tarkasti kirjaa tehokäyrän tuottoarvot kuvaajaan.

2.3 Tuuliolosuhteiden arviointi

Tuuliolosuhteiden arvioinnin tarkoituksena on helpottaa kuluttajaa ennustamaan oletetun mikrotuulivoimalan tuotantoa. Arviointia on hyvä lähestyä monelta eri kannalta, jotta saadaan mahdollisimman kattava kokonaiskuva. Luotettavaa ja tilastoitua

tuulitietoa löytyy Suomen Ilmatieteen laitoksen sääasemilta. Suomen tuuliatlas on tehty helpottamaan lähinnä teollisten tuulivoimaloiden suunnittelua ja on näin ollen vain alkuarvoja antava tietolähde mikrotuulivoimaloita suunniteltaessa. Manuaalisen laskennan kautta tai WASP- laskentaohjelman avulla pystytään tarkentamaan tuuliatlaksen esittämiä tuulen keskiarvonopeuksia mikrotuulivoimaloille sopiviksi.

Työssä esitellään myös otanta Teknologian tutkimuskeskus VTT:n julkaisemista tuulivoimaloiden tuotantotiedoista. Nämä tuotantotiedot koskevat yli 70 kW nimellistehon tuulivoimaloita, jolloin työn loppupuolella voidaan vertailla kokoluokan kasvattamisen merkitystä tuottavuuteen.

2.3.1 Suomen tuuliolosuhteet

Suomen tuuliolosuhteisiin vaikuttaa oleellisesti Atlantilta suuntautuva Golfvirta. Ilmavirtauksen mukana tuomat matalapaineet ja niiden kulkemat reitit määräävät hyvin pitkälti maan tuuliolot. Näin yleisin ilmavirtauksen suunta on lounaasta ja harvinaisinta se on koillisesta. (Karttunen et al. 2008)

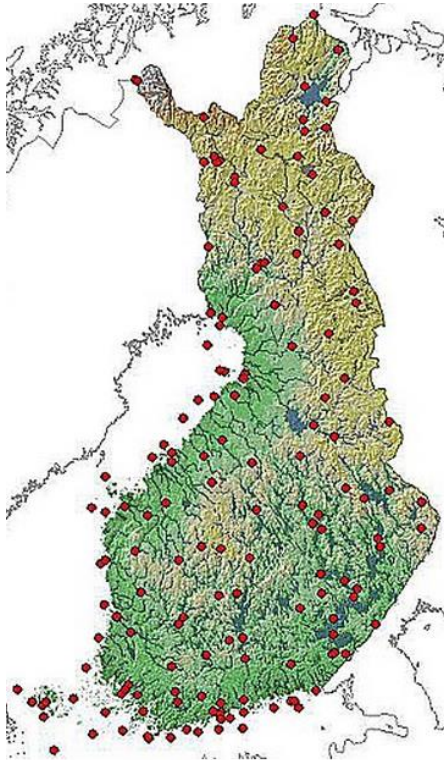
Tarkasteltaessa keskimääräisiä tuuliolosuhteita Euroopassa rajakerroksen yläpuolella huomataan, että juuri Golfvirtauksen vaikutusalueella geostrofisen tuulennopeudet ovat verrattain suuret verrattuna esimerkiksi eteläisempään Eurooppaan. Pohjoiselta Atlantin valtamereltä puhaltava virtaus on keskimäärin jopa 10–12 m/s kohdatessaan Brittein saaret. Myös Tanskassa, Norjan rannikolla ja Pohjanmeren rannikoilla päästään vielä 10–11 m/s lukemiin. Suomen ilmakehän alueella keskimääräinen geostrofisen tuulennopeus vaihtelee välillä 9-9,5 m/s, kun taas etelä Euroopassa lukemat ovat vain 7-8,5 m/s luokkaa. (Suomen Tuuliatlas 2012)

Siirryttäessä kohti maan pintaa rajakerrokseen ja sieltä edelleen pintakerrokseen tuulennopeus pienenee huomattavasti. Tähän vaikuttavat oleellisesti maaston korkeuserot ja rosoisuus sekä ilman terminen tasapainotila. Sisämaassa sääasemilla mitatut tuulen vuotuiset keskimääräiset nopeudet jäävät jopa alle 3 m/s, kun taas rannikon sääasemilla päästään n.5 m/s keskiarvoihin ja merisääasemilla keskinopeus on 6-8 m/s luokkaa (Tammelin. 1991). Merialueilla tuulennopeus vaihtelee vuodenajan mukaan hyvin paljon, kun taas sisämaassa vaihtelu on vähäisempää. Korkeuden vaikutus tuulennopeuteen on suurempi sisämaassa ja etenkin kaupungeissa, kun taas merialueiden tuulen korkeusriippuvuus on vastaavasti paljon pienempi. (Suomen Tuuliatlas 2012)

2.3.2 Suomen Ilmatieteen laitoksen havaintoasemat

Ilmatieteen laitoksella on Suomessa yhteensä noin 400 eri havaintoasemaa. Määrä on ajoittain vaihteleva, koska uusia asemia perustetaan, vanhoja puretaan ja joidenkin asemien havaintosuureet muuttuvat. Kuvassa 2.14. on koottu tuulta mittaavien sääasemien sijainnit Suomen kartalle. Asemien paikat ilmoitetaan Ilmatieteen laitoksen

sivuilla koordinaattien avulla. Joidenkin asemien kohdalla on myös saatavana sanallinen ympäristön kuvaus. (Ilmatieteen laitos 2013)



Kuva 2.14. Ilmatieteen laitoksen tuulta mittaavien sääasemien sijainti vuonna 2009 (Suomen Tuuliatlas)

Tampereen keskustan ja sen lähiympäristön alueella on kaksi tuulta mittaavaa sääasemaa, Siilinkari ja Pirkkalan lentoasema. Kuvassa 2.15 on havainnollistettu kyseisten sääasemien sijainteja.

Siilinkarin sääasema on maasta mitattuna 9 metrin korkeudella ja se on otettu käyttöön 1992. Mittaustietoa löytyy yli 20 vuoden ajalta, mutta havainnoissa on puutteita mittari- ja yhteysongelmien vuoksi. Paikka on hyvä vertailukohta tuulivoimaloita ajatellen, koska sen sijainti on todella lähellä tuulivoimaloiden sijoituspaikkoja (n. 1,2 km Särkänniemestä). Kuitenkin on huomioitava, että sääaseman maantieteellinen sijainti on avokarilla Näsijärvellä, kaukana rosoisesta mantereesta, joten tuuliolosuhteet pitäisivät kauttaaltaan olla hieman paremmat kuin voimaloiden saamat ilmavirtaukset. Toisaalta sääaseman mittauskorkeus on matalampi kuin tuulivoimaloiden napakorkeus, joten tämä kompensoi hieman edellistä virhettä.



Kuva 2.15. Ilmatieteen laitoksen tuulta mittaavien sääasemien sijainti Tampereen alueella.

Lentoaseman sääasema on maasta mitattuna 14 m korkeudella. Maantieteellisesti asema vastaa hyvin sisämaan hyviä tuulisia lievästi rosoisia alueita. Se on otettu käyttöön vuonna 1979, joten mittaustietoa on saatavilla yli 30 vuoden ajalta. Lentoasema on hyvä vertailukohde sisämaan vähän rosoisemmille alueille.

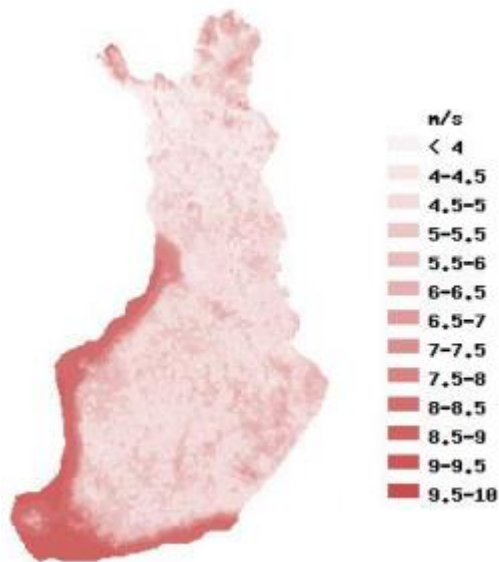
Loppukuluttajan näkökulmasta tuulimittausten järjestäminen on hankalaa ja taloudellisesti arvokasta. Kuluttaja voi kuitenkin tarkastella oman tuulivoimalan tuuliennusteita lähimmän sääasemansa tuloksien valossa huomioon ottaen rosoisuuserot vertailtavien sijaintien välillä.

2.3.3 Suomen Tuuliatlas

Uusi Suomen Tuuliatlas otettiin käyttöön vuoden 2009 lopussa. Sitä pystyy jokainen kuluttaja käyttämään internetissä osoitteessa www.tuuliatlas.fi. Edeltäjänsä verrattuna se tarjoaa laajempaa ja yksityiskohtaisempaa tietoa koko maan kattavasta tuulivoimapotentialista tietokonemallinnuksien avulla. Sivusto sisältää staattisia karttoja, jotka kertovat tuuliolosuhteista ja valittujen tuulivoimaloiden tuotantotietoja. Lisäksi käyttäjä pystyy mallintamaan hilaruutujen avulla tietyn alueen tuulisuustiedot dynaamisesti käyttöliittymän avulla.

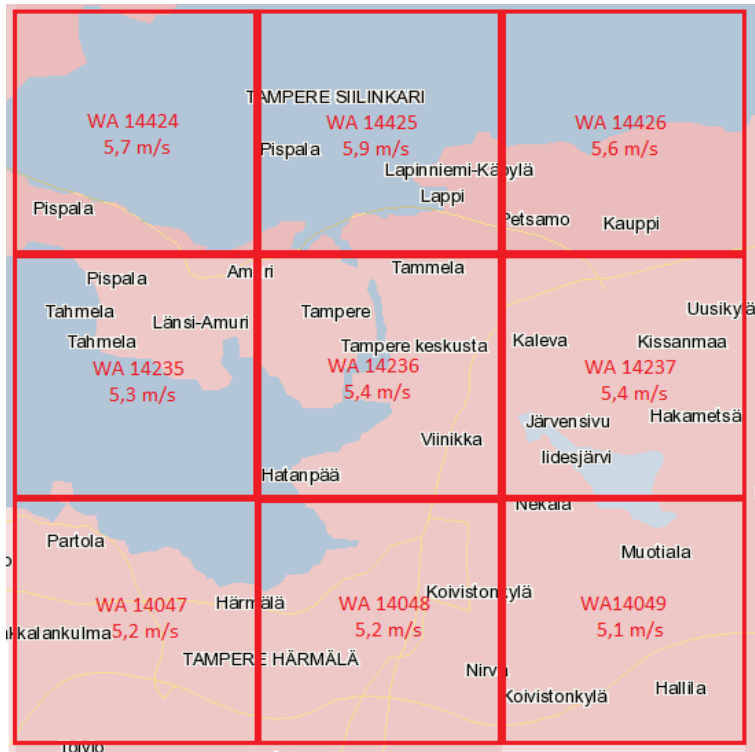
Mallinnukset pohjautuvat sääennustummalleihin ja niitä on jalostettu tanskalaisella *WAsP*- tuuliatlassovelluksen avulla. Mallinnukset ovat laskettu yhteensä 72:n jo toteutuneiden kuukausien säätilanteista simuloimalla niitä säämallien avulla. Tuuliolosuhteiden vertailuvuosi koostuu yhteensä 48 kuukaudesta, jotka on poimittu ajanjaksolta 1989–2007. Näin käyttäjän tarkkailema kuukausi kostuukin neljän kuukauden otoksista eri vuosilta. Samalta aikaväliltä valittiin 12 kuukautta edustamaan kovatuulisia vuosia ja samoin 12 kuukautta heikkotuulisia vuosia. Näillä menettelytavoilla pyrittiin saamaan mallinnoista mahdollisimman luotettavia keskimääräisiä tuulia määriteltäessä. Mallinnuksella pystyy tarkastelemaan Suomen tuuliolosuhteita 50 metristä aina 400 metriin asti. (Suomen Tuuliatlas)

Tuulivoimaloiden tuotantotietoja pystyttäisiin jo suuntaa antavasti arvioimaan kuvan 2.16 perusteella, mutta keskinopeudet ovat kuitenkin pitkän aikavälin keskiarvoja ja eivät näin ollen kerro tuulen käyttäytymisestä tai nopeuksien yleisyydestä paljoakaan.



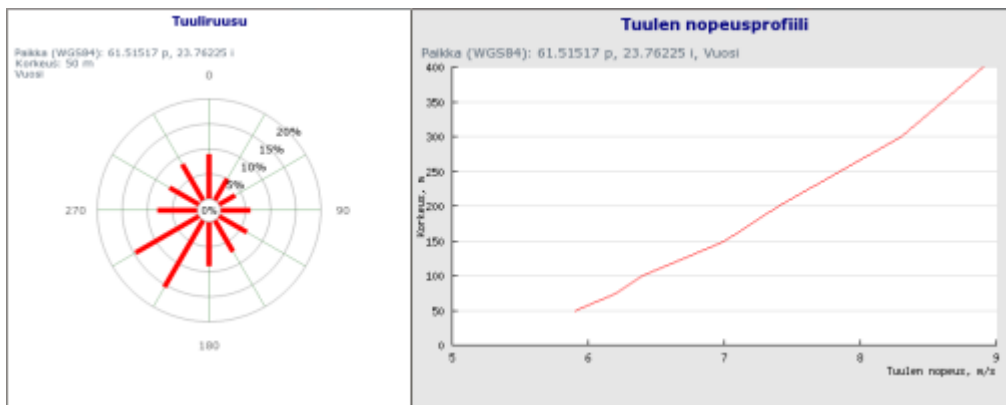
Kuva 2.16. Tuuliatlas-mallin antamat tuulen keskinopeudet (m/s) Suomessa 50 metrin korkeudella 2,5x2,5 neliökilometrin tarkkuudella. (Suomen tuuliatlas)

Koko Suomen kattava kartasto, joka sisältää tuuliatlaksen keskiarvomallit ja perustiedot, on koottu 2,5 x 2,5 nelikilometrin alueisiin. Näitä tietoaueita kutsutaan *hilaruuduiksi*. Jokaisella hilaruudulla on keskiarvoiset tiedot sen alueelta tuuliprofiilista. Käyttäjä voi itse valita korkeuden, jolla ohjelma näyttää keskimääräiset tuulennopeudet tai voimalaitoksien tuotantotiedot siirretystä nollapisteestä. Siirretty nollapiste on laskettu jokaiselle hilaruudulle erikseen, kun maaston topografia ja rosoisuudet on keskiarvotettu eli on eliminoitu niiden vaikutus tuuleen. Kuvassa 2.17 on tarkennettu kuvan 2.16 näkymää Tampereen keskustan alueelle ja havainnollistettu kuvaa lisäämällä siihen mallissa käytetyt hilaruudut. (Suomen Tuuliatlas)



Kuva 2.17. Tuuliatlas-mallin antamat tuulen keskinopeudet (m/s) Tampereen keskustan alueelle 50 metrin korkeudella siirretystä nollapistestä 2,5x2,5 neliökilometrin tarkkuudella (Suomen tuuliatlas).

Kartasta jotain aluetta rajaamalla tai pistettä klikkaamalla päästään sen alueen hilaruudun tietoihin. Näitä tietoja ovat kuvassa 2.18 olevat tuuliruusu ja tuuliprofiili, jotka ovat tärkeitä ominaisuuksia tietää tuulivoiman tuottoa arvioidessa.



Kuva 2.18. Tuuliatlas-mallin yhden hilaruudun tuuliruusu ja tuulennopeusprofiili. (Suomen Tuuliatlas)

Kuten kuvasta 2.18 havaitaan, tuuliruusu kertoo prosentuaalisen ajan tuulen virtauksen suunnasta 30° sektoreiden avulla. Samassa kuvassa oleva tuulennopeusprofiili havainnoi korkeuden vaikutusta tuulen keskimääräiseen nopeuteen. Korkeustiedot ovat siirretystä nollapistestä eli hilaruudun maaston rosoisuuden keskiarvosta mitattuja arvoja. (Suomen Tuuliatlas)

Tuuliatlaksen hilaruudusta saa myös kopioitua *lib.-tiedoston*, joka on WASP-laskentaohjelman tekstimuotoinen tiedosto. WASP-laskentaohjelman avulla pystytään määrittelemään tarkempia tuulijakaumia ja laskemaan tuulivoimaloiden tuotantoarvioita hilaruudun sisällä huomioiden maaston rosoisuuden vaikutus. Excel-taulukot taas kertovat yksityiskohtaiset tuulitiedot taulukkomuodossa hilaruudun alueelta ja ovat käytettävissä tarkempaa laskentaa varten. (Suomen Tuuliatlas)

2.3.4 WASP- laskentaohjelma

WASP-laskentaohjelmasta on tullut tuulivoimateollisuuden standardi PC-ohjelma, joka on kehitetty Tanskan teknillisessä yliopistossa (DTU). Sen avulla voidaan ennustaa tuuliolosuhteita ja energian tuotantoa tuulipuistojen ja yksittäisten tuuliturbiinien avulla. Yleisesti ohjelmaa käytetään rajakerroksen alemmassa osassa määritettäessä keskimääräisiä tuuliolosuhteita. Ohjelmalle annetaan lähtötiedot joko Suomen Tuuliatlaksesta sääennustemallien pohjalta tai Ilmatieteen laitoksen sääasemilta mitattujen pitkäaikaisten tuulitietojen perusteella. Ohjelmalla pystytään huomioimaan maaston muotoja, rosoisuuksia ja muita tuulta hidastavia esteitä. Tarkastelukorkeuden muuttuessa ohjelmisto muuttaa Weibull-parametrin lähtöarvoja. Ohjelman käyttö vaatii lisenssin. (WASP; Suomen Tuuliatlas)

Suomen Tuuliatlas on rakennettu WASP-laskentaohjelman avulla tuuliennusteista. Käyttäjä saa Tuuliatlaksesta WASP-ohjelmaan tarvittavat keskimääräiset tuulisuustiedot hilaruutujen avulla. Hilaruutujen tuulitiedot pystytään valitsemaan Tuuliatlaksesta 50–400 m korkeudelta. Tuulitietojen ajanjaksoksi voidaan valita yhdestä kuukaudesta yhteen vuoteen. (Suomen Tuuliatlas)

WASP-ohjelmaan lisätään alueen korkeuskäyrät ja rantaviivat, jotka saadaan maanmittauslaitokselta. Lisäksi määritellään alueen rosoisuuskertoimet (z_0). Rosoisuuskertoimet pystytään määrittelemään hyvinkin tarkasti alueen sisällä, mutta tässä työssä määrittelyt arvot ovat keskimääräisiä (kts. kappale 5.3.1). Ohjelmaan pystytään myös lisäämään karttapohja sekä turbiinin tuottavuutta ennustettaessa turbiinin teknisiä ominaisuuksia. Määritelyjen tietojen perusteella pystytään yhden hilaruudun sisällä saamaan esiin tiedot vaihtelevista tuuliolosuhteista sekä ennustamaan tuottavuutta eri kohdissa hilaruutua. Käytännössä ohjelma laskee tulokset pienentämällä hilaruutujen kokoa. Näin käyttäjä pystyy saamaan tuloksia tarkennetuissa sijainneissa ja korkeuksissa.

WASP-ohjelmaa on tässä työssä hyödynnetty kappaleessa 5 havainnollistamaan maaston muotoja sekä arvioimaan Tampereen keskustan alueen parhaimmat pientuulivoimaloiden sijaintipaikat. Laskennat pohjautuvat Suomen tuuliatlaksen hilaruutujen lähtötietoihin. Maasto on oletettu WASP:ssa homogeeniseksi ja säätilanne stabiiliksi, kuten teoriakappaleen 2.1.1 kaavoissa 1 ja 2. WASP-ohjelman tuloksissa täytyy kuitenkin muistaa huomioida, että WASP ei ole dynaaminen malli, joten korkeiden esteiden ja maaston muotojen läheisyydessä tulokset eivät välttämättä vastaa todellisuutta. (Suomen Tuuliatlas)

2.3.5 Suomen tuulivoimatilastot

Vuodesta 1992 alkaen on Suomessa kerätty tuulivoimaloiden tuotantotietoja. 1996 alkaen tuotantotiedot löytyvät VTT:n tietokannasta. Energiantuotantotiedot kerätään tuottajilta ja säätiedot Ilmatieteen laitokselta. (VTT, Tuulivoiman tuotantotilastot, vuosiraportti 2011)

Suomen tuulivoimatilastojen vuosiraportteihin huomioidaan kaikki Suomen verkkoon kytketyt nimellistehojaan yli 70 kW:n tuulivoimalaitokset, joten tämän työn kannalta oleellisia mikrotuulivoimalaitoksien tuotantotietoja ei näistä löydy. Tehdyistä tilastoista pystytään kuitenkin analysoimaan napakorkeuden, pyyhkäisyypinta-alan ja teholuokan kasvattamisen vaikutukset tuotantoon.

Eri kokoluokan tuulivoimaloiden tuotantoja ei voi suoraan verrata toisiinsa, koska niiden generaattoreiden nimellistehot tai roottorin halkaisijat eivät ole identtiset. Yleisimmät tuulivoimaloiden vertailuun käytettävät tunnusluvut ovat huipunkäyttöaika (t_h , kWh/kW), joka suhteuttaa tuotannon nimellistehoon, sekä tuotanto suhteutettuna roottorin pyyhkäisyypinta-alaa kohti (e , kWh/m²). Kapasiteettikerroin (CF , kWh/kW,h) suhteuttaa huipunkäyttöajan käytettyihin tunteihin vuodessa. (VTT, Tuulivoiman tuotantotilastot, vuosiraportti 2011)

Laskentakaavat;

$$e \left(\frac{kWh}{m^2} \right) = \frac{tuotanto(kWh)}{\pi * r^2} \quad (13)$$

$$t_h \left(\frac{kWh}{kW} \right) = \frac{tuotanto(kWh)}{Nimellisteho(kW)} \quad (14)$$

$$CF = \frac{tuotanto(kWh)}{Nimellisteho(kW) * tunnit(h)} \quad (15)$$

Lyhenteiden selitykset;

z	napakorkeus (korkeus maan pinnasta roottorin keskipisteeseen)
D	roottorin halkaisija m ²
t_h	huipunkäyttöaika kWh/kW
e	tuotanto suhteessa roottorin pyyhkäisyypinta-alaan kWh/m ²
CF	kapasiteettikerroin kWh/kW,h

Taulukkoon 2.2 on kerätty Tampereen lähiympäristön pienempien tuulivoimaloiden tietoja. Taulukosta nähdään, että tuuliturbiinien teho on 75–750 kW. Huippukäyttöaika pyörii n. 650–900 h/a tuntumassa, tuotanto suhteessa roottorin pyyhkäisyypinta-alaan on n. 150–300 kWh/m² ja kapasiteettikerroin on 7-10 %.

Taulukko 2.2. Suomen tuulivoimatilastojen vuosiraportti 2011(VTT, Tuulivoiman tuotantotilastot, vuosiraportti 2011)

Kunta	Nimi	Teho [kW]	Valmistaja	Z [m]	D [m]	Tuotanto [MWh]	t_h [h/a]	e [kWh/m ²]	CF [%]
Huittinen	Huittinen 1	75	Nordtank	40	20	50	667	159	9
Jalasjärvi	Vaasantie	220	Windworld	31	25	68	307	138	4
Sastamala	Marjamäenvuori 1	225	Vestas	52	29	198	881	300	10
Töysä	Riihontie 1	600	NEGMicon	50	43	365	608	251	7
Vammala	Koppelo	225	Vestas	50	29	159	705	240	8

Taulukon laskennallisia arvoja verrataan tässä työssä tutkittaviin pientuulivoimaloihin kappaleessa 6. Vertailulla pyritään saavuttamaan näkökulmaa siihen, kuinka pientuulivoimaloiden tunnusluvut sijoittuvat verrattaessa niitä teollisen kokoluokan pienimpiin tuulivoimaloihin.

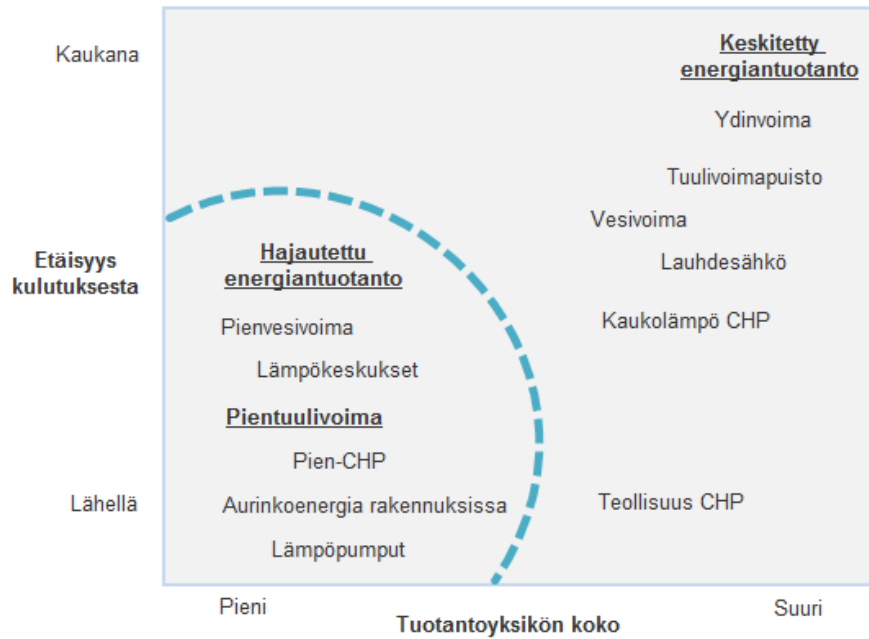
3 PIENTUOTANTO YLEISESTI

3.1 Keskitetystä energiantuotannosta mikrotuotantoon

Energiantuotanto voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään; hajautettu ja keskitetty energiantuotanto. Hajautetulla tuotantomuodolla tarkoitetaan, että energia tuotetaan lähellä loppukulutuspiistettä. Tyypillistä on, että energia tuotetaan pienissä tuotantoyksiköissä. Yleisiä esimerkkiratkaisuja ovat mm. pienet biopolttoainekattilat (biokaasu, hake, pelletti), erilaiset lämpöpumput, aurinkovoimaa hyödyntävät paneelit ja keräimet tai tuulivoimalat. Hajautetussa energiantuotannossa käytetään lähes aina uusiutuvia energialähteitä, jotka ovat poikkeuksetta puhtaita ja päästöttömiä vaihtoehtoja. Lisäksi niissä moni tuotantomuoto on sellainen, jota ei edes pystytä käyttämään suuremmissa mittakaavassa.

Keskitetyssä energiantuotannossa energia tuotetaan keskitetysti suurissa voimalaitoksissa, joista se siirretään kulutuspiisteisiin yleensä pitkien etäisyyksien päähän. Haittapuolina tässä järjestelmässä ovat siirtojärjestelmien energiahävikki sekä isojen laitoksien vaurioitumisesta aiheutuma haavoittuvuusriski. Lisäksi yleensä suuret tuotantolaitokset eivät käytä uusiutuvia energialähteitä, vaan esimerkiksi uraania tai fossiilisia polttoaineita. Positiivisena puolena merkittävin hyöty saavutettaneen taloudellisista hyödyistä. (Motiva 2010)

Kuvassa 3.1 on havainnollistettu eri energiantuotantoratkaisujen jakautumista keskitetyn ja hajautetun järjestelmien vaikutusalueilla. Jos hajautetun energiantuotannon järjestelmät ovat riittävän pienikokoisia, voidaan ne kategoroida mikrotuotantolaitteistoiksi.



Kuva 3.1. Keskitetyn- ja hajautetun energiantuotannon määrittelyä (Motiva 2010).

Suomen Standardisoimisliitto SFS on julkaissut eurooppalaisen standardin EN-50438, jossa määritellään tekniset vaatimukset yleisen pienjänniteverkon kanssa rinnan käyvien mikrogeneraattoreiden suojaukselle, liittämiselle ja käytölle. Määritelmän mukaan mikrotuotannon rajoiksi asetetaan generaattoreille maksimissaan 16 A:n tuotantoraja. Tämä vastaa jakeluverkossa 230/400 V jänniteportaassa yksivaiheisena kytkentänä noin 3,7 kW tehoa ja kolmivaiheisena järjestelmänä 11,1 kW tehoa.

Kansainvälisen sähköalan standardin IEC 61400-2 mukaan pientuulivoimalaksi luetaan voimalat, jotka ovat pyyhkäisyypinta-alaltaan alle 250 m² sekä niiden korkeus on alle 50 m ja lapojen pituus alle 9 m. Lisäksi yhden talouden nimellisteholtaan alle 10kW:n laitosta voidaan kutsua nimellä mikrotuulivoimalaitos.

Tuulivoimaa koskevassa kirjallisuudessa jako kokoluokkiin tehdään vielä tarkemmin. Katsantokanta ei ole yleensä sähköverkon virta- tai jänniterajoissa vaan tuotetun energian käyttökohteessa. Taulukossa 3.1 on havainnollistettu yhtä yleisesti käytettyä luokkajakoa. Isot tuulivoimalat on suunniteltu teolliseen tuotantoon, eli niiden tarkoitus on tuottaa energiaa valtakunnan verkkoon aivan kuten muidenkin energiantuotantovaihtoehtojen suurempien voimaloiden. Tämän työn kannalta oleellinen pientuulivoimaloiden ryhmä on jaettu kolmeen alaryhmään. Pienin näistä on mikro-luokka, jonka voimalat tuottavat tehoa maksimissaan vain muutamia satoja watteja ja pyyhkäisyypinta-ala on korkeintaan yhden neliömetrin luokkaa. Seuraavana tulee mini-luokka, joka ylittää jo reiluun kilowatin maksimitehoon sekä seitsemän neliömetrin pyyhkäisyypinta-alaan. Suurin näistä pientuulivoimaluokista on kuvaavasti omakotitalo-luokka, jonka teholuokat vaihtelevat puolestatoista kilowatista aina 16 kW:iin asti, pyyhkäisyypinta-alojen ollessa välillä 7-79 m².

Taulukko 3.1. Tuulivoimaloiden kokoluokitus (Gipe 2009, s. 16.)

Kokoluokka	Roottorin halkaisija [m]	Pyyhkäisyypinta-ala [m ²]	Standardi teholuokka [kW] *
Mikro	0,5-1,25	0,2-1,2	0,04-0,25
Mini	1,25-3	1,2-7,1	0,25-1,4
Omakotitalo	3-10	7-79	1,4-16
			Tyypillisiä tuotettuja teholuokkia [kW]
Pieni teollinen	10-20	79-314	25-100
Keskikokoinen teollinen	20-50	314-1963	100-1000
Suuri teollinen	50-100	1963-7854	1000-3000
* Standardi teholuokka mikro-, mini- ja omakotitalo- kokoluokan tuulivoimaloissa = pyyhkäisyypinta-ala x 200 W/ m ²			

Vertailtaessa standardien rajoja kirjallisuudessa käytettyihin rajoihin huomataan pientä eroavaisuutta pientuulivoimaloiden ja teollisten voimaloiden rajapinnassa. Kirjallisuudessa pientuulivoimalan maksimikokoluokka vastaa standardien pientä teollista laitosta ainakin lapojen halkaisijan ja pyyhkäisyypinta-alan perusteella. Taasen tehomääritystä katsottaessa tilanne on päinvastainen. Merkittävin ristiriita koetaan varmasti käytetyissä nimityksissä. Standardit käyttävät synonyymisesti sanoja pientuulivoimala ja mikrotuulivoimala, kun taas alan kirjallisuudessa pientuulivoimaloiden pienin luokka on mikrotuulivoimat. Tässä työssä tarkastelun lähtökohtana käytetään pientuotannolle edellä mainittuja standardien määrittelemiä rajoja ja nimityksiä.

3.2 Historia, nykytila ja näkymät Suomessa

Hajautettu tuotanto ja sen mukana mikrotuotanto ovat saaneet historian aikana kehitystä aktivoivia ulkoisia muutosvoimia. Sähköistämisen alussa kaikki tuotanto oli hajautettua ja energianlähteenä käytettiin pääasiassa pienvesivoimaa. Taloudelliset seikat ja vesivoiman riittämättömyys kuitenkin johtivat keskitetyn tuotannon kehittämiseen ja rakentamiseen.

Hajautetun tuotannon uudelleenmarssi tapahtui 1970-luvulla öljykriisistä johtuen. Silloin päätään nostivat uudet teknologiat sekä pienet yhteisöt tai ekokylät, jotka olivat omavaraisia omasta energiantuotannostaan. Suomessa tehtiin tällä vuosikymmenellä voimakas panostus aurinkoenergian kehittämiseen. 80-luvun taitteessa saatiin jo asuinalueita mm. Keravan aurinkokylä ja Helsingin Torpparinmäki, jotka lähtökohtaisesti hyödynsivät auringonlämpöä ja jopa aurinkopaneeleista saatua sähköä energialähteinään. (Motiva 2010)

Kaukolämmön vahva asema sekä sähkön edullinen hinta hillitsivät hajautetun tuotannon kehitystä ja toteutusta 80-luvun puolivälistä aina vuosituhannen vaihteeseen. Suomessa tänä aikana ainoa uusi asuinalue oli 90-luvun loppupuolella rakennettu Helsingin Viikki, jossa käytettiin monipuolisesti uusiutuvan energian teknologioita.

Viikki onkin kenties Suomen tunnetuin asuinalue, jossa hyödynnetään paikallista energiantuotantoa ja sitä kehitetään jatkuvasti. Viikissä voidaankin hyvin puhua mikrotuotannosta, koska yleisesti ratkaisut ovat kiinteistökohtaisia. Energialähteinä toimivat aurinkosähkö, aurinkolämpö, tuulivoima, biokaasu ja vesivoima. (Uusiutuva energia Viikissä, 2013)

2000- luvulta lähtien erilaiset lämpöpumppuratkaisut ovat kasvattaneet suosiotaan. Lämpöpumppuratkaisuilla on mahdollista korvata kotitalouksien lämmöntuotannosta 30-70 % uusiutuvalla energialla. Yleisimmät tekniikat ovat ilma-ilmalämpöpumppu ja maalämpöpumppu. (Motiva 2010)

Vuosituhanen vaihteen jälkeen yksityiset kuluttajat alkoivat yhä enenemissä määrin käyttää hajautettua energiantuotantoa ja halusivat syystä tai toisesta päästä omavaraisiksi energian tuotannon kannalta. Yksi varteenotettava merkkipaalu on vuonna 2010 Kempeleelle rakennettu 10 omakotitalon ekokylä, joka on täysin omavarainen niin sähkön kuin lämmönkin osalta. Kylä on ensimmäinen Suomessa, joka on täysin irti valtakunnan sähköverkosta. Kylässä sijaitsee häikäpönttötekniikkaan perustuva pienvoimala, joka käyttää polttoaineena puuhaketta. Keskitetyssä energiantuotannossa varsin yleinen lämmön ja sähkön yhteistuotanto on saatu kotimaisen kehitystyön ansiosta onnistumaan myös tässä pienessä puulämpölaitoksessa. Kylässä on myös varavoimala, joka käyttää polttoaineeksi rypsiöljyä.

Vuoden 2011 loma-asuntomessut Mäntyharjulla olivat hyvä esimerkki siitä, kuinka loma-asuinnoissa pystytään hyödyntämään hajautettua tuotantoa yhdistettynä energiatehokkuuteen ja taloudellisuuteen. Messuilla oli kohteita, joissa tuotetaan energiaa mm. aurinkokeräimillä ja -sähköpaneelilla sekä maalämpöjärjestelmillä. Taas vuoden 2012 asuntomessut Tampereen Vuoreksessa oli määritellyt tärkeimpien teemojen joukkoon ekotehokkaan asumisen tukena uusimmat tekniikkaratkaisut.

Viime vuosien aikana Suomen energiaomavaraisuudesta ja ilmastonmuutoksesta johtuneet muutosvoimat ovat laittaneet energiasuunnittelun muutosten eteen. Lisäksi mikrotuotantolaitteistojen kehittyminen on mahdollistanut liiketoiminnan aloittamisen tällä sektorilla. Kaikessa tuottamisessa pyritäänkin nyt siihen, ettei ympäristöä kuormiteta turhaan. Energia pyritään tuottamaan kestävästi ilman konflikteja luonnon, ympäristön tai ihmisten keskuudessa. Näillä arvoilla saavutetaan myös saaman aikaan EU:n energia- ja ympäristöpolitiikan korostuneita ympäristötavoitteita.

3.3 Markkinakatsaus

Työn tiimoilta tehtiin markkinakatsaus kesän 2011 aikana. Markkinakatsauksessa tutkittiin kuluttajille tarjottavia mikrotuulivoiman tuotantolaitteistojen vaihtoehtoja. Lisäksi suoritettiin kysely Suomen verkkoyhtiöille. Kyselyssä selvitettiin vuoden 2011 tilannetta mikrovoimaloiden osalta sekä verkkoyhtiöiden omia mielipiteitä liittyen voimaloihin ja niiden liitälaitteisiin. Otannalla pyrittiin saamaan mahdollisia vastauksia mikrotuulivoimaloiden yleistymisen esteisiin. Kuluttajien näkökulma, eli ostoaikaisessa olevan kuluttajan löytämä tarjonta, toteutettiin internetin hakupalveluiden

avulla. Niiden oletettiin olevan yleisin kuluttajan käyttämä toimintamalli ja luotettavin otanta tarjonnassa olevista mikrotuulivoimaloista.

3.3.1 Markkinakatsaus internetissä

Nykyisin kuluttajan varmasti yleisin toimintamalli ostotilanteessa on se, että tuote ja sen käyttökokemukset sekä ylipäättään tuotteen löytäminen tapahtuvat joltain osin internetin hakupalveluita käyttäen. Niinpä tässä työssä kuluttajan näkökulmaa markkinoilla olevista voimaloiden tarjonnasta etsittiin suoraan internetin hakupalveluiden avulla. Hakusanat olivat yleensä hyvin yksinkertaisia mm. *tuulivoimala*, *pientuulivoimala* ja *energiaa tuulesta*. Lisäksi aiheeseen perehdyttiin erilaisilla blogi- ja keskustelupalstoilla. Markkinakatsaus rajattiin suomenkielisille yrityksille ja sivustoille. Kuitenkin keskustelupalstojen innoittamana selvitettiin myös ulkomaista tarjontaa ja sen seurauksena Kiinasta tilattiin yksi verrokkituulivoimala, mutta ulkomaista tarjontaa ei muuten tässä työssä oteta esille.

Tuulivoimatieto -sivusto antaa hyvät lähtökohdat omaa tuulivoimaa suunnittelevalle kuluttajalle. Lisäksi Tuulivoimayhdistys järjestää erilaisia tapahtumia aihealueeseen liittyen, tästä esimerkkinä mainittakoon jokavuotinen tuulivoimaseminaari. Työn puitteissa käytiin tutustumassa ko. seminaariin 2011, mutta aihealueet koskettivat ainakin silloin enimmäkseen isomman kokoluokan voimaloita. Kuluttajan kannalta positiivista on se, että Tuulivoimatieto -sivustoilta löytyy erillinen pientuulivoimatietopankki sekä pientuulivoimayrityksien yhteystiedot henkilöistä tai yrityksistä, jotka ovat jäseninä yhdistyksessä.

Internetistä löytyi erilaisia suomalaisten yritysten tarjoamia pientuulivoimalajärjestelmiä (liite 1). 115 järjestelmästä noin puolet jätettiin kuitenkin lähemmin tarkastelematta työn aihepiirin rajauksen takia. Nämä olivat tuulivoimalapaketteja, joiden generaattori-, tasasuuntaajan- tai vaihtosuuntaajan jännite oli 12 V tai 24 V. Taulukot 3.2–3.4 esittävät kesän 2011 markkinatarjontaa tuulivoimalapaketeista, joiden generaattorijännite on 230/400 V ja joihin on mahdollisuus kytkeä verkkoliitäntälaitte, jos sitä ei vielä tarjoukseen kuulunut. Otantaan otettiin mukaan 46 kpl eri tuulivoimalajärjestelmää, jotka ovat vertailukelpoisia keskenään ja sopivat verrokeiksi tässä työssä tarkasteltavien tuulivoimaloiden kanssa.

Taulukoihin 3.2 ja 3.3 on kerätty hintajakaumaa tuulivoimalapaketeista, joita ei voida kytkeä verkkoon. Taulukon 3.3 paketteihin kuuluu myös masto. Nämä tuulivoimalapaketit olivat muutamia vuosia sitten hyvinkin yleinen ratkaisu niiden edullisuuden takia. Edulliseksi paketin tekee se, että järjestelmässä on generaattorin lisäksi ainoastaan lämmitysvastus, jota ohjaa tasasuuntaaja/säädin. Generaattorin tuottama sähköteho muutetaan lämmöksi vastuksessa. Vastukset kytketään yleensä lämminvesivaraajaan ja näin saatu energia varastoidaan veteen. Tuulivoimalassa ilmavirtaus määrittelee generaattorin jännitteen käyrämuodon, joten amplitudi- ja taajuusarvot vaihtelevat paljon. Resistanssi on hyvä peruskomponentti siinä mielessä, ettei sen toimintaan vaikuta edellä mainittujen sähköisten ominaisuuksien vaihtelut.

Taulukko 3.2. Markkinakatsaus tuulivoimalapaketteihin, jotka sisältävät generaattorin, tasasuuntaajan ja lämmitysvastuksen (2011)

Tuulivoimala + tasasuuntaaja + lämmitysvastus					
Teholuokka (kW)	Otanta (kpl)	Keskiarvoja			
		Teho (W)	nim. tuulen nopeus (m/s)	pyyhkäisyypinta-ala (m ²)	Hinta (€)
2	1	2000	9.0	12.6	3790
3	1	3000	9.0	19.6	3976
5	1	5000	9.5	28.3	4445

Ilman mastoa olevan tuulivoimalapaketin vastuksella ja säätimellä saa valmistajasta ja yrityksestä riippuen n. 4000 euron hintaan. Otannassa tuulivoimalan teho tai pyyhkäisyypinta-ala ei näytä vaikuttavan loppuhinnan muodostumiseen. Toki otanta ei ole täysin validi, koska jokaista teholuokkaa on vain yksi kappale.

Taulukko 3.3. Markkinakatsaus tuulivoimalapaketteihin, jotka sisältävät generaattorin, tasasuuntaajan, lämmitysvastuksen ja maston (2011)

Tuulivoimala + tasasuuntaaja + lämmitysvastus + masto						
Teholuokka (kW)	Otanta (kpl)	Keskiarvoja				
		Teho (W)	nim. tuulen nopeus (m/s)	pyyhkäisyypinta-ala (m ²)	Maston kork. (m)	Hinta (€)
2	1	2000	8.0	-	18	7380
3	1	3000	10.0	-	18	9840
4	4	4000	10.0	19.6	23	17150
5	3	5000	10.0	32.2	17	14730

Maston kanssa oleva tuulivoimalapaketti vastuksella ja säätimellä maksaa n. 7000-14 000 euroa (taulukko 3.3). Teholuokka ja maston korkeus näyttäisivät vaikuttavan merkittävästi tuotteen loppuhintaan. Taulukossa 3.4 on esitelty verkkoon kytkeytyvien tuulivoimalapakettien tarjonta ilman mastoa. Hinnat vaihtelevat 6000- 23000 euroon kokoluokasta ja pyyhkäisyypinta-alasta riippuen.

Taulukko 3.4. Markkinakatsaus tuulivoimalapaketteihin, jotka sisältävät generaattorin, tasasuuntaajan, kuormavastuksen sekä vaihtosuuntaajan (2011)

Tuulivoimala + tasasuuntaaja + vaihtosuuntaaja					
Teholuokka (kW)	Otanta (kpl)	Keskiarvoja			
		Teho (W)	nim. tuulen nopeus (m/s)	pyyhkäisyypinta-ala (m ²)	Hinta (€)
≤ 1	1	600		2.3	5900
1 ≤ 2	3	1800	9.3	10.9	7900
2 ≤ 3	1	2400	9.0	10.9	8750
3 ≤ 5	2	3500	10.5	11.4	13225
5 ≤ 10	2	10000	11.0	42.8	23275

Taulukossa 3.5 on esitelty verkkoon kytkettävät tuulivoimalapaketit mastolla. Hintahaarukka on 6 000–29 000 euroa kokoluokasta ja pyyhkäisyypinta-alasta riippuen. Lisäksi maston rakenne ja materiaali ratkaisee paljon. Harustettuja mastoja saa hyvinkin edullisesti.

Taulukko 3.5. *Markkinakatsaus tuulivoimalapaketteihin, jotka sisältävät generaattorin, tasasuuntaajan, kuormavastuksen, vaihtosuuntaajan, sekä maston (2011)*

Tuulivoimala + tasasuuntaaja + vaihtosuuntaaja + masto						
Teholuokka (kW)	Otanta (kpl)	Keskiarvoja				
		Teho (W)	nim. tuulen nopeus (m/s)	pyyhkäisyypinta-ala (m ²)	Maston kork.(m)	Hinta (€)
1	1	1000	9.0	7.5	8 har	5880
2	5	2000	9.0	9.8	8,8 har	6631
3	2	3000	9.4	16.6	15 har	14370
4	2	4000	10.0	19.6	23	17650
5	5	5000	10.0	32.2	17	20540
10	6	10000	10.0	50.3	16	28842

Työn markkinakatsausta tehdessä ja taulukoita 3.2–3.5 tarkasteltaessa on havaittavissa, että tuulivoimaloiden hinta, pyyhkäisyypinta-ala, teho, maston korkeus tai laatu eivät välttämättä korreloi keskenään loogisesti. Syitä tähän on varmasti monia. Yksi syy on, että osa tuulivoimapaketteja myyvistä yrityksistä pitää korkeampaa katetta, koska kuluttaja ei löydä välttämättä vertailuhintaa kyseiselle voimalalle. Joidenkin yritysten valikoima taas perustui halpatuontiin ja tätä kautta hinta saatiin todella edulliseksi, mutta tuulivoimaloiden valmistajien tehokäyriä ei kuitenkaan oltu testattu ulkopuolisen toimesta.

3.3.2 Kysely verkkoyhtiöille

Tämän työn puitteissa tehtiin Suomen jakeluverkkoyhtiöille kysely mikrotuotannosta ja sen hetkisestä tilanteesta. Kyselylomake ja saatekirje löytyvät liitteistä 2 ja 3. Kyselyssä tiedusteltiin pienimuotoisen tuotannon määrää verkkoyhtiön alueella sekä eriteltiin tuotantolaitosten tyyppejä. Kysymystä tarkennettiin niiden voimalaitoksien määrällä ja tyyppillä, jotka myyvät sähkönsä markkinoilla. Kyselyyn otettiin vielä mukaan diplomityön edetessä useasti vastaan tullut kysymys; Pystyvätkö tuotantolaitteet liittymäkohdassa täyttämään energiateollisuuden suosittamat asetteluarvot ja toimintaajat? Kyselyn vastauksia analysoidessa tulee kuitenkin huomioida, että työn tekemisen aikana energiateollisuus on muuttanut ohjeistuksiaan. Esimerkiksi saarekekäytön katkaisuaika nousi 0,15 sekunnista 5 sekuntiin. Verkkoyhtiöille annettiin vielä kyselyn lopuksi vapaa sana. Kyselyn yhteenveto löytyy liitteestä 4.

Verkkoyhtiöistä 48 kpl vastasi kyselyyn, mikä on 55 % verkkoyhtiöiden lukumäärästä. Tutkittaessa 0,4 kV jakeluverkon vastausprosenttia verrattuna siirtoverkon pituuden kilometreihin vastausprosentti oli kuitenkin jopa 73 %. Tämän

perusteella kyselyä voidaan pitää luotettavana mikrotuotantoa koskien, koska laitteistot kytketään 230/400 V jänniteportaaseen, eli siirtoverkon jakeluverkkoon.

Samankaltaisen kyselyn on teettänyt Ina Lehto diplomityössään *Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähkönjakeluverkkoon vuonna 2009*. Kysymys voimaloiden määristä ja tyypeistä pidettiin tarkoituksella samana, jotta saatiin mahdollisimman hyvä vertailupohja fokusoiden kehityksen suuntaan. Kyselyyn vastasi tuolloin 89verkonhaltiasta 49, eli 48 %, mutta pien- ja keskijännitejakeluverkon haltioista tarkasteltuna 69 %, jos tarkastellaan verkkoyhtiöiden verkko-osuuksien kilometrejä. (Lehto 2009)

Taulukossa 3.6. on vuoden 2009 tulokset. Lisäksi muutamasta verkkoyhtiöstä epäiltiin, että heidän alueellaan saattoi olla voimalaitoksia, joiden kytkemisestä verkkoon ei oltu ilmoitettu heille. (Lehto 2009)

Taulukko 3.6. Verkkoon kytkettyjen voimaloiden lukumäärä (Lehto 2009)

	tuulivoima	vesivoima	biovoima	mikro-CHP	aurinkovoima	muut
<11kW	10	2	0	0	3	3
11-50kW	3	10	2	1	2	8
50-500kW	15	23	5	2	0	4
500kW-1M	23	14	3	0	0	14

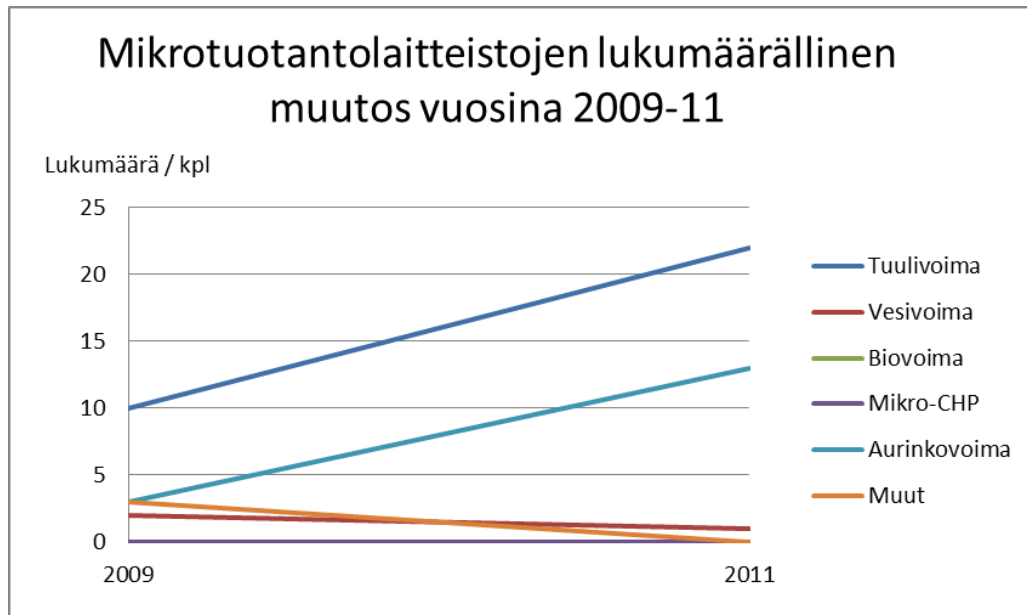
Tämän diplomityön aikana tehdyn kyselyn tulokset näkyvät taulukoissa 3.7 ja 3.8. Lisäksi myös tässä kyselyssä osa verkkoyhtiöiden vastaajista epäili, että he eivät tienneet välttämättä kaikista heidän verkkoalueelleen kytketyistä pienvoimalaitoksista.

Taulukko 3.7. Verkkoon kytkettyjen voimaloiden lukumäärä 2011

	tuulivoima	vesivoima	biovoima	mikro-CHP	aurinkovoima	muut
11kW	22	1	0	0	13	0
11-50kW	4	7	4	0	7	1
50-500kW	13	47	3	3	3	5
500kW-1M	8	17	7	0	0	9

Kuvassa 3.2 on tarkasteltu kuvaajien avulla mikrotuotantolaitteistojen lukumäärällistä muutosta aikajanalla 2009–2011. Tarkasteluun on otettu ainoastaan alle 11 kW tuotantolaitokset eli mikrotuotantolaitokset. Näitä laitoksia oli yhteensä 18 kpl vuonna 2009 ja vuonna 2011 niiden määrä oli kasvanut 36 kpl:een. Tuloksissa on myös huomioitava joidenkin tuotantomuotojen voimaloiden määrän väheneminen. Ilmiö ei kuitenkaan ollut huomattava alle 11 kW voimaloiden kohdalla. Kyselyssä ei selvinnyt voimaloiden määrän pienenemisen syytä. Kuvaajista voidaan havaita, että suurin kasvuvauhti on tuulivoimalaitoksilla, mutta aurinkovoimalaitoksilla kasvuvauhti on lähes sama. Lukumäärään peilaten aurinkovoimalaitosten määrä on kolminkertaistunut kahdessa vuodessa, kun taas tuulivoimaloiden määrä on kaksinkertaistunut. Vesivoimalaitosten ja muiden laitosten määrä on vähentynyt. Yhteenvedon voidaan todeta, että Suomessa tämän hetken mikrotuotanto toteutetaan auringon avulla joko

suoraan aurinkopaneeleilla tai välillisesti ilmavirtauksia hyväksikäyttäen tuulivoimalaitoksilla.



Kuva 3.2. Mikrotuotantolaitteistojen lukumäärällinen muutos vuosina 2009–2011

Taulukossa 3.8 on esitetty kyselyn tulos markkinoilla sähkönsä myyvien voimalaitosten lukumääristä. Taulukosta nähdään, kuinka verkkoon kytketyistä 36 mikrovoimalaitoksesta vain kaksi aurinkovoimalaitosta myy tuottamaansa sähköä markkinoilla. Prosentti on siis pieni, mutta ymmärrettävä pienen tuotannon takia. Lisäksi voimalat pyritään yleisesti mitoittamaan oman kulutuksen kattamiseksi ja näin optimoidaan tuotosta saatava taloudellinen hyöty.

Taulukko 3.8. Sähköä markkinoilla myyvien voimaloiden lukumäärä 2011

	tuulivoima	vesivoima	biovoima	mikro-CHP	aurinkovoima	muut
11kW	0	0	0	0	2	0
11-50kW	1	6	0	0	3	0
50-500kW	9	32	2	3	0	3
500kW-1M	8	16	5	0	0	9

Kysymyksen ”pystyvätkö tuotantolaitteet liittymäkohdassa täyttämään energiateollisuuden suosittamat asetteluarvot ja toiminta-ajat?” vastaukset olivat kirjavia. Toiset vastasivat puolesta ja toiset taas vastaan, usein lisäten, että varsinkin mikrotuotantolaitteistoille rajat ovat aivan liian pienet. Varsinkin LOM- suojaus oli lähes mahdoton saavuttaa. Kyselyn jälkeen juuri kyseistä arvoa muutettiin.

Verkkoyhtiöille tuli yhteydenottoja mikrotuotantoon liittyen hyvin paljon, mutta toteutuneet projektit jäivät vähäisiksi. Lisäksi verkkoyhtiöt kokivat, ettei heidän ohjeistuksensa ole ollut aukotonta, kuluttajat sekä heidän hankkimansa yritykset eivät ole olleet perillä suojauksista ja yleisesti mikrotuulivoimaloiden sähkön laatu huolestutti.

Kyselyn positiivisin asia vuonna 2011 kuluttajan näkökulmasta oli varmasti se, että yksi verkkoyhtiö oli valmis maksamaan asiakkaalle ylijäämästä. Oletettavasti kuitenkin rahallinen korvaus olisi ollut hieman sähkömarkkinahintaa heikompi. Vuonna 2014 tilanne on kuitenkin toinen. Monella verkkoyhtiöllä on oma tariffinsa pientuotannolle.

4 PIENTUULIVOIMALOIDEN LAITTEISTOT

4.1 Laitteistojen tekniset ominaisuudet

4.1.1 Pientuulivoimaloiden luokittelut

Tuulivoimalat voidaan jaotella usealla eri tavalla. Yleisin jakoperuste on tuulivoimalan akselin suunta, mutta ne on myös mahdollista jaotella voimaloiden toimintatavan tai säätötavan mukaisesti luokkiin.

Pystyakselisten tuulivoimaloiden suurimpana etuna voidaan pitää sitä, ettei voimalaa tarvitse erikseen suunnata tuulen suuntaan, vaan se kykenee ottamaan energiansa mistä tuulensuunnasta tahansa (kts. kuva 4.1). Lisäksi niiden optimaalinen pyörimisnopeus on alhaisilla tuulenopeuksilla n. 1-6 m/s (kts. kuva 2.10). Mainitut ominaisuudet ovat hyviä ympäristössä, jossa tuuli on pyörteistä, heikkoa tai tuulen suunta on herkästi muuttuva. (Windside; Savonius; Darrieus; Tuulivoimatieto)

Konseptin heikkoutena voidaan pitää pystyakselisten vähäistä pyyhkäisyypinta-alaa kokoonsa nähden sekä selkeästi heikompaa hyötysuhdetta vaaka-akselisiin voimaloihin verrattuna. Lisäksi, kuten kappaleessa 2.2.3 huomattiin, ilmavirtauksen energiasisältö on riippuvainen sen tilavuudesta, joten alhaisilla tuulenopeuksilla saatavan energian määrä on hyvin pieni. Pystyakselisiä tuulivoimaloita erottaa toisistaan niiden lapojen kirjava muotoilu ja materiaalivalinnat. Näillä onkin suuri vaikutus tuulivoimaloiden hyötysuhteisiin. Hyötysuhde on huomattavan vaihteleva, muutamasta prosentista jopa 40 prosenttiin. Tunnetuimpia malleja ovat mm. Windside, Savonius ja Darrieus. (Tuulivoimatieto)

Vaaka-akselisten tuulivoimaloiden hyödyllisin ominaisuus on niiden lapojen halkaisema pyyhkäisyypinta-ala, joka on huomattavasti suurempi kuin voimalan oma pinta-ala (kts. kuva 4.1). Lisäksi niiden energiantuotanto on suhteessa suuri omaan painoonsa nähden. Vaaka-akselisten tuulivoimaloiden lapojen rakenne näyttääkin paljon yhteneväisemmältä verrattuna pystyakselisten konseptiin. Vaaka-akselisten voimaloiden suurimmat erot tulevatkin siipien määrässä ja valmistuksessa käytetyissä materiaaleissa. Vaaka-akselisiä tuulivoimaloita markkinoilta löytyy yksi-, kaksi-, kolmi- ja monilapaisia konsepteja. Yksi- ja kaksilapaisilla tuulivoimaloilla siipien kuormitus on epäsymmetristä, kun taas kolmi- ja useampi lapaisissa voimaloissa siipien aiheuttamia voimia pystytään käsittelemään tasossa. Coriolisvoiman vaikutuksesta tuulivoimaloiden akseli pyrkii nousemaan tai laskemaan tuulen suuntaan kääntäessä. Yksi- ja kaksilapaisilla tuulivoimaloilla voima aiheuttaa enemmän mekaanista rasitusta ja häiritsevää ääntä tasapainoisempaan kolmilapaiseen verrattuna. (Tuulivoimatieto)

Mikrotuulivoimatuotannossa markkinoilla tarjottavien potkurimallisten voimaloiden lajien lukumäärä vaihtelee yleisesti paljon eri toimittajien välillä. Tarjonnalla halutaan spesifioida voimaloiden tehoalue juuri kohteen tuulioloille sopiviksi ja näin parantaa niiden hyötysuhdetta. (Burton et al. 2001; Tuulivoimatieto)



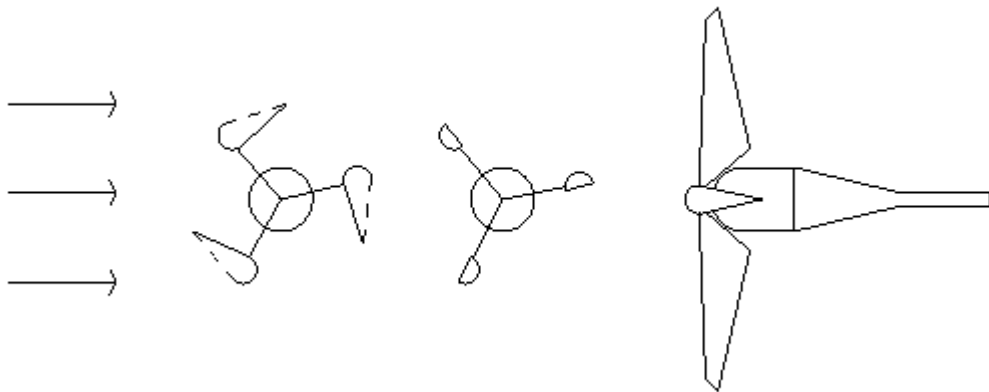
Kuva 4.1. Tampereen ammattikorkeakoululla sijaitsevat vaaka- ja pystyakselinen tuulivoimala

Vaaka-akseliset eroavat myös toisistaan niissä käytetyn tuuliohjauksen perusteella, joka ohjaa potkuria kohtisuoraan ilmavirtausta päin joko tuulen ylä- tai alapuolelle. Ohjaus tapahtuu yleisesti moottoroidusti isomman kokoluokan voimaloissa ja pientuulivoimaloiden kokoluokissa tuulen ohjurilla eli pyrstöllä. Pyrstö ohjaa potkurin mastosta katsottuna tuulen puolelle, jolloin tuulivoimalan toimintatavasta käytetään nimitystä *etutuulipotkuri* (kts. kuva 4.1). Toinen tapa on, että potkuri on mastosta katsottuna tuulen alapuolella. Näistä voimaloista käytetään myös nimitystä *takatuulipotkuri*. Takatuulipotkureiden etuna pidetään niiden edullisempia rakentamiskustannuksia ja parempaa toimintavarmuutta, koska ohjausta tuulen suuntaan

ei tarvita. Potkurin siivet kääntyvät ilmavirtauksen johdosta aina tuulen alapuolelle mastosta katsottuna. Haittana on mastosta aiheutuvat pyörteet ilmavirtaukseen ennen kuin se kohtaa potkurin. Pyörteet aiheuttavat tuulivoimalan pyöriessä myös melua ja värinää. (Tuulivoimatieto; Gipe 2004)

4.1.2 Toimintatavan eroavaisuudet

Tuulivoimalat pyrkivät jarruttamaan ilmavirtausta ja muuttamaan tämän jarrutuksesta aiheutuneen momentin sähköenergiaksi. Ilmavirtausta jarrutetaan tuulivoimalan siipien rakenteesta ja sijoittelusta riippuen kolmella eri tavalla. Pystyakselisten voimaloiden toiminta perustuu yleisesti joko nostovoiman ja vastuksen vaikutukseen tai siipien välillä vallitsevaan vastuseroon. Nykyaikaisten vaakakselisten tuulivoimaloiden suurin vääntömomenttiin vaikuttava voima tulee ilmavirtauksen siipiin aiheuttamasta nostovoimasta. Kuvassa 4.2 on havainnollistettu eri toimintatapoihin perustuvia tuulivoimaloita. (Gipe 2004; Windside, Savonius, Darrieus, Tuulivoimatieto)

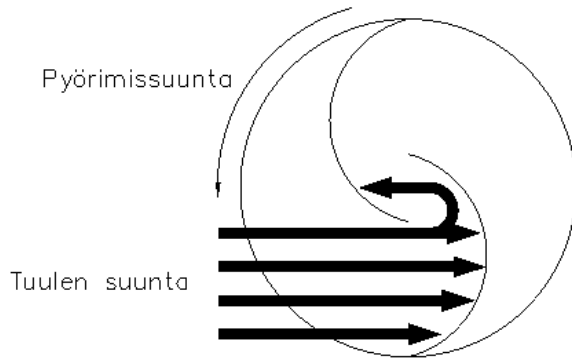


Kuva 4.2. Tuulivoimaloiden toimintatavan eroavaisuuksia

Vastuserolla toimivat tuulivoimalat ovat tyypillisesti pystyakselisia, matalakierroksisia ja pienitehoisia. Toimintaidea perustuu siihen, että siipi pyörähtää kehällä tuulen kanssa myötäsuntaan ja sen vastusarvo ilmavirtaukselle on mahdollisimman suuri. Siiven palatessa kehän toisella puoliskolla ilmavirtausta vasten, sen vastusarvo on taas mahdollisimman pieni. Tästä johtuen siipien kehänopeuden on aina oltava ilmavirtausta pienempi ja voimalat pyörivätkin toimiessaan hyvin matalilla kierroksilla. Huonona puolena tässä tyypissä on sen matala hyötysuhde, mikä on vain muutaman prosentin luokkaa. Hyötysuhdetta huonontaa oleellisesti se, että siipi pitää aina palauttaa vastatuuleen ja sen vastusarvoa ei saada tällä puoliskolla mitätöityä. Kehällä olevien siipien muotoa ja rakennetta on pyritty muuttamaan aina parempaan suuntaan. (Tuulivoimatieto)

Nostovoiman ja vastuksen avulla toimivien voimaloiden historiaa löytyy Suomestakin. Suomalainen Sigurd Savonius kehitti ja patentoi pystyakselisen tuuliturbiinin jo 1920-luvulla. Turbiinin poikkileikkausta on havainnollistettu kuvassa

4.3. Roottorin yleisenä hyötysuhteena on pidetty 12–15 prosenttia, jota voidaan pitää kohtuullisen hyvänä pysty akselisen tuulivoimalan hyötysuhteena. Siipien epäsymmetrisestä rakenteesta johtuen alkuperäinen voimala aiheutti voimakkaita poikittaisvoimia. Lisäksi käynnistysmomentti riippui sen hetkisen tuulen ja roottorin keskinäisistä suunnista. Usein käynnistys ja poikittaisvoimien eliminoimiseksi roottoreita sijoitettiin kaksi päällekkäin keskenään 90 asteen kulmaan. (Savonius, Tuulivoimatieto, Gipe 2004)



Kuva 4.3. Savonius-roottorin toimintaperiaate

Ehkä merkittävin jatkokehitelmä oli suomalaisen Windside Oy:n 1979 patentoima Windside-turbiini, jossa turbiinia kierretään ruuvin tavoin (kuva 4.4). Valttina kehittämälle pidetään laajaa tuulenopeuskaalaa, joka sopii niin matalille kuin kovillekin tuulille. Turbiini pystyy hyödyntämään alhaiset 1-3 m/s tuulet, kun taas potkurimalliset voimalat tarvitsevat normaalisti yli 4 m/s tuulenopeuden käynnistyäkseen. (Windside, Tuulivoimatieto)



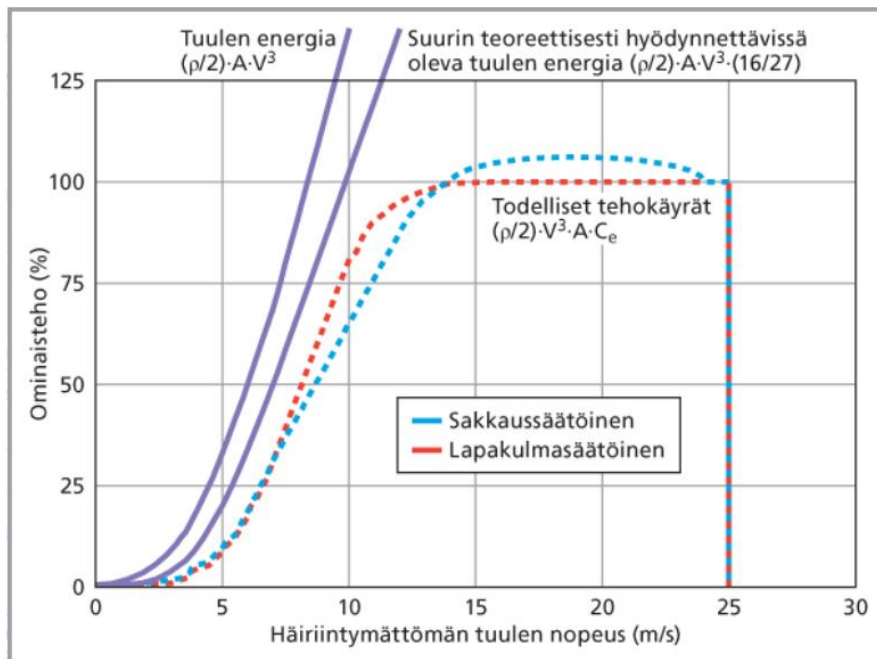
Kuva 4.4. Windside tuulivoimala (SVVE ja Windside, esite)

Tässä tutkimuksessa tarkasteltavien tuulivoimaloiden toiminta perustuu ilmavirtauksen aiheuttamaan nostovoimaan tuulivoimalan lavassa, kun ilmavirtaus ohittaa lavan. Puhutaankin *aerodynaamisesti* toimivista turbiineista. Ilmiötä sivuttiin kappaleessa 2.2.1 purjevene-esimerkin avulla. Nostovoima on sitä suurempi, mitä nopeammin ilmavirtaus ohittaa ilmavirtauksessa poikittain etenevän lavan. Suhteellisen tuulennopeutta saadaan toimintamallissa kasvatettua ohivirtaavaa ilmavirtausta suuremmaksi, koska tähän ilmavirtaukseen lisätään vielä siipien kehänopeudesta tuleva voima. Yleensä siipien kehänopeus onkin maanpäällistä ilmavirtausta nopeampi. Nostovoimaa käyttävät laitteet tuottavatkin yli 50 kertaa enemmän tehoa siiven pinta-alan nähden kuin vastuserolla toimivat laitteet. (Gipe, 2004, s. 111–112.)

4.1.3 Sääötötapojen mukainen jaottelu

Optimaalista tehoa haettaessa täytyy vaaka-akselisten tuulivoimaloiden lapojen ja tuulen välistä kohtauskulmaa säätää aina kutakin tilannetta vastaavaksi. Lisäksi liian kovilla tuulilla säätöä on tehtävä, jotta välttyttäisiin voimaloiden eliniän lyhenemiseltä. Tehonsäätötavat voidaan karkeasti jakaa kahteen ryhmään; *lapakulman säätö* ja *sakkaussäätö*. Toimintatavat ovat toisilleen vastakohtat. Lapakulman säädössä tuulen ja lapojen välistä kohtauskulmaa pienennetään ja näin saadaan nostovoima vähenemään, kun taas sakkaussäädössä kulmaa kasvatetaan niin paljon, että ilmavirtaus ei ole enää optimaalista ja näin nostovoiman vaikutus vähenee. (Tuulivoimatieto)

Aktiivinen sakkaussäätö on yleinen sääötötapo sellaisille tuulivoimaloille, jotka on suunniteltu pyörimään samaa kehänopeutta tuulennopeudesta riippumatta (*vakionopeuksinen* tuulivoimala), koska sakkauksen avulla pystytään säätämään tuulivoimalan pyörimisnopeutta ja tehokäyrrää halutun muotoiseksi. Toiminnan idea perustuu siihen, että lapojen ja tuulen välistä kohtauskulmaa lisätään eli käännetään lapoja poispäin tuulen suunnasta. Näin ilmavirtaus muuttuu liian suuresta kohtauskulmasta johtuen turbulenttiseksi ja nostovoima katoaa (kts. kuva 4.5). (Tuulivoimatieto)



Kuva 4.5. Tuulen energia, teoreettisesti saavutettava energia, sekä tyypilliset tehokäyrät sakkaus- ja lapakulmasäättöisille voimaloille.

Lapakulman säätö on aerodynaamisesti oikea tapa säätää tehoa. Matalilla tuulennopeuksilla kohtauskulma on pieni ja sitä kasvatetaan tuulennopeuden kasvaessa. Hyvinä puolina pidetään hyvää hyötysuhdetta, sekä sitä, että se soveltuu niin *muuttuva-* kuin kiinteänopeuksisille voimaloille. Haittana taas on, että säätö vaatii kehittyneen ja hintavan ohjausjärjestelmän toimiakseen. Konsepti on kuitenkin yleistynyt isomman kokoluokan voimaloissa, jotka toimivat muuttuvalla pyörimisnopeudella. Syynä on hyötysuhde, joka saadaan optimoitua jokaiselle tuulennopeudelle erikseen ja näin saavutetaan aina paras hyötysuhde tehokäyrän nousevalla osalla, jolla voimala toimii suurimman osan ajastaan. (Tuulivoimatieto)

Tuulivoimaloiden suunnittelussa haetaan optimointia kustannuksien ja ratkaisujen tuomien hyötyjen välillä. Pientuulivoimaloiden kohdalla optimointi tarkoittaa sitä, että ei ole taloudellisesti järkevää rakentaa voimaloiden lapoihin aktiivista säätömekanismia, joka ei kuitenkaan toisi merkittävää energiantuotannon lisäystä. Pientuulivoimalat lavat rakennetaankin täysin *kiinteälapaisiksi* tai lähes kiinteäksi.

Täysin kiinteälapaisen tuulivoimalan lavat on kiinnitetty runkoon siten, etteivät ne pysty reagoimaan potkurin kehänopeuteen tai maanpäälliseen tuulennopeuteen. Toimintatavan ongelmaksi tulee myrskysuojaus, koska nostovoima kiihdyttää kehänopeutta yhä nopeammaksi tuulennopeuden kasvaessa. Myrskysuojaus tässä toimintamallissa onkin toteutettu yleisesti kääntämällä potkuri pois tuulen suunnasta kovilla tuulilla, esimerkiksi pyrstöllä, joka ei ole samassa linjassa tuulivoimalan rungon kanssa.

Lähes kiinteälapaisella tuulivoimalalla tarkoitetaan voimaloita, joiden myrskysuojaus on toteutettu passiivisella lapakulmasäädöllä. Silloin alhaisilla tuulennopeuksilla lapakulma pidetään lähes vakiona, mutta kun tuulennopeus kasvaa

riittävän korkeaksi, lapojen etureunat alkavat kääntyä keskipakoisvoiman vaikutuksesta tuulta kohti pienentäen sekä kohtauskulmaa että nostovoimaa.

Kuvassa 4.6 on havainnollistettu WindSpot 3,5 kW pientuulivoimalan lavankääntömekanismia. Lapojen tyveen on asennettu vääntövivut, joiden tehtävä on kääntää lapoja keskipakoisvoiman avulla (kuva 4.6). Keskipakoisvoiman kääntöä vastustaa jousi, joka on asennettu navan keskelle. Mekanismi on hyvin yksinkertainen, toimiva ja suhteellisen edullinen rakentaa. Lisäksi sen toiminta mahdollistaa energiantuoton korkeilla tuulenopeuksilla ja näin saadaan oikeilla mitoituksilla myös hyötysuhdetta parannettua. Tämän työn puitteissa kaikista tutkittavista tuulivoimaloista löytyy edellä mainittu mekanismi.



Kuva 4.6. WindSpot 3,5kW patentoitu myrskysäätö

Yleisesti säätömekanismien osalta potkurimallisten pientuulivoimaloiden kohdalla konsepti on hyvin yhdenmukainen; muuttuvanopeuksinen kestopagneetti generaattori, ei aktiivista lapakulmansäätöä, myrskysuojaus toteutettu usein passiivisella lavankääntömekanismilla sekä tuuleen suuntaaminen passiivisesti peräsimmellä tai ilman.

4.2 Liitäntätekniiikka

4.2.1 Lainsäädännölliset vaatimukset

Suomessa sähköenergian tuotantoon, jakeluun ja käyttöön asetettavat rajat määrittää sähkömarkkinalaki. Sähköturvallisuuslaki määrittelee sähkölaitteistojen tekniset ominaisuudet turvallisuuden näkökulmasta. Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM) tekee sähköalaa sitovia päätöksiä lakien pohjalta. Energiaviraston (EMV) ja Turvallisuus- ja kemikaaliviraston (TUKES) tehtävinä on valvoa lakien noudattamista. Lisäksi ne mm. myöntävät toimiluvat, keräävät ja julkaisevat alaan liittyviä tietoja ja neuvovat, edistävät, sekä valvovat alan toimintaa. (Työ- ja elinkeinoministeriö, Energiamarkkinavirasto, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto)

Energiateollisuus ry (ET) on energia-alan elinkeino- ja työmarkkinapoliittinen etujärjestö. Sen tehtävä on edustaa sähköenergiasektorin toimijoita, tehdä selvitystä, neuvoa ja kouluttaa jäseniään sekä toimia tiedon välittäjinä. ET tekee lakien ja niistä tehtyjen päätösten perusteella ohjeistuksia ja suosituksia etenkin verkkoyhtiöiden toiminnalle. (Energiateollisuus ry)

Energiateollisuus ry jakaa verkkosivuillaan kattavan paketin pientuotannon verkkoon liittymisen ehdoista ja suosituksista. Sivulla on valmiita ohjeistuksia pienimuotoisen tuotantolaitteiston verkkoon liittämisen ehdoista koskien verkonhaltijaa, verkon suunnittelijaa tai loppukuluttajaa. Verkkoyhtiöiden internet-sivuilla löytyvät vielä tarkennetut ohjeet kuluttajalle sen alueen sähköverkon toimintamalleista. Seuraavaksi käydään läpi Energiateollisuus ry:n suosituksia ja ohjeistuksia kyseiseen aihealueeseen liittyen.

Tämän tutkimuksen pientuulivoimaloiden laitteistojen verkkoon kytkeytymistä koskeva standardi on eurooppalainen SFS-EN 50438, joka on vahvistettu suomalaislaseksi kansalliseksi standardiksi. Standardissa on maakohtaiset asetteluarvot. Suomen kohdalla on asetteluarvoihin tehty suomalainen lisäys muutoksiin, koska alkuperäiset asetteluarvot olivat hankalia saavuttaa. Standardin pohjalta energiateollisuus on tehnyt ohjeistuksen verkkoyhtiöille; sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon. Ohjeistuksen tekninen liite 1 on kohdennettu tarkemmin mikrotuotantolaitteistoille, eli nimellisteholtaan alle 50 kVA. Kyseinen liite on saatavilla Energiateollisuuden kotisivuilla. (Energiateollisuus ry). Seuraavaksi otetaan esille ainoastaan joitakin liitteen pääkohtia.

Laitteiston on pystyttävä tahdistumaan verkkoon ja pysymään verkon tahdissa. Sen on myös oltava yhteensopiva jakeluverkon sähköisten ominaisuuksien ja laadun kanssa. Laitteisto ei saa huonontaa sähkön laatua liittymispisteessä, eikä merkittävästi vaikuttaa jännitteen laatuun. Sen on täytettävä kansalliset ja kansainväliset standardivaatimuksen, koskien sähkön laatua (SFS-, IEC-, CENELEC-).

Tilanteessa, jossa jakeluverkko menee jännitteettömäksi, on laitteiston kyettävä katkaisemaan tehonsyöttö verkkoon päin. Suojausta kutsutaan nimellä saarekekäytön esto, lyhennettynä LOM-suojaus (Loss Of Mains). Taulukossa 4.1 on esitetty suojausten asetteluarvojen ohjeistus mukaan. Taulukossa U_n tarkoittaa verkon normaalia nimellisjännitettä. Asetteluarvojen ylittyessä verkkoliitännälaitteiston on pystyttävä toimimaan määritellyn 0,2 sekunnin sisällä. (Energiateollisuus ry)

Taulukko 4.1. Suojausvaatimukset tuotantolaitteistoille (energiateollisuus)

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0,2 s	$U_n + 10 \%$
Alijännite	0,2 s	$U_n - 15 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51 Hz
Alitaajuus	0,2 s	48 Hz
Saarekekäyttö	enintään 5 s	

Tilanteessa, jossa verkkoliitäntälaitte on kytkeytynyt irti suojauksesta johtuen, on sen minimissään oltava irti verkosta 20 sekuntia, ennen kuin se yrittää uudestaan kytkeytyä takaisin verkkoon. Jos tänä aikana verkon jännite poikkeaa sallituista rajoista, aika alkaa aina alusta. (Energiateollisuus ry)

Sähköturvallisuuden kannalta tuotantolaitos on varustettava erotuslaitteella, johon verkonhaltialla on esteetön pääsy. Kytkin on oltava sellainen, että sen pystyy lukitsemaan haluttuun asentoon. Kiinteistön sähkökeskuksella pitää olla merkittynä varoituskilvin takasyöttövaarasta, sekä opastus laitteiston irtikytkemiselle. (Energiateollisuus ry)

Energiateollisuus ry päivitti ohjeistusta helmikuussa 2013 niin, että myös Saksan mikrotuotantonormin VDE-AR-N 4105 mukainen verkkoliitäntälaitte on soveltuva jakeluverkon kanssa. Vuoden 2014 tammikuusta lähtien Energiateollisuuden sivuilta saa yleistietolomakkeen, jonka tarkoituksena on auttaa ja selventää asiakkaan ja verkkoyhtiön välillä tehtävää sopimusta. Lomake selventää hyvin pääkohdat tarvittavista toimenpiteistä sekä suojauksista. Yleistietolomake on saatavissa ET:n kotisivuilta. (Energiateollisuus ry)

Pitää kuitenkin huomioida, että edellä mainitut asiat ovat Energiateollisuuden ohjeistuksia verkkoyhtiöille ja jokainen verkkoyhtiö tulkitsee ohjeistusta sekä sen noudattamista omalta näkökannaltaan. Kuluttaja, joka on aikeissa ostaa pientuulivoimalalaitosta, on hyvä olla yhteydessä etukäteen paikalliseen verkonhaltiaan ennen verkkoliitäntälaitteiston hankkimista ja selvittää alueella noudatettavia käytänteitä.

4.2.2 Pientuulivoimaloiden liitäntäteknikka

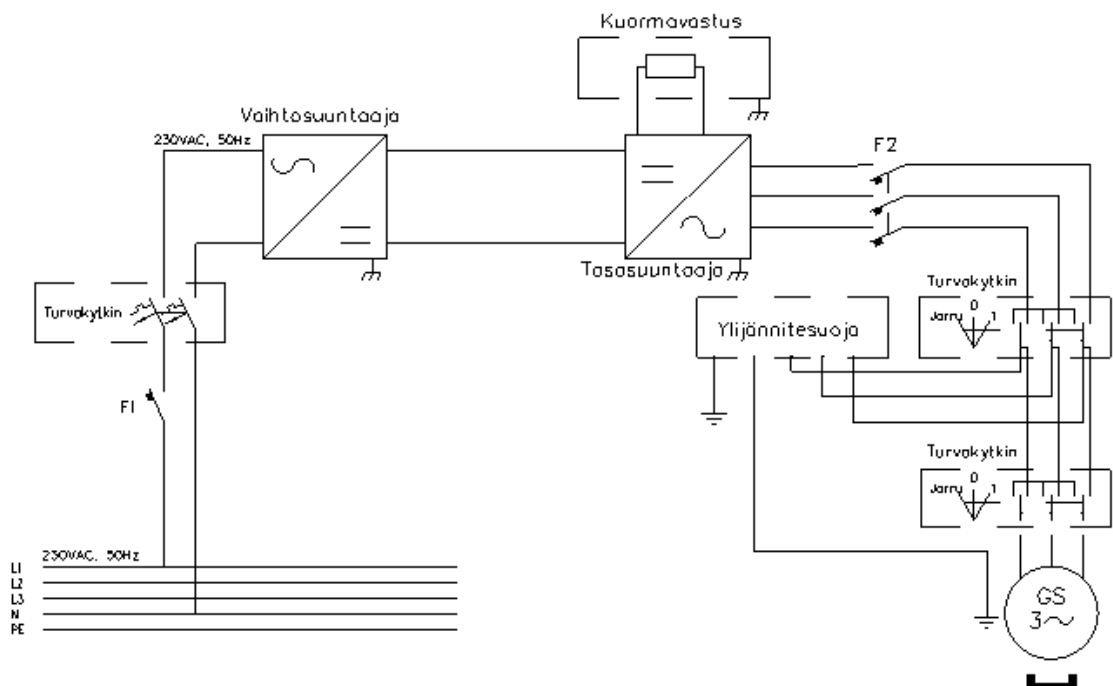
Pientuulivoimaloiden generaattorit tuottavat jännitettä, jonka käyrämuoto, amplitudi, sekä taajuuden vaihtelut ovat vasteita ilmavirtauksen käyttäytymiselle. Liitäntälaitteiden tehtävä on kuormittaa generaattorin jännitettä kullekin tuulennopeudelle optimaalisella tavalla sekä muokata tämä saatu teho sähköverkon laatukriteereihin sopiviksi jännitteeksi ja virraksi unohtamatta sitä, että toiminnan on tapahduttava turvallisesti aiheuttamatta vaaraa ympäristölle. Kappaleessa käydään ensiksi läpi tehon kulkusuunnassa pääkomponentit (generaattori, tasasuuntaaja ja vaihtosuuntaaja) ja tämän jälkeen turvallisuuteen liittyvät komponentit ja toimintatavat.

Markkinakatsauksen perusteella voidaan todeta, että nykypäivän pientuulivoimalat on varustettu kestomagneettitahtigeneraattoreilla. Generaattoriratkaisun hyvinä puolina voidaan pitää sen yksinkertaisuutta, korkeaa hyötysuhdetta, hyvää teho/paino-suhdetta, sekä alhaista kierrosnopeutta.

Kolmilapaisten potkurimallisten pientuulivoimaloiden roottorin kierrosnopeudet ovat yleensä muutaman sadan kierroksen luokkaa minuutissa, kun tuulennopeus ylittää 10:een m/s. Tämä tarkoittaa sitä, että oikeanlaisella käämityksellä kestomagneettigeneraattoreissa saadaan nimellinen pyörimisnopeus laskettua kyseiseen

arvoon. Näin päästään ratkaisuihin, joissa ei tarvita erillistä vaihteistoa, mikä taas lisäisi valmistus- ja huoltokustannuksia sekä huonontaisi hyötysuhteita.

Generaattorilta lähtevä epämuotoinen jännite tulee ensiksi tasasuuntaajalle (kts. kuva 4.7). Tässä työssä komponentista käytetään nimitystä tasasuuntaaja, mutta nimityksiä on myös muita kuten säädin ja ohjain. Tasasuuntaajalla on kaksi tehtävää: muuntaa villi vaihtojännite sopivaksi tasajännitteeksi välipiiriin sekä ohjata käyttämätöntä tehoa kuormavastukseen. Tasasuuntaus tapahtuu yleisesti passiivisen diodisillan avulla. Tämän jälkeen komponentissa on suodatus, joka parantaa tasasähkön laatua. Muunnettua tasasähköä mitataan pienen älyn avulla. Jos välipiirin tasajännite nousee liian korkeaksi, äly ohjaa transistorin avulla liiallista tehoa jarru-/kuormavastukselle. Kuormavastus on laitevalmistajasta riippuen joko erillinen tai se on integroitu samaan ohjauslaatikkoon. Integroituna vaihtoehtona ohjauslaatikossa on käytetty lisäksi vielä mahdollisesti erillistä jäähdytysjärjestelmää. Tasasuuntauskomponentti on yksinkertainen ja elektroniikan peruskomponenteista rakennettu.



Kuva 4.7. Pientuulivoimaloiden verkkoliitännässä käytetyt yleisimmät komponentit

Tasasuuntaajalta tuleva tasajännite tulee välipiiriin kautta vaihtosuuntaajalle. Muita nimityksiä ovat mm. invertteri, verkkoliitäntälaitte ja verkkoinvertteri. Vaihtosuuntaajan ensisijainen tehtävä on kuormittaa tuulivoimalan generaattoria kullekin tuulennopeudelle optimaalisella kuormalla. Optimoinnilla tarkoitetaan sitä, että lapojen kehänopeus suhteessa maanpäälliseen tuulennopeuteen eli toisin sanoen kärjen nopeussuhde pystyttäisiin pitämään parhaalla mahdollisella tasolla, jotta tuulivoimalan hyötysuhde olisi korkea. Vaihtosuuntaajan kuormittaessa liikaa tai liian vähän

generaattoria lapojen kehänopeus laskee tai nousee, jolloin lavan ja suhteellisen tuulennopeuden välinen kohtauskulma muuttuu epäedullisempaan suuntaan.

Vaihtosuuntaajan toinen tehtävä on tarkkailla sähköverkkoa. Sen pitää olla joka hetki tietoinen siitä, onko verkon jännite normaaleissa rajoissa. Jos näin on, se antaa itselleen luvan toimia, mutta heti kun verkon jännite katkeaa se irrottaa itsensä verkosta. Näin saadaan estettyä vaarallinen saarekesyöttö (LOM).

Sähköverkon taajuus, jännitteet sekä vaiheiden määrä ja niiden järjestys voivat vaihdella maiden välillä. Lisäksi lähes jokaisella maalla on omat laatukriteerit jotka vaihtosuuntaajan tulee täyttää, kun se on kytkettynä sähköverkkoon. Vaihtosuuntaajien valmistajat ovat ratkaisseet ongelman sillä, että vaihtosuuntaajissa on eri maiden asetusten valikot tai joissakin malleissa käyttäjä saa itse valita kyseiset arvot haluamakseen tietyn rajan sisällä. Ongelmana voi olla kuitenkin valmiiksi asetelluista rajoista se, että kaikkia maita, kuten Suomea, ei valikosta löydy.

Kolmas vaihtosuuntaajan tehtävä on muokata ja välittää eteenpäin välipiirin tasajännitteen kautta saatava teho sähköverkon laatukriteerit täyttäväksi jännitteeksi ja virraksi. Laatukriteereitä ovat taajuus, jännitteen amplitudi sekä jännite- ja virtakäyrän muoto. Tehonsyöttö pitää generaattorin tuoton aikana olla reaaliaikaista, jotta välipiirin jännite pysyisi halutuissa arvoissa. Pientuulivoimaloiden turvallisuuteen liittyviä asioita on saarekekäytön eston lisäksi generaattorin jarru, ukkossuojaus sekä toimilaitteiden erotuksen sähköverkosta mahdollistavat turvakytkimet. Generaattorin jarru voi toimia joko mekaanisesti tai sähköisesti. Mekaaninen jarru toteutetaan tyypillisesti rumpujarruna generaattorin sisällä. Mastoa pitkin alas tuodaan jarruvaijeri, jota kiristämällä voimalan saa pysäytettyä. Sähköinen jarru toimii kestopagneettigeneraattoreissa oikosulkemalla generaattorin vaihejohtimet yhteen. Tällöin virta ja sitä kautta liikettä vastustava teho ovat suurimmillaan ja generaattoria kuormittava resistanssi on pienimmillään. Huomioitavaa kuitenkin on, että sähköistä jarrua ei saa suurten oikosulkuvirtojen takia kytkeä päälle, jos generaattorissa on huomattavat kierrokset. Kuvassa 4.7 näkyy kaksi kappaletta sähköisiä jarrukytкимиä. Ne asennetaan yleensä generaattoripään turvakytkimien yhteyteen, käyttämällä kolminasentoisia kytкимиä, jarru-0-1. Toinen turvakytkimistä sijoitetaan maston juurelle ja toinen keskushuoneeseen. Kolmas turvakytkin asennetaan vaihtosuuntaajan viereen keskushuoneeseen verkon puolelle. Tämä turvakytkin on normaali 2-asentoinen, 0-1-kytkin. Keskushuoneen turvakytkimien tarkoitus on taata turvallinen huoltomahdollisuus liitälaitteistolle.

Ukkossuojaus on huomioitava johtavissa rakenteissa, mitkä sijaintikorkeudeltaan tai muotoilultaan erottuvat maaston ja rakenteiden muodoista korkeussuunnassa. Pientuulivoimalan metallinen masto olisi mahdollisuuksien mukaan hyvä maadoittaa perustuksistaan suoraan maaperään, joko kuparijohtimella tai huonosti eristävässä maaperässä kuparisauvoilla. (SFS-EN 50438)

Markkinoilla on myynnissä monia pientuulivoimaloihin tarkoitettuja ylijännitesuojia. Niiden tehtävä on eliminoida haitallisen suuret jännitteet pois generaattorin syöttökaapelin johtimista. Ylijännitesuojat sijoitetaan tyypillisesti

keskushuoneeseen ja kytketään toimintatavasta riippuen generaattorin syöttökaapelin vaihejohtimien kanssa sarjaan tai rinnan. Ylijännitesuoja vaatii toimiakseen maajohtimen, joka on yhdistetty mahdollisimman pienen impedanssin kautta maihin. Kohteesta riippuen pitää katsottava järkevin maadoitusreitti. Jos pientuulivoimalan maston perusta on saatu maadoitettua hyvin, on yksi tapa tuoda maston maadoituspisteestä generaattorin syöttökaapelin mukana kuparikaapeli ylijännitesuojalle.

Verkkoliitäntälaitteistot tulee suojata nimellisen virtansa mukaisilla johdonsuojakatkaisijoilla sekä verkon, että generaattorin puolelta. Osa valmistajista vaatii myös vikavirtasuojakytkimen asentamista verkon puolelle takuun voimassaolon ehtona.

4.3 Sopimukselliset asiat

4.3.1 Rakennus- ja toimenpideluvat

Kuten kaikkiin rakentamiseen, tuulivoimaloidenkin rakentamiseen sovelletaan maankäyttö- ja rakentamislain (132/1999, MRL) säännöksiä. Tuulivoimalat vaikuttavat lähiympäristöön siinä missä muukin rakentaminen. (Ympäristöministeriö).

Tyypillisesti pientuulivoimalan perustamiseen riittää toimenpidelupa varsinkin silloin kun alue on kaava-alueen ulkopuolella. Kaava-alueelle perustettavalle voimalalle voidaan joissakin tapauksissa vaatia rakennuslupa, etenkin jos masto on merkittävästi korkeampi muuhun maaston muotoihin nähden. Lupa-asioissa on eroavaisuuksia eri paikkakunnilla. Asiaa voi tiedustella oman kuntansa rakennuslupatarkastajalta. (Ympäristöministeriö)

4.3.2 Sähköverkonhaltijan kanssa tehtävä sopimus

Tuotantolaitoksen verkkoon kytkemiseen tarvitaan aina sähköverkonhaltijan lupa. Ennen mikrotuotantolaitteiston liittämistä on kuluttajan ilmoitettava ja anottavaa lupaa verkonhaltijalta energiateollisuus ry:n suosittelemalla yleistietolomakkeella (liite 6). Sähköverkonhaltijat määrittelevät itse liitäntävaatimukset tuotantolaitoksille energiateollisuuden verkostosuosituksen YA9:09 pohjautuen. (Energiateollisuus ry)

Sähköntuottajan ja verkonhaltijan välillä tehdään yleensä tuotannon liittymissopimus. Tähän sopimukseen on suositeltua soveltaa tuotannon liittymisehtoja (TLE11, LE05). Kuluttaja ja verkonhaltija tekevät normaalisti sähkönkäyttöpaikasta verkkopalvelusopimuksen, johon suositellaan sovellettavaksi verkkopalveluehtoja (VPE10). Lisättäessä sähkönkäyttöpaikkaan tuotantoa, joka siirtää osin tai kokonaisuudessaan tuotetun energian sähköverkkoon, laajennetaan sopimusta soveltaen siihen myös tuotannon verkkopalveluehtoja (TVPE11). (Energiateollisuus ry)

4.4 Huolto ja ylläpito

Tuulivoimalat pyritään suunnittelemaan kaikissa kokoluokissa siten, että ne toimisivat automaattisesti ilman jatkuvaa seurantaa. Pientuulivoimaloiden suunnittelussa on erityisesti pyritty minimoimaan huollon tarve. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikki ohjaukset ovat maston päässä pyritty suunnittelemaan siten, että ne pystytään toteuttamaan passiivisesti. Pientuulivoimaloiden valmistajat ennustavatkin tuotteilleen jopa 20 vuoden käyttöikä ja kotimaiset maahantuojat antavat joidenkin tuulivoimaloiden työlle ja osille viiden vuoden takuita koskien.

Valmistaja suosittelee WindSpot 3,5 kW pientuulivoimalalle tehtävää ylläpitohuoltoa 18 kuukauden välein. Tuotteen manuaalissa on yksityiskohtaisesti käyty läpi huollossa tehtävät toimenpiteet kuvien kera. Liitteessä 5 on esitetty huoltoraportti yhdelle tutkittavista tuulivoimaloista.

Huoltotoimenpiteet koskivat ainoastaan turbiini-osaa, joten myös käytetystä mastosta riippuen on myös sen kiinnityksestä huolehdittava asianmukaisella tavalla. Metallimastot koostuvat yleisesti elementeistä ja jokainen jatkoskohta on yhdistetty pulteilla toisiin nähden kiinni. Pulttien ja muttereiden kireyden tarkistus täytyisi huollon yhteydessä käydä lävitse. Harustetuissa vaihtoehtoissa pitää vielä tarkistaa haruksien kiinnitys ja kunto.

Tuulivoimalan vastamomenttia ohjaava automaattinen logiikka, elektroniikka, kuormavastus sekä voimalan ylijännitesuojaukset on pientuulivoimaloissa saatu sijoitettua maan pinnalle ohjauskeskuksiin helposti lähestyttävään paikkaan. Nämä laitteistot eivät yleensä tarvitse jatkuvaa huoltoa tai ylläpitoa. Ainoastaan sijoituspaikan pitää olla lämpötilaltaan ja kosteudeltaan valittujen laitteistojen vaatimusten mukainen, ja jäähdytyksen on toimittava. Laitteistojen ympärille pitää jättää tyhjää tilaa, jotta jäähdytys toimisi halutulla tavalla.

5 LAITTEISTOJEN VERTAILU TEORIASSA

Kappaleen tarkoitus on selvittää ja arvioida teoriapohjalta tuulivoimaloiden energiantuotantoa. Ensiksi esitellään työssä tutkittavat laitteistot ja tämän jälkeen käydään läpi teoriaosuuden pohjalta kuinka kuluttaja voi löytää, arvioida ja analysoida tuulitietoja paikkakohtaisesti yhdistämällä nämä tiedot vielä maaston rosoisuus- ja topologiatietoihin. Kappaleen lopussa lasketaan lisäksi tuottoennusteet pinta-ala – ja tehokäyrämenetelmän avulla eri voimaloille.

5.1 Tutkittavien laitteistojen esittely

5.1.1 Tuulivoima 1, Kaleva, TAMK

Tampereen ammattikorkeakoulun pientuulivoimala saatiin kytkettyä kokonaisuudessaan verkkoon 27.11.2012. Tuulivoimalan hankinta kuului osana Opi enempi -projektia. Projektin osatarkoitus oli rakentaa koululle oppimisympäristö, joka mahdollistaisi todellisessa ympäristössä opiskelijoiden pääsyn tutkia, seurata, käyttää ja huoltaa uusia energiaratkaisuja. Sähköenergian tuottamisen ratkaisussa käytettiin aurinko- ja tuulivoimaa.

Kuvissa 5.1 ja 5.2 on kuvattu tuulivoimalaa ja sen lähiympäristöä. Pohjoinen-itä-etelä sektoreilla rakennukset ja puusto muodostavat ilmavirtaukselle fyysiset esteet. Lounaaseen päin kuvattusta ilmansuunnasta näkyy tuulivoimalan paras suuntasektori ilmavirtauksen suhteen sen napakorkeudelta katsottuna. Toki tämänkin sektorin ilmavirtaukset ovat maaston rosoisuudesta johtuen pyörteisiä.



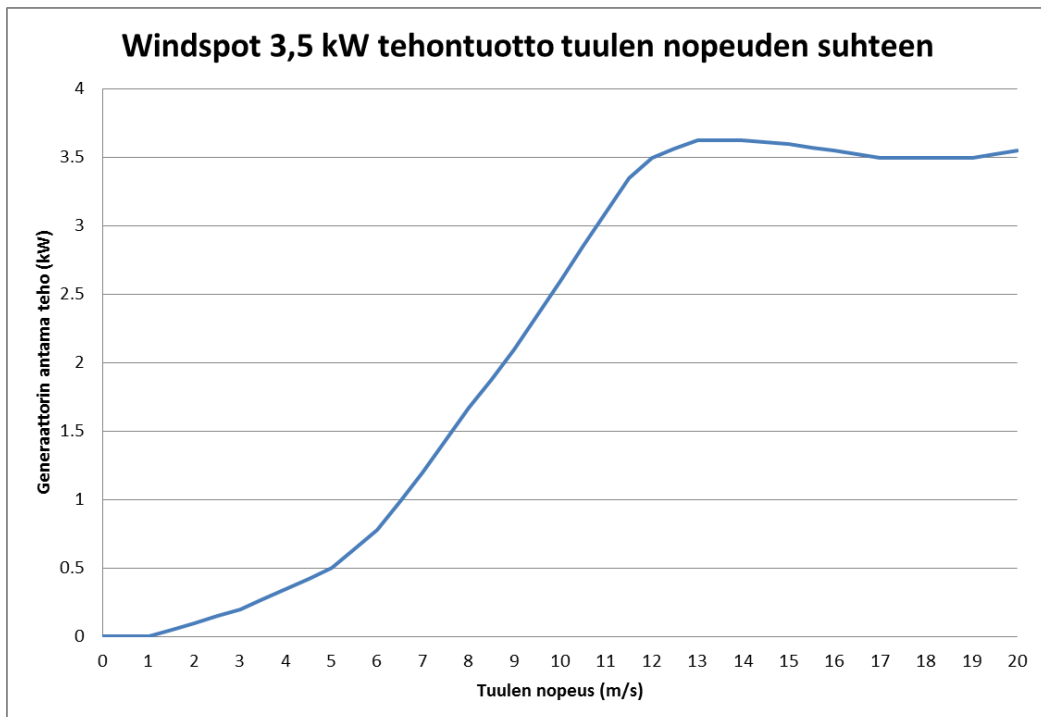
Kuva 5.1. Kaleva, TAMK:n tuulivoimala kuvattuna itään päin



Kuva 5.2. Kaleva, TAMK:n tuulivoimala kuvattuna lounaaseen päin

Tuulivoimalan valmistaja on espanjalainen Sonkyo Energy. Sonkyo Energyllä on hyvä maine laadukkaiden ja testattujen tuulivoimaloiden valmistajana. Kyseinen tuulivoimalamalli on nimeltään WindSpot 3,5 kW. Tuulivoimalan toimintamalli on yleinen vaaka-akselinen potkurimallinen voimala kolmella lavalla. Voimala on valmistettu pientuulivoimaloiden suunnittelukriteereihin kohdistetun IEC 61400-2 standardin mukaisesti.

Valmistajan antama tekniset tiedot löytyvät taulukosta 5.1. Tuulivoimalassa on 3-vaiheinen kestopagneettigeneraattori, jonka tuottokäyrä on esitetty kuvassa 5.3. Generaattorin nimellinen piste on 250 kierrosta minuutissa tuulennopeuden ollessa 11 m/s ja tehontuotto 3,5 kW. Tuulivoimalan potkuri on tuulen yläpuolella, eli ohjaus tapahtuu passiivisesti peräsimellä. Myrskysuojaus tapahtuu keskipakoisvoimaan perustuvalla lavankääntömekanismilla, joka esiteltiin jo kappaleessa 4.1.3.



Kuva 5.3. Valmistajan antama WindSpot 3.5 kW tehokäyrä tuulennopeuden suhteen

Verrattaessa taulukon 5.1 ja tehokäyrän (kuva 5.3) käynnistysnopeutta huomataan selvä eroavaisuus. Taulukon mukaan käynnistysnopeus on 3 m/s ja tehokäyrän tuotto alkaa jo 1 m/s:ssa. Tulevissa laskennoissa käytetään taulukon käynnistysnopeuden arvoa 3 m/s.

Taulukko 5.1. Tuulivoimala WindSpot 3,5 kW tekniset tiedot

Windspot 3,5 tekniset tiedot	
Teho	3,5 kW, 250 rpm
Roottorin halkaisija	4,1 m
Käynnistysnopeus	3 m/s
Nimellinen nopeus	11 m/s
Paino	165 kg
Kokonaispituus	3,2 m
Arvioitu vuosituotanto	5 550 - 11 300 kWh
Tyyppi	Vaaka-akselinen, tuulta vasten suuntautuva
Generaattori	Synkronoitu, kestopmagnetoitu; 3 vaihetta, 24-48-110-220 V, 50/60 HZ
Suunnan ohjaus	Passiivinen ohjaus peräsimellä
Tehon hallinta	Passiivinen keskipakoisvoimaan perustuva lavankääntö, varustettu iskunvaimentimella (patentointu malli)
Välitys	Vaihteeton suoravälitys
Jarru	Sähköinen
Ohjain	Verkko- tai akkukytkentä
Siivet	Lasikuituvahventeinen polyesterikomposiitti
Ääni	45 dB (A) mitattuna 60 m etäisyydeltä tuulen nopeudella 8 m/s (BWEA standardi)
Ruostesuojaus	Suljettu generaattori rakenne + galvanoitu + UV suojaamaali
Suunnittelustandardi	IEC61400-2 pientuulivoimaloiden standardin mukai

Tuulivoimala on asennettu 18 metriä korkeaan kotimaisen valmistajan tuulivoimalamastoon. Masto on itsekantava metallimasto, joka ei tarvitse haruksia. Se koostuu kolmesta 6 metrin pituisesta elementistä. Masto on maadoitettu 16 neliön kuparikaapelilla perustuksistaan.

Tasasuuntaajakomponentti sekä jarruvastus kuuluvat Sonkyo Energyn toimittamiin tuulivoimalapaketteihin. Tasasuuntaajan malli on MWP W4G-20K ja sen rinnalle on asennettu erillinen jarruvastus (4kW) mahdollista verkkokatkoa varten. Jarruvastuksen ohjausta käyttäjä pystyy itse muuttamaan tasapiirin jänniteasettelulla tasasuuntaajassa olevien dippikytkinten avulla. Taulukkoon 5.2. on kerätty tasasuuntaajan teknisiä tietoja.

Taulukko 5.2. Tasasuuntaajan MWP W4G-20K tekniset tiedot

Kuvaus	Arvo
Sisääntulojännite (sallittu)	0-500 V AC
Sisääntulojännite (toiminta)	40-500 V AC
Maksimi sisääntulovirta	40 A
Toiminnallinen ulostuloteho / kuormateho	12 kW/ 8 kW
Maksimi ulostulovirta / kuorman virta	40 A DC jatkuvaa/ 30 A rms
Hyötysuhde (@ 400 V AC, PFC \geq 0.7)	> 99 %
Ulostulojännite	0-750 V
Sallittu ympäristön lämpötila	-25-60 °C
Ääni	<40 dBA
Paino	6.4 kg
Koko (korkeus x leveys x syvyys)	370*275*135 mm

Vaihtosuuntaajana on Amerikkalaisen Power One yrityksen valmistama malli Aurora PVI-3.6-TL-OUTD-W. Kyseinen vaihtosuuntaajan malli eri kokoluokissa on yleisesti käytetty pientuulivoimaloissa. Taulukkoon 5.3 on kerätty valmistajan antamia teknisiä tietoja. Taulukossa näkyy myös verkkojen turvallisuusstandardit, joiden rajat on valmiiksi aseteltu suuntaajaan. Suomen sähköverkossa käytettyjä arvoja ei suoraan näistä oletusstandardeista löydy, joten vaihtosuuntaaja aseteltiin standardin SFS-EN 50438 Irlannin arvojen mukaan. Auroran vaihtosuuntaajissa käyttäjä pystyy itse määrittelemään generaattorin kuormituskäyrän usealla eri pisteellä.

Taulukko 5.3. Vaihtosuuntaaja PVI-3.6-TL-OUTD-W tekniset tiedot

Sisääntulot	
Maksimi jännite DC	600 V
Operointijännite DC	50-580 V
Täydentehon jännitetasot	120-530 V
Maksimi jatkuva virta DC	32 A
Maksimi hetkellinen virta DC	40 A
Ulostulot	
Verkkokytkennän tyyppi	yksivaiheinen
Nimellinen teho (@ cosφ=1)	3600 W
Maksimi teho (@ cosφ=1)	4000 W
Maksimi näennäisteho	4000 VA
Verkon käyttöjännite	230 V
Jännitteen vaihtelu-alue (maakohtainen)	180-264 V
Maksimi jatkuva virta	17.2 A
Maksimi hetkellinen virta	19 A
Verkon taajuus	50 Hz/ 60 Hz
Taajuuden vaihtelu-alue (maakohtainen)	47-53 Hz/ 57-63 Hz
Harmoonisten virtojen sisältö	< 2 %
Toiminnan suorituskyky	
Maksimi hyötysuhde	96.8 %
Valmiustilan kulutus	< 8 W
Kynnysteho	10 W
Turvallisuus	
Turvallisuus ja EMC standardit	EN62109-1, EN62109-2, AS/NZS3100, AS/NZS 60950, EN61000-6-1, EN61000-6-3, EN61000-3-11, EN61000-3-12
Verkon standardi	CEI 0-21, VDE 0126-1-1, VDE-AR-N 4105, G59/1, G59/2, EN50438 (ei kaikille maille), RD1699, AS 4777, C10/11, IEC 61727, ABNT NBR 16149

Taulukossa 5.4 on kerätty energiateollisuuden suosittelemat standardin EN50438 vaatimat ja vaihtosuuntaajan toiminnassa käyttämät verkon jännite- ja taajuusarvot kyseisellä maa-asettelulla sekä näiden toiminta-ajat. Kuten taulukosta huomataan, Power One Aurora pysyy energiateollisuuden suosittelemissa asetteluarvoissa, kun maa-asetuksiin on valittu Irlanti. Suomen toiminta-ajat ovat kuitenkin tiukemmat Irlantiin verrattuna, joten vaadittaviin aikoihin ei päästä. Asia on kuitenkin sovittu paikallisen sähköyhtiön kanssa ja he ovat tietoisia asetteluarvoista sekä toiminta-ajoista.

Taulukko 5.4. Standardin EN50438 verkon jännitteen ja taajuuden asetteluarvot, sekä toiminta-ajat verrattuna vaadittaviin, sekä vaihtosuuntaajan käyttämiin

Parametri	Asetteluarvo			Toiminta-ajat (s)		
	Suomi	IR (EN50438)	Power-One	Suomi	IR (EN50438)	Power-One
Ylijännite (V)	253	253	250.7	0.2	0.5	0.46
Alijännite (V)	195.5	207	209.3	0.2	0.5	0.46
Ylitaajuus (Hz)	51	50.5	50.45	0.2	0.5	0.32
Alitaajuus (Hz)	48	48	48.05	0.2	0.5	0.32

5.1.2 Tuulivoima 2, Särkänniemi, niemen kärki

Särkänniemen niemen kärjessä sijaitseva pientuulivoimala on Tampereen Sähkölaitoksen rakennuttama ja omistama. Se on yksi osoitus Tampereen Sähkölaitos Oy:n ja Tampereen Särkänniemi Oy:n yhteistyöstä ympäristöasioiden kehittämisessä. Tuulivoimala on käynyt saman kehityskaaren kuin Tampereen ammattikorkeakoulun tuulivoimala. Voimalat ovat olleet täysin identtiset keskenään aina niiden rakentamisesta lähtien. Lopulta verkkoliitälaitteiden vaihtamisessakin päädyttiin samoihin ratkaisuihin. Tämän tutkimuksen tuulivoimalaitos kokonaisuudessaan saatiin kytkettyä mittauksineen sähköverkkoon 27.4.2012.

Tuulivoimalaa koskevat tekniset tiedot ja asetelut on esitelty jo edellisessä kappaleessa. Maantieteellisesti voimala sijaitsee Särkänniemen tontin aivan itäisessä päässä, niemen kärjessä (kts. kuva 5.4). Kuva on otettu lounaaseen päin ja siitä voidaan havaita esteetön näkymä pohjoiseen päin katsottaessa. Toki tuulivoimalan ympäristössä on rosoisuutta aiheuttavia esineitä ja puustoa, jotka tekevät ilmavirtauksen pyörteiseksi joiltakin sektoreilta tultaessa.



Kuva 5.4. Särkänniemi, niemen kärjen tuulivoimala kuvattuna luoteeseen päin

5.1.3 Tuulivoima 3, Nekala, lämpökeskus

Tampereen Nekalan kaupunginosassa sijaitsee Tampereen Sähkölaitoksen lämpölaitos (kuva 5.5). Sen katolla sijaitsee Tampereen Sähköverkon toinen pientuulivoimala. Rakennus on maaston muotoihin nähden korkea, joten 12 metrin maston avulla päästään jo hyvälle napakorkeudelle pientuulivoimaloiden mittapuussa.



Kuva 5.5. Nekalan tuulivoimala kuvattuna koilliseen päin

Kuva 5.6 on kuvattu lämpölaitoksen katolta lounaaseen päin. Kuvasta havaitaan esteetön näkymä kyseiseen ilmansuuntaan. Kokonaisuudessaan ilmavirtauksella ei ole esteitä missään ilmansuunnassa, jos ei huomioida lämpölaitoksen piippua. Piippu aiheuttaa kapeahkon sokean kulman tuulivoimalan itäiselle sektorille.



Kuva 5.6. Näkymä Nekalan lämpölaitoksen katolta kuvattuna lounaaseen päin

Nekalan tuulivoimala saatiin kytkettyä verkkoon mittauksineen 7.10.2011. Tuulivoimalan tukirakenteiden suunnittelu ja toteuttaminen olivat Nekalan tuulivoimalan ehkä haastavimpia osatekijöitä. Laitoshallin katon rakenteista johtuen masto on tuettu jatkamalla masto metallipylyvään avulla aina kantavaan lattiaalaattaan asti. Masto itsessään on samalta valmistajalta kuin edellisissä tuulivoimaloissa, mutta se koostuu ainoastaan kahdesta 6 metrin elementistä.

Maston lisäksi Nekalan tuulivoimala eroaa edellisiin muutamalla tavalla. Ensinnäkin maston maadoitus on jatkettu 16 neliömillimetrin kuparilla rakennuksen pääpotentialintasauskiskoon, mikä johtuu käytetystä perustustavasta. Tämä toimintamalli ei kuitenkaan ole suositeltavaa standardin SFS-EN 50438 mukaan. Toiseksi vaihtosuuntaajan kokoluokka on suurempi edellisiin verrattuna, mutta sillä on kuitenkin sama valmistaja ja kuuluu samaan tuoteryhmään.

Vaihtosuuntaajana toimii Power One Aurora PVI-6000-TL-OUTD-W. Taulukkoon 5.5 on kerätty vaihtosuuntaajan teknisiä tietoja. Tiedot eivät oleellisesti eroa edellisten tuulivoimaloiden pienemmän kokoluokan vaihtosuuntaajasta. Kyseinen malli on kuitenkin huomattavan paljon ylimitoitettu kyseiseen käyttöön, koska generaattori ei pysty tuottamaan teknisten tietojen pohjalta kuin maksimissaan noin 3,7 kW hetkellistä tehoa (katso kuva 5.3).

Taulukko 5.5. Vaihtosuuntaaja PVI-6000-TL-OUTD-W tekniset tiedot

Sisääntulot	
Maksimi jännite DC	600 V
Operointijännite DC	50-580 V
Täydentehon jännitetasot	180-530 V
Maksimi jatkuva virta DC	36 A
Maksimi hetkellinen virta DC	44 A
Ulostulot	
Verkkokytkennän tyyppi	yksivaiheinen
Nimellinen teho (@ $\cos\phi=1$)	6000 W
Maksimi teho (@ $\cos\phi=1$)	6200 W
Maksimi näennäisteho	6670 VA
Verkon käyttöjännite	230 V
Jännitteen vaihtelu-alue (maakohtainen)	180-264 V
Maksimi jatkuva virta	30 A
Maksimi hetkellinen virta	40 A
Verkon taajuus	50 Hz/ 60 Hz
Taajuuden vaihtelu-alue (maakohtainen)	47-53 Hz/ 57-63 Hz
Harmoonisten virtojen sisältö	< 2 %
Toiminnan suorituskyky	
Maksimaalinen hyötysuhde	97.0 %
Valmiustilan kulutus	< 8 W
Kynnysteho	10 W
Turvallisuus	
Turvallisuus ja EMC standardit	EN62109-1, EN62109-2, AS/NZS3100, AS/NZS 60950, EN61000-6-1, EN61000-6-3, EN61000-3-11, EN61000-3-12
Verkon standardi	CEI 0-21, VDE 0126-1-1, G59/2, EN50438 (ei kaikille maille), RD1699, AS 4777, C10/11, IEC 61727, ABNT NBR 16149

5.1.4 Tuulivoima 4, Särkänniemi, Onkiniemi

Särkänniemen Onkiniemen tuulivoimala oli tämän tutkimuksen vertailukohta muille laadukkaille ja arvokkaille pientuulivoimaloille. Päätettiin etsiä markkinoiden halvimmasta päästä olevan pientuulivoimalan, joka edustaisi kuitenkin kokoluokassaan samaa tasoa muiden tutkittavien voimaloiden kanssa. Ratkaisuun päädyttiin osaksi internetin keskustelupalstojen perusteella, kun useampi henkilö oli toiminut samalla tavalla, mutta luotettavia tuottotietoja ei näistä kohteista löytynyt.

Sijainti valittiin tuulisuuden sekä turvallisuuden näkökulmasta. Paikka kuuluu Tampereen Särkänniemi Oy:n tonttialueeseen, mutta se on alueella, missä ei ole

asiakkaita tai muuten asiattomilta on pääsy kielletty. Näin haluttiin minimoida tuulivoimalan ja sen lapojen mahdolliset rikkoutumista aiheuttavat vahingot.

Lopulta hankittiin kiinalaisen Zhejiang Huaying Wind Power Generator Co.,Ltd yrityksen valmistaman tuulivoimalan. Yritys löytyi internetin hakupalveluiden avulla. Pakettiin kuului pientuulivoimala, tasasuuntaaja ja vaihtosuuntaaja. Hankinnassa oli omat riskinsä, koska tuulivoimala piti maksaa etukäteen. Toimitus kuitenkin saapui Tampereen ammattikorkeakoululle n. 7 viikon jälkeen maksun suorittamisesta.



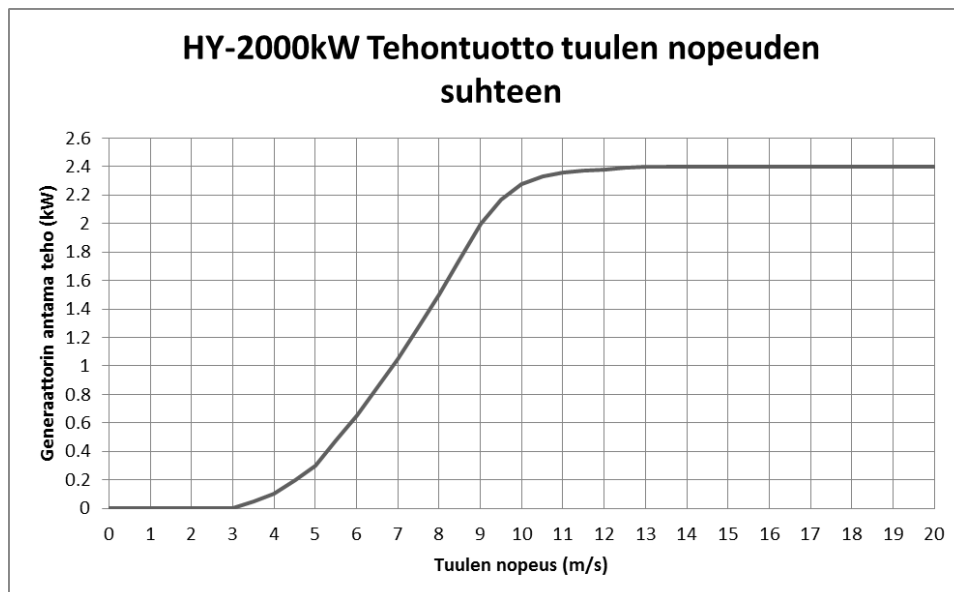
Kuva 5.7. Zhejiang Huaying Wind Power Generator Co.,Ltd lähettämä tuulivoimalapaketti

Generaattorin malli on HY-2kW ja sille on myönnetty CE-merkintä, sekä RoHS-merkintä. Taulukkoon 5.6 on kerätty tuulivoimalan tekniset tiedot ja kuvaan 5.8 valmistajan antama tehokäyrä. Käynnistymisnopeus annetaan teknisissä tiedoissa 2,5 m/s, joka on huomattavan alhainen. Valmistajan antamassa tehokäyrässä tuotto alkaa 3 m/s. Tulevissa laskennoissa käytetään tehokäyrän käynnistysnopeuden arvoa 2,5 m/s.

Taulukko 5.6. HY-2000 tekniset ominaisuudet

HY-2000 2-AD4	
Teho	2.0 kW, 360 rpm
Roottorin halkaisija	4,0 m
Käynnistysnopeus	2.5 m/s
Nimellinen nopeus	9 m/s
Maksimi tuulen nopeus	50 m/s
Paino	130 kg
Tyyppi	Vaaka-akselinen, alatuuleen suuntautuva
Generaattori	Synkronoitu, kestmagnetoitu; 3 vaihetta, AC
Toiminta-alue	2.5-25 m/s
Tehon hallinta	Passiivinen keskipakoisvoimaan perustuva lavankääntö
Välilytys	Vaihteeton suoravälilytys
Jarru	Mekaaninen/Sähköinen
Ohjain	Verkko- tai akkukytkentä
Siivet	Erikoismateriaali päällystettynä hatsilla ja lujitemuovilla
Ääni	Alle 65 dB, kun kärjen nopeussuhde on yli 0.4
Ruostesuojaus	Suljettu generaattori rakenne, IP54
Generaattorin elinikä	15 vuotta tai 30 000 tuntia

Tasa- ja vaihtosuuntaaja olivat Sungrow Power Supply Co, Ltd yrityksen valmistamia. Tasasuuntaajan malli on WEL-2K minkä tekniset tiedot on listattu taulukkoon 5.7. Verrattaessa tasasuuntaajaa edellä esitettyyn Sonkyo Energyn malliin toiminnallisia eroavaisuuksia on muutamia. Suurin näistä on se, että WEL-2K toiminnot on integroitu yhteen ohjausboxsiin. Se sisältää sähköisen jarrukytkimen ja kuormavastuksen.



Kuva 5.8. Valmistajan antamat tehokäyrät tuulen funktiona

Taulukko 5.7. Tasasuuntaaja WEL-2K tekniset tiedot

Kuvaus	Arvo
Sisääntulojännite	0-280 V AC
Ulostulojännite	0-400 V DC
Kuormalle ohjauksen käynnistysjännite DC	290 V
Maksimi kuormateho	2 kW
Kuormatehon ohjaus	Teho säädettävissä 0-2 kW
Kotelointiluokka	IP20
Sallittu ympäristön lämpötila	-20-40 °C
Jäähdytys	tuuletin
Paino	11 kg
Koko (korkeus x leveys x syvyys)	310*450*155 mm

Vaihtosuuntaajan malli on WG3K ja sen teknisiä tietoja on kerätty taulukkoon 5.8. Vaihtosuuntaajan kuormituskäyrän kulmakerrointa ja huipputehoa saa kuluttaja itse muuttaa haluamaansa arvoihin. Kuormituskäyrä on lineaarinen nimelliseen pisteeseen asti ja sille voidaan antaa tasajännitteen arvo kun teho on vielä 0 wattia, sekä jännitearvon piste, kun teho on nimellinen 3 kW. Tästä suuremmilla jännitearvoilla tehontuotto on aina 3 kW.

Taulukko 5.8. Vaihtosuuntaaja WG3K tekniset tiedot

Sisääntulot	
Operointijännite DC	200-450 V
Suosittelu generaattorin teho	1-2 kW
Maksimi virta DC	18 A
Ulostulot	
Verkkokytkennän tyyppi	yksivaiheinen
Nimellinen teho (@ $\cos\phi=1$)	3000 W
Maksimi teho (@ $\cos\phi=1$)	3300 W
Jännitteen vaihtelu-alue (maakohtainen)	180-260 V
Taajuuden vaihtelu-alue (maakohtainen)	47-51.5 Hz/ 57-61.5 Hz
Tehokerroin	> 0.99 nimellisessä tehossa
Maksimi hyötysuhde	94 %
Euroopan hyötysuhde	93 %
Harmoonisten virtojen sisältö	< 3 % nimellisestä tehosta

Sungrown vaihtosuuntaajassa jännitteen ja taajuuden vaihteluiden rajat näkyvät taulukossa 5.9. Käyttäjä saa itse valita sekä jännitteelle että taajuudelle ala- ja ylärajan kyseiseltä väliltä. Irtikytketyminen tapahtuu valituilla raja-arvoilla 0.2 sekunnin aikana. Taulukossa 5.9 on kerätty Energiateollisuuden suosittelemat raja-arvot sekä vaihtosuuntaajaan ohjelmoidut arvot.

Taulukko 5.9. *Energiäteollisuuden suosittamat verkon jännitteen ja taajuuden asetteluarvot, sekä toiminta-ajat, verrattuna vaihtosuuntaajaan aseteltuihin arvoihin*

Parametri	Asetteluarvo		Toiminta-ajat (s)	
	Suomi	WG3K	Suomi	WG3K
Ylijännite (V)	253	252	0.2	0.2
Alijännite (V)	195.5	196	0.2	0.2
Ylitaajuus (Hz)	51	50.7	0.2	0.2
Alitaajuus (Hz)	48	48.3	0.2	0.2

Kyseiselle liitäntälaitteelle tehtiin useita eri mittauksia laboratoriossa, koska haluttiin varmistaa manuaalien ja esitteiden antamien arvojen paikkaansa pitävyys. Itse generaattoria ei saatu sen vaikean muodon takia testipenkkiin kiinni, mutta sen sijaan käytettiin kotimaisen Axco motorsin generaattoria AF-PMG-2/250. Generaattorin nimellinen teho on sama 2 kW kuin tilatussa HY-2kW generaattorissa. Nimellinen pyörimisnopeus oli 250 rpm, joka oli vähemmän kuin kiinalaisessa versiossa, mutta tämä huomioitiin mittauksissa.

Mittauksissa ei ilmennyt valmistajan antamiin parametreihin eroavaisuutta. Vaihtosuuntaaja irrottautui testeissä verkosta jopa luvattua nopeammin. Laboratoriotesti oli kuitenkin hieman vajavainen laitteiston ajallisen irtautumisen mittauksissa, koska simuloitu kantaverkko otettiin kokonaan jännitteettömäksi. Todellisuudessa olisi pitänyt vaihdella kantaverkon jännitettä tai taajuutta ali- tai ylärajalle ja ottaa mittaukset myös tästä. Tämän tyyppinen mittaus olisi kuitenkin ollut vaativampi toteuttaa koulun laitteistoilla.

Tuulivoimalan masto päätettiin toteuttaa puisella sähköpylväällä, jonka korkeus oli n. 12 metrin luokkaa. Pylvään tyvi saatiin kiinnitettyä sijaintipaikalla suoraan kallioon. Pylväs tuettiin vielä kolmella haruksella, jotta voitiin varmistua siitä, että puinen pylväs pitää mahdollisimman hyvin asentonsa ja on riittävän tukeva. Puupylvään ja tuulivoimalan väliin piti suunnitella ja teettää kiinnitystä varten välilaippa. Työ teetettiin oppilastyönä Tampereen ammattikorkeakoulun koneosastolla.

Kuvassa 5.9 näkyy tuulivoimalan pystytyksestä otettu tilannekuva. Maisema on suoraan pohjoiseen päin kuvattuna tuulivoimalan sijaintipaikalta. Kuvan perusteella voidaan todeta että pohjoisilla sektoreilla ilmavirtauksella on esteettömät kulkureitit. Toki sijaintipaikka on rinteessä, puolivälin tienoilla koko mäen korkeuseroon suhteutettuna, joten tässä mielessä sijainti on haasteellinen.



Kuva 5.9. Särkänniemi, Onkiniemen tuulivoimalan pystyyn nostaminen., kuvattu pohjoiseen päin

5.2 Tuuliolosuhteiden arviointi

5.2.1 Keskimääräisen tuulen ja rosoisuuden arviointi napakorkeudella

Kappaleessa tehdään arviointia tuulen keskimääräisestä nopeudesta pientuulivoimaloiden napakorkeudella Suomen tuuliatlakselta saatavia tuulitietoja sekä teoriassa esiteltyjä kaavoja soveltaen.

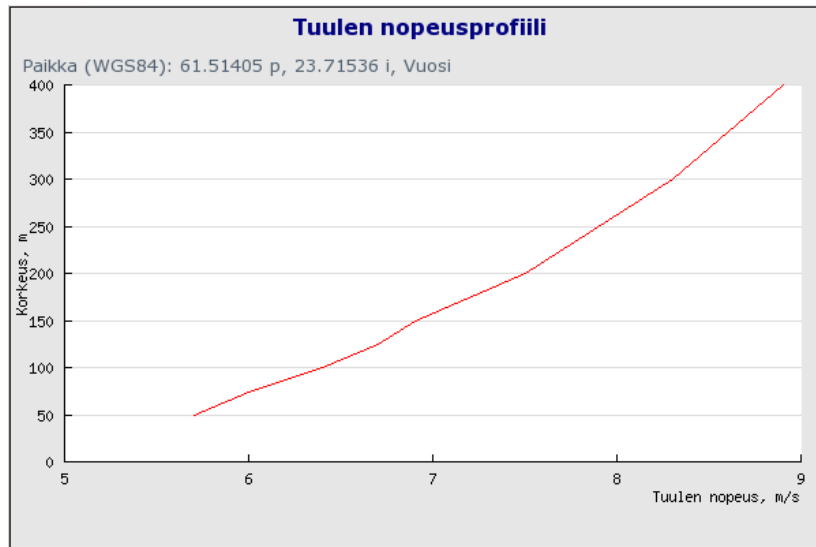
Tampereen keskustan alue muodostuu yhdeksästä 2,5x2,5 km kokoisesta hilaruudusta. Kuvassa 5.10. hilaruuduissa on näkyvissä tuulen keskimääräiset nopeudet vuoden tarkastelujaksona 50 m korkeudessa siirretystä nollapisteestä. Pientuulivoimaloiden kohdalla ei kuitenkaan ole taloudellisesti järkevää rakentaa mastoja näille korkeuksille. Tuuliatlas antaa pientuulivoimaa suunnittelevalle ainoastaan lähtötiedot tuuliprofiilista 50 m korkeudella, mutta kuluttajan on itse analysoitava tiedot matalammille korkeuksille.

Voimaloiden sijainti on ruutuihin nähden seuraava; TAMK:n tuulivoimala sijaitsee ruudussa WA14426, Nekalan tuulivoimala ruudussa WA14448 ja Särkänniemen tuulivoimalat ruuduissa WA14424 ja WA14425. Tarkasteltaessa keskimääräistä tuulennopeutta 50 m korkeudella, tuulisin paikka tällä kyseisellä korkeudella olisi Särkänniemen alue, missä keskimääräinen tuuli olisi 5,9 ja 5,7 m/s. Seuraavaksi otollisin paikka olisi TAMK:n alue, missä tuulennopeus on 5,6 m/s. Nekalan alueella keskinopeus jää 5,2 m/s:iin.

Suomen Tuuliatlakselta käyttäjä saa hilaruutujen tuulennopeusprofiilin kuvaajan kuvan 2.20 mukaisesti. Lisäksi käyttöliittymä antaa taulukkotiedot, mistä nopeusprofiili on laskettu. Kuten kuvasta 2.17 huomattiin, Särkänniemen Onkiniemen (WA14424) keskimääräinen tuulennopeus 50 m korkeudessa oli 5,7 m/s. Kuvassa 5.10 on kyseisen hilaruudun WA14424 tuulennopeusprofiili. Profiilin alin piste on edellä mainitussa

pisteessä. Huomataankin, että Suomen Tuuliatlas on suunniteltu ensisijaisesti teollisen kokoluokan tuulivoimaloiden suunnittelun helpottamiseksi.

Pientuulivoimalaa suunnitteleva kuluttaja kuitenkin pystyy hyödyntämään, laskemaan ja arvioimaan näiden lähtötietojen perusteella keskimääräistä tuulennopeutta eri napakorkeuksilla. Yksinkertaisin tapa on joko graafisesti tai taulukko-ohjelmaa apuna käyttäen jatkaa kuvan 5.10 tuulennopeusprofiilin kuvaajaa pienemmille napakorkeuksille. Toimintamallissa ei kuitenkaan huomioida maaston rosoisuuskertoimen muutosta mikä voi oleellisesti vaihtua korkeuden pienentyessä.

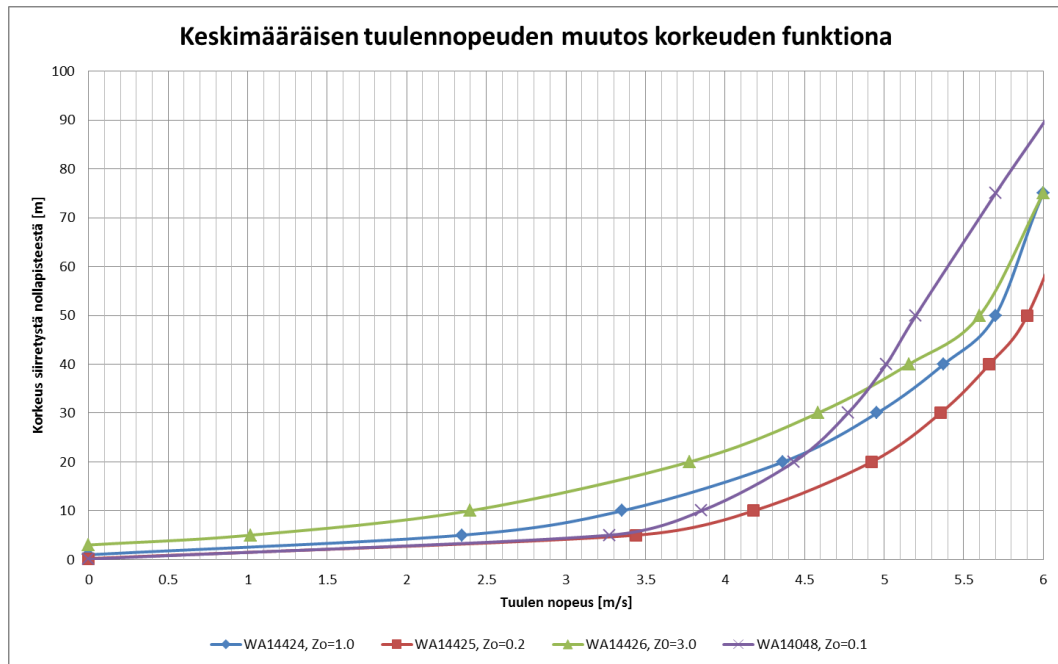


Kuva 5.10. Tuuliatlaksen tuulennopeusprofiili hilaruudussa WA 14424 50 m korkeudelta siirretystä nollapisteestä

Toinen ja mahdollisesti myös tarkempi tapa on laskea tuulennopeuden keskiarvoja kaavan 3 perusteella. Kaava pätee homogeenisessä pintakerroksessa, missä vallitsee stabiili ilmantila. Kaava on valmiiksi johdettu muotoon, missä siihen tarvitsee ainoastaan sijoittaa tuuliatlaksen antamat keskimääräinen tuulennopeus ja korkeus sekä päätellä maaston rosoisuusparametri pientuulivoimalan sijaintipaikan ympäristössä. Kaavalla saa tarkempia ennusteita, jos pystyy arvioimaan maaston rosoisuusparametria tarkasti korkeuden muuttuessa. Tämä onnistuisi esimerkiksi jakamalla korkeusprofiili 10 m osiin alle 50 metrissä ja arvioimalla maaston muotojen ja korkeuksien avulla rosoisuusparametrit jokaiselle osalle erikseen. Kuten jo teoriaosuudessa kävi ilmi, matemaattiset kaavat ilmavirtauksen keskiarvoja mallintaessa antavat tuulennopeuden arvoksi nollan, kun napakorkeus on samantarvoinen kuin rosoisuusparametrin arvo. Tämä nollakorkeus ei kuitenkaan ole todellisuudessa maaston korkeus, vaan hilaruudun sisällä keskiarvioitettun maaston nollakorkeus. Tämä seikka pitää huomioida rosoisuusparametreja määriteltäessä, sekä lopullista keskiarvoisen tuulennopeuden korkeutta määriteltäessä.

Kuvassa 5.11 on havainnollistettu tutkittavien tuulivoimaloiden keskimääräisen tuulennopeuden profiilin muutosta alle 50 m korkeuksilla. Kuvaajia on jatkettu Tuuliatlaksen 50 m korkeustietojen jälkeen kaavan 3 avulla. Rosoisuusparametrien

arvot näkyvät kuvaajan alareunassa. Nekalan voimalan (WA14048) rosoisuusparametrin z_0 arvoksi määriteltiin 0,1 m, joka oli tutkittavien tuulivoimaloiden rosoisuusparametreista pienin. Tuulivoimala sijaitsee paikalla, missä ei ole näkyviä esteitä mihinkään ilmansuuntaan, jos ei huomioida lämpölaitoksen piippua. Lämpölaitoksen korkeus on myös korkeampi muuhun ympäristöön verrattuna, joten rosoisuudesta aiheutuva turbulentsisuus ei arvion mukaan pysty suuremmin vaikuttamaan tuulivoimalan ilmavirtaukseen.



Kuva 5.11. Keskimääräisen tuulennopeuden muutos korkeuden suhteen alle 50 m korkeuksilla siirretystä nollapisteestä

Särkänniemen niemen kärjen tuulivoimalan maaston rosoisuusparametri määriteltiin arvoon 0,2 m. Tähän vaikutti se, että ilmansuuntien sektoreista lähes puolet on avointa Näsijärveä, mutta toiset sektorit ovat kaupunkimiljöötä, jonka maaston muodot kohoavat tuulivoimalan napakorkeutta ajatellen merkittäväälle tasolle.

Särkänniemen Onkiniemen tuulivoimalan rosoisuusparametri sai arvon 1,0 m. Kuten toisessakin Särkänniemen tuulivoimalassa, ilmansuunnan sektoreista puolet on järveä ja puolet kaupunkia. Ongelman vapaalle ilmavirtaukselle tekee erittäin jyrkkäreunainen kallio ja tuulivoimalaa ympäröivä rosoinen puusto ja kasvillisuus, jotka muodostavat huomattavan varjon tuulivoimalan taakse.

TAMK:n tuulivoimalan sijainti ei ole mitenkään maastoltaan ja rosoisuudeltaan järjellä perusteltavissa. Ainoa vapaa pääsy ilmavirtauksella on tulla lounaasta, mutta vastapuolella tuulivoimalaa, eli pohjoinen – itä -akseleilla sitä varjostaa n. kolminkertaisella korkeudella puusto ja rakennusyhdistelmät verrattuna tuulivoimalan omaan napakorkeuteen. Voimalalle määriteltiin rosoisuusparametrin arvoksi 3,0 m.

Taulukkoon 5.10 on kerätty jokaisen tuulivoimalan tiedot ja tarvittavat laskennat lopullista keskimääräistä tuulennopeutta määriteltäessä. Siihen on lopuksi myös laskettu

tuulen profiilista tuulivoimaloiden napakorkeudelta ennustettu keskimääräinen tuulennopeus kyseisellä sijainnilla. Nollatason siirtymä d määriteltiin teoriassa ja tässä laskennassa jokaiselle hilaruudulle arvioitiin siirtymä teorian pohjalta.

Otetaan esimerkkinä Särkänniemen niemen kärjessä sijaitseva voimala. Kuvasta 1.3 ja 2.17 nähdään hilaruudun sijoittuminen maantieteellisesti. Huomataan, että ruudusta n. 70 % on matalaa Näsijärveä ja loput 30 % on muuten alavaa mannerta. Tasoittaessa maaston topologian ja rosoisuuden tämä muutaman metrin korkeammalla oleva manner tasoitetaan koko ruudun alueelle. Koska mantereen osuus on vähäinen, sekä sen korkeusero pieni vallitsevaan maaston korkeuteen nähden hilaruudun sisällä, ei laskennallinen korkeus poikkea juurikaan Näsijärven pinnasta. Tuulivoimala sijaitsee aivan niemen kärjessä ja sen maston juuren asennuskorkeus on n. 1 metrin luokkaa järven pinnasta mitattuna. Laskennassa onkin oletettu, että kyseisessä tapauksessa ei tarvita siirtymää. Pintakerroksen tuuliprofiilin logaritminen kaava antaa kuitenkin tuloksen nolla, kun maaston korkeus on rosoisuusparametrin arvoinen, joten tämä rosoisuusparametrin arvo pitää lisätä tuulivoimalan napakorkeuden laskennalliseen arvoon. Tässä esimerkissä rosoisuusparametri oli kuitenkin erittäin pieni, joten sen vaikutus tulokseen on vähäinen. Laskennallinen napakorkeuden arvo saadaan näillä edellisillä toimenpiteillä arvoon 18,2 metriä. Kuvassa 5.11 esitetystä keskimääräisestä tuulennopeuden kuvaajasta pystytään tällä arvolla laskemaan tuulivoimalan napakorkeuden keskimääräinen tuulennopeus, joka on 4,8 m/s. Samalla periaatteella laskenta toistettiin kaikille tutkittaville tuulivoimaloille.

Taulukko 5.10. Keskimääräisen tuulennopeuden määrittäminen tuuliprofiilista huomioiden nollatason siirtymän

Tuulivoimalan nimi	Hilaruutu	Rossoisuus parametri Z_0 (m)	Nollatason siirtymä d (m)	Nollatason korjaus $z_k = z_0 + d$ (m)	Maston korkeus (m)	Laskennallinen napakorkeus z (m)	Keskimääräinen tuulennopeus V_{ka} (m/s)
Kaleva, TAMK	14426	3	-3	0	18	18	3.6
Särkänniemi, niemen kärki	14425	0.2	0	0.2	18	18.2	4.8
Nekalan, lämpölaite	14048	0.1	6	6.1	12	18.1	4.3
Särkänniemi, Onkiniemi	14424	1	-1	2	12	14	3.8

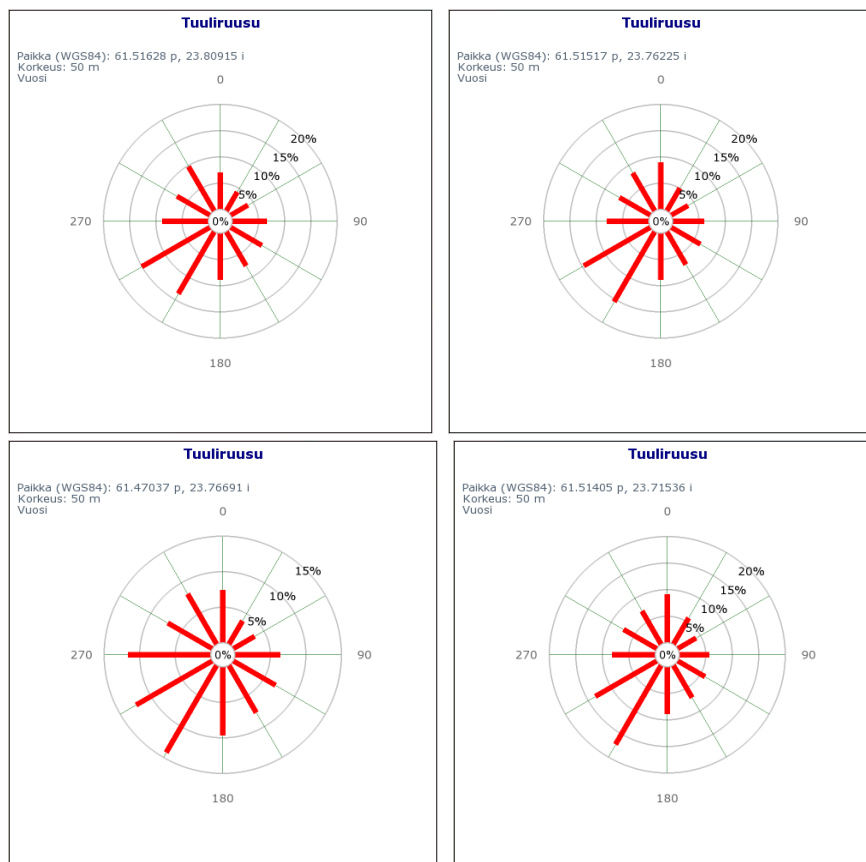
Taulukon 5.10. tuloksista nähdään, että Tuuliatlaksen lähtötietojen ja rosoisuusparametrien arvojen perusteella paras keskimääräinen tuulennopeus voimalan napakorkeudella on juurikin esimerkin voimalalla, eli Särkänniemen niemenkärjen tuulivoimala. Nekalan tuulivoimalan napakorkeudella on toiseksi paras keskimääräinen tuulennopeus, joka on 4.3 m/s. Seuraavaksi sijoittuu Onkiniemi 3,8 m/s ja viimeiseksi jää TAMK 3,6 m/s.

Kuvan 5.11 kuvaajista ja taulukon 5.10 tuloksista huomataan hyvin tuuliprofiilin logaritminen ja äkillinen muutos korkeuden laskiessa pintakerroksessa. Tuulitulokset eivät kuitenkaan ole vielä suoraan käyttökelpoisia tuulivoimaloiden energiantuotannon arviointia varten, vaan niihin on myös hyvä huomioida voimalan toiminta-alueella vaikuttavat fyysiset esteet, kuten maaston korkeuserot, rakennukset ja puusto.

5.2.2 Tuuliruusujen ja maaston analysointi

Suomen Tuuliatlas antaa tuuliprofiilin lisäksi myös ilmavirtauksen tuuliruusun jokaiselle hilaruudulle erikseen. Ongelma pientuulivoimaa suunnittelevalle on kuitenkin sama kuin tuuliprofiilissakin: tuuliruusun tietoja ei saa alle 50 metrin korkeuksille. Ratkaisuun ei kuitenkaan kaavoja välttämättä tarvita. Pientuulivoimalaa suunnitteleva henkilö voi kuvitella itsensä ilmavirtaukseksi muistaen, että ilmavirtaus menee sieltä missä vastusta on vähiten, väistämällä esteet jo kaukaa. Kappaleessa pohditaan ja analysoidaan ilmavirtauksen tuuliruusun mahdollista muuttumista 50 metrin korkeudesta aina pientuulivoimaloiden napakorkeudelle. Maaston havainnoinnin apuna on käytetty Maanmittauslaitoksen maastokarttoja ja korkeuskäyriä, joita on vielä väritetty maaston korkeuseroilla WASP-laskentaohjelman avulla.

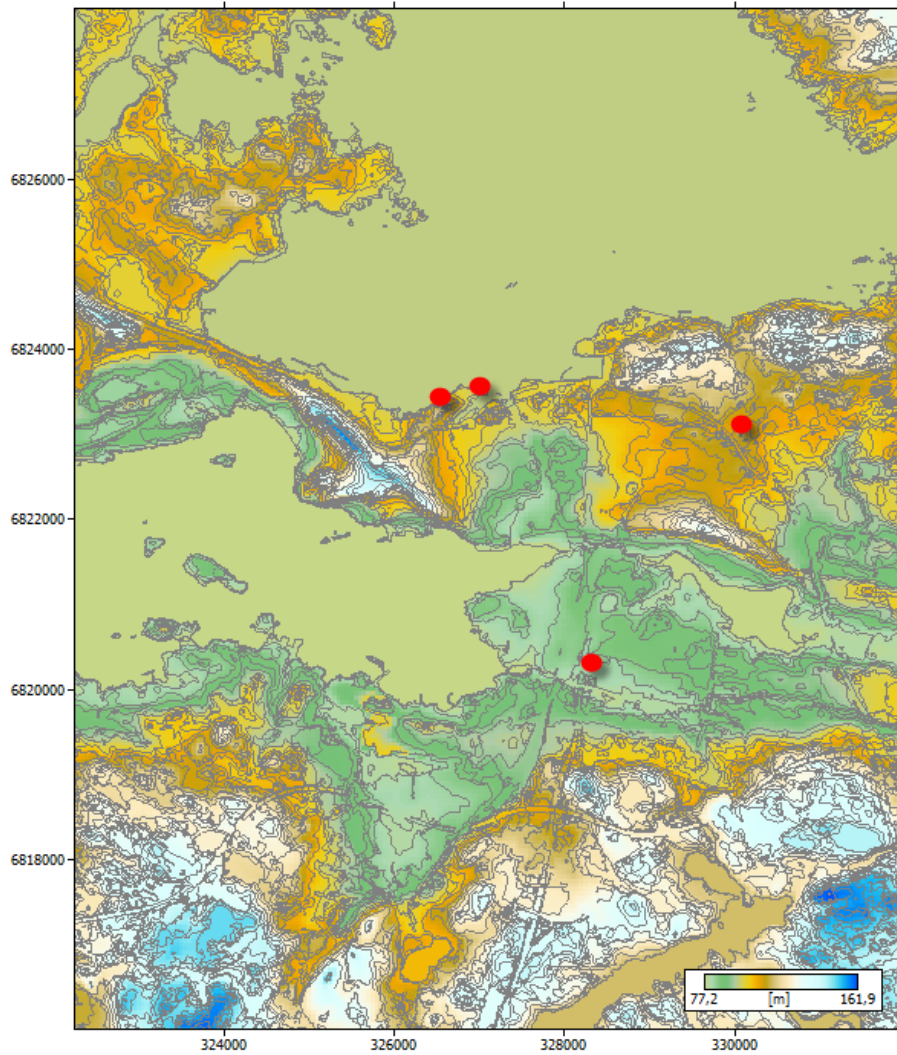
Kuvaan 5.12 on kerätty tutkittavien pientuulivoimaloiden hilaruutujen ilmavirtauksen tuuliruusut 50 metrin korkeudella siirretystä nollapisteestä. Voimaloiden ja hilaruutujen järjestys on seuraava; WA14426 Kaleva TAMK, WA14425 Särkänniemi niemen kärki, WA14048 Nekala lämpölaite ja WA14424 Särkänniemi niemen kärki. Kuvasta huomataan tuuliruusujen yhtäläisyys ja se, että tuulen vallitseva suunta on kaikissa ruusuissa lounaasta päin puhaltava ilmavirtaus. Tämä havainto tukee myös teoriassa kappaleessa 2.3.1 esille otettua Golf-virran vaikutusta.



Kuva 5.12. Tuuliatlaksen ilmavirtauksen tuuliruusut hilaruudun sisällä 50 m korkeudelta siirretystä nollapisteestä. Järjestyksessä TAMK, Niemen kärki, Nekala ja Onkiniemi

Tuuliruusujen yhteinen rakenne on hyvin samankaltainen. Tuulen todennäköisyys asteilla 256–195 on 5-10 % luokkaa jokaisella 30 asteen sektorilla. Tästä haarukasta väli 16–75 astetta on kaikissa tuuliruusuissa selvästi prosentuaalisesti epätodennäköisin ilmavirtauksen suunta jääden 5 % luokkaan sektorilla tai jopa sen alle. Verrattaessa tulosta todennäköisempään väliin eli 196–255 astetta tuulen todennäköisyys on näillä kahdella sektorilla 15 %:n luokkaa. Yhteenvetona voidaan summata, että tuuli puhaltaa todennäköisemmin lounaan suunnalta, noin 30 % varmuudella. Epätodennäköistä se on koillisesta, jonka todennäköisyys on vain 10 % luokkaa. Kaksi lounaaseen päin ja kaksi koilliseen päin osoittavaa sektoria vievät tuulesta todennäköisyydestä 40 %. Loppu 60 %:n todennäköisyys jakaantuu muille sektoreille lähes tasaisesti, eli noin 7 prosentin luokkaa sektoria kohden. On kuitenkin muistettava, että tilanne olisi tällainen 50 metrin korkeudessa, jos maasto olisi tasainen, mutta tutkittavien tuulivoimaloiden kohdalla maaston korkeuserot ja rosoisuudet ovat huomattavia hilaruudun sisällä.

Kuvan 5.13 avulla havainnollistetaan Tampereen keskustan alueen korkeuseroja. Tampereen keskustan alue on muodostunut kahden ison järven väliin. Pohjoisin näistä on Näsijärvi (265 km², 95 m mpy) ja eteläisin Pyhäjärvi (124 km², 77 m mpy). Näsijärvi on muodoiltaan pitkulainen etelä-pohjoissuunnassa. Järven eteläisin piste, missä se muuttuu Tammerkoskeksi, sijaitsee aivan Särkänniemen kupeessa. Keskustan alueen rikkoo kaakkois-luoteissuunnassa isot Kalevan, Pyynikin ja Pispalan soraharjut, joiden korkein kohta kohoaa aina 162 metriin mpy. Tammerkoski laskee aivan ydinkeskustan kautta Pyhäjärveen. Pyhäjärvi lähtee avautumaan lounaissuunnassa, mutta on muodoltaan kuitenkin sellainen, että ilmavirtaus ei pääse suoraan puhaltamaan keskustan alueelle.



Kuva 5.13. Tampereen keskustan korkeuserot koordinaatistossa (YKJ). (Maanmittauslaitos, WAsP)

Kuvasta 5.13 voidaan päätellä, että keskustan alue on haasteellinen pientuulivoimaa ajatellen. Keskustan alue on kauttaaltaan jo pelkkien maaston muotojenkin perusteella hyvin rosoista järviä lukuun ottamatta. Huomioiden vielä kaupunkialueen rakennukset ja korkea puusto on ilmavirtauksen lähes mahdoton edetä esteettömästi ja pyörteettömästi pintakerroksen alueella. Korkeimmat paikat näkyvät kuvassa vaalean- tai tummansinisellä värillä, eli korkeus on 160 metrin tietämillä. Tutkittavien voimaloiden sijainnit näkyvät kartassa punaisilla pisteillä.

Ottaen huomioon kuvassa 5.13 havainnollistetut maaston muodot ja analysoiden niitä kuvan 5.12 ilmavirtauksen tuuliruusuihin, päästään arvioimaan tuulen suunnan todennäköisyyksiä vielä tarkemmin. Edellä todettiin, että 50 metrin korkeudessa siirretystä nollapisteestä, maaston topologia tasattuna, tuulen todennäköisyys lounaissuunnasta (asteina 196–255) on 30 % luokkaa. Yhdistämällä tähän tietoon maaston muodot ja tiputtamalla korkeutta voidaan todeta, että mihinkään voimalan sijoituspaikkaan eivät nämä yleisimmät tuulet pääse suoraan puhaltamaan. Seuraavissa kappaleissa on analysoitu paikkakohtaisesti tuulivoimaloiden sijaintien perusteella,

mitkä tuuliruusun sektoreista pyyhkiytyvät pois ja mitkä pystyvät toteutumaan. Tässä tutkimuksessa sektoreiden pois pyyhkiytyminen huomioidaan laskennoissa ilmavirtauksen hyötysuhteella η_i .

Särkänniemen tuulivoimaloiden lounaispuolella sijaitsee Pispalan ja Pyynikin soraharjut ja muutenkin kokonaisuudessaan eteläiset sektorit ovat maastoltaan huomattavan korkeita verrattuna tuulivoimaloiden napakorkeuteen. Koska maaston topologia leikkaa näiden sektoreiden tuulet pois, on tämä seikka huomioitava lopullista ilmavirtauksen hyötysuhdetta arvioidessa. Pohjoisen puoleiset sektorit ovat täysin esteettömiä, joten hyötysuhteet pitäisi olla kohtuullisen hyviä. Ilmavirtaus tulee eräänlaiseen sumppuun puhaltaessa pohjoisilta sektoreilta. Sumpusta pois pääseminen vaatii ilmavirtaukselta joko korkeuden nostoa ja tai ohjautumista Tammerkosken yläjuoksun kohdalle, koska tässä on maaston matalin uoma, mistä ilmavirtaus pääsee kevyesti eteenpäin. Edellä oleva ilmiö voi myös nostaa ilmavirtauksen hyötysuhdetta.

Nekalan tuulivoimalan sijainti on kuvasta 5.13 katsottuna ideaali n. 500 metrin säteellä olevassa ympyrässä. Ilmavirtaus pääsee tällä alueella puhaltamaan täysin estoitta jokaiselta sektorilta. Ongelmana on, että ympyrä on montussa sitä ympäröivään maastoon nähden ja voimakkaimmat ilmavirtaukset leikkaantuvat pois. Ainoastaan ilmavirtauksen kannalta esteetön sektori on suoraan lännestä puhaltava ilmavirtaus. Lisäksi ilmavirtaus voi tiivistyä tälle sektorille laajemmaltakin alueelta ja nostaa nopeuttaan, koska maaston muodot voivat ohjata ilmavirtausta kulkemaan kyseistä reittiä pitkin.

TAMK:n pientuulivoimalan sijoituspaikan alue on ympäriltään korkeampien mäkien peitossa. Pienet aukot jäävät kaakon ja lounaan suuntaiseen ilmavirtaukseen. Kuten jo edellisessä kappaleessa asiaa sivuttiin, on voimala rakennusten ympäröimä. Kaakosta päin rakennukset estävät ilmavirtauksen ja taas lounaasta päin ilmavirtaus ohittaa tuulivoimalan hyvissä ajoin, koska takana on korkeita rakennuksia ja puustoa.

Taulukkoon 5.11 on arvioitu aiempien kappaleiden perusteella tuulivoimaloiden ilmavirtauksen esteellisyydestä johtuvat ilmavirtauksien hyötysuhteet. Näiden tarkoitus on korjata laskennassa esteiden aiheuttamaa negatiivista vaikutusta ilmavirtaukseen.

Taulukko 5.11. Tuulivoimaloiden ilmavirtauksien hyötysuhteet

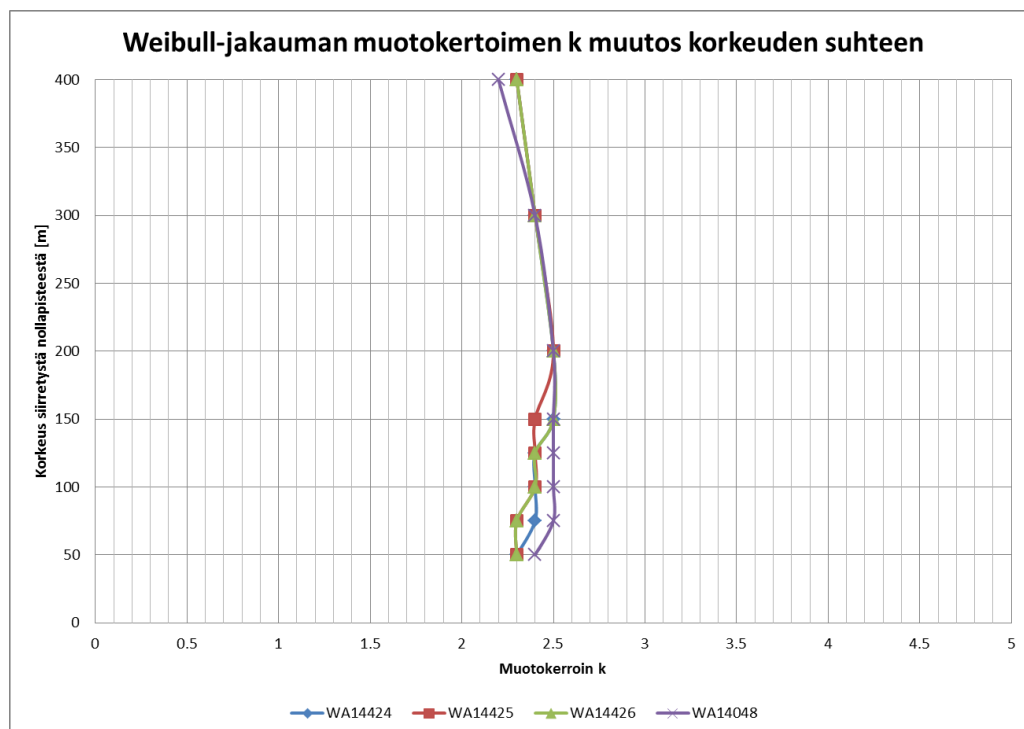
Tuulivoimala	Hilaruutu	Ilmavirtauksen hyötysuhteet η_i				Ka η_i
		Sektori 1-90°	Sektori 91-180°	Sektori 181-270°	Sektori 271-360°	
Kaleva, TAMK	14426	0.1	0.1	0.5	0.5	0.3
Särkänniemi, niemen kärki	14425	0.8	0.4	0.1	0.7	0.5
Nekala, lämpölaite	14048	0.4	0.4	0.6	0.9	0.6
Särkänniemi, Onkiniemi	14424	0.7	0.2	0.1	0.6	0.4

5.3 Teoreettisten tuottoennusteiden arviointi

5.3.1 Ilmavirtauksen energia pinta-alamenetelmällä

Kappaleessa lasketaan teorian pohjalta maksimaalinen energia ilmavirtauksen perusteella jokaiselle tutkittavalle tuulivoimalalle. Potkurin pyyhkäisyypinta-alaan perustuvassa tarkastelussa ainoa tekninen tieto tuulivoimaloista oli niiden potkurin halkaisija. Laskennoissa huomioidaan kuitenkin myös tuulivoimaloiden käyntiinlähönnopeudet sekä rajoitetaan tehollaskenta valmistajien antamiin maksimitehoihin. Kappaleessa 5.1 käytiin läpi tuulivoimaloiden teknisiä tietoja ja noteerattiin, että kaikkien tuulivoimaloiden potkureiden pyyhkäisyypinta-alat ja käyntiinlähönnopeudet ovat lähellä toisiaan. Särkänniemen Onkiniemen tuulivoimalassa halkaisija oli 4 metriä sekä käyntiinlähönnopeus 2,5 m/s ja kaikkien muiden arvot vastaavasti 4,1 metriä ja 3 m/s. WIndSot 3,5 kW generaattorin arvioitu maksimiteho on kuvan 5.3 perusteella 3,7 kW ja HY-2000 generaattorin vastaava teho on 2,4 kW kuvan 5.8 perusteella.

Weibull-jakaumaan tarvittavat keskituulennopeudet selvitettiin kappaleessa 5.2.1. Tarvittavista lähtötiedoista todennäköisyysjakauman laskemiseen tarvittiin myös muotokertoimen parametrin k arvon. Rayleigh-jakauma oli yleisesti käytetty jakauma ($k=2$) tuulivoimaennusteita laskettaessa mantereilla. Tässä laskennassa kuitenkin selvitettiin muotokertoimen arvoja Suomen Tuuliatlaksen tutkittavien hilaruutujen arvojen perusteella. Kuvaan 5.14 on piirretty kaikkien tuulivoimaloiden hilaruutujen muotoparametrien arvot korkeuksilla 50–400 metriä siirretystä nollapistestä.

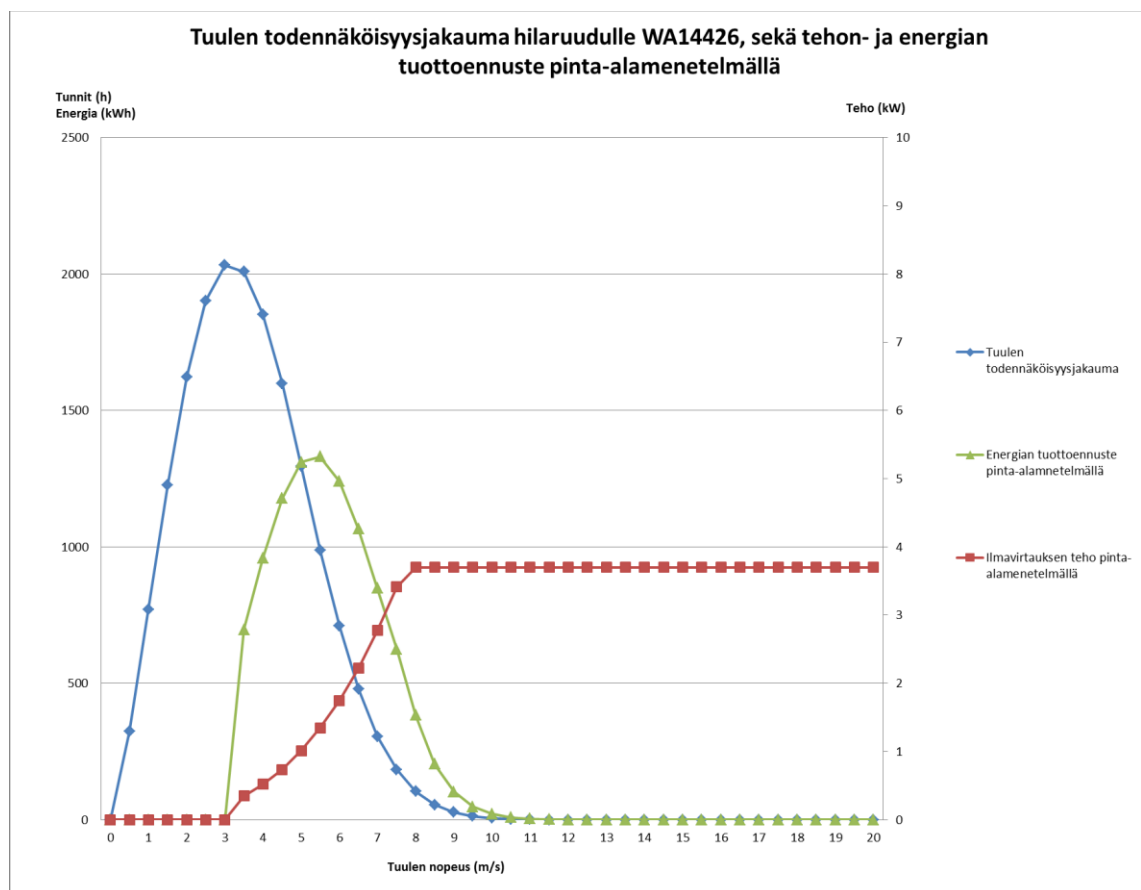


Kuva 5.14. Weibull-jakauman muotokertoimen k arvon muutos korkeuden muuttuessa

Vertailemalla kaikkien hilaruutujen muotokertoimien arvoja eri korkeuksilla, voidaan sanoa, että muotokertoimen arvo vaihtelee välillä 2,2–2,5. Kaikkien muotokertoimien kuvaajat näyttävät kaartuvan huippulukemista pienempiin arvoihin kun korkeus vähenee. Siksi seuraavissa laskuissa kaikkien tuulivoimaloiden tuulen todennäköisyysjakaumaa laskettaessa muotoparametrin arvoksi on annettu 2,3.

Kuvassa 5.15 on esitelty TAMK:n tuulivoimalan tuottoennusteen laskenta graafisilla kuvaajilla. Tuulen todennäköisyysjakauman arvot olivat siis $v_{ka}=3,6$ m/s ja $k=2,3$. Todennäköisyysjakauma kerrottiin vuoden tunneilla, jotta tiedettiin kuinka monta tuntia tuulee milläkin nopeudella. Ilmavirtauksen tehon kuvaaja saatiin teorian kaavalla 9, mihin huomioitiin kyseisen tuulivoimalan pyyhkäisyypinta-ala ja ilmantiheyden arvoksi annettiin standardi $1,225$ kg/m³.

Kertomalla tuntijakauma ja tehojakauma keskenään saadaan energian tuottoennusteen kuvaaja (kaava 10). Tuottoennusteen kuvaajaan on vielä huomioitu pientuulivoimalan käynnistysnopeus, joka oli 3 m/s. Kuvaajasta voidaan lukea, että todennäköisesti paras tuotto on odotettavissa 5–6 m/s tuulilla.



Kuva 5.15. Tuulen todennäköisyysjakauma ja lasketut teho- ja tuottoennusteet pinta-alamenetelmällä TAMK:n tuulivoimalalle

Sama laskenta toistettiin jokaiselle tutkittavalle tuulivoimalalle. Taulukkoon 5.12 on kerätty välivaiheiden tuloksia. Vuotuinen energia saatiin laskettua energian

tuottoennusteen kuvaajan pinta-alasta kaavalla 11. Tulokseen huomioitiin vielä edellisessä kappaleessa lasketut ilmavirtauksen hyötysuhteet, joihin on otettu huomioon tuulivoimaloiden sijainneissa vallitsevat fyysiset esteet.

Taulukko 5.12. Pinta-alamenetelmällä lasketut maksimaaliset energian vuosituotot tutkittaville tuulivoimaloille

Tuulivoimalan nimi	Kaleva, TAMK	Särkänniemi, niemen kärki	Nekala, lämpölaitos	Särkänniemi, Onkiniemi
Hilaruutu	14426	14425	14048	14424
Keskimääräinen tuulennopeus v_{ka} [m/s]	3.6	4.8	4.3	3.8
Weibull-jakauman muotokerroin k	2.3	2.3	2.3	2.3
Potkurin halkaisija [m]	4.1	4.1	4.1	4
Pyyhkäisyypinta-ala [m ²]	13.2	13.2	13.2	12.6
Käynnistysnopeus [m/s]	3	3	3	2.5
Ilmavirtauksen energia [kWh/a]	4866.4	10599.9	8152.8	5135.2
Ilmavirtauksen hyötysuhde η_i	0.3	0.5	0.6	0.4
Pyyhkäisyypinta-alan mukainen maksimi energia vuodessa [kWh/a]	1459.9	5300.0	4891.7	2054.1

Taulukon 5.12 tuloksista nähdään, että ilmavirtauksen maksimaalinen energia tuulivoimaloiden pinta-alaan nähden on suurimmillaan Särkänniemen niemen kärjessä, noin 6 kWh/a, ja Nekalan lämpölaitoksella 5 kWh/a. TAMK:illa ja Särkänniemen Onkiniemessä tuotto on selvästi heikompi, koska tulokset jäävät n. 2 kWh/a tasolle.

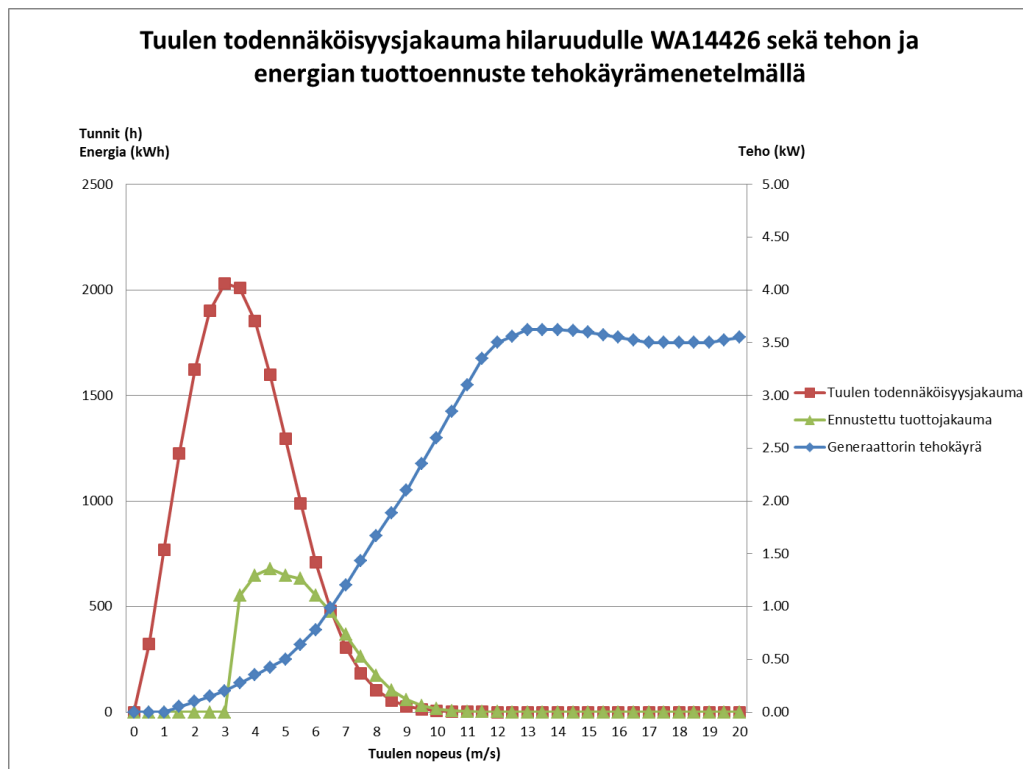
Tulosten tarkastelussa tulee kuitenkin muistaa, että tulos on ilmavirtauksen sisältämä maksimienergia. Betzin lain mukaan potkurimallisen tuulivoimalan hyötysuhde on 0,59 ja tämäkin lukema oli teoreettinen siinä mielessä, että ilmavirtausta ei käytännössä pystytä kitkattomasti ja ilman pyörteitä jarruttamaan.

5.3.2 Energian arviointi tehokäyrämenetelmällä

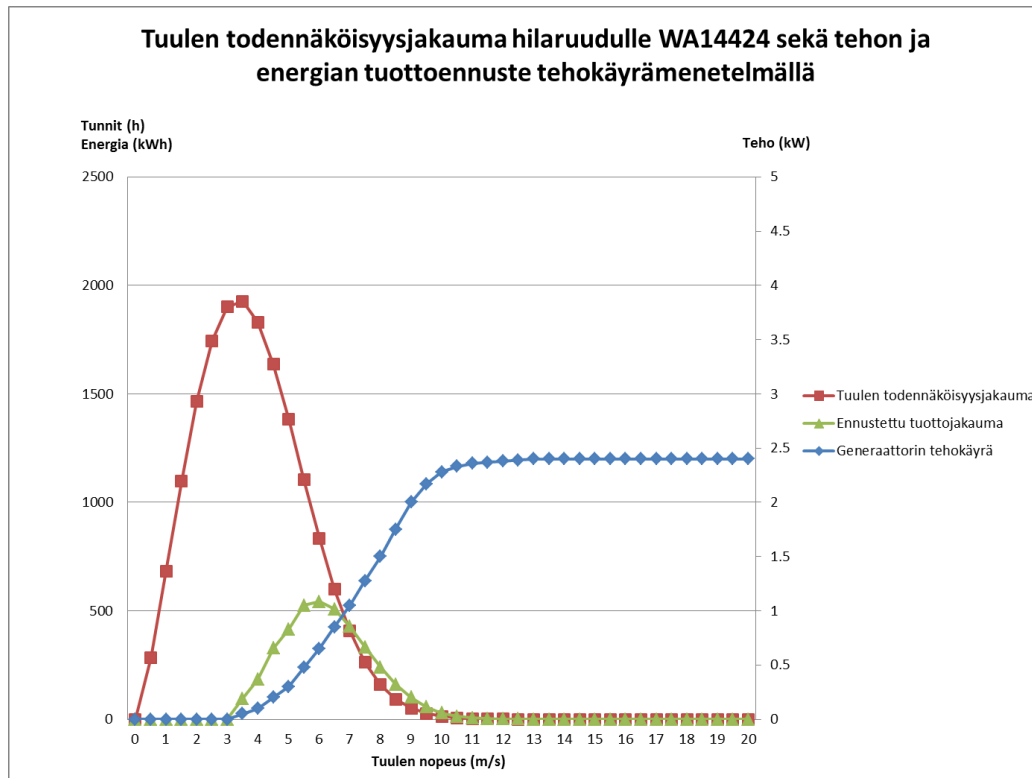
Kappaleessa tehdään jokaiselle tutkittavalle tuulivoimalalle tuottoennuste valmistajien antamien tehokäyrien perusteella. Tehokäyrämenetelmään on käytetty samaa tuulen todennäköisyysjakaumaa kuin edellä lasketussa pinta-alamenetelmässäkin. Näiden kahden menetelmän avulla voidaan myös laskea tuulivoimaloiden teoreettisia hyötysuhteita, joista kuluttaja voi itse arvioida tuulivoimavalmistajien tehokäyrien paikkansapitävyyksiä.

Tarkastellaan kuvien 5.16 ja 5.17 avulla menetelmän laskennan vaiheita graafisten kuvaajien avulla. Tarkasteltavat tuulivoimalat ovat Kaleva TAMK ja Särkänniemi Onkiniemi. Kuvaajien tehokäyrät ovat kopioitu valmistajien antamien manuaalien pohjalta mahdollisimman tarkasti. Energian tuottoennusteen kuvaaja saadaan kertomalla tuulen todennäköisyysjakauman tuntitietoja ja valmistajien antamien tehokäyrien arvoja keskenään.

Tarkasteltaessa tehokäyrän muotoa molemmissa kuvaajissa ja verrattaessa niitä keskenään huomataan, että tehokäyrät ovat lähes identtiset aina 9 m/s tuulennopeuksille asti. Kun taas tarkastellaan kummankin sijainnin ennustettua tuulen todennäköisyysjakaumaa, voidaan huomata, että tätä korkeammat tuulet ovat todella harvinaisia. Vastaavissa tilanteissa ei generaattorin nimellisteholla ole tuoton kannalta suurta merkitystä, koska tuulivoimala tulee työskentelemään suurimman osan ajastaan tehokäyrän nousevalla osalla ja vielä sen alkupuoliskolla. Suurempi merkitys tuottoennusteisiin on tuulivoimaloiden käyntiinlähtönopeus, jonka ero on 1 m/s. Pienillä tuulilla ilmavirtauksen tilavuuden koko on kuitenkin pieni, joten tämäkin hyöty on ainoastaan muutamia satoja watteja vuodessa.



Kuva 5.16. Tuulen todennäköisyysjakauma ja lasketut teho- ja tuottoennusteet tehokäyrämenetelmällä TAMK:n tuulivoimalalle



Kuva 5.17. Tuulen todennäköisyysjakauma ja lasketut teho- ja tuottoennusteet tehokäyrämenetelmällä Särkänniemen Onkiniemen tuulivoimalalle

Taulukkoon 5.13. on kerätty tuulivoimaloiden tuottoennusteiden tulokset välivaiheiseen tehokäyrämenetelmää apuna käyttäen. Lopulliseen vuotuisen tuottoennusteeseen on vielä huomioitu ilmapirtauksen hyötysuhde (η_i), jolloin myös sijaintipaikkojen fyysiset esteet on otettu huomioon.

Taulukko 5.13. Tehokäyrämenetelmällä lasketut tuottoennusteet tutkittaville tuulivoimaloille

Tuulivoimalan nimi	Kaleva, TAMK	Särkänniemi, niemen kärki	Nekala, lämpölaitos	Särkänniemi, Onkiniemi
Hilaruutu	14426	14425	14048	14424
Keskimääräinen tuulennopeus v_{ka} [m/s]	3.6	4.8	4.3	3.8
Weibull-jakauman muotokerroin k	2.3	2.3	2.3	2.3
Käynnistysnopeus [m/s]	3	3	3	2.5
Tehokäyrästä laskettu energia [kWh/a]	2465.7	5360	4048.3	1942.9
Ilmapirtauksen hyötysuhde η_i	0.3	0.5	0.6	0.4
Vuotuinen energiaennuste [kWh/a]	739.7	2680.0	2429.0	777.2

Tehokäyrien perusteella ennustettu vuosituotto vaihtelee voimaloiden välillä 700-2700 kWh. Särkänniemen niemen kärjen ja Nekalan lämpölaitoksen voimaloiden

tuottoennuste on n. 2 500 kWh, kun taas Särkänniemen Onkiniemen ja TAMK:n voimaloiden vuotuinen tuottoennuste jää vaivaiseen 700 kWh:iin.

Tuloksia on hyvä peilata edellisen kappaleen roottorin pyyhkäisyypinta-alan teoreettiseen energiaennusteeseen, koska siitä saatu tulos on se, mikä on teoriassa mahdollista saavuttaa kyseisellä potkurin halkaisemalla pinta-alalla. Taulukkoon 5.14. on kerätty tuulivoimaloiden energian tuottoennusteet kummallakin menetelmällä ja niistä lasketut hyötysuhteet. WindSpot -tuulivoimalan hyötysuhde heittelee laskentatarkkuudesta johtuen, mutta se on keskimäärin 0,51 luokkaa ja Zhejiang Huaying tuulivoimalan hyötysuhteeksi saadaan 0,38. Tulokset ovat todella korkeita ja voidaankin todeta, että eräät valmistajat antavat tuulivoimaloidensa tehokäyrät teoreettista maksimirajaa hipoen.

Taulukko 5.14. *Generaattoreiden teoreettiset hyötysuhteet laskettuna menetelmien tuottoennusteista*

Tuulivoimalan nimi	Vuotuinen energiaennuste pinta-alamenetelmällä [kWh/a]	Vuotuinen energiaennuste tehokäyrämenetelmällä [kWh/a]	Tuulivoimalan hyötysuhde η
Kaleva, TAMK	1459.9	739.7	0.51
Särkänniemi, Niemen kärki	5300.0	2680.0	0.51
Nekala, Lämpölaite	4891.7	2429.0	0.50
Särkänniemi, Onkiniemi	2054.1	777.2	0.38

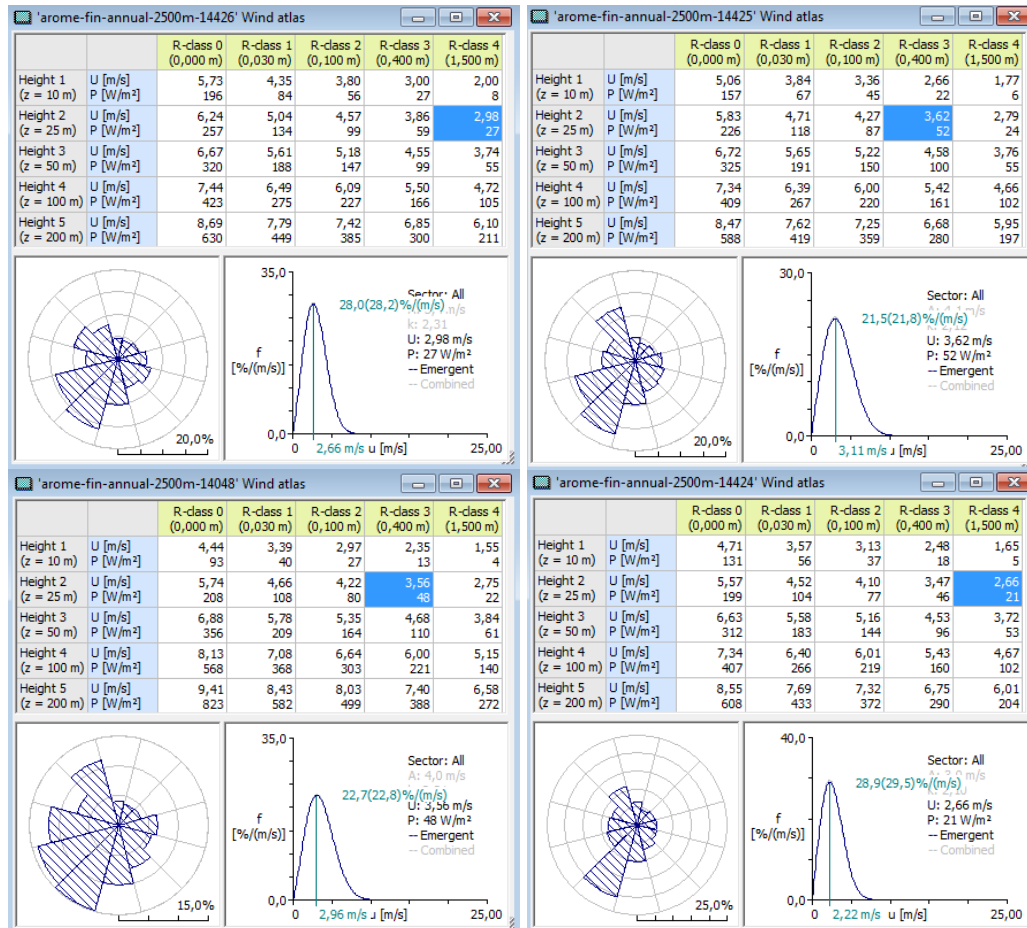
5.3.3 Energian arviointi WAsP- laskentaohjelmalla

Kappaleen tarkoitus on esitellä lyhyesti pääpiirteissään tuulivoimaloiden suunnitteluun käytettävää WAsP- laskentaohjelmaa. Laskentaohjelmalla on mahdollista tarkkoja ilmavirtauksien simulointeja, mutta tämä vaatii paljon pohjatyötä, koska maaston korkeuserot, rantaviivat, rosoisuudet ja fyysiset esteet ovat kaikki syötettävä ohjelmaan manuaalisesti. Tämän työn puitteissa ei tehdä yksityiskohtaista selvitystä laskentaohjelman avulla, mutta esitellään hieman ohjelman käyttömahdollisuuksia.

Suomen Tuuliatlaksen hilaruutujen tiedot saadaan ladattua suoraan lib-tiedostomuodossa, eli WAsP- laskentaohjelman tiedostoina. Kuvassa 5.18 on avattu nämä hilaruutujen tiedot WAsP:lla. Ne ovat järjestyksessä Kaleva TAMK, Särkänniemi niemen kärki, Nekala lämpölaite ja Särkänniemi Onkiniemi. Tuuliatlaksien yläreunassa näkyy myös hilaruutujen numerointi.

Valmiista taulukoista valittiin rosoisuusluokiksi (z_0) TAMK:n ja Särkänniemen Onkiniemen tuulivoimaloille R-4, sekä Nekalan ja Särkänniemen niemen kärkeen R-3. Näiden kahden rosoisuuden ero on suuri, koska rosoisuus hyppää 0,4:stä metristä 1,5 metriin. Rakennusten lähellä, jyrkillä kallioilla ja ison metsän reunassa käytetään rosoisuuskerrointa R-4, joten nämä kuvaukset sopivat hyvin vertailuna TAMK:n ja Onkiniemen maaston kuvauksiin. Rosoisuus R-3 vastaa metsää/rannikkoa, joten se rinnastetaan Särkänniemen niemen kärkeen sekä Nekalaan.

Korkeus valittiin kaikille sama 25 m siirretystä nollapisteestä. Valinta on yläkanttiin, mutta seuraavaksi pienin arvo valmiissa tauloukossa olisi ollut 10 m, joka olisi ollut hieman liian alhainen. Nekalan ja Onkiniemen voimaloiden maston korkeus olisi ollut lähempänä tätä, mutta kun huomioidaan kokonaisuus, että toinen on korkean rakennuksen päällä ja toinen jyrkän rinteen yläpuolella, oletettiin korkeus samaksi.



Kuva 5.18. Tuulivoimaloiden sijaintien tuuliatlakset WASP:ssa

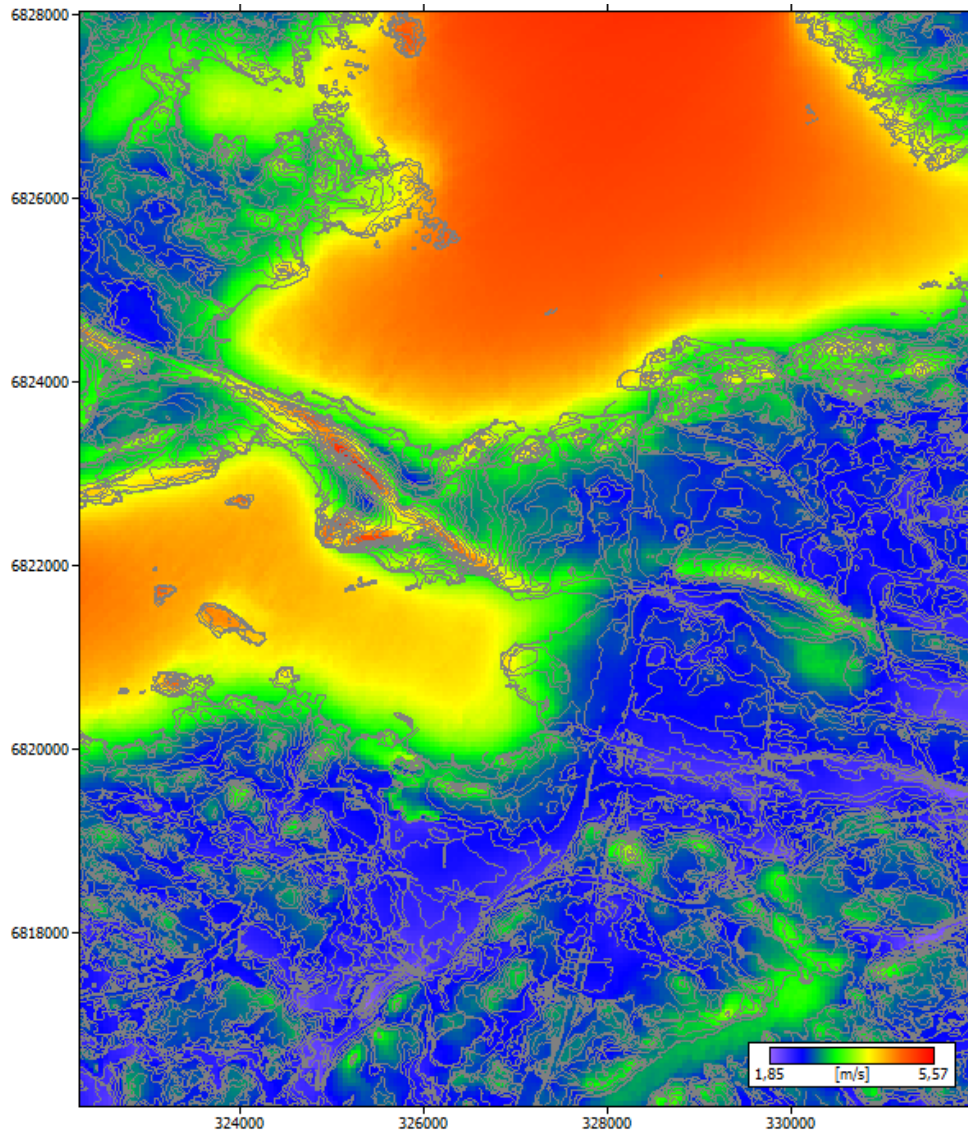
Kuvan 5.18 tuuliatlakseen taulukoista on valittu (sinisellä) aktiiviseksi rosoisuus- ja korkeusluokat. Valintaruudusta nähdään tuulen keskinopeus U [m/s], sekä sen energiasisältö yhdeltä neliömetrin alueelta P [W/m²] kyseiseltä korkeudelta, että rosoisuudelta. Vertaillen tuloksia pystyy havaitsemaan, että paremmuusjärjestyksessä sijainnit olisivat; Särkänniemi niemen kärki, Nekala, TAMK, Särkänniemi Onkiniemi. Särkänniemen niemen kärjessä keskimääräinen tuulenneopeus on 3,62 m/s ja energiasisältö 52 W/m², kun taas Onkiniemen päässä nopeus on 2,66 m/s ja energia 21 W/m². Teorian paikkaansa pitävyys näkyy myös näiden kahden tuloksissa. Tuulenneopeuden kasvaessa n. 35 % sen energiasisältö n. kolminkertaistuu (kaava 9).

Tuuliatlakseen alareunoissa on esitetty kyseisen luokan tuuliruusu, sekä kunkin tuulenneopeuden todennäköinen esiintymistiheys kuvaajana. Esiintymistiheyksien kuvaajissa pystyy hiirellä osoittimella valitsemaan haluamansa tuulenneopeuden (kuvaajassa pystyviiva) ja ohjelma kertoo sen nopeuden yleisyyden prosentteina. Tuulen

todennäköisyysjakaumia vertailemalla voidaan huomata, kuinka ohjelma automaattisesti laskee ja muuttaa Weibull-jakauman alkuarvoja korkeuden ja rosoisuuden muuttuessa.

Tuuliruusuja tutkittiin jo aikaisemmassa kappaleessa. Ne olivat kaikki 50 m korkeudella siirretystä nollapisteestä. Kuvan 5.18 tuuliruusuissa huomataankin pieniä eroavaisuuksia aikaisempiin, kun niitä tarkkaillaan 20 m korkeuteen siirretystä nollapisteestä käsin ja niihin on huomioitu annetut rosoisuuskertoimet. Pääpiirteissään ne ovat kuitenkin samankaltaisilta. Nekalassa on symmetrisin ruusu ja kaikissa ruusuissa lounassektori on selvästi vahvin. Suurimman eroavaisuuden tekee Onkiniemen tuuliruusu, jonka lounaissektorin ohjelma näyttää todella vahvaksi. Yhdeltä 30° sektorilta tuulee n. 25 % kaikista tuulista. Tuloksia tulkittaessa pitää kuitenkin muistaa, että maaston pintakerros ja korkeuserot on tasoitettu, joten maaston muodot pitää tähän vielä huomioida.

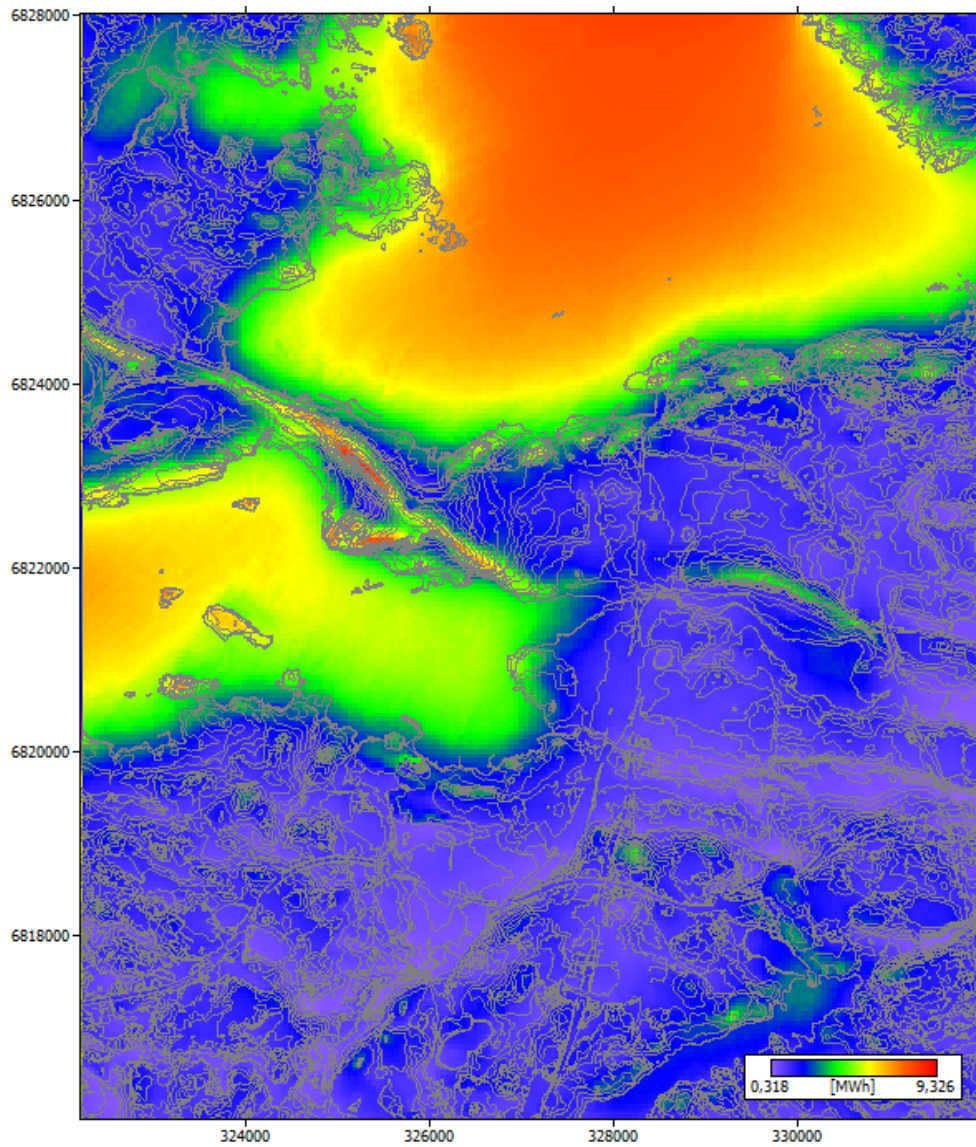
Kuvassa 5.19 on pienennetty laskentaohjelman avulla Suomen Tuuliatlaksen hilaruudun kokoa. Kuvassa lasketut hilaruudut ovat kooltaan 50x50 metriä. Laskentaa varten on ohjelmaan syötetty maaston korkeuskäyrät, rantaviivat ja rosoisuuskertoimet. Rosoisuuskertoimien tarkka määrittäminen eri sijainneille toisi laskennassa tarkempia ennusteita, mutta tämän tarkastelun puitteissa on kaikille järville annettu parametrin arvoksi 0 metriä ja kaikille mantereille 1,5 metriä. Nämä keskiarvoiset kertoimet pohjautuvat taulukkoon 2.1.



Kuva 5.19. Tuulen keskimääräinen nopeus 18 m korkeudella siirretystä nollapisteestä.

Kuvan 5.20 tarkastelukorkeudeksi on valittu 18 metrin korkeus siirretystä nollapisteestä. Kuvan väreistä havaitaan, että parhaimmat tuulen keskimääräiset nopeudet n. 6 m/s saavutetaan Näsijärvellä, sekä Pynikin harjun maastossa. Koska rosoisuusparametri määriteltiin kaikille mantereille samaksi, huomataan kuvan väreistä, että ainoa merkitsevä tekijä tuulennopeuden keskiarvoon mantereella on maaston korkeuserot. Siksi tarkempaa analysointia ei tarkastelussa kannata tehdä.

Syöttämällä laskentaohjelmaan WIndSpot 3,5 kW generaattorin tehokäyrän saadaan ohjelmalla laskettua tuottoennusteet Tampereen keskustan alueella. Tarkastelukorkeus on sama kuin edellä, 18 metriä siirretystä nollapisteestä.



Kuva 5.20. *Winspot 3,5 kW tuotto 18 m korkeudella siirretystä nollapisteestä*

Kuten kuvasta 5.20. havaitaan, annetuilla parametreilla 18 metrin korkeudessa siirretystä nollapisteestä paras tuotto saavutettaisiin Näsijärvellä tai Pyynikin harjun maastoissa, noin 9 MWh vuodessa. Tuloksia on kuitenkin tarkasteltava varauksella, koska laskentaohjelma pohjautuu dynaamiseen malliin ja se voi erota todellisuudesta esteiden ja korkeiden mäkien läheisyydessä.

6 LAITTEISTOJEN VERTAILU MITTAUSTEN PERUSTEELLA

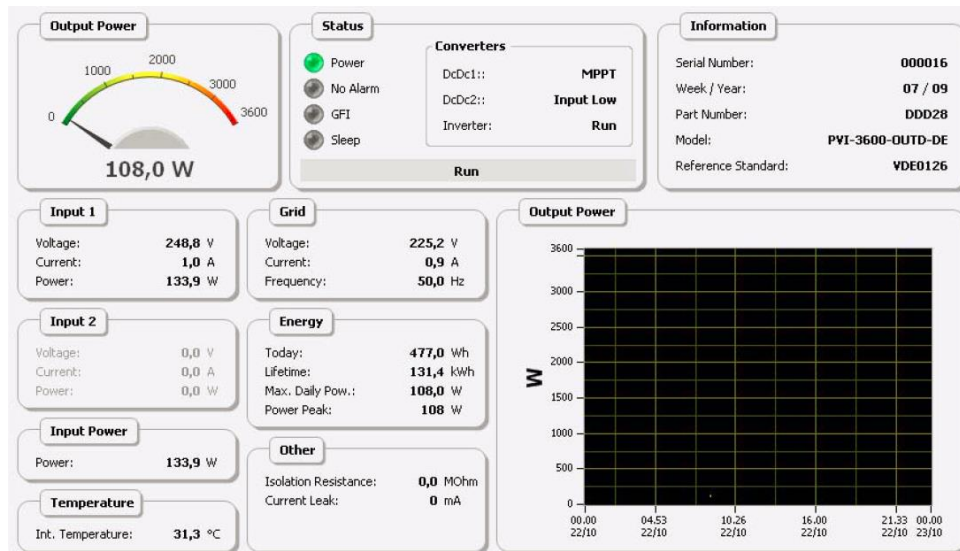
6.1 Mittausjärjestelyt

6.1.1 Energiamittauksien toteutus

Tuulivoimaloiden energiamittaus päätettiin toteuttaa täysin ulkopuolisen valmistajan mittareilla sekä erillisellä energiaraportointipalvelulla. Näillä toimenpiteillä pyrittiin saamaan aikaan validit mittaukset. Luettavuuden takaamiseksi laboratoriossa tehtiin vielä varmistusmittauksia. Mittauksissa demonstroitiin mittaustilanne käytännössä, pois lukien generaattorin pyörittämä voima, joka tuli moottoripenkistä. Mittausten aikana generaattorin tehoa vaihdeltiin ja oltiin etäyhteydessä raportointipalveluun, jonka tuloksia vertailtiin laboratorion mittareiden tuloksiin. Nopeasti syntyi johtopäätös, että mittauksia voidaan pitää luotettavana, koska mittauserot olivat minimaaliset ja ne olivat mittareiden virhemarginaalien sisällä.

Tuulivoimaloiden verkkoliitälaitteissa on oma energiamittaus. Laboratoriotesteissä kuitenkin huomattiin, että ainakin osa verkkoliitälaitteista mittasi tuotetun energian hieman todellisuutta korkeammaksi. Saattoi olla, että mittaukset eivät huomioineet liitälaitteen hyötysuhdetta, vaan mittaus suoritettiin ainoastaan tuulivoimalasta tulevan tehon välipiirin arvoista.

Verkkoliitälaitteissa oli erillinen seurantaohjelma tietokoneella, josta energian tuottoa ja muita parametreja oli helppo seurata ja kerätä niistä tilastoja. Kuvassa 6.1 näkyy Aurora-verkkoliitälaitteen seurantaohjelma. Liitälaitteiden omia mittausmahdollisuuksia/-tuloksia ei kuitenkaan huomioitu tässä työssä.



Kuva 6.1. Power One Aurora verkkoliitännälaitteen seurantaohjelma (Power One)

Energiamittareiksi valittiin Iskra ME372-D1. Mittareita valmistaa Iskraemeco. Mittarin ominaisuuksiin kuuluu mm. GSM/GPRS-verkon kautta etäluenta, sisäinen kello sekä energian mittaus molempiin suuntiin. (Iskraemeco, Tampereen Sähkölaitos)

Etäluenta- ja web- raportointipalvelu tuli Rejlers Oy:n energiapalveluista. Kuvasta 6.2 nähdään raportointipalvelun esimerkkikuvaaja Nekalan tuulivoiman tuotoista. Raportointipalvelun kautta voitiin seurata tuulivoimaloiden tuottoa, jännitteen vaihtelua, tuulitietoja ja käyttökatoja. Mittaustieto haettiin mittareilta kerran tunnissa, joten kaikki kerätyt tulokset ovat tunnin keskiarvoja.



Kuva 6.2. Rejlersin raportointipalvelun energiantuotannon kuvaaja Nekalan tuulivoimalasta vuosina 2012 ja 2013.

6.1.2 Tuulivoimaloiden tuulimittauksien toteutus

Tutkimuksessa lähtökohtana oli mitata tuulivoimaloiden sijaintipaikkojen tuulennopeuksia, koska valmistajan lupaamien tuotantotietojen paikkansapitävyys oli

yksi kohta, jota tässä työssä haluttiin selvittää. Luotettavien tuulimittausten toteuttaminen on kuitenkin haasteellista. Tuulivoimalan tuulimittaus pitäisi saada mitattua napakorkeudella juuri ennen propellia, missä ilmavirtaukseen ei ole vielä vaikuttaneet itse tuulivoimalan synnyttämät vastavoimat. Kyseisellä mittausmenetelmällä saataisiin todennettua luotettavasti valmistajien antamien tehokäyrien oikeellisuus.

Tutkimuksen aikana jokaiseen tuulivoimalaan asennettiin oma tuulimittari. Tuulimittareiden sijoittelu pyrittiin tekemään niin, että niiden mittaustulokset olisivat lähellä ja mieluummin pienemmät kuin tuulivoimalan kohtaama ilmavirtauksen nopeus. Luotettavuuden parantamiseksi Ilmatieteen laitokselta hankittiin Siilinkarin ja Pirkkalan lentoaseman sääasemien tuulimittaustulokset, jotta työn puitteissa tehdyille mittauksille saatiin luotettavat vertailukohteet. Tuulimittauksissa tehtiin yhteistyötä Tampereen ammattikorkeakoulun tietotekniikkapuolen opiskelijoiden kanssa.

Tuulimittareiksi hankittiin Ranskalaisen LCJ Capteurs -yrityksen ultraäänituulisensoreita (kuva 6.3). Mittareiden yksi parhaimpia ominaisuuksia on se, että niiden toiminta ei ole altis vaihteleville sääolosuhteille, koska niissä ei ole liikkuvia osia. Perinteisten kuppianemometrien heikkoutena pidetään niiden liikkuvia osia, jotka ovat usein alttiita vioille ja vaurioille. Tuulimittarit on suunniteltu ensisijaisesti purjeveneiden tuulimittareiksi, joten ne kestävät ja pystyvät mittaamaan tarkasti Suomen vaativassa ilmastossa. Mittareiden luotettavuudesta kertoo myös se, että jokainen mittarin paikkansapitävyys testataan tehtaalla ennen toimitusta. (LCJ Capteurs)



Kuva 6.3. Tuulimittarina käytetty ultraäänisensori LCJ CV7 (LCJ Capteurs)

Taulukossa 6.1. on esitetty tuulimittarin tärkeimpiä tietoja. Huonona puolena voidaan pitää käyttölämpötilaa $-10\dots+55$ °C, joten kovilla pakkasilla ei mittarista luotettavia tuulitietoja saada.

Taulukko 6.1. Ultraäänisensori LCJ CV7 tekniset tiedot (LCJ Capteurs)

LCJ CV7 ultraäänisensori	
Nopeuserkkyys	0.13 m/s
Nopeuserottelu	0.05 m/s
Mittausalue	0.13 - 41.15 m/s
Suuntaherkkyys	± 1°
Suuntaerottelu	1°
Käyttöjännite	10-14 V DC
Virrankulutus	12 mA
Käyttölämpötila	-10...+55 °C
Vesitiiveys	IP67
Paino	230 g

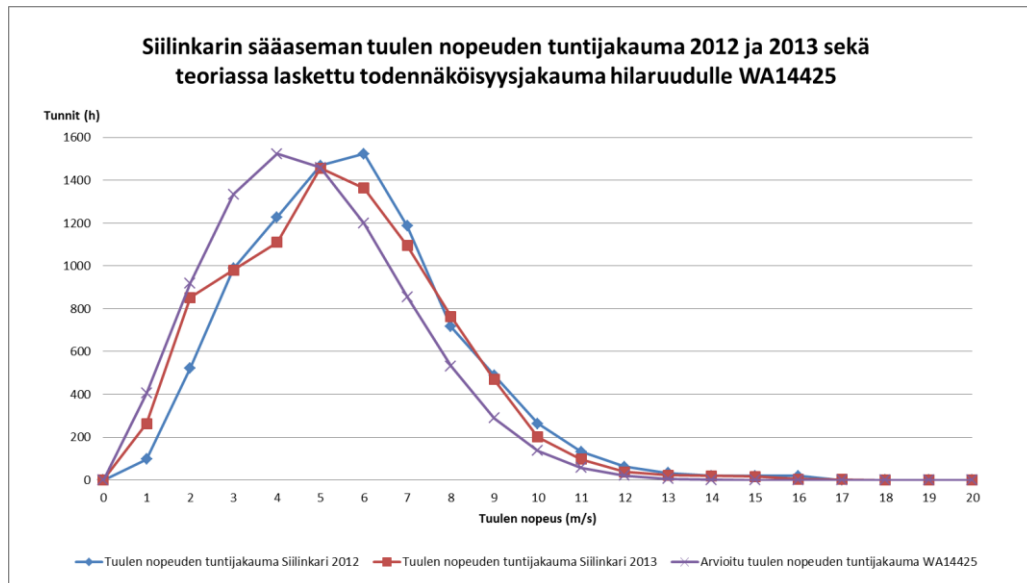
Tuulituloksia analysoidessa huomattiin, että paras korrelointi tuulennopeuden ja tuulivoimaloiden tehon tuoton välillä oli Ilmatieteen laitoksen Siilinkarin sääasema. Sääasema oli vielä maantieteellisesti lähellä Särkänniemen niemen kärjen voimalaa ja tarkasteluja pystyttiin kohdentamaan tietyille sektoreille, missä ilmavirtauksella olisi samat vastusvoimat verrattuna työssä käytettyihin tuulimittauksiin tai tuulivoimalan saamaan ilmavirtaukseen.

Tuulivoimaloiden omilla tuulimittausjärjestelyillä ei saavutettu haluttua lopputulosta. Luotettavien tuulimittauksien esteitä olivat etäluennan toimivuuden epävarmuus, mittarin luotettavuuden tarkistamisen puute sekä mittareiden sijainti kaukana tuulivoimaloiden napakorkeudesta.

6.1.3 Tuulimittauksien vertailua teorian arviointeihin

Kappaleessa 2.2.2 laskettiin tuulennopeuden esiintymisen todennäköisyyksiä ja tuntijakaumia tilastollisten Weibull-funktion avulla. Lähtötiedot saatiin Suomen tuuliatlaksista 50 metrin korkeudesta siirretystä nollapisteestä. Matemaattisten kaavojen avulla siirrettiin tuulitietoja rosoisuusparametrit huomioiden tutkittavien tuulivoimaloiden napakorkeudelle. Muotoparametrin muutos arvioitiin kuvaajien silmämääräisellä tarkastelulla.

Kuvassa 6.4 on otettu kappaleessa 5.3.1 laskettu teoreettinen tuulennopeuksien todennäköisyysjakauma Särkänniemen niemen kärjessä (hilaruutu 14425) tuulivoimalan napakorkeudella. Kyseinen hilaruutu WA14425 on sama kuin missä Ilmatieteen laitoksen sääasema sijaitsee. Sääaseman tuulitiedoista vuosina 2012 ja 2013 laskettiin toteutuneet tuulennopeuden jakaumat ja vertailtiin niitä teoreettiseen todennäköisyysjakaumaan. Tuloksissa on kuitenkin huomioitava sijaintipaikkojen eroavaisuudet maaston muodoissa ja rosoisuuksissa. Siilinkarin sääasema on avokarilla 9 metrin korkeudella ja tuulivoimala on 18 metrin korkeudella niemen kärjessä. Lisäksi fyysiset esteet tuulivoimalan lähimaastossa aiheuttavat jonkin verran eroavaisuutta.



Kuva 6.4. Siilinkarin sääaseman tuulennopeuden tuntijakaumat vuosina 2012 ja 2013, sekä teoriassa laskettu todennäköisyysjakauma hilaruudulle (WA14425)

Kuten kuvasta 6.4 ilmenee, teoreettinen tarkastelu tuulennopeuksien esiintymisen suhteen sekä sääasemalla mitattujen tuulennopeuksien suhteen menevät todella lähelle toisiaan. Keskimääräinen tuulennopeus on arvioitu hieman alhaisemmaksi verrattuna sääaseman mittaustuloksiin. Koska rosoisuusparametri on sääasemalla pienempi ja fyysisiä esteitä on vähemmän kuin mantereella, voidaan teoreettista tarkastelua pitää luotettavana.

6.2 Tuotannon vertailua energia- ja tuulimittausten perusteella

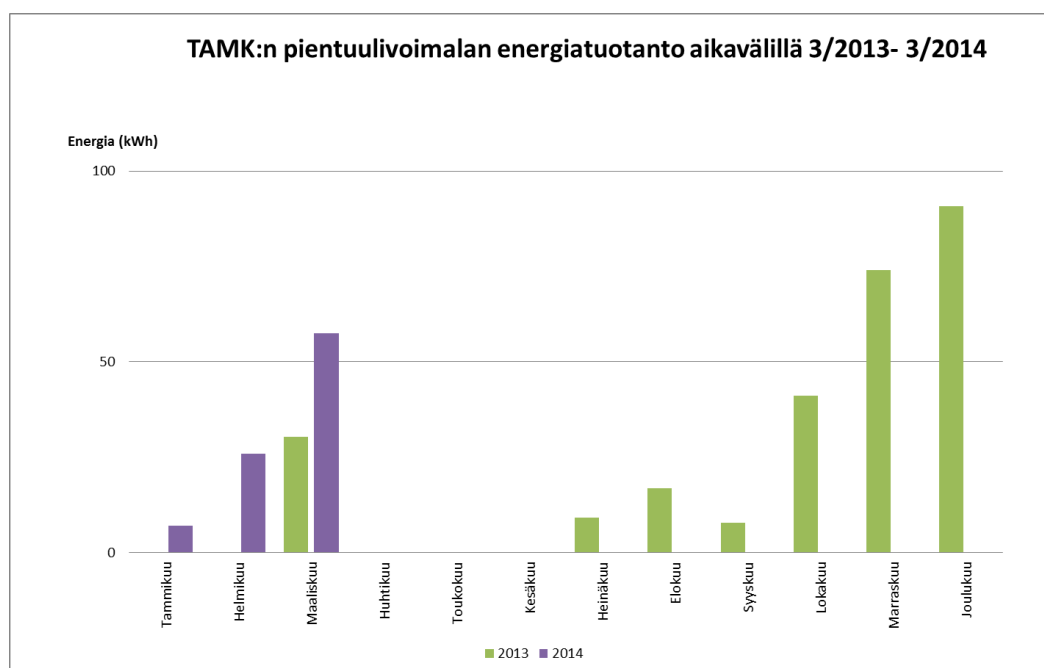
Kappaleen tarkoitus on vertailla eri sijainneilla olevien ja eri tekniikalla varusteltujen pientuulivoimaloiden energiantuottoa sekä antaa lukijalle todellinen kuva pientuulivoimaloiden kuukausi- ja vuosituotannoista. Ilmatieteen laitoksen sääaseman tuulitietoja vertaillaan tuulivoimaloiden energiantuotantoihin ja tätä kautta voidaan arvioida tuulivoimaloiden valmistajien antamia tehon ja tuulen keskinäisiä suhteita. Lisäksi analysoidaan teoreettista tarkastelua tuulivoimaloiden tehojen ja sääaseman tuulen suuntaa vertailemalla. Kappaleessa käytetty mittausdata löytyy kokonaisuudessaan liitteestä 6.

6.2.1. Tuulivoima 1, Kaleva, TAMK

Kuvaan 6.5 on kerätty TAMK:n tuulivoimalan energiantuotannon tietoja kuukausitasolla graafisten pylväiden avulla. Voimalan käytössä on ollut muutamia käyttökatkoja, mikä tekee tulosten tarkastelusta haastavampaa. Käyttökatkot eivät johdu tässä työssä tutkittavista laitteistoista, vaan toisen liitännälaitteen tutkimus- ja kehitystyöstä.

Tietoihin on otettu mukaan tuulivoimalan tuottokuukausista ainoastaan ne, joissa energiantuotanto on ollut mahdollista kuukauden jokaisena päivänä. Taulukosta huomataan, että yhtään kokonaista kalenterivuotta ei tuulivoimala ole yhtäjaksoisesti toiminnassa ollut, joten luotettavaa otantaa ei näillä tiedoilla vielä saada.

Pienin kuukausituotanto 7 kWh on saavutettu tammikuussa 2014 ja suurin tuotanto 91 kWh joulukuussa 2013. Näillä saatavilla olevilla tiedoilla kuukauden keskiarvotuotannoksi tulee 39 kWh vuonna 2013 ja 32 kWh vuonna 2014. Kuukausien keskiarvotuotantojen kautta lasketusta vuosituotannon arviosta saataisiin vuosituotannoksi 420 kWh. Tuloksessa pitää kuitenkin huomioida mittaustiedon puutteellisuus ja sen vähäisyys. Luotettavaa tarkastelua ei kyseisillä tiedoilla pystytä tekemään.

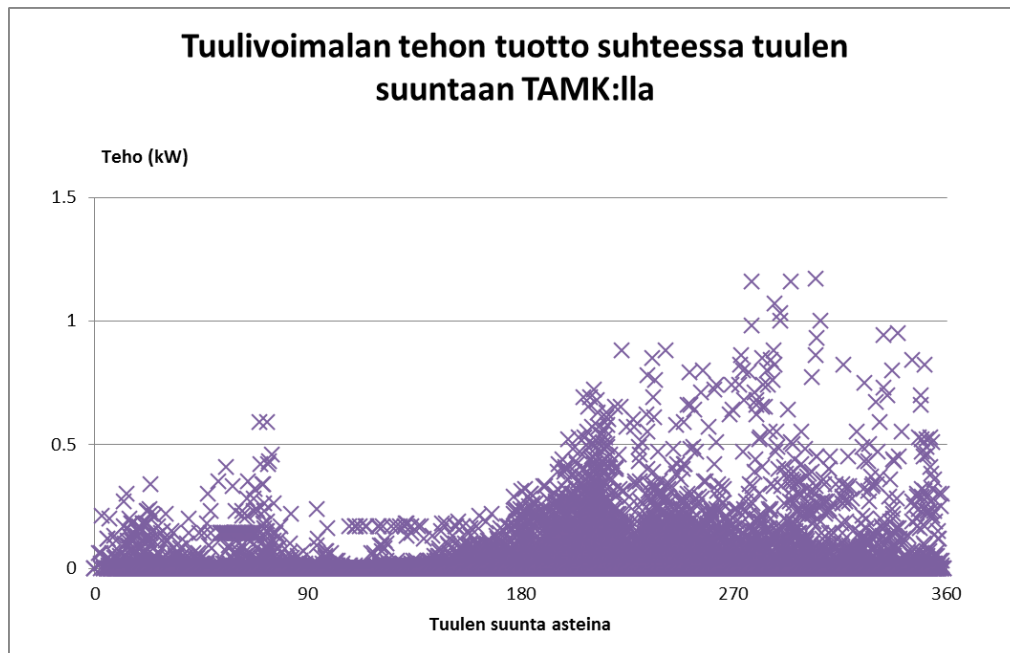


Kuva 6.5. Tampereen ammattikorkeakoulun pientuulivoimalan tuotantotiedot 2011–2014 välisenä aikana

Tutkimuksen aikana ei saatu luotettavaa tuulennopeustietoa mitattua ja kerättyä TAMK:n tuulivoimalan sijaintipaikalta. Ilmatieteen laitoksen sääasemat olivat maantieteelliseltä sijainniltaan kaukana, joten rosoisuuden vaikutuksen arviointi siirrettyillä tuulitiedoilla olisi ollut mahdotonta. Tutkimuksessa tehtiin kuitenkin suuntaa antavaa tarkastelua tuulen suunnan ja tuulivoimalan tehon suhteen. Huomioitavaa on ilmavirtauksen käyttäytyminen pintakerroksessa. Ilmavirtaus muuttaa suuntaa ja nopeutta maaston muotojen ja rosoisuuksien mukaan. Seuraavassa tarkastelussa oletetaan, että tuulen suunta olisi sama avokarilla sijaitsevalla sääasemalla kuin rosoisella, rakennusten ja metsän ympäröimällä tuulivoimalan sijaintipaikalla.

Kuvaan 6.6 on kerätty tuulivoimalan tunnin keskimääräiset tehot ja Siilinkarin sääaseman tuulien keskituntinopeudet. Kuvasta voidaan päätellä selvästi fyysisten esteiden rajoittavan ilmavirtausta ilmansuunnilla 0-170 astetta. Teoreettisen tarkastelun

pohjalta voidaan arvioida lounaistuulen sopivan paikkaan parhaiten. Tämä näyttäisi kuvan perusteella pitävän paikkaansa. Yllättävää on 270–360 asteiden eli länsi-pohjoissektorin vahvuus. Kuvan 5.13 kartan avulla voidaan hahmottaa ilmavirtauksen reitti, joka ohjautuu soraharjujen avustuksella etelästä ja Kaupin korkeiden mäkien johdosta pohjoisesta sumppuun tuulivoimalan sijaintipaikalle. Tämä selittäisi tuulivoimalan vahvimman sektorin.



Kuva 6.6. TAMK:n tuulivoimalan tuotanto suhteutettuna tuulen suuntaan

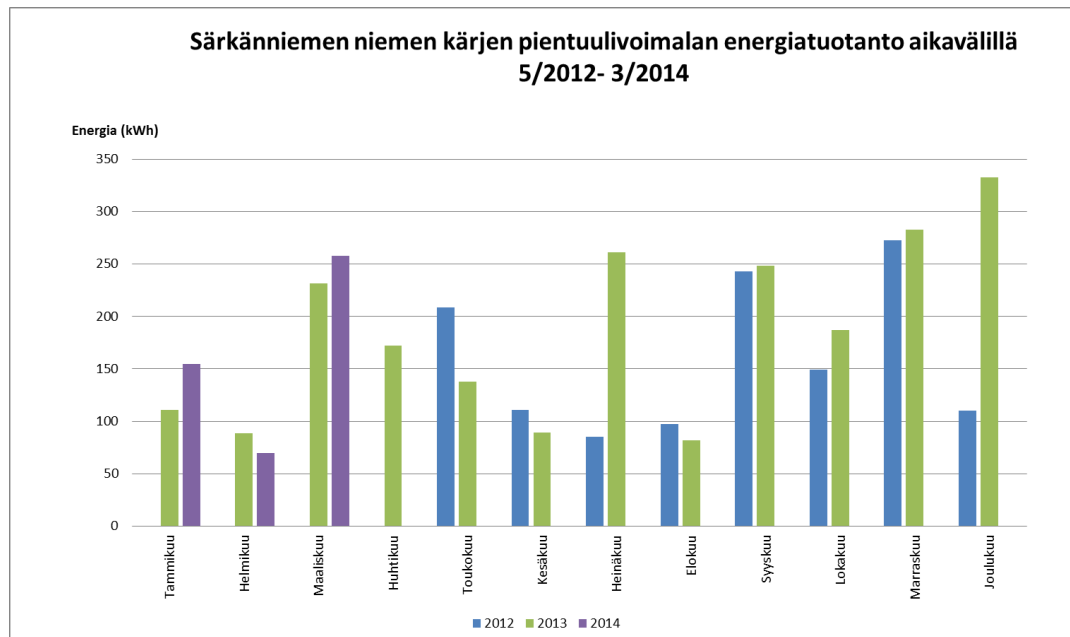
Luotettavien tuulennopeuksien puutteellisuudesta johtuen kyseiselle sijaintipaikalle ei tehdä valmistajan antaman tehon ja tuulen suhteiden tarkastelua. Tuulivoimala on kuitenkin sama kuin Särkänniemen niemen kärjessä, joten tarkastelu voidaan luotettavasti tehdä seuraavassa kappaleessa.

6.2.3 Tuulivoima 2, Särkänniemi, niemen kärki

Kuvaan 6.7 on kerätty Särkänniemen niemen kärjen tuulivoimalan energiantuotannon tietoja kuukausitasolla graafisten pylväiden avulla. Tietoihin on kerätty tuulivoimalan tuottokuukausista ainoastaan ne, joissa energiantuotanto on ollut mahdollista kuukauden jokaisena päivänä. Paras tuottokuukausi 332 kWh on ollut vuoden 2013 joulukuussa ja pienin tuotto 70 kWh helmikuussa 2014.

Vuodelta 2013 saadaan koko kalenterivuoden kestävä vuosituotto, noin 2,2 MWh. Keskiarvioitettuna tämä kuukausille on yhden kuukauden keskimääräinen energiantuotto vuoden sisällä 185 kWh. Yhdistämällä vuodet 2012 ja 2013 saadaan myös kokonainen kalenterivuosi verrokiksi edellisille tuloksille. Vuosituotto jää tässä tapauksessa alle 2 MWh ja kuukauden keskiarvotuotto 160 kWh.

Kuvan 6.7 avulla huomataan kuukausituottojen yhdenmukaisuus vuodenaikojen ja kuukausien mukaan, mutta havaitaan myös selviä poikkeamia, kuten vuosien 2012 ja 2013 heinä- ja joulukuu.

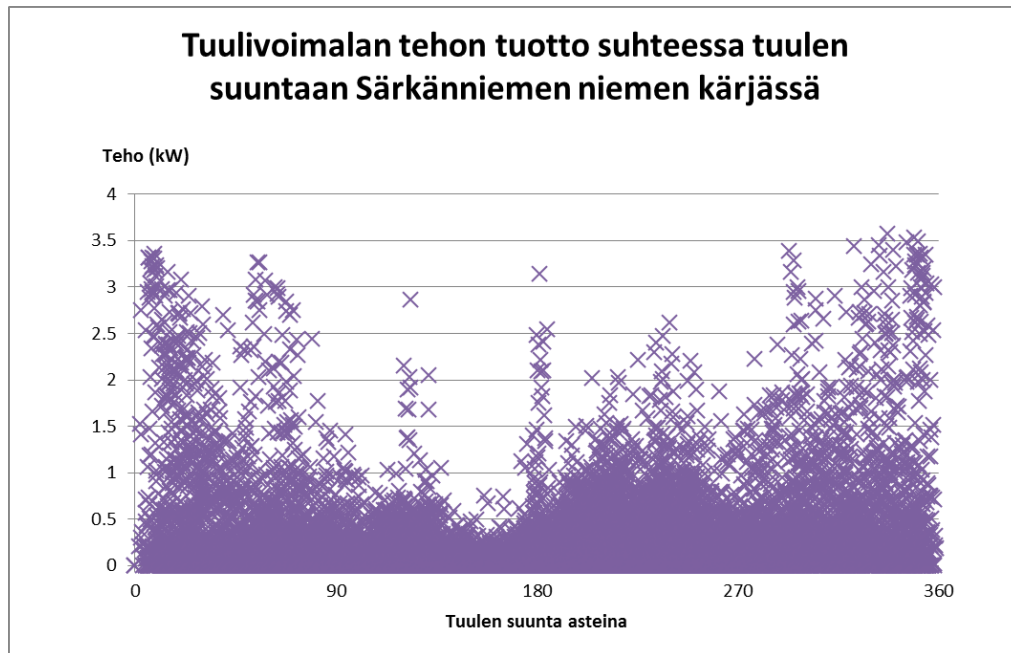


Kuva 6.7. Särkänniemen niemen kärjen pientuulivoimalan tuotantotiedot 2012–2014 välisenä aikana

Vuoden 2012 joulukuu on ollut selvästi keskimääräistä heikompi tuottoinen ja vuoden 2013 vastaava kuukausi keskimääräistä tuottavampi. Lisäksi vuoden 2013 heinäkuu on ollut poikkeuksellisen tuottava, yltäen jopa kevät- ja syysmyrskyjen tuottojen tasolle. Tuotantopylväiden perusteella voidaan kuitenkin päätellä, että keskiarvioitettuna samojen kuukausien tulokset eri vuosilta tuulivoimalan tuotanto on vähäisintä alkuvuodesta ja kesällä.

Särkänniemen niemen kärjen tuulivoimala on tutkimuksen kannalta luotettavin paikka tutkia ja todistaa valmistajan antamien teho- ja tuulisuhteiden paikkansapitävyyttä. Perusteluna on, että Ilmatieteen laitoksen sääasema on sijainniltaan todella lähellä ja sen tuulitiedot vastaavat hyvin tuulivoimalan samaa ilmavirtausta, jos ilmavirtauksen suuntasektori valitaan oikein.

Kuvaan 6.8 on tehty kuvaaja Siilinkarin tuulen suunnasta ja tuulivoimalan tehosta tunnin keskiarvoina. Kuten teoreettisessa arvioinnissakin ennustettiin, pohjoisen puolen sektorit tekevät merkittävän tuoton kyseisellä sijainnilla (270–90°). Vasten teorian olettamuksia tuotto sektoreilla 180–270 astetta olisi olettamusta parempi. Näillä sektoreilla sijaitsee kuitenkin lyhyen matkan päässä Pyynikin ja Pispalan korkeat soraharjut. Tutkimuksessa ei löydetty teoriaan pohjautuvaa selitystä oletettua paremmalle tuotannolle. Ilmavirtauksen käyttäytymistä oli tässä kohtaa vaikea ennustaa.

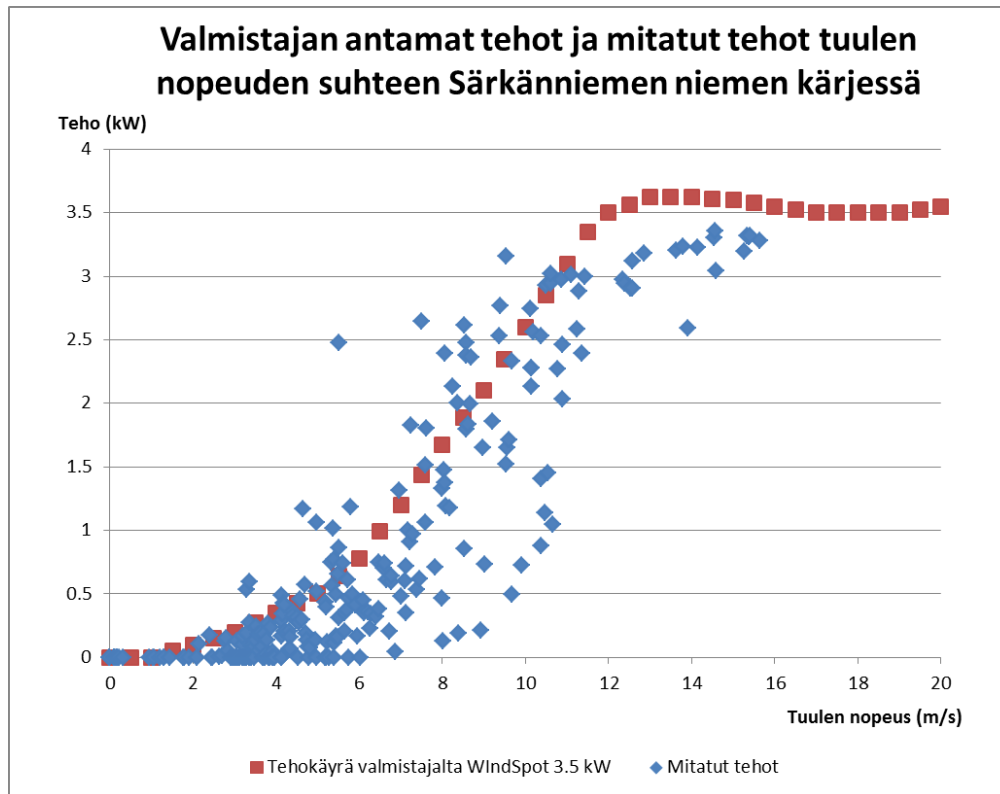


Kuva 6.8. Särkänniemen tuulivoimalan tuotanto suhteutettuna tuulen suuntaan

Kuvan 6.8 tuotannoista nähdään selvät keskiarvopoikkeamat noin 120 ja 180 asteen kohdilla. Tutkimuksessa tultiin tulokseen, että näiden asteiden kohdalla ilmavirtaus pääsee esteettömästi ohjautumaan maastonmuotojen ansiosta tuulivoimalan sijaintipaikalle. Kuten kuvasta 5.13 nähdään, suoraan etelän suunnalta puhaltavalla ilmavirtauksella on matalampi uoma soraharjujen katketessa Tampereen ydinkeskustan kohdalla. Ilmavirtaus ohjautuu, kasaantuu ja voimistuu soraharjujen katketessa ja sillä on esteetön pääsy tuulivoimalan sijaintipaikalle mittaustuloksia katsoessa. Lisäksi puhaltaessa itä-etelä-sektorilta (kuva 5.13) ilmavirtaus ohjautuu Kalevankankaan soraharjua pitkin kasaantuen ja kääntyessä Särkänniemen kohdalla Pyynikinharjun suuntaiseksi (120°).

Kuvassa 6.9 on esitetty valmistajan antama tehokäyrä sekä mittauksien perusteella saadut tuotto- ja tuulitiedot. Analyysia tehdessä pyrittiin valikoimaan tarkasteluun tuulen suuntasektoreista sellaiset, mistä ilmavirtaus pääsisi esteettömästi puhaltamaan tuulivoimalan sijaintipaikalle (kts. kuva 6.8). Tuulen suunnaksi tarkastelua varten otettiin 20 asteen sektori pohjoistuulista (asteina 355–15). Keskimääräisiä tunnin tuottotietoja löytyi tältä sektorilta yhteensä 254 kappaletta, mikä vastaa yhtäjaksoisessa ajassa reilua 10 päivää.

Tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida, että koska kaikki mitatut tulokset ovat yhden tunnin keskiarvoja, tulokset ovat vain suuntaa antavia. Etenkin matalilla tuulilla virheen marginaali kasvaa, jos esimerkiksi hyvin tyynellä säällä tulee hetkittäisiä puuskia, joihin tuulivoimala ei reagoi ja jotka nostavat kuitenkin tunnin sisällä keskimääräistä tuulennopeutta merkittäväällä tavalla.



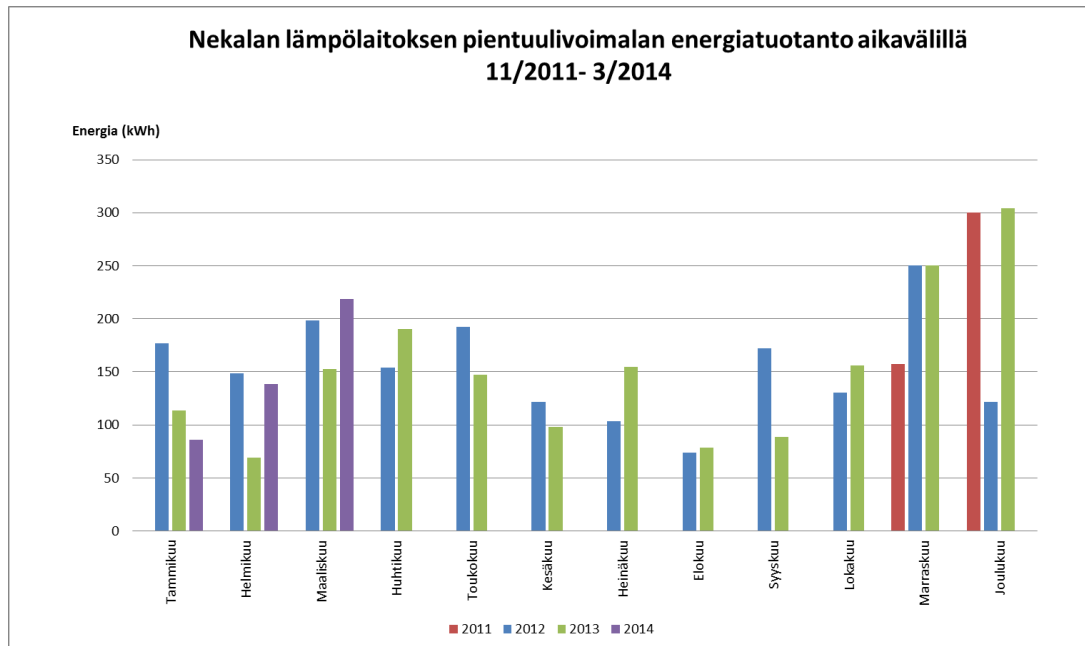
Kuva 6.9. Särkänniemen niemen kärjen pientuulivoimalan tuotantotiedot 2012–2014 välisenä aikana

Kuten kuvasta 6.9 nähdään, otannat sijoittuvat valmistajan antaman tuottokäyrän molemmille puolille. Pääpainoisesti ne sijoittuvat niin, että tuottokäyrä rajaa maksimituotannon raja-arvoa. Johtopäätöksenä voidaan kuitenkin näillä tutkimuksella käytetyillä materiaaleilla todeta, että valmistajan antamat tehot ja tuulen suhteet pitävät paikkaansa.

6.2.4 Tuulivoima 3, Nekala, lämpökeskus

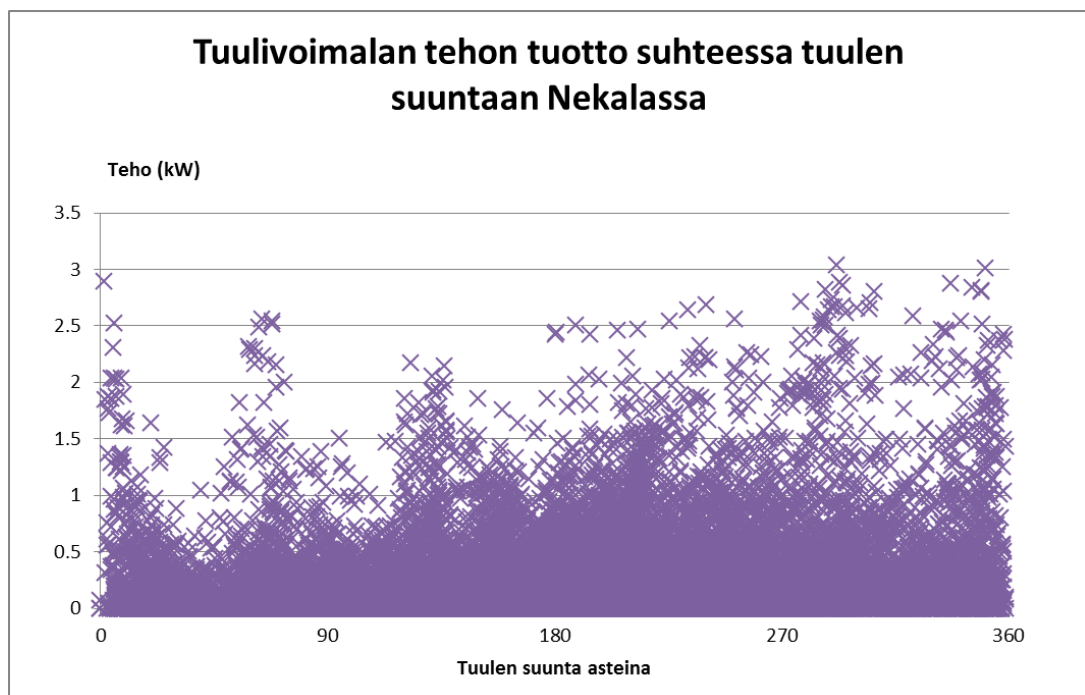
Kuvaan 6.10 on kerätty Nekalan lämpölaitoksen tuulivoimalan energiantuotannon tietoja kuukausitasolla. Tuottokuukausista on kerätty tarkasteluun ainoastaan ne, joissa energiantuotanto on ollut mahdollista kuukauden jokaisena päivänä. Kuvasta voidaan lukea, että pienin kuukausituotto 69 kWh on tullut helmikuussa 2013. Kuten jo aikaisemmissakin tarkasteluissa, paras kuukausituotto on saavutettu joulukuussa 2013. Kyseisellä voimalalla tuotto oli 304 kWh. Vuoden keskimääräinen kuukausituotto on 150 kWh luokkaa.

Nekalan tuulivoimalasta on saatu kerättyä eniten tuottotietoja. Kalenterivuoden vuosituotot on saatu vuosilta 2012 ja 2013. Vuosituotot ovat hyvin lähellä toisiaan, noin 1,8 MWh vuodessa. Tuotto on samaa suuruusluokkaa tai hieman pienempää kuin Särkänniemen niemen kärjessä.



Kuva 6.10. Nekalan lämpölaitoksen pientuulivoimalan tuotantotiedot 2012–2014 välisenä aikana

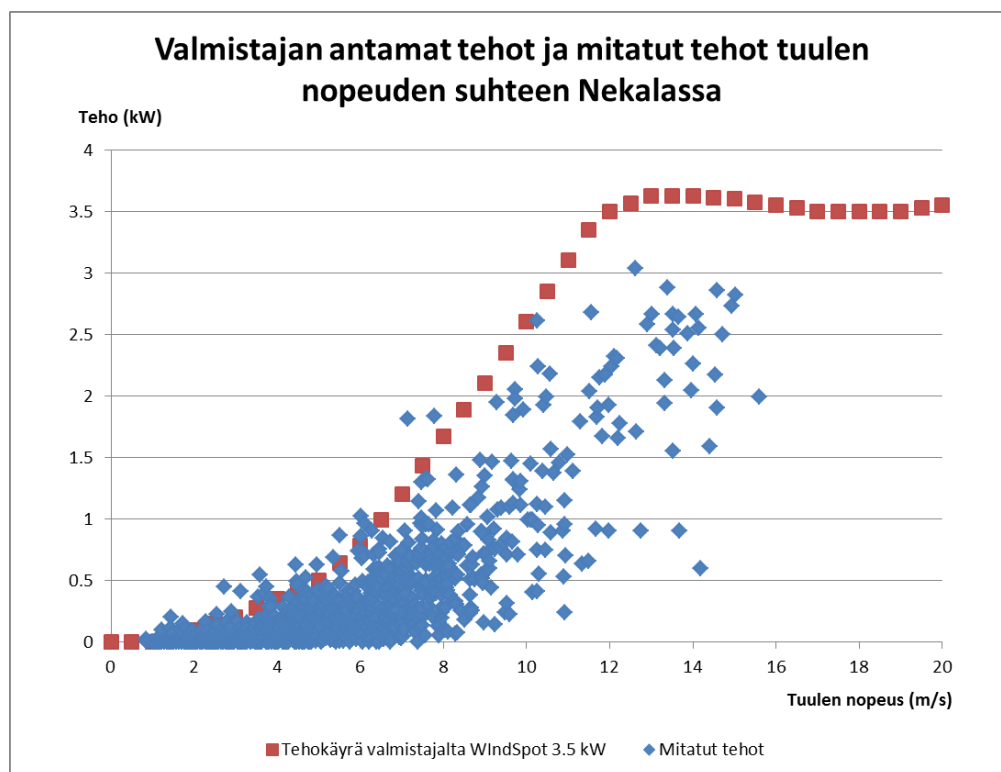
Kuvassa 6.11. on Nekalan tuulivoimalaitoksen tunnin keskimääräiset tehot, sekä Siilinkarin tuulen suunnat. Kuvaajasta nähdään, kuinka itäisen puoliskon sektorit eivät tuota yhtä hyvin kuin läntisen puolen sektorit. Teoriassa ennustettiin länsisektorin olevan todella vahva, mikä pitää paikkansa, mutta koko läntisen puoliskon eli 180–360 asteen sektorit ovatkin ennustettua vahvemmat.



Kuva 6.11. Nekalan lämpölaitoksen tuotanto suhteutettuna tuulen suuntaan

Kuvassa 6.12 on esitetty valmistajan antama tehokäyrä sekä mittauksien perusteella saadut tuotto- ja tuulitiedot. Tuulen suunnaksi tarkastelua varten valittiin eri suuntasektori kuin Särkänniemessä, koska ilmavirtauksella on esteetön pääsy pitkältä matkalta Pyhäjärven suunnalta. Tarkasteluun otettiin 20 asteen sektori länsi-luode-suunnalta (asteina 280–300). Keskimääräisiä tunnin tuottotietoja löytyi tältä sektorilta yhteensä 1025 kappaletta, mikä vastaa yhtäjaksoisessa ajassa yli kuukautta.

Tarkastelussa pitää huomioida edellisiin kappaleisiin verrattuna myös maantieteellisen sijainnin vaikutus. Nekalan lämpölaite on Siilinkarin sääasemasta sijainnillisesti jo kaukana, sekä maaston topologia eroaa näiden kahden sijainnin välillä. Ilmansuunta on kuitenkin pyritty valitsemaan niin, että ilmavirtauksien arvot olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan.



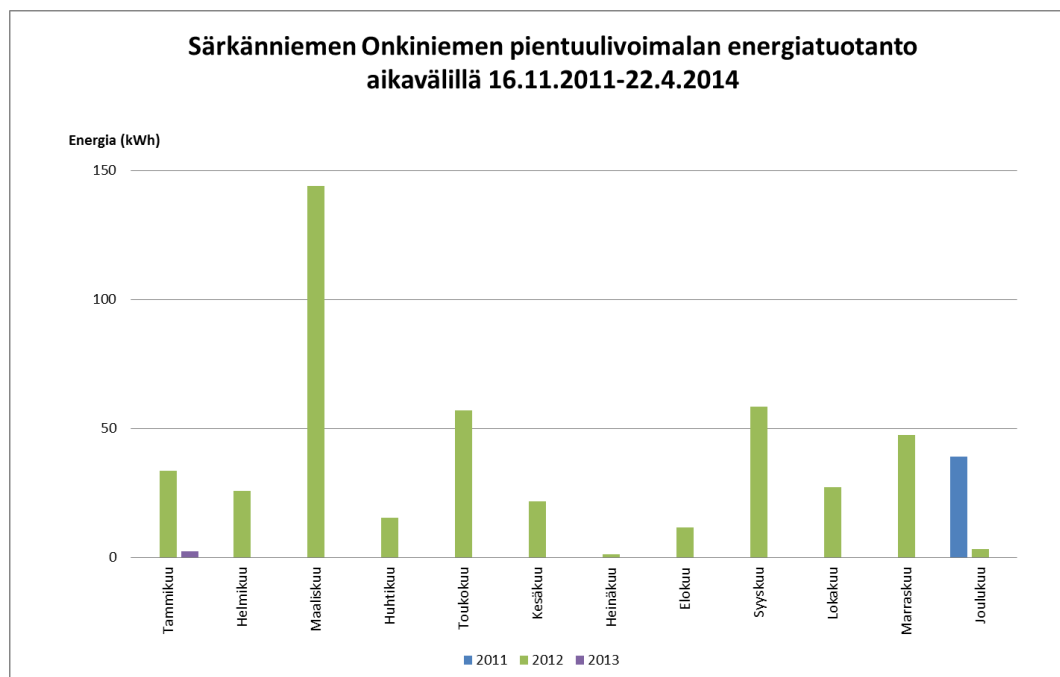
Kuva 6.12. Nekalan lämpölaitoksen pientuulivoimalan tuotantotiedot 2012–2014 välisenä aikana

Tarkastelujakso on kattava ja huomioiden se, että edellisessä kappaleessa todistettiin valmistajan antaman tuottokäyrän paikkaansa pitävyys, voidaan kuvan 6.12 tuloksista päätellä tuottokäyrän muoto, joka alkaa hahmottua kuvaan hieman nopeammille tuulille. Voidaankin olettaa ilmavirtauksen olevan 1–2 m/s pienempi Nekalassa verrattaessa tätä kyseistä ilmansuunnan sektoria Siilinkarin sääasemaan. Toinen huomioitava syy eroavaisuuteen voi löytyä vaihtosuuntaajaan asetellusta kuormituskäyrän muodosta, sillä se on laitteiston tarjoaman yrityksen asettelema.

6.2.5 Tuulivoima 4, Särkänniemi, Onkiniemi

Onkiniemen tuulivoimalan kuukausittaiset tuottotiedot on esitettyä kuvassa 6.13. Tietoihin on kerätty tuulivoimalan tuottokuukausista ainoastaan ne, joissa energiantuotanto on ollut mahdollista kuukauden jokaisena päivänä. Kuten mittauksista nähdään, tuulivoimala toimi moitteettomasti vähän yli vuoden. Tutkimuksissa kuitenkin laiminlyötiin kunnossapitoa siinä mielessä, ettei voimalan rikkouduttua sitä yritetty edes korjata. Tutkimuksen kannalta kuitenkin saatiin vertailtavia tuloksia ja tuottotiedot kokonaisuudessaan vuodelta 2012.

Kuvasta 6.13 nähdään, että pienin kuukausituotto 1 kWh on saavutettu heinäkuussa 2012. Paras tuotto on saatu maaliskuulta 2012 144 kWh. Tämä tulos on kuitenkin yli puolet pienempi kuin samalla tontilla sijainneella toisella tuulivoimalalla. Kalenterivuoden vuosituotto jää alle 500 kWh ja keskiarvioitettuna tämä kuukautta kohden saadaan energiaa noin 40 kWh kuukaudessa.

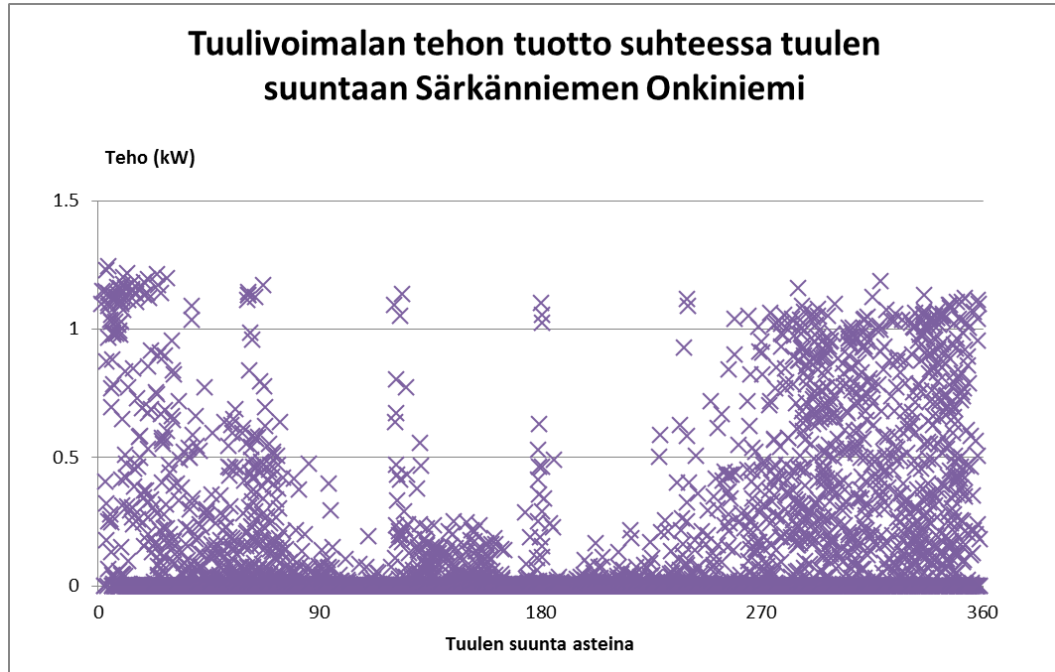


Kuva 6.13. Särkänniemen Onkiniemessä pientuulivoimalan tuotantotiedot 2012–2014 välisenä aikana

Kuvasta 6.13 voidaan päätellä sijaintipaikan olleen hyvin haasteellinen ilmavirtaukselle, koska yhtenä kuukautena tuotettiin energiaa kuitenkin lähes 150 kWh. Tämä todistaa sen, että tuulivoimalassa on potentiaalia, jos paikan sijainti olisi ilmavirtaukselle avoin jokaiselta ilmavirtauksen sektorilta.

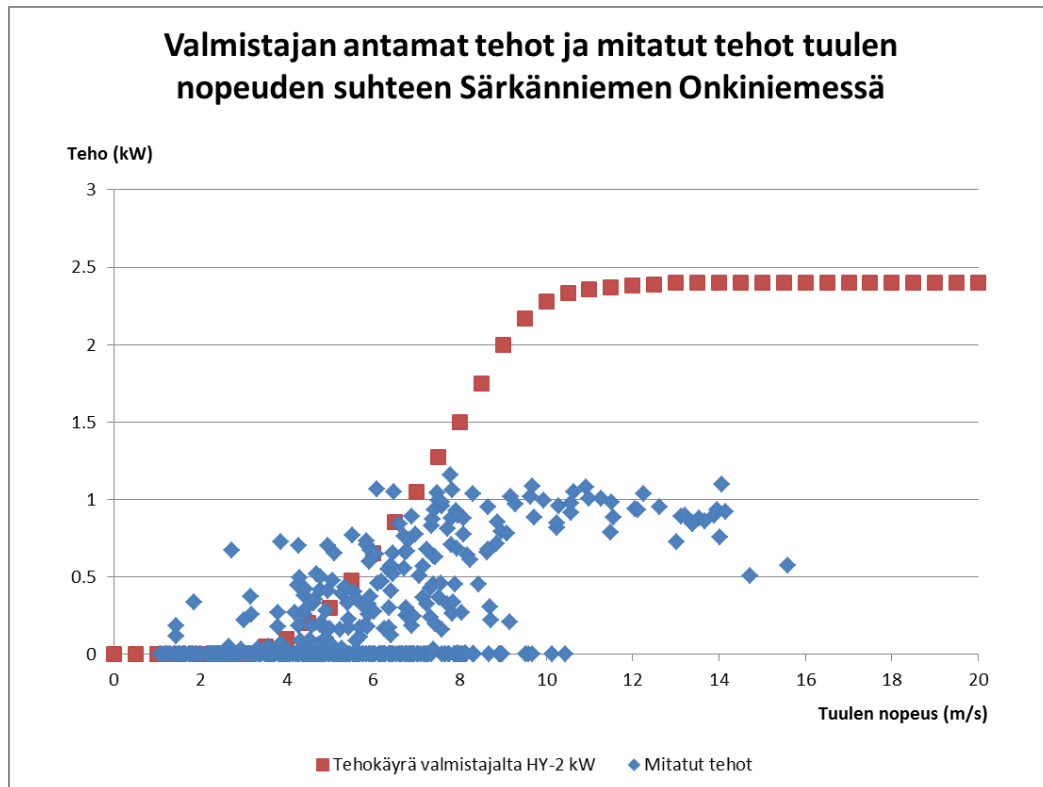
Kuvassa 6.14 näkyy tuulivoimalan tehon tuotto suhteessa Siilinkarin tuulen suuntaan. Kaikki käytetyt arvot on laskettu tunnin keskiarvosta. Kuvasta nähdään, kuinka ilmavirtaus tavoittaa tuulivoimalan todella hyvin pohjoisen puoliskon sektoreilla. Suurin osa tuotosta tulee länsi-pohjois-sektorilta. Eteläisen sektorin

puoliskolla ilmavirtauksella ei ole pääsyä tuulivoimalalle, joten tuloksissa pitää huomioida keskiarvoista aiheutuva virhemarginaali.



Kuva 6.14. Särkänniemen Onkiniemen tuulivoimalan tuotanto suhteutettuna tuulen suuntaan

Kuvasta 6.14 huomataan samat keskiarvoista selvästi poikkeavat tuottopiikit asteluvuilla 120 ja 180, kuten aikaisemmin Särkänniemen niemen kärjessä olevalla tuulivoimalalla. Tämä vahvistaa edellä tehtyjä oletuksia ilmavirtauksen käyttäytymisestä. Tarkasteltaessa tuulen suuntien tuottoja ja tuulivoimalan tehuippuja kerätyistä mittauksista päädytään ottamaan valmistajan tehokäyrän todistamiseen tuulen suuntasektoriksi 280–300 astetta. Kuvaan 6.15 on piirretty mittausten perusteella saadut tehokäyrän mittaustulokset.



Kuva 6.15. Särkänniemen Onkiniemessä pientuulivoimalan tuotantotiedot 2012–2014 välisenä aikana

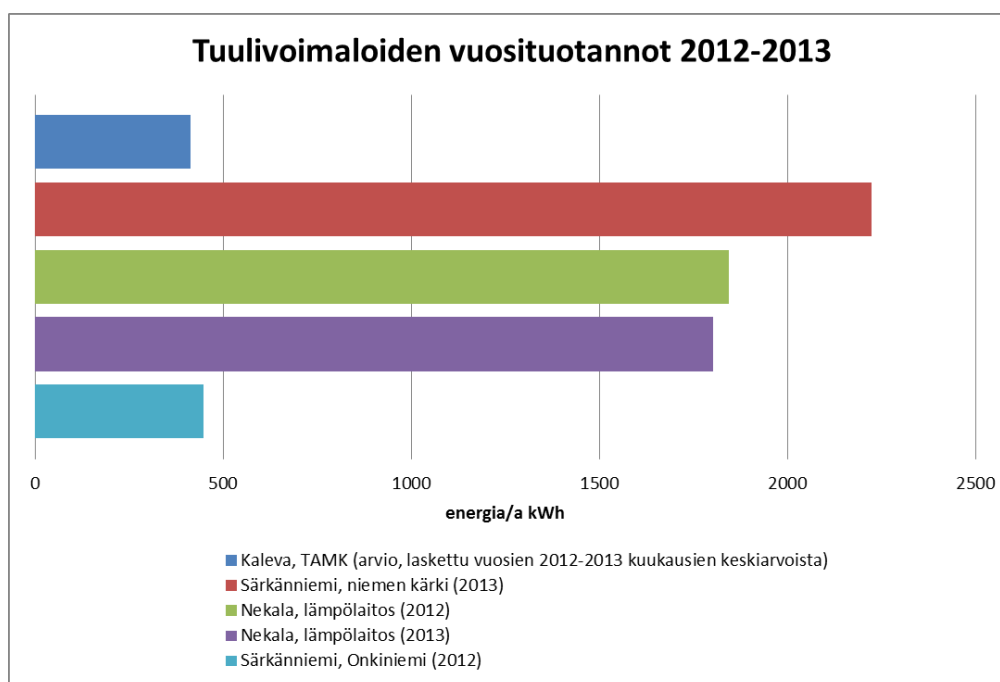
Tuulen mittauksessa käytetty sääaseman maantieteellinen sijainti, maaston muodot sekä rosoisuus ovat vertailukohteesta eroavia, joten täysin luotettavasti ei pystytä toteamaan valmistajan antaman tehokäyrän paikkaansa pitävyyttä. Kuvan 6.15 mukaisten mittausten perusteella tuulivoimalan teho jäisi kuitenkin oleellisesti luvatuista arvoista.

6.3 Tulosten analysointi

Kappaleessa tarkastellaan käytännössä saatuja mittaustuloksia ja vertaillaan niitä tutkittavien tuulivoimaloiden välillä. Lisäksi selvitetään tuulivoimaloiden tunnuslukuja, joiden avulla on mahdollista vielä verrata tuulivoimaloiden tuotantoa suurempiin kokoluokkiin. Lopuksi tarkastellaan tuulivoimaloiden energiatuotantoa taloudellisesta näkökulmasta.

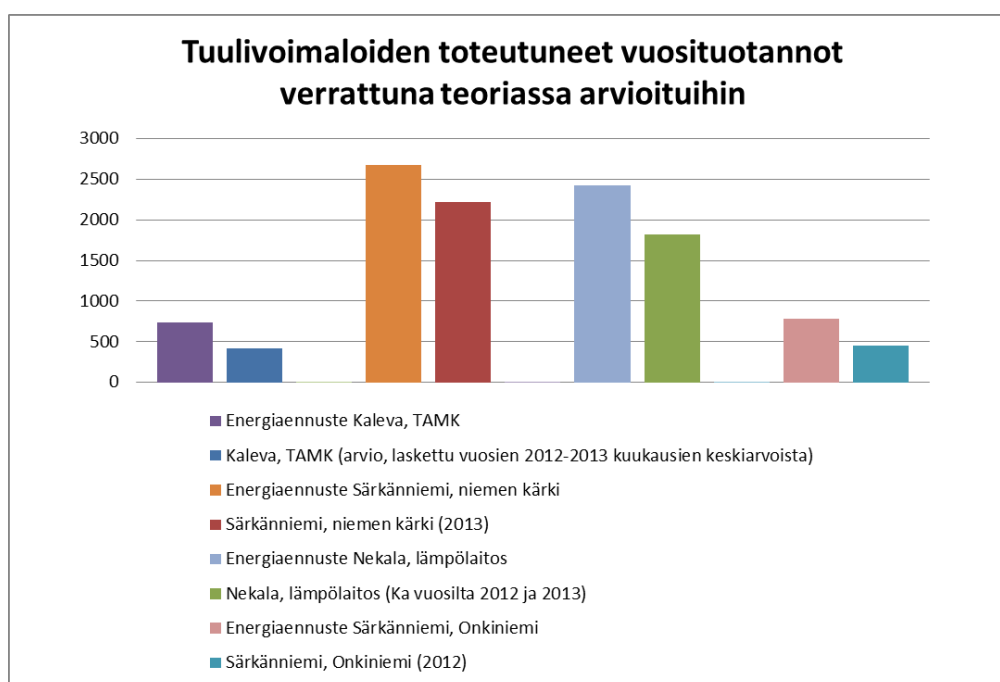
6.3.1 Tuloksien vertailu

Kuva 6.16 esittää tuulivoimaloiden vuosituotantoja aikavälillä 2012–2013 graafisten palkkien avulla. Tiedot on kerätty mittaustuloksista kappaleesta 6.2. Kuvassa on esitetty ne vuodet, joissa tuulivoimaloiden on ollut mahdollista tuottaa energiaa koko kalenterivuoden ajan, lukuun ottamatta TAMK:n tuulivoimalan vuosituotantoa, joka on laskettu kahden eri kalenterivuoden kuukausien keskiarvotuloksista.



Kuva 6.16 Tutkittavien tuulivoimaloiden vuosituotannot ajanjaksona 2012–2013

Kuvan 6.16 tuloksista nähdään, kuinka tuulivoimaloiden vuosituotannot jakaantuvat kahteen eri ryhmään. Parhaimmat vuosituotannot ovat 2 MWh luokkaa ja huonoimmat jäävät alle 500 kWh:iin vuositasolla. Kuvassa 6.17 on havainnollistettu teoriassa määriteltyjen tuottoennusteiden ja käytännössä toteutuneiden vuosituotantojen eroavaisuuksia. Tulokset ovat yhdenmukaiset teoriaosuuden arviointeihin, joten ilmavirtaukseen huomioitavat seikat selittävät tuotannon jakaantumisen tuulivoimaloiden kesken.



Kuva 6.17. Tutkittavien tuulivoimaloiden toteutuneet vuosituotannot verrattuna teoriassa ennustettuihin

Teoriassa ennustetut vuosituotannot ovat kuitenkin kauttaaltaan suurempia kuin todellisuudessa saavutetut (kts. kuva 6.17). Parhaimmilla tuottopaikoilla todellinen vuosituotto jää noin 80 % luokkaan teoriassa arvioituihin tuottoennusteisiin verrattuna. Ilmavirtauksen kannalta epäedullisimmilla sijainneilla olleiden tuulivoimaloiden todellinen vuosituotto jää noin 55 % teoriassa arvioituihin tuottoennusteisiin verrattuna. Voidaankin todeta, että tuottoennusteiden arvioiminen on sitä helpompaa ja luotettavampaa mitä vähäisempiä ovat maaston rosoisuus ja ilmavirtauksen pyörteisyys.

Taulukkoon 6.2 on kerätty tuulivoimaloiden tehohippuja vuosien 2011–2013 aikana. Taulukon mitatut tiedot ovat tunnin keskiarvoja, joten hetkelliset huipputehot ovat näitä arvoja suurempia. Tuulen suunnat ja nopeudet on otettu Siilinkarin sääasemalta kuten kappaleessa 6.2. Tutkittavana aikana Suomea koetteli kolme suurta myrskyä; 26.12.2011 Tapani-myrsky, 17.11.2013 Eino-myrsky ja 13.12.2013 Seija-myrsky. Kaikkien myrskyjen tuulenpuuskien huiput sisämaassa mitattiin 30 m/s tietämille. Tuloksissa on kuitenkin huomioitava, että Onkiniemen tuulivoimala lakkasi toimimasta vuoden 2013 alusta, joten se ei ollut toiminnassa loppuvuoden myrskyjen aikana.

Taulukko 6.2. Tutkittavien tuulivoimaloiden huipputuotannot vuosina 2011–2013

Voimala	Päivämäärä	Tunti	Tuulen suunta (°)	Tuulen nopeus (m/s)	Energia (kWh)
Kaleva TAMK	17.11.2013	11	305.0	12.5	1.17
	13.12.2013	1	277.7	12.8	1.16
Särkänniemi Niemen kärki	1.12.2013	20	349.3	14.1	3.53
	13.12.2013	7	337.2	14.1	3.57
Nekala lämpölaite	26.12.2011	9	292.0	12.6	3.04
	1.12.2013	19	351.0	16.2	3.01
Särkänniemi Onkiniemi	14.1.2012	19	4.5	10.5	1.25
	14.1.2012	20	3.5	10.4	1.23

Taulukkoon 6.2 on otettu jokaisen tuulivoimalan kaksi parasta keskiarvotuntia. Tuloksista huomataan, että jokin tuulen suunnan sektori on kullekin tuulivoimalalle otollinen ja paras tuotanto saavutetaan aina samalta sektorilta. Samat havainnot voi tehdä kappaleessa 6.2, jossa verrattiin tuulivoimaloiden tuottoa tuulen suuntaan.

Generaattoreiden valmistajien lupaamat huipputehot saavutettiin WindSpot 3,5 kW osalta Särkänniemen Niemen kärjessä pohjoistuulella, jossa tuulimittauksen arvot ovat hyvin lähellä tuulivoimalan saamaa ilmavirtausta. Tuloksen perusteella voidaan todeta kyseisen valmistajan tehokäyrän olevan luotettava huipputehon osalta.

Kiinalaisen generaattorin HY-2kW tehon huppuarvot jäivät valmistajan lupaamista arvoista. Tutkimuksessa käytetty tuulimittaus ei välttämättä vastaa tuulivoimalan saamaa ilmavirtausta, joten tulos on siinä mielessä epäluotettava. Nekalassa ja TAMK:lla tuulivoimaloissa on sama generaattori kuin Särkänniemen niemen kärjessä,

joten myös näissä tapauksissa huomataan, että tuulimittaus ei pidä paikkaansa kyseisillä tuulensuunnan sektoreilla.

6.3.2 Tulosten vertailua tuulivoimaloiden tuotantotilastoihin

Kappaleessa 2.3.5 osoitettiin, kuinka on mahdollista verrata tuulivoimaloita toisiinsa, vaikka niiden tehot tai fyysiset mitat olisivat toisiinsa nähden eri kokoluokassa. Tutkittavien tuulivoimaloiden huipunkäyttöajat, kapasiteettikertoimet, sekä tuotanto suhteutettuna pyyhkäisyypinta-alaan laskettiin mittaustulosten ja teknisten tietojen avulla. Taulukkoon 6.3 on kerätty jo esillä olleet lähiympäristön sisämaan 75–750 kW tehoiset tuulivoimalaitokset sekä tässä tutkimuksessa olevat pientuulivoimalaitokset. Taulukko on lajiteltu kapasiteettikertoimen mukaiseen järjestykseen pienimmästä suurempaan. Taulukkoa tulkittaessa on huomioitava, että vertailu on ainoastaan suuntaa antava, koska tunnusluvut on laskettu eri vuosilta aikaväliltä 2011–2013.

Taulukko 6.3. Tutkittavien tuulivoimaloiden tuotannon tunnuslukuja verrattuna Suomen tuulivoimalaitosten tuulivoimalaitoksien vastaaviin arvoihin

Kunta	Nimi	Teho [kW]	Valmistaja	Z [m]	D [m]	Tuotanto [MWh]	t_h [h/a]	e [kWh/m ²]	CF [%]
Tampere	Kaleva, TAMK	3.5	Sonkyo Energy	18	4.1	0.4	114	30	1
Tampere	Särkänniemi, Onkiniemi	3.5	Huaing Wind Power	12	4	0.4	114	30	1
Jalasjärvi	Vaasantie	220	Windworld	31	25	68	307	138	4
Tampere	Nekala, lämpölaite	3.5	Sonkyo Energy	12	4.1	1.8	514	136	6
Töysä	Riihontie 1	600	NEGMicon	50	43	365	608	251	7
Tampere	Särkänniemi, niemen kärki	3.5	Sonkyo Energy	18	4.1	2.2	629	167	7
Vammala	Koppelo	225	Vestas	50	29	159	705	240	8
Huittinen	Huittinen 1	75	Nordtank	40	20	50	667	159	9
Sastamala	Marjamäenvuori 1	225	Vestas	52	29	198	881	300	10

Vertailemalla taulukon tuulivoimaloita keskenään huomataan tässä työssä tutkittavien pientuulivoimaloiden olevan vertailun epäedullisimmasta päästä. TAMK:n ja Särkänniemen Onkiniemen tuulivoimalat erottautuvat taulukosta negatiivisessa valossa. Nekalan ja Särkänniemen niemen kärjen voimalat ovat kuitenkin vertailukelpoisia isomman kokoluokan tuulivoimaloiden kanssa.

Tuotantoa verrattaessa roottorin pyyhkäisyypinta-alaan havaintaan pientuulivoimaloiden olevan tarkasteltavan kohteen huonoimmasta päästä. Tulos kertoo sen, että pientuulivoimalat eivät kykene hyödyntämään pyyhkäisyypinta-alansa ilmavirtauksen energiaa yhtä hyvin kuin isomman kokoluokan tuulivoimalat. Yksi merkittävä syy tähän on varmasti pientuulivoimaloiden kiinteät lapakulmat, jotka pienentävät tuulivoimalan huippuhyötysuhdetta kapealle skaalalle tietyille tuulennopeudelle. Myös ilmavirtauksen turbulenssi matalammilla napakorkeuksilla huonontaa tuulivoimaloiden hyötysuhdetta.

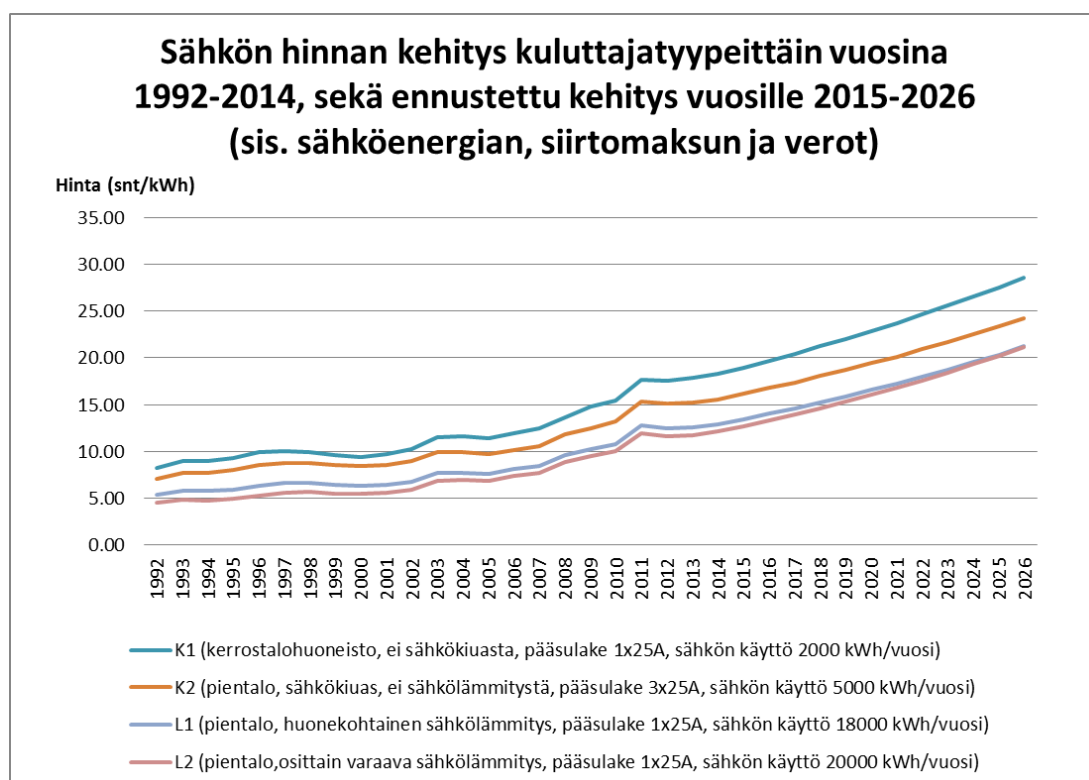
Huipunkäyttöajassa sekä kapasiteettikertoimissa Nekalan ja Särkänniemen niemen kärjen tuulivoimalat saavat vertailukelpoisia arvoja suuremman kokoluokan

tuulivoimaloihin. Tilastot ovat kuitenkin eri vuosilta, joten tarkempaa analysointia ei luotettavasti pystytä tekemään.

6.3.3 Taloudellista vertailua

Pientuulivoimaloiden ennakoiva taloudellinen vertailu on haasteellinen tehtävä. Markkinakatsauksessa luvussa 3.3.1 todettiin tarjonnan olevan kirjavaa. Nykytekniikka ja sen taloudellinen kehitys ovat avanneet markkinat pientuulivoimaloiden sektorille vasta vähän aikaa sitten, joten käytännön kokemuksia luotettavuuksista tai eliniästä oli työtä tehdessä mahdoton saada. Taloudellisesta näkökulmasta katsottaessa tutkimuksessa käytetyt tuulivoimalat ovat ääripäistä. Kiinassa valmistettu tuulivoimala oli markkinoiden edullisimpia, kun taas kolme muuta voimalaa olivat markkinoiden arvokkaimmista päästä.

Kuvassa 6.18 näkyy sähkön hinnan kehitys kuluttajatyypeittäin vuosina 1992–2014, sekä ennuste vuosille 2015–2026. Tarkasteluun on otettu mukaan eri pientalotyyppien sekä kerrostalohuoneiston sähköenergioiden ostohinnat. Hinnat sisältävät myynti- ja siirto-osuuden sekä ajankohtana voimassa olleet verot. Kuvaajista nähdään, kuinka hinnat ovat kaksinkertaistuneet 20 vuoden aikana, vuodesta 1992 vuoteen 2014. Kyseisenä aikana keskiarvioitettujen vuosihintojen kasvumuutosprosentit vaihtelevat kuluttajatyypeittäin välillä 3,7–4,8. Määritellyillä kuluttajatyypikohtaisilla muutoskasvuprosenteilla kuvaajia on jatkettu vuoteen 2026 asti.



Kuva 6.18. Sähkön keskihinnan (snt/kWh) kehitys vuosina 1992–2014 sekä ennuste vuosille 2015–2026 kuluttajatyypeittäin. Hinnat sisältävät sähkön siirron ja myynnin osuudet sekä kaikki ajankohtana voimassa olleet verot (Tilastokeskus)

Kuvan 6.18 kuluttajatyyppejen hintaerot vaihtelevat tutkittavissa tilastoissa vuonna 2014 pyöristäen 12–18 snt/kWh välillä, kun taas vuoden 2026 ennusteessa hintaerot ovat 15–22 snt/kWh välillä. Tutkittavien tuulivoimaloiden taloudellinen tarkastelujakso määritellään seuraavissa tarkasteluissa vuosille 2011–2026. Kyseisessä aikavälissä keskiarvioitun sähkön hinta on laskelmien perusteella noin 18 snt/kWh. Kuluttaja saa tuotetusta sähköenergiastaan parhaan mahdollisen taloudellisen hyödyn, kun hän itse pystyy kuluttamaan tuottamansa sähkön kokonaisuudessaan. Seuraavissa laskelmissa oletetaan, että kuluttaja hyödyntää sähkötuotannon omassa kulutuksessaan, sähköenergian keskiarvioitun hinnan ollessa 18 snt/kWh tarkasteluajana. Seuraavissa laskennoissa sähköenergian ostohinnasta on käytetty pyöristettyä keskiarvoa 15 snt/kWh.

Taulukkoon 6.4 on kerätty tuulivoimaloiden suuntaa antavat hankintahinnat niiden perustamishetkellä. Hinnat eivät sisällä perustuksia, koska perustusten hinnat vaihtelivat suuresti kohteiden välillä. Taulukkoon on laskettu taloudellinen vuosituotanto edellä esitetyllä tämänhetkisellä sähkön hinnalla. Kappaleessa 6.2 ilmoitetuista tuulivoimaloiden vuosituotannoista ja ostetun energian hinnasta saadaan laskettua taloudellinen tuotto vuodessa jokaiselle tutkittavalle tuulivoimalalle. Tuloksissa on huomioitava, että huolto- ja kunnossapitokuluja ei otettu laskentoihin mukaan.

Taulukon 6.4. viimeiseen sarakkeeseen on arvioitu jokaisen tuulivoimalan takaisinmaksuaika. Takaisinmaksuaika lasketaan taloudellisten vuosituottojen summana ja verrataan koska nämä vuosituotot saavuttavat investoinnin hankintahinnan. Menetelmässä ei huomioida rahan aika-arvoa eikä korkotekijöitä. Laskenta on tehty edellä mainitulla sähköenergian keskiarvohinnalla ja siihen ei ole huomioitu tuulivoimalan huolto- ja kunnossapitokuluja.

Taulukko 6.4. Tuulivoimaloiden taloudellista vertailua ja arvioitu takaisinmaksuaika

Tuulivoimalan nimi	Hankintahinta (€)	Energian vuosituotanto (kWh/a)	Ostetun energian hinta (snt/kWh)	Taloudellinen vuosituotanto (€/a) *	Takaisinmaksuaika (a) *
Kaleva, TAMK	30000	740	18	133	225
Särkänniemi, Niemen kärki	30000	2680	18	482	62
Nekala, Lämpölaite	30000	2429	18	437	69
Särkänniemi, Onkiniemi	5000	704	18	127	39
* Ei huomioida huolto- ja kunnossapitokuluja					

Lyhin takaisinmaksuaika edellä esitetyillä laskelmilla saavutettaisiin Särkänniemen Onkiniemen Kiinalaisvalmisteisella tuulivoimalalla, jonka takaisinmaksuaika olisi 39 vuotta. Kuten tutkimuksessa kuitenkin kävi ilmi, kyseinen tuulivoimala ei ilman huoltoa ja kunnossapitoa kestänyt toiminnassa kuin reilun vuoden.

Seuraavaksi lyhin takaisinmaksuaika saavutettiin Särkänniemen tuulivoimalla, 62 vuotta. Tuloksissa on kuitenkin huomioitava, että hankintahinnat ovat tuulivoimaloiden perustamishetkeltä eli vuosilta 2011–2012. Vertailukohdaksi otettakoon kappaleen kirjoitusvuosi, kevät 2014, jolloin vastaava tuulivoimalapaketti ilman perustuksia olisi

maksanut noin 15 000 euroa. Kolmen vuoden aikana kyseinen tuulivoimalapaketin hinta on siis puoliintunut, joten takaisinmaksuaika olisi työn kirjoitushetkellä 31 vuotta.

Laitteistojen käyttöikä ei varmasti saavuta takaisinmaksuaikoja, joten tuulivoimalat eivät pysty elinikänsä aikana maksamaan itseään takaisin nykyisillä tuulivoimaloiden hinnoilla ja arvioidulla sähköhinnan kehityksellä. Taulukossa 6.5 on lähestytty asiaa toisesta näkökulmasta. Taulukossa on arvioitu tuulivoimaloiden käyttöiäksi 15 vuotta ja laskettu edellä esitetyillä vuosituotannoilla tuulivoimaloiden käyttöiän tuottoennuste kyseisessä ajassa. Hankintahinnan ja käyttöiän tuottoennusteen suhteesta saadaan arvioitua kuluttajan maksama hinta tuulivoimalalla tuotetulle sähkölle sen käyttöiän aikana.

Taulukko 6.5. Tuulivoimaloilla tuotetun sähkön hintaennuste (snt/kWh)

Tuulivoimalan nimi	Hankintahinta (€)	Energian vuosituotanto (kWh/a)	Käyttöiän ennuste (a)	Käyttöiän tuottoennuste (kWh/a)	Sähköstä maksettu hinta (snt/kWh) *
Kaleva, TAMK	30000	740	15	11096	270.38
Särkänniemi, Niemen kärki	30000	2680	15	40200	74.63
Nekala, Lämpölaite	30000	2429	15	36435	82.34
Särkänniemi, Onkiniemi	5000	704	15	10559	47.35
* Ei huomioida huolto- ja kunnossapitokuluja, eikä korkotekijöitä					

TAMK:n tuulivoimalalla tuotetun sähkön hinnaksi tulee 2,70 euroa/kWh, joka on ostosähköön (2014) verrattuna moninkertainen hinta. Särkänniemen Onkiniemen tuulivoimalalla tuotettu sähkö tulisi kaikista edullisimmaksi, jos voimala kestäisi 15 vuotta. Tässäkin tapauksessa vuoden 2014 ostosähköön verrattuna hinta olisi yli kolminkertainen.

Samoihin hintaluokkiin päästäisiin, jos oletettaisiin, että Särkänniemen niemen kärjen tuulivoimala hankittaisiin vuonna 2014, jolloin sen hankintahinta olisi noin 15 000 euroa. Tällöin tuulivoimalalla tuotetun sähkön hinnaksi saataisiin keskimäärin 15 vuodessa noin 37 snt/kWh, kun ei huomioida huolto- ja kunnossapito kuluja.

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa selvitettiin tuulen syntyä auringon epätasaisen säteilyn vaikutuksesta. Ilmavirtauksen voimakkuus ja käyttäytyminen ovat seurausta monen eri voiman yhteisvaikutuksesta. Ilmavirtaus on voimakasta korkealla maan pinnasta, kun maan kitkavoimat eivät pysty vaikuttamaan ilmavirtaukseen. Aluetta, jossa kitkavoimat vaikuttavat ilmavirtaukseen, kutsutaan rajakerrokseksi. Rajakerroksen alaosa n. 10 % on pintakerrosta, jossa vaikuttavat pintatuulet. Ilmavirtauksen voimakkuus hidastuu rajusti pintakerroksen alueella maaston rosoisuuden vaikutuksesta. Rosoisuus tekee ilmavirtauksesta myös pyörteistä, mikä osaltaan heikentää sen voimakkuutta.

Matemaattisilla yhtälöillä on mahdollista arvioida ilmavirtauksen käyttäytymistä eri korkeuksilla. Yhtälöiden avulla pystytään huomioimaan kitkan vaikutus ilmavirtauksen voimakkuuteen, arvioimaan tuulennopeuksien esiintymistodennäköisyyksiä sekä ennustamaan ilmavirtauksesta saatavaa tehoa tietyllä pinta-alalla.

Kuluttaja voi saada tuulitietoja eri maantieteellisillä sijainneilla Ilmatieteen laitoksen sääasemilta tai tuulivoimaloiden suunnitteluun tehdyllä Suomen Tuuliatlas sovelluksella. Sääasemien tuulitiedot on mitattu pintakerroksen alueelta ja asemasta riippuen tuulitietoja voi saada useamman vuosikymmenen ajalta. Suomen Tuuliatlaksen keskimääräiset tuulennopeudet ovat saatavilla yli 50 metrin korkeuksilla ja ne perustuvat matemaattisiin malleihin pitkän aikavälin hyvin toteutuneisiin sääennusteisiin.

Tutkimuksessa rakennettiin neljä pientuulivoimalaa Tampereen keskustan alueelle. Tuulivoimaloiden sijaintien rosoisuuskertoimet vaihtelevat paljon. Tuulivoimaloista kaksi on ilmavirtauksen esteettömän pääsyn kannalta hyvällä paikalla ja kaksi rosoisemmalla sijainnilla. Työssä laskettiin teoreettiselta pohjalta tuottoennusteet matemaattisten menetelmien ja ohjelmien avulla jokaiselle tuulivoimalalle. Keskimääräisten tuulennopeuksien lähtötiedot otettiin Suomen Tuuliatlaksesta. Tuottoennusteita selvitettiin ilmavirtauksen pinta-ala tehon ja valmistajan antaman tehokäyrän perusteella. Menetelmien keskinäisellä vertailulla selvitettiin myös pientuulivoimaloiden tehokertoimia.

Käytännön mittauksissa seurattiin tuulivoimaloiden tuottoa useamman vuoden ajan. Tuottoa analysoitiin eri tuulimittauksilla sekä tarkasteltavia muuttujia vaihdellen. Verrattaessa tuulen ajankohtaa, suuntaa, sekä nopeutta ja näiden korrelointia tuulivoimaloiden tehotuotantoon, oli mahdollista analysoida valmistajan antamien tehokäyrien luotettavuuksia.

Kuluttajalle markkinoilla tarjottavien pientuulivoimaloiden kirjo on laaja. Voimaloiden keskinäinen vertailu ostohetkellä on haastava tehtävä. Hyötysuhteen ja

laadun mittarina toimii parhaiten valmistajien antama tehon ja tuulen suhteesta antama kuvaaja eli tehokäyrä. Pientuulivoimaloiden tehokäyrien luotettavuuksien mittaavia tutkimuslaboratorioita on perustettu ympäri maailmaa. Kuluttajan kannattakin varmistaa ennen tuulivoimalan hankintaa, että sen tehokäyrä on testattu ulkopuolisen laboratorion toimesta.

Verkkoyhtiöille teetetyin kyselyn mukaan pientuulivoimaloiden määrä oli kasvanut puolella aikavälillä 2009–2011. Kyselyiden määrä aihepiiristä oli huomattavasti suurempi kuin toteutuneiden pientuulivoimaloiden määrä. Verkkoyhtiöiden kannalta ongelmia aiheuttivat pientuulivoimaloiden turvallisuus- ja suojausasetukset. Joidenkin valmistajien verkkoliitäntälaitteet eivät pystyneet toimimaan energiateollisuuden antamien suositusarvojen rajoissa.

Pientuulivoimaloiden tuotto pystyttiin arvioimaan teoreettisen analysoinnin pohjalta tarkasti. Mittauksissa todistettiin, että hyvällä sijainnilla olleet kaksi tuulivoimalaa tuottavat noin 2 MWh vuodessa ja kaksi vähän epäedullisemmalla sijainnilla olevien tuulivoimaloiden tuotto jää alle 500 kWh vuodessa. Tutkimuksessa pystyttiin todistamaan kolmessa tutkittavassa kohteessa käytetyn tuulivoimalan valmistajan antaman tehokäyrän paikkaansa pitävyys.

Taloudellisesta näkökulmasta kolme tutkittavaa tuulivoimalaa oli markkinoiden laadukkaimpia ja arvokkaimpia ja yksi markkinoiden edullisin. Edullisin tuulivoimala pysyi toimintakuntoisena vähän reilun vuoden. Laadukkaalla ja parhaimmalla sijainnilla olleen tuulivoimalan takaisinmaksuaika oli 62 vuotta tuulivoimalan perustamishetken kustannuksilla ja 18 snt/kWh sähköenergian hinnalla laskettaessa. Laskennan kuluihin ei huomioitu perustuksia, eikä huolto- ja kunnossapitokuluja. Joidenkin tuulivoimaloiden hinnat ovat laskeneet tutkimuksen aikana. Vuoden 2014 kevään hinnoilla kyseisen voimalan hankintahinta on puolittunut, joten takaisinmaksuaika olisi edellisillä laskelmilla 31 vuotta.

Tutkimuksessa asennetuilla sijainneilla ja tutkittavilla pientuulivoimalakokonaisuuksilla ei energiantuotanto ole järkevää taloudellisesta näkökulmasta tarkasteltaessa. Tampereen keskustan alueen otollisin paikka pientuulivoimaloiden sijoittamiselle mantereella olisi Pyynikin harju, josta olisi mahdollista saada noin nelinkertaiset tuotot tutkittaviin sijainteihin verrattuna. Näin saavutettaisiin teoriassa alle 10 vuoden takaisinmaksuaika. Tämä vaatisi kuitenkin luotettavimmat tutkimukset kyseiselle alueelle.

Pientuulivoimaloiden etuna voidaan pitää niiden helppoa siirrettävyyttä paikasta toiseen siinä tilanteessa, kun ensimmäinen sijoituspaikka on todettu virhearviointiksi. Investointina itse pientuulivoimala verkkoliitäntälaitteineen on arvokas hankinta, mutta siirtäminen ja uusien maaperustuksien tekeminen on näihin nähden edullista.

LÄHDELUETTELO

Barry, R., Chorley, R. 2010. Atmosphere, Weather and Climate. 9th ed. Oxon and New York, Routledge. 516.

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., 2001. Wind Energy Handbook. West Sussex, John Wiley & Sons. 617.

Chiras, D. 2010. Wind Power Basics. New York, New Society Publishers. 193.

Darrius G.J.M. 1931. Turbine having it's rotating shaft transverse to the flow of the curren. United States Patent 1835018.

Energiamarkkinavirasto [WWW]. [viitattu 31.10.2013]. Saatavissa: www.energiamarkkinavirasto.fi

Energiateollisuus ry [WWW]. [viitattu 31.10.2013]. Saatavissa: www.energia.fi

European Environment Agency [WWW]. [viitattu 10.11.2013]. Saatavissa: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/renewable-gross-final-energy-consumption-1/assessment>

Finnwind Oy [WWW]. [viitattu 3.3.2014]. Saatavissa: www.finnwind.fi

Gipe, Paul. 2009. Wind Energy Basics, A Guide to Home- and Community-Scale Wind Energy Systems. 2nd ed. White River Junction. Chelsea Green Publishing Company. 194.

Gipe, Paul. 2004. Wind Power, Renewable Energy for Home, Farm, and Business. White River Junction. Chelsea Green Publishing Company. 514.

Ilmatieteen laitos [WWW]. [viitattu 13.3.2013]. www.ilmatieteenlaitos.fi

Iskraemeco [WWW]. [viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: <http://www.iskraemeco.si/emecoweb/index.htm>

Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E., Manner, O. 2008. Ilmakehä, sää ja ilmasto. Keuruu, Otavan Kirjapaino Oy. 497. Saatavana myös...

Kodin vihreä energia Oy [WWW]. [viitattu 30.5.2012]. Saatavissa: www.kodinenergia.com

LCJ Capteurs [WWW]. [viitattu 15.10.2013]. Saatavissa: www.lcjscapteurs.com

Lehto, I. 2009. Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Diplomityö. Helsinki. Teknillinen korkeakoulu. 101 s. [viitattu 20.3.2013]. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100081.pdf>

Maanmittauslaitos [WWW]. [viitattu 22.10.2013]. Saatavissa: www.maanmittauslaitos.fi

Motiva. 2010. Selvitys hajautetusta ja paikallisesta energiantuotannosta erilaisilla asuinalueilla [WWW]. Loppuraportti. [viitattu 4.10.2013]. http://www.motiva.fi/files/4458/Hajautettu_ja_paikallinen_energiantuotanto_loppuraportti.pdf

Paasonen, S. 2001. Sää. Porvoo, Bookwell Oy. 166.

Pielou, E.C. 2001. Energy of Nature. Chicago, University of Chicago Press. 259.

Power-One [WWW]. [viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: <http://www.power-one.com>

Rejlers Oy [WWW]. [viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: <http://www.rejlers.fi/>

Savonius, S.J. 192-?. The wing-rotor in theory and practice, Helsinki, Savonius & Co. 39.

SEPEN tutkimuskeskus pientuulivoimaloille [WWW]. [viitattu 6.3.2014]. Saatavissa: www.sepen-montplaisir.fr

Shell energy scenarios to 2050 [WWW]. [viitattu 10.11.2013]. Saatavissa: http://www.manicore.com/fichiers/Shell_scenarii_to_2050.pdf

Suomen Tuuliatlas [WWW]. [viitattu 31.5.2012]. Saatavissa: www.tuuliatlas.fi

Suomen Tuulivoimayhdistys ry [WWW]. [viitattu 8.6.2011]. www.tuulivoimayhdistys.fi

Tammelin, B. 1991 Suomen tuuliatlas. Helsinki, Ilmatieteen laitos. 355.

Uusiutuva energia Viikissä [WWW]. [viitattu 9.10].

<http://www.viikinuusiutuvaenergia.net/>

Tampereen Sähkölaitos Oy [WWW]. [viitattu 14.10.2013]. Saatavissa:

www.tampereensahkolaitos.fi

Tilastokeskus [WWW]. [viitattu 4.5.2014]. Saatavissa: www.tilastokeskus.fi

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto [WWW]. [viitattu 31.10.2013]. Saatavissa:

www.tukes.fi

Tuulivoimatieto-sivusto [WWW]. [viitattu 21.3.2013]. Saatavissa:

<http://www.tuulivoimatieto.fi/>

Työ- ja elinkeinoministeriö [WWW]. [viitattu 31.10.2013]. Saatavissa: www.tem.fi

VTT, Tuulivoiman tuotantotilastot, vuosiraportti 2011 [WWW]. [viitattu 3.10.2013].

Saatavissa:

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T74.pdf>

Vihriälä H., Control of Variable Speed Wind Turbines. Väitöskirja. Tampere 2002.

Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu – Tampere University of Technology.

Publication; 388. 88.

WAsP [WWW]. [viitattu 22.10.2013]. Saatavissa: <http://www.wasp.dk>

Windside [WWW]. [viitattu 10.2.2014]. Saatavissa: www.windside.com

Ympäristöministeriö, Maankäyttö ja rakentaminen [WWW]. [viitattu 12.3.2014].

Saatavissa: www.ym.fi

Yong, Z. 2003. Large-Scale Inhomogenous Thermodynamics - And Application for Atmospheric Energetics. Cambridge, Cambridge International Science Publishing. 647.

LIITTEET

Liitteet erillisellä CD-levyllä.