

SUOMEN
tuuli ATLAS

Yhteenvetoraportti

Esipuhe

Hallitusohjelman mukaisesti on valmisteltu uusi Suomen tuuliolosuhteita kuvaava tuuliatlas. Sen tarkoituksena on edistää tuulivoimarakentamisen suuntaamista tuuliolosuhteiltaan hyvälle alueille. Tuuliatlaksen keskeisiä käyttäjiä ovat maankäytön suunnittelijat ja kaavoittajat sekä tuulivoimahankkeiden valmistelijat ja rakentajat.

Tuuliatlaksen valmistelun on rahoittanut työ- ja elinkeinoministeriö. Toteutuksen päävastuu on ollut Ilmatieteen laitoksella, joka vastaa työn tuloksista. Motiva Oy on hankkeen koordinaattorina hoitanut mm. valmistelun hallinnointia ja viestintää. Valmistelua on ohjannut ohjausryhmä, johon ovat kuuluneet kaavoittajien, sähköntuottajien ja muiden tuulivoima-alan asiantuntijaorganisaatioiden edustajat.

Tuuliatlas-sivusto avattiin käyttöön 25.11.2009 ja se löytyy osoitteesta www.tuuliatlas.fi. Tämä yhteenvetoraportti kuvaa lyhyesti valmistelun ja tulosten pääkohdat. Perusteellisempaa tietoa löytyy Tuuliatlas-sivustolta.

Helsingissä 28.6.2010

Työ- ja elinkeinoministeriö

Ilmatieteen laitos

Motiva Oy

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| Johdanto | 4 |
| 1. Mikä Tuuliatlas on? | 5 |
| 2. Mihin Tuuliatlasta tarvitaan? | 6 |
| 3. Miten Tuuliatlas on tehty? | 7 |
| 3.1 Mallinnettavan jakson valinta..... | 9 |
| 3.2 Mallinnuksen tarkkuudesta | 9 |
| 4. Tuulisuus ja Suomen ominaispiirteet | 11 |
| 5. Tuuliatlaksen tulokset | 15 |
| 5.1 Tuulen keskinopeuskartat | 15 |
| 5.2 Tuulivoimalan tuotantokartat | 16 |
| 5.3 Karttaliittymä | 17 |
| Sanasto | 19 |
| | |
| Liite 1 Karttaliittymän käyttöohje | 20 |
| Liite 2: Tuuliatlaksen toteuttajat | 31 |

Johdanto

Suomen ensimmäinen tuuliatlas valmistui vuonna 1991, ja sen tarkoitus oli antaa riittävästi meteorologista taustatietoa tuulienergiapotentiaalin määrittämiselle. Tulokset perustuivat sääasemien tuulihavaintoihin 15 vuoden ajalta. Tämä tuuliatlas on vanhentunut, koska siinä käytetyt korkeudet tuulennopeuksille ovat liian matalia suhteessa nykyisten voimalaitosten kokoon.

Nykyään tarvitaan myös yksityiskohtaisempaa tietoa tuulen ominaisuuksista, jota vanha atlas ei sisältänyt. Vuoden 2009 lopussa valmistuneen uuden Suomen tuuliatlaksen tulokset ovat paljon edeltäjänsä laajemmat. Tietokonemallinnukseen perustuva uusi atlas kattaa koko maan sekä tarjoaa tarkempaa ja monipuolisempaa tietoa kuin edeltäjänsä.

Tuulivoima on usein mielletty lähinnä rannikko- ja tunturialueiden energiantuotantomuodoksi Suomessa. Tämä ajattelumalli on muuttumassa. Maaliskuussa 2009 vahvistetuissa valtakunnallisissa alueidenkäytön tavoitteissa on linjattu, että maakunta-kaavoissa on osoitettava tuulivoimatuotannolle sopivia alueita myös sisämaassa.

Ilmasto- ja energiastrategiassa vuodelta 2008 todetaan, että tuulivoiman lisärakentaminen on yksi tärkeimmistä keinoista kasvihuonekaasujen vähentämiseksi ja uusiutuvan energian tuotannon lisäämiseksi. Myös nämä linjaukset ovat puoltaneet Tuuliatlaksen tarpeellisuutta.

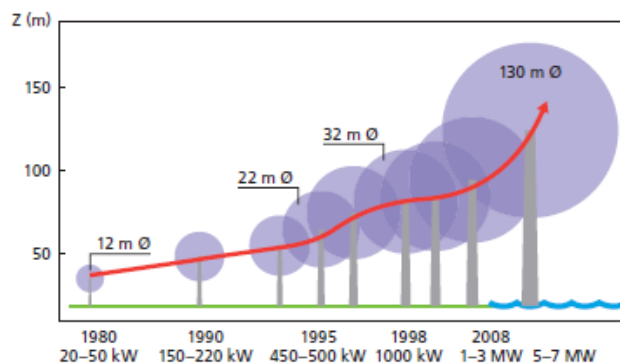
Tuuliatlas-sivusto koostuu tuuliolosuhteita ja tuulivoimalan tuotantoa kuvaavista staattisista kartoista, taustatiedoista sekä dynaamisesta Tuuliatlaksen käyttöliittymästä, jonka hilaruutujen kautta voi tarkastella kunkin mallinnetun pisteen tuulisuustietoja. Sivuilta löytyy myös yksityiskohtaiset käyttöohjeet, jotka ovat myös tämän raportin liitteenä.

1 Mikä Tuuliatlas on?

Suomen tuuliatlas, tuulienergiakartasto, on tärkeä apuväline arvioitaessa mahdollisuuksia tuottaa tuulen avulla sähköä. Sen avulla voidaan vertailla tuuliolojen vuotuista ja kuukausittaista vaihtelua joko koko Suomessa tai tietyillä rajatuilla alueilla.

Tuuliatlaksessa käytetyllä säämallilla on tarkasteltu Suomen tuuliolosuhteita eri korkeuksilta 50 metristä aina 400 metriin saakka. Näiltä korkeuksilta on Tuuliatlaksen myötä saatavilla yksityiskohtaista tietoa tuulen ominaisuuksista.

Tuuliatlaksen staattiset kartat ja etenkin karttatyökalun yksityiskohtaiset tiedot mahdollistavat tuuliolosuhteiden paikallisen tarkastelun. Tuuliatlas-sivustolle on myös kerätty kattavasti tietoa Suomen tuulioloista, tuulen ominaisuuksista, säätilasta ja ilmastonmuutoksen vaikutuksesta tuuliolosuhteisiin. Tämä tieto tukee tuulitulosten analysointia.



Kuva 1. Tuulivoimaloiden koon kehitys.

2 **Mihin Tuuliatlasta tarvitaan?**

Tuuliatlas on ennen kaikkea kaavoituksen, aluesuunnittelun ja voimalarakentamisen suunnittelun työväline. Sen avulla on mahdollista tarkastella koko Suomea tuulivoimarakentamisen näkökulmasta.

Tuulivoimalaitosten koko on kasvanut merkittävästi viimeisen parinkymmenen vuoden aikana. Tuulivoimarakentajat ja alueiden suunnittelusta vastaavat tahot tarvitsevat yksityiskohtaista tietoa korkeuksilta, joiden tuuliolosuhteita ei ole aikaisemmin pystytty määrittelemään.

Etenkin sisämaan alueidenkäytön suunnittelussa Tuuliatlaksen tulokset voivat paljastaa uusia alueita tuulivoimarakentamiselle, joita olisi muilla menetelmillä erittäin vaikea havaita.

Tuuliatlaksen tuloksia tarkasteltaessa on hyvä muistaa, että kyse on tietokone-mallista. Vaikka sillä pyritään kuvaamaan paikallisia tuuliolosuhteita mahdollisimman tarkasti, tulokset poikkeavat aina jossain määrin todellisista olosuhteista. Lopulliset päätökset tuulivoimahankkeista, joiden kokonaiskustannukset ovat miljoonia euroja, tulisi perustua paikalla tehtyihin tuulimittauksiin, ei pelkästään Tuuliatlaksen tuloksiin.

3 Miten Tuuliatlas on tehty?

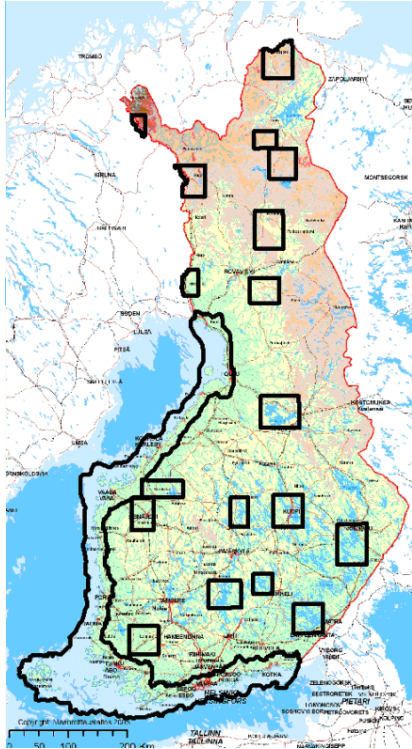
Suomen tuuliatlas perustuu tietokonemallinnukseen, jossa on hyödynnetty säänennustusmalleja sekä tuuliatlassovellutuksissa yleisesti käytettyä laskentaohjelmaa. Uusi Tuuliatlas poikkeaa täysin vuonna 1991 tehdystä, sääasemahavaintotietojen analysointiin perustuvasta vanhasta tuuliatlaksesta.

Työssä käytetyt säänennustusmallit, HIRLAM ja AROME, ovat dynaamisia malleja, joilla pyritään kuvaamaan ilmakehän fysiikkaa mahdollisimman tarkasti. AROMEn laskennan alkuarvot on tuotettu käyttäen hyväksi Ilmatieteen laitoksen HIRLAM-säänennustusmallia. Tarvittavat tiedot on saatu Euroopan keskipitkän kantaman säänennustuskeskuksen tuottamasta aineistosta.

Tuuliatlasta varten säämallilla on laskettu yhteensä 72 toteutuneen kuukauden säätilanteet, jotka on tilastollisesti valittu edustamaan viimeisen 50 vuoden jaksoa.

Säämallilla simuloidusta keskimääräistä tuulisuutta edustavan perusaineiston säätilanteista on laskettu tuulen keskinopeudet sekä muut tuulen ominaisuuksiin liittyvät arvot 2,5 x 2,5 neliökilometrin hilaruutuihin, jotka kattavat koko Suomen alueen.

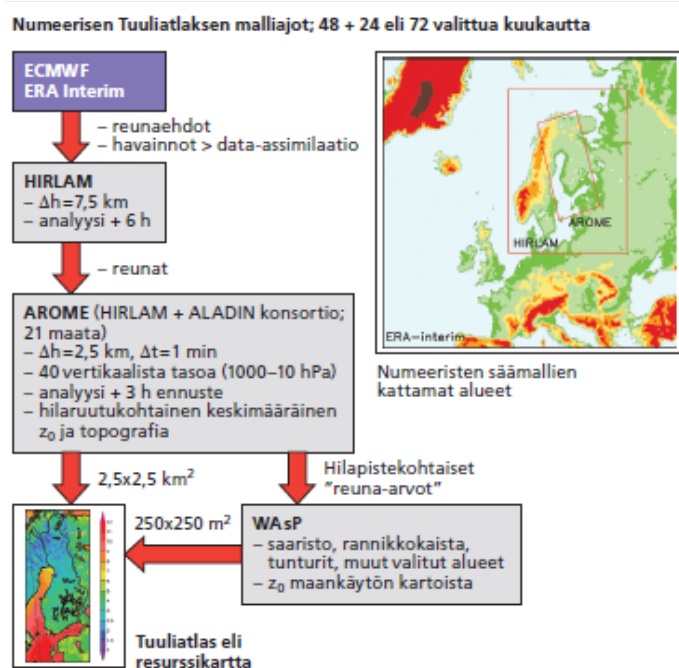
Lisäksi etukäteen määritetyillä alueilla on mallinnettu tuuliolosuhteita 250 x 250 neliömetrin hilakoolla (kuva 2). Tällaisia alueita on mm. rannikko- ja tunturialueet, joissa voidaan olettaa vallitsevan tuulivoimatuotannon kannalta keskimääräistä paremmat olosuhteet. Sisämaasta on kartoitettu mm. vaara- sekä suuremmat järviolueet. Alueiden valinta perustui aikaisempaan kokemukseen tuuliolosuhteista erilaisissa maastoissa.



Kuva 2. Tarkemmalla (250 x 250 neliometriä) hilakoolla kartoitetut alueet.

Tuulisuuden skaalaaminen 2,5x2,5 neliökilometrin hilaruudukosta 250x250 neliömetrin ruudukkoon on saatu aikaan yhdistämällä AROME-mallin tulokset WASP-laskentaohjelman tuloksiin. WasP-ohjelmalla voidaan kuvata mm. rajatun alueen tuuli-ilmastoa, tuulisuusjakauma, tuulienergiapotentiaali ja tuulivoimaloiden tuottama energia.

Pienemmän hilakoon ruudussa yli 200 metrin korkeudella olevat tuulen nopeudet on laskettu AROME-mallilla. Alle 200 metrin korkeudelle mallinnus on tehty WASP:lla käyttäen tuulijakaumista ja tuuliväänteestä tehtyjä tuuli-ilmastotiedostoja eli ns. LIB-tiedostoja.



Kuva 3. Tuuliatlaksen toteutuksessa käytetyt mallit.

3.1 Mallinnettavan jakson valinta

Suomen tuuliatlaksessa on esitetty tuulen kuukausittaiset keskimääräiset jakaumat sekä tiedot kahdessatoista eri suuntasektorissa. Tuuliatlaksen simuloitavia todellisia säätilanteita on huomattavan paljon.

Keskimääräisiä tuuliolosuhteita edustava vertailuvuosi tuotettiin simuloimalla riittävä määrä säätilanteita säämallilla. Vertailuvuosi koostuu 48 kuukaudesta jaksolta 1989–2007. Kukin Tuuliatlaksessa esitettävä kalenterikuukausi koostuu siis neljän kuukauden säätilanteista, jotka on poimittu eri vuosilta.

Tämän lisäksi valittiin yksittäiset 12 kuukautta edustamaan kovatuulisinta vuotta (koostuu jakson 1989–2007 kovatuulisimmasta tammikuusta, helmikuusta, jne.). Samalla periaatteella tuotettiin myös heikkotuulista vuotta kuvaavat arvot.

3.2 Mallinnuksen tarkkuudesta

Tuulisuuden mallinnusta on verrattu sääasemilla ja korkeissa mastoissa tehtyihin tuulimittauksiin. Mallinnuksen tarkkuus vaihtelee selvästi paikkakohtaisesti ja vuodenajoin. Paikoin mallilla saadaan hyvin lähellä mittauksia olevia keskimääräisiä tuulen nopeuksia, joissakin paikoin poikkeamat mittauksiin verrattuna ovat suurempia.

Mittausten ja säämallin tulosten vertaaminen ei ole täysin oikea tapa arvioida tarkkuutta. Mastossa tehdyt tuulimittaukset edustavat pistemäistä arvoa. Toisaalta käytetyn säämallin 2,5 x 2,5 neliökilometrin suuruinen hilaruutu on keskiarvotettu kuva maaston topografiasta ja rosoisuudesta.

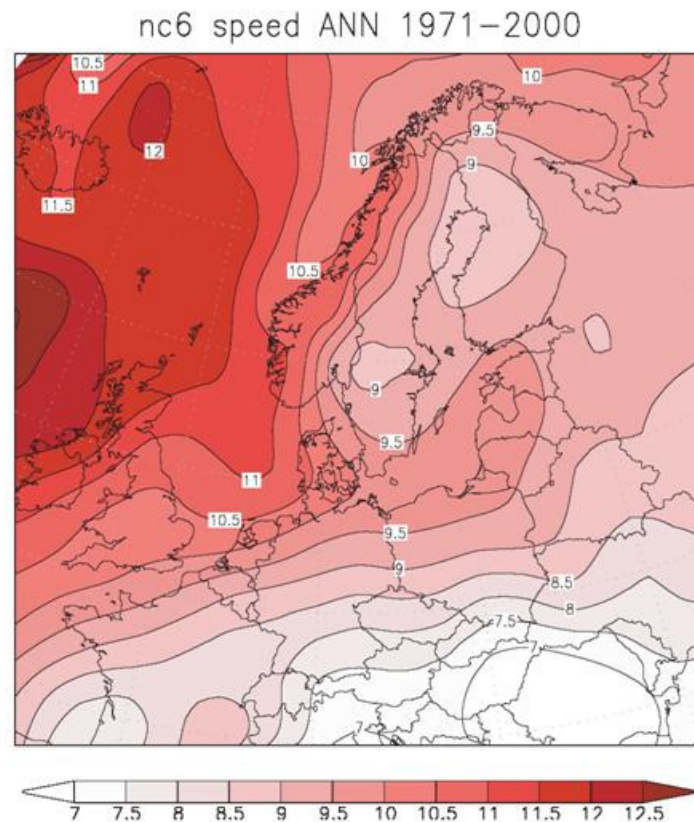
Mallin ja mittausten vastaavuutta tarkasteltaessa on otettava myös huomioon, että tuulimittaukset eivät ole virheettömiä. Mastot aiheuttavat mittauksiin virhettä, jos esimerkiksi mittarit ovat liian lähellä massiivia mastorakenteita.

Mittaustulosten lisäksi tuuliennusteita on verrattu mm. tutkahavaintoihin. Tutkahavaintoihin verrattaessa säämallin tulokset eroavat korkeudesta riippuen 0,0-0,5 m/s mitatusta tuloksesta.

4 Tuulisuus ja Suomen ominaispiirteet

Suomen tuulioloihin vaikuttaa merkittävästi maantieteellinen sijaintimme ja pääasiassa Atlantilta suuntautuvat matalapaineet ja niiden kulkemat reitit. Tuulivoimaloiden tuotantokorkeudella eniten tuulee talvella ja vähiten kesällä.

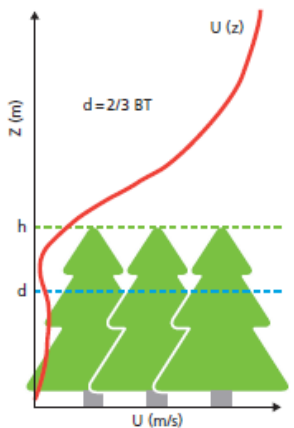
Suomen sijainnista johtuen suuren mittakaavan keskimääräinen tuulen nopeus noin kilometrin korkeudessa on verraten suuri (9–9,5 m/s), eli huomattavasti suurempi kuin eteläisemmässä Euroopassa (7–8,5 m/s), mutta toisaalta pienempi kuin lähempänä pohjoista Atlanttia sijaitsevilla Brittein saarilla, Norjan rannikolla tai Tanskassa.



Kuva 6. Keskimääräisen tuulennopeuden jakauma Euroopassa, joka vastaa noin 1–1,5 km:n korkeudessa vallitsevaa tuulta (m/s). (Tuulivoiman tuotantokorkeudella tilanne voi olla hyvin erilainen, kuten esimerkiksi kuva 11 osoittaa.)

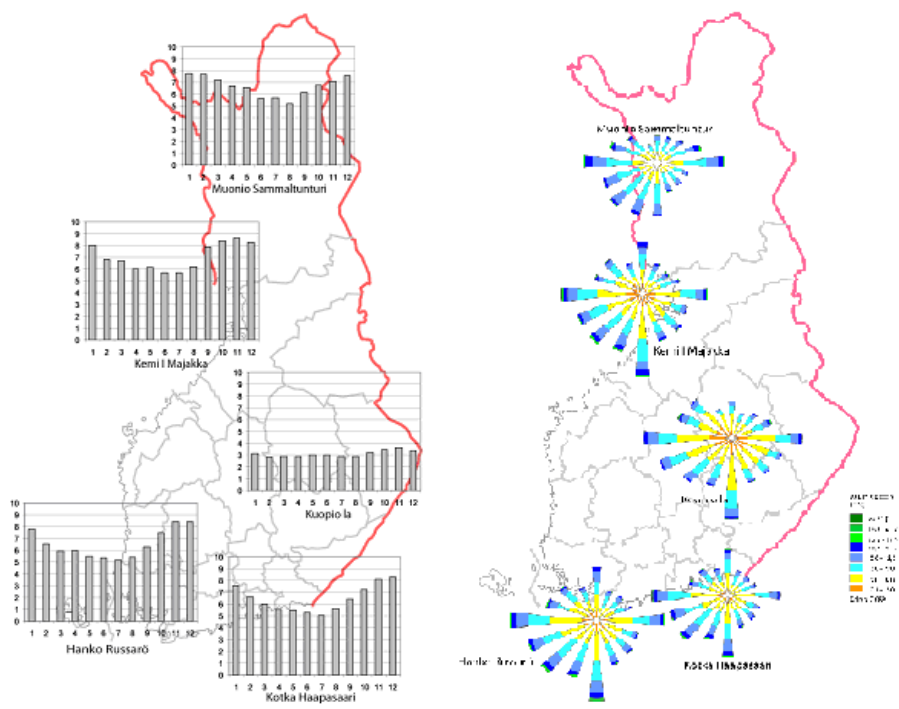
Tuulen nopeus pienenee kuvan 6 arvoista maanpintaa kohti tultaessa. Tuulen nopeuden pieneneminen riippuu muun muassa maaston korkeuseroista, peitteisyydestä ja ilman termisestä tasapainotilasta.

Nopeuden muutos korkeussuunnassa on avoimilla merialueilla huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi metsissä tai kaupunkialueilla (kuva 7).



Kuva 7. Metsäkasvillisuus hidastaa tuulen nopeutta lähellä maan pintaa.

Suomessa on tyypillistä ihmisen havaintokorkeudella tuulen nopeuden selvät vaihtelut vuodenajoittain merialueilla, rannikolla ja tuntureilla (kuva 8). Sisämaassa tuulen kuukausittainen keskinopeus vaihtelee varsin vähän.



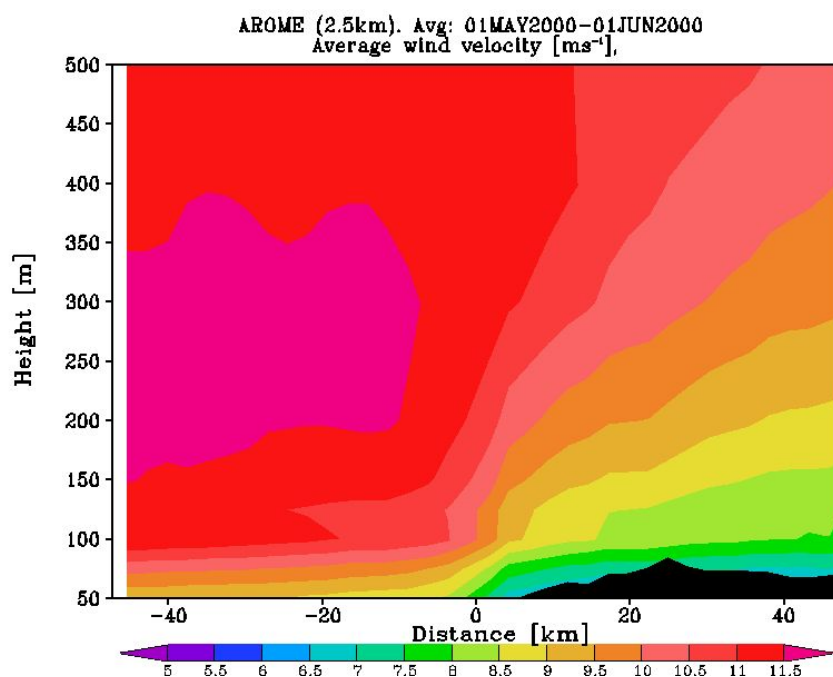
Kuva 8. Tuulen nopeuden keskiarvo (m/s) ja tuulisuus eri kuukausina mittaussyksyllä 1999–2008.

Rannikolla tuulen nopeuden suureen vaihteluun rajakerroksessa vaikuttaa maaston rosoisuuden muuttuminen. Saaristo, yksittäiset saaret ja niemet ja niiden vaihtelut lisäävät maaston epähomogeenisuutta ja lisäävät rosoisuutta. Metsäiset saaret muodostavat tuulivirtaukselle myös selviä esteitä.

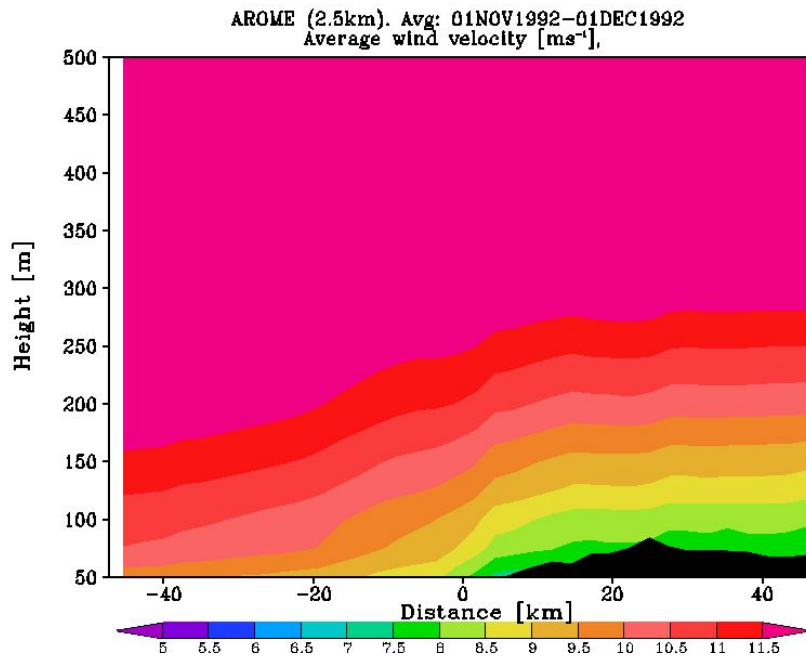
Yleensä myös alemmassa ilmakehässä ilman stabiilius muuttuu siirryttäessä mereltä maalle tai maalta merelle. Tuuliolot ja ilmavirtaukset Suomen saaristossa ja rannikkoalueilla ovatkin erittäin haasteellisia ja vaikeasti malleilla kuvattavia. Esimerkiksi Suomenlahden etelärannikko sekä Saksan ja Alankomaiden rannikkoalueiden tuuliolojen kuvaaminen malleilla on huomattavasti helpompaa.

Yleisesti ottaen tuuliolot tuulienergian kannalta ovat huomattavasti paremmat avomerellä kuin lähellä rantaa olevalla sisämaan alueella. Tämä korostuu kun tarkastellaan tuulioloja lähellä meren- tai maanpintaa. Toisaalta sisämaassa topografian tuoma korkeuden kasvu parantaa tuulioloja.

Kuvista 9 ja 10 käy ilmi, miten tuulen nopeus heikkenee tultaessa mereltä maalle. Kuvista selviää myös miten tämän muutoksen suuruus vaihtelee eri ajankohtina.



Kuva 9. Tuulen nopeuden jakautuminen rannikolla (Oulu, toukokuu 2000).



Kuva 10. Tuulen nopeuden jakautuminen rannikolla (Oulu, marraskuu 2000).

Tuulen nopeus vaihtelee vuodesta toiseen. Heikkotuulisten ja kovatuulisten vuosien keskituulen nopeuksien välillä on paikoittain jopa 2-3 m/s erot.

5 Tuuliatlaksen tulokset

Suomen tuuliatlaksen keskeisimmät tulokset löytyvät staattisista kartoista ja karttatyökalun antamista arvoista.

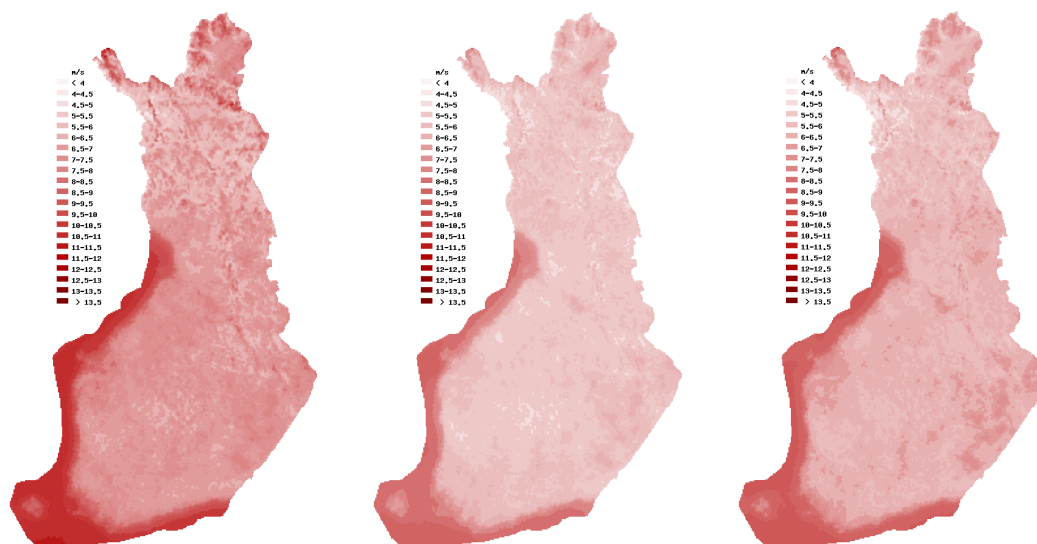
Tuuliatlaksen staattisia karttoja on kahdenlaisia: tuulen keskinopeuskartat ja tuuli-voimalan tuotantokartat. Verkkosivulla on mahdollista tarkastella karttoja eri ajanjaksoina ja eri korkeuksilla. Staattisia karttoja yksityiskohtaisempaa tietoa löytyy karttatyökalun avulla. Sen avulla on mahdollista tarkastella tuulen ominaisuuksia yksittäisissä hilapisteissä. Jokaisesta hilapisteestä on saatavilla tuulen ominaisuuksia kuvaavien parametrien arvot eri korkeuksilla.

5.1 Tuulen keskinopeuskartat

Tuulen keskinopeuskartoissa on esitetty aritmeettinen keskinopeus (m/s) kullekin kuukaudelle ja vuodelle. Karttoissa tuuli-arvot on esitetty 2,5 x 2,5 neliökilometrin tarkkuudella. Tuulen nopeus on kuvattu eri väreillä 0,5 m/s resoluutiolla.

Karttoja on kolmelta eri korkeudelta: 50, 100 ja 200 metriä maanpinnasta. Kussakin 2,5 x 2,5 neliökilometrin ruudussa maanpinnan korkeus merenpinnasta edustaa laskennallista keskip korkeutta.

Alla olevissa karttakuvissa on esitetty tuulen keskinopeus eri kuukausina korkeudella 100 metriä.



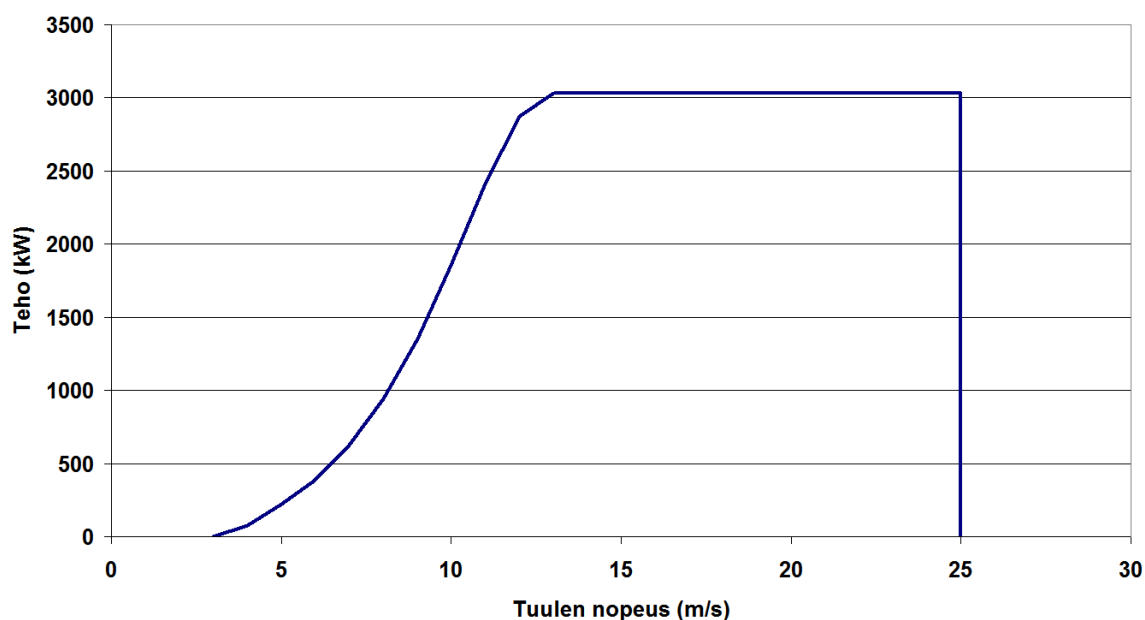
Kuva 11. Tuulen keskinopeus helmi- kesä- ja syyskuussa 100 metrin korkeudella.

5.2 Tuulivoimalan tuotantokartat

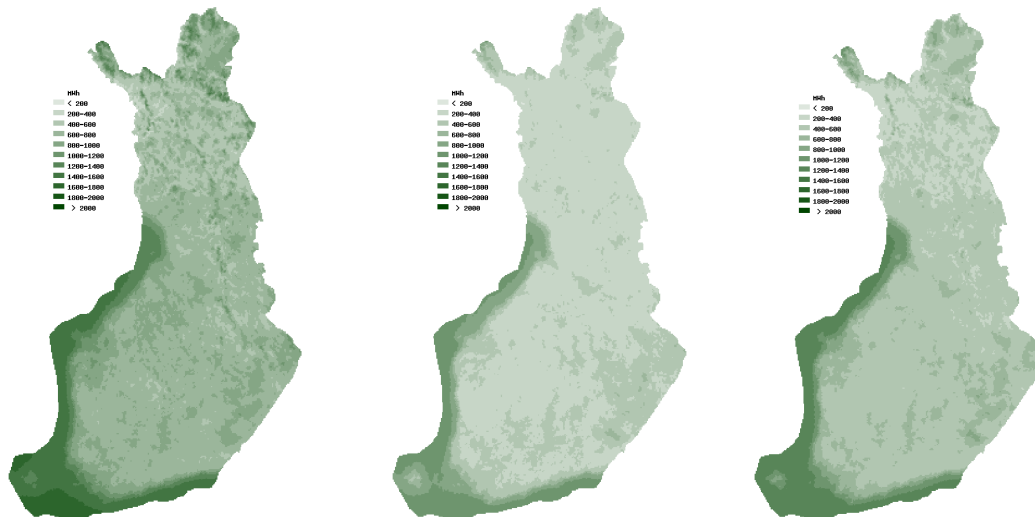
Tuulivoimalan tuotantokartat kuvaavat säämallilla tuotetun tuulen nopeuden jakaumasta nimellisteholtaan 3 MW:n tuulivoimalan tehokäyrällä lasketun energiatuotannon kuukausittaista ja vuotuista keskimääräistä jakaumaa.

Tuotantokartat on esitetty kolmella eri korkeudella: 50 metriä, 100 metriä ja 200 metriä. Tuulen nopeuden oletetaan vastaavan voimalan napakorkeudella olevaa tuulta, ja tuulen nopeus on vakio koko roottorin pyyhkäisy-pinta-alalla. Ilman tiheyden vaihtelun vaikutusta voimalan tehoon ja energiantuotantoon ei ole otettu laskennassa huomioon.

Esimerkkivoimalana on käytetty lapasäätöistä kolmen megawatin turbiinia. Tuulen nopeuden ylittäessä 25 m/s tuulivoimalan on katsottu pysähtyvän. Tuulivoimalan suorituskyky eli tehokäyrä on laadittu vastaamaan ns. standardi-ilmakehän oloja.



Kuva 12. Tuotantomäärien laskennassa käytetty 3 MW:n tuulivoimalan tehokäyrä.



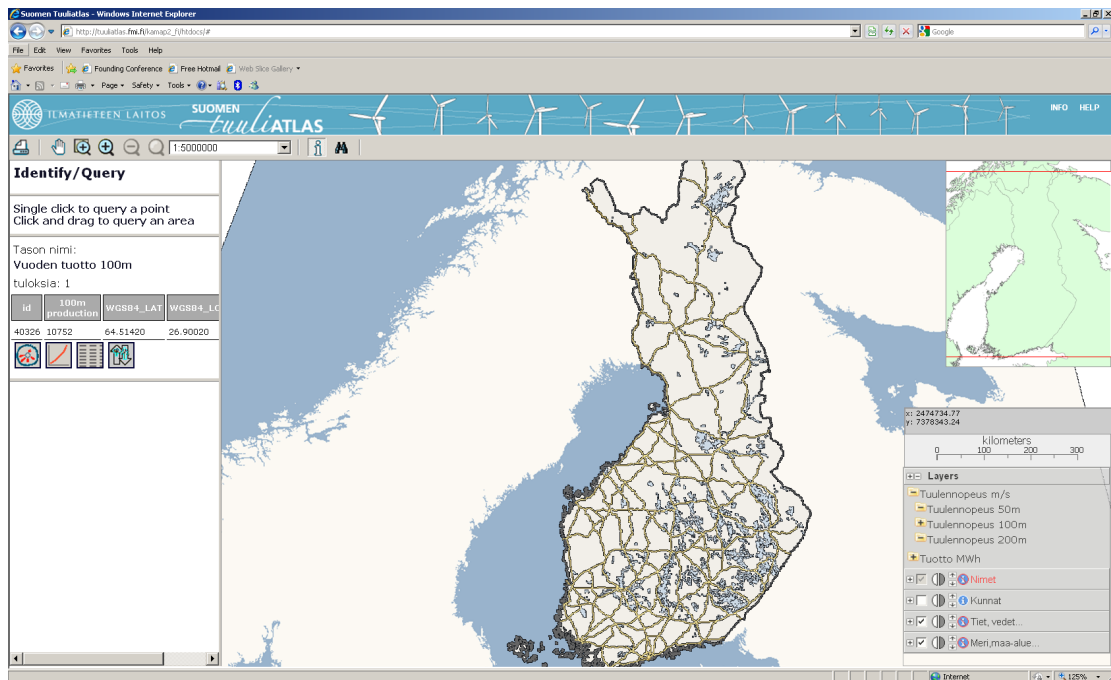
Kuva 13. 3 MW:n tuulivoimalan keskimääräinen vuosituotto (MWh) Suomen alueella tammi-, touko- ja lokakuussa 100 metrin korkeudella.

Tuulivoimalalle annetun tehokäyrän avulla laskettu tuotettu energia ei täysin vastaa voimalan todellisuudessa tuottamaa energiaa, sillä todellinen teho vaihtelee suhteessa tehokäyrän lukemiin.

5.3 Karttaliittymä

Karttaliittymä (kuva 14) on Tuuliatlaksen tärkein tiedon lähde. Sen avulla voi tarkastella tuulen ominaisuuksia eri hilapisteissä. Käyttäjä voi esimerkiksi valita, haluaako hän tarkastella olosuhteita tuulivoiman tuotannon vai tuulennopeuden kannalta.

Karttaliittymään pääsee Tuuliatlas-sivuston (www.tuuliatlas.fi) kautta oikeasta yläkulmasta *Tuuliatlas-karttaliittymä* -painikkeesta tai menemällä suoraan osoitteeseen <http://tuuliatlas.fmi.fi>. Karttaliittymän käytöstä on kerrottu tarkemmin tämän raportin liitteenä olevassa käyttöohjeessa.



Kuva 14. Tuuliatlas-karttaliittymä.

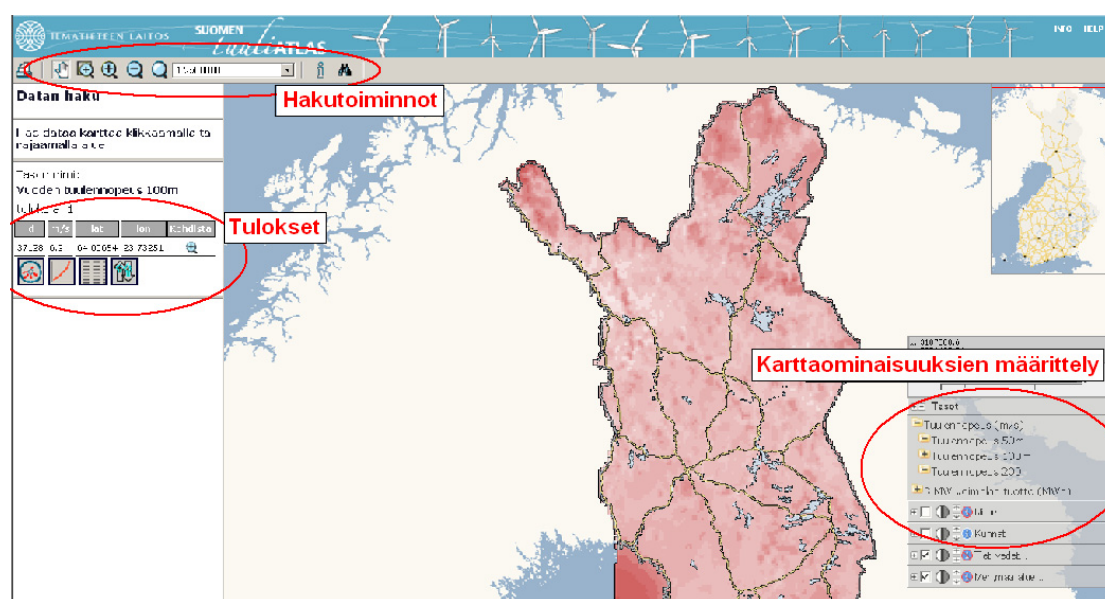
6 Sanasto

| | |
|--------------|--|
| AROME | Malli, jolla voidaan ennustaa eri suureita kuten vaakasuora tuuli ja pystynopeus, paine, lämpötila ja ilman kosteussisältö. |
| Hilaruutu | Hilaruudulla tarkoitetaan mallin laskentapistettä, joka käsittää ennemminkin tilavuuden kuin yksittäisen pisteen tai neliön. Hilaruudun koko voidaan valita käyttötarkoituksesta riippuen mm. olemassa olevien laskentaresurssien mukaan. |
| HIRLAM | Ilmatieteen laitoksen kahden vuorokauden ennusteiden tuottamiseen käyttämä säänennustusmalli. HIRLAM on usean Euroopan maan ilmatieteen laitoksen yhteinen kehitysprojekti, joka alkoi 1985. |
| LIB-tiedosto | Lib-tiedostot ovat WAsP-ohjelman sääasemien tai muista tuulimittauksista tuottamia, ja kohdealueen tuuliolojen laskennassa käyttämiä, kuvauksia tuuli-ilmastosta. |
| Mesoskaala | Mesoskaalalla tarkoitetaan meteorologisissa sovelluksissa yleisesti suhteellisen pieniä alueita, jotka eivät tule edustavasti kuvattua yleisemmässä klimatologiassa skaalassa, eli esimerkiksi laaksoja, metsiköitä, saaria, tuntureita jne. |
| Rajakerros | Ilman virtausten mukautuessa pinnan olosuhteisiin, syntyy rajakerros ilman vapaan virtauksen ja maapinnan aiheuttaman kitkan välille. |
| Tehokäyrä | Käyrä kuvaa tuulivoimalan tuotantotehon kehitystä suhteessa tuulen nopeuteen. |
| Tuuliruusu | Kuvaaja, joka kertoo tuulen tulosuuntia yksittäisessä pisteessä tietyllä aikavälillä. |
| Tuuliväanne | Ilmiö, jossa tuulen suunta ja tai nopeus muuttuu kahden pisteen välillä. |
| WAsP | Laskentamalli, jonka avulla voidaan kuvata rajatun alueen tuuli-ilmastoa, tuulisuusjakauma, tuulienergiapotentiaali ja tuulivoimaloiden tuottama energia. |

Liite 1 Karttaliittymän käyttöohje

Karttaliittymän sijainti

Karttaliittymään pääsee suoraan osoitteessa <http://tuuliatlas.fmi.fi> tai www.tuuliatlas.fi -sivuston kautta.

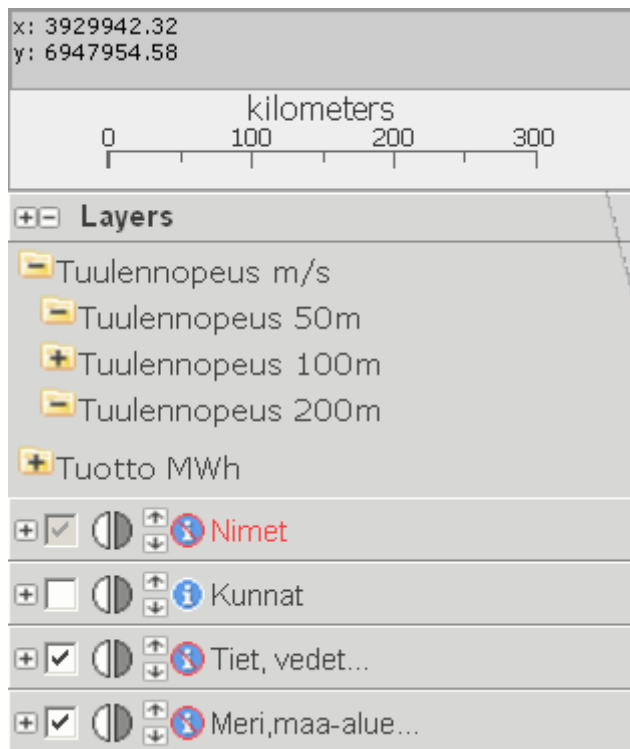


Kuva 1. Karttaliittymä.

Alkumäärittely

Tiedonhaku kannattaa aloittaa määrittelemällä kartan ominaisuudet oikeassa alakulmassa olevasta sisältövalikosta. Valikon avulla voidaan määrittää, mitä ominaisuuksia hakukartalla on näkyvissä. Tuulen nopeuden ja tuoton (vastaa 3 MW:n voimalaitoksen tuottoa) lisäksi karttaan on mahdollista lisätä hakuja helpottavia ominaisuuksia kuten tiet ja järvet.

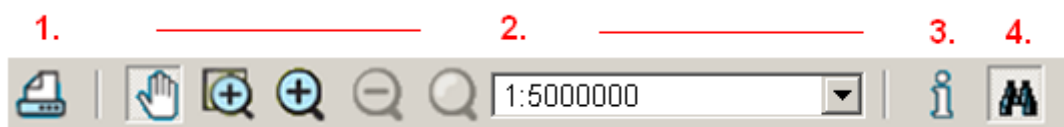
Aluksi tulee valita, tarkastellaanko tuulioloja 250 x 250 m vai 2,5 x 2,5 km hilakoolla. Tarkemman hilakoon tietoja ei ole koko maasta. Oikeassa yläkulmassa olevassa kartassa näkyy kyseiset alueet. Kun on valittu esimerkiksi suurempi hilakoko ja tuulen nopeus 100 metrin korkeudella, avautuu uusi valikko, jonka avulla määritetään haluttu ajanjakso. Tietoja voi tarkastella kuukausi- tai vuositasolla.



Kuva 2. Sisältövalikko.

Hakutoiminnot

Karttaliittymän yläpalkissa olevat painikkeet mahdollistavat paikanmäärittelyn kartalla. Kartalla liikkuminen ja lähennys/loitonnuks toimii samalla periaatteella kuin useimmissa karttaohjelmissa (2.). Paikkakuntakohtainen karttahaaku on myös mahdollista (4.). Tallenna näkymä -painikkeella (1.) voidaan ladata mm. karttakuvia jpeg-muodossa ja GIS-pohjaisten karttojen kanssa yhteensopivia karttatietoja omalle koneelle. Varsinaiset hilakohtaiset tiedot saadaan info-painikkeella (3.). Tietoja haettaessa on mahdollista valita joko yhden tai useamman (max. 20) hilapisteen tiedot.




Kuva 3. Hakupainikkeet.


Tulokset


Valittuasi hilapisteen/pisteitä kartalta, aukeaa näkymän vasempaan reunaan tulosvalikko, jonka avulla tuulitietoja voidaan tarkastella tarkemmin. Mikäli on valittu useampi kuin yksi hilapiste, ne listautuvat taulukkoon alkaen valitun alueen vasemmasta alakulmasta (valitun alueen lounaiskulma) siirtyen riveittäin ylöspäin (pohjoiseen).


Hilapisteestä on näkyvillä tuulen keskinopeustiedot tai voimalaitoksen tuotantotiedot valitulla korkeudella. Taulukossa näkyy myös hilan keskipisteen gps-koordinaatit. Tuuliruusu (5.) kertoo tuulen nopeuden ja suunnan jakauman. Tuuliprofiilin (6.) avulla voidaan tarkastella tuulen nopeuden kehitystä suhteessa korkeuteen. Valitun hilan Lib-tiedostot (8.) on myös mahdollista ladata omalle koneelle valikosta. Yksityiskohtaiset tiedot hilan tuuliominaisuuksista (7.) on ladattavissa excel-tilukuna. Taulukko kertoo yksityiskohtaiset tiedot hila-alueella eri korkeuksilla ja eri suuntasektoreista. Taulukon tulkinnasta lisää seuraavassa kappaleessa. Mikäli tietoja on tarkasteltu tarkemmalla hilakoolla (250 x 250 m) tuuliruusu ja Lib-tiedostot eivät ole käytössä.


Tason nimi:
Vuoden tuulennopeus 100m
tuloksia: 1

| id | m/s | lat | lon | Kohdist |
|-------|-----|----------|----------|---|
| 12477 | 7.2 | 61.30217 | 28.12347 |  |


5.


6.


7.


8.

Kuva 4. Tulosvalikko.

Huomio! Excel-asetukset ja ohjelmaversio saattavat vaikuttavaa tulosten luettavuuteen.

Taulukon desimaalierottimena tulee käyttää pistettä, koska muuten ohjelma voi esim. tulkita, että tulokset ovat päivämääriä. Erottimen muuttaminen tapahtuu seuraavasti:

- Valitse Työkalut (Tools) ja sieltä kohta Asetukset (Options)
- Valitse Maakohtaiset asetukset -välilehti (International)
- Muuta desimaalierottimeksi piste
- Tallenna muutokset, sulje excel-tilukko ja avaa se uudestaan.

Mikäli taulukon otsikot ja arvot ovat samassa sarakkeessa, toimi seuraavasti:

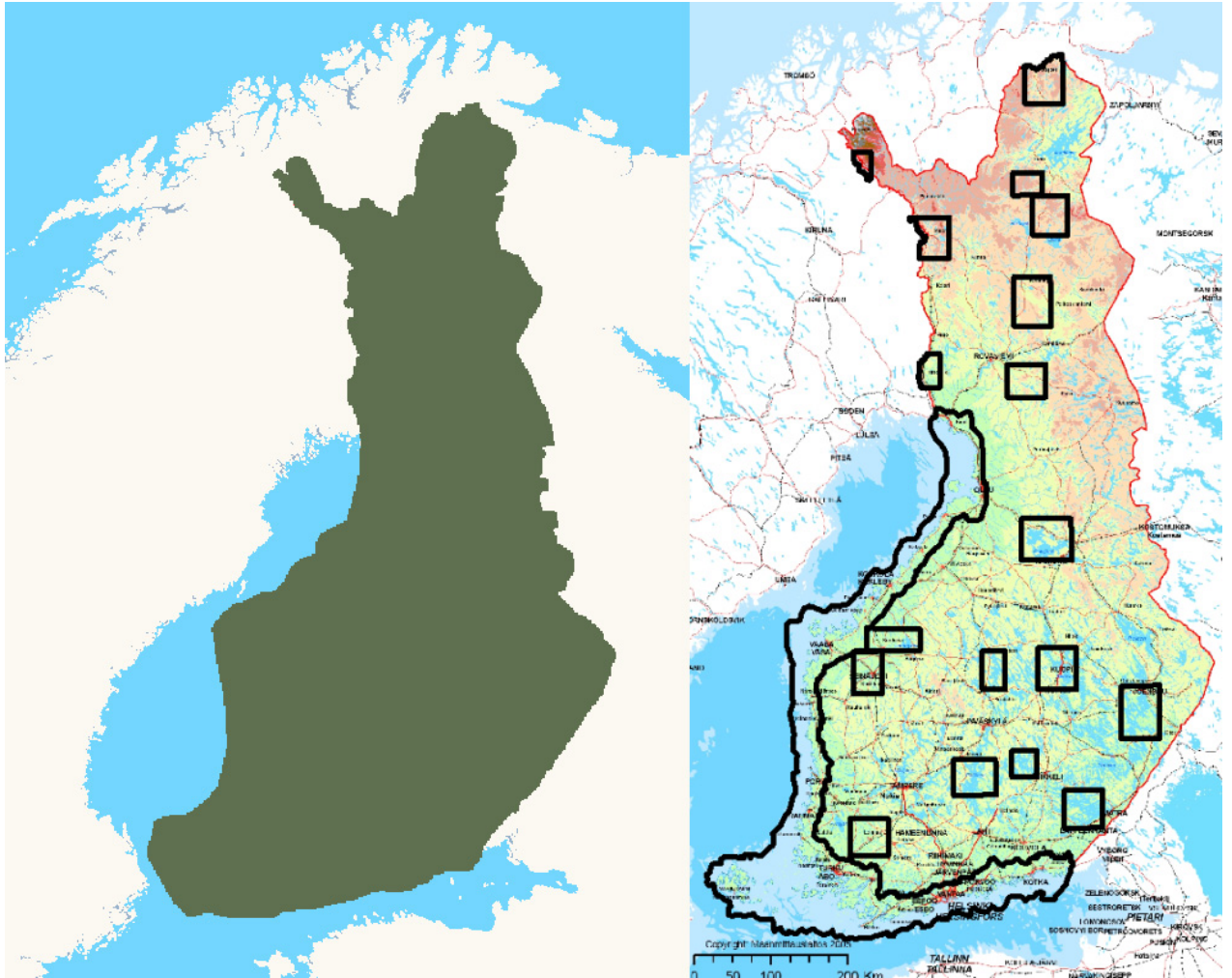
- valitse koko A-sarake taulukosta
- Valitse Tiedot-valikosta (Data) kohta Tekstit sarakkeisiin (Text to columns)
- Valitse Erotettu (Delimited) ja paina Seuraava (Next)
- Valitse Puolipilkku (Semicolon) ja paina Valmis (Finish)

Taulukoiden tulkinta

Dynaamisista kartoista on mahdollista saada näkyviin kaksi erilaista taulukkoa, joista laajempi vastaa 2,5 x 2,5 neliökilometrin (taulukko 1) tarkkuudella ja suppeampi 250 x 250 neliömetrin tarkkuudella laskettuja arvoja.

Taulukossa 1 esitetään seuraavat tiedot. Riveillä on esitetty kutakin 12 suunta-sektoria vastaavat arvot, sekä niiden alla kyseisen kuukauden koko aineistosta lasketut keskiarvo ja kokonaismäärät. Eri sarakkeissa on puolestaan esitetty seuraavat arvot vasemmalta oikealle:

- Lat = leveyspiiri
- Lon = pituuspiiri
- Suuntasektori
- Frekvenssit (%) koko aineistolle ja stabiilille tilanteelle erikseen
- Tuulen keskinopeus (m/s)
- Weibull-parametrit A ja K koko aineistolle sekä eri stabiilisuusluokkiin jaettuna
- Ilman keskilämpötila (°C)
- Turbulenssin intensiteetti eri nopeusluokille
- Puuskakertoimet eri nopeusluokille
- Tuulivoiman tuotto (MWh), kolmelle eri turbiini tyypille
- Tuulen energiasisältö (W/m²)
- Tyynen kuukauden keskituulen nopeus, Weibull-parametrit A ja k sekä tuulivoiman tuotto 3 MW voimalalle
- Kovatuulisen kuukauden keskituulen nopeus, Weibull-parametrit A ja K sekä tuulivoiman tuotto 3 MW voimalalle



Kuva 5. Vasemmassa kuvassa on esitetty Suomen tuuliatlaksen kattama alue. Topografisessa kartassa on mustilla ääri viivoilla rajattu ne alueet, jotka on laskettu WASP:n 250 x 250 neliömetrin hilassa.

Korkeus

Suomen tuuliatlaksen tulokset on esitetty taulukkomuodossa kahdeksalle vakio-tasolle, jotka ovat 50 m, 75 m, 100 m, 125 m, 150 m, 200 m, 300 m, 400 m. Korkeudet on määritetty etäisyytenä mallin maanpinnan tasosta, ei merenpinnasta. Mallissa maanpinnan korkeus on puolestaan esitetty hilakeskiarvona, jolloin malli tasoittaa hilaruudun sisällä olevat todelliset pienet maan pinnan muodot. Malli ei huomioi teräviä mäennyppylöitä ja syvänteitä.

AROME-mallin mallipinnat eivät suoraan vastaa todellisia ilmakehän korkeuksia. Tämän vuoksi taulukoissa esitetyt suuret on lineaarisesti interpoloitu Tuuliatlaksessa käytetyille korkeuksille käyttäen kahden lähimmän mallitason tuloksia.

Frekvenssi

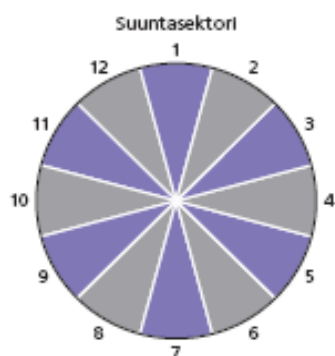
Frekvenssi kuvaa prosenttisyksikköinä kuinka usein tuuli käy kyseisestä suunnasta. Kaikkien suuntien frekvenssien summa tulee siis olla 100 %. Frekvenssit on laskettu koko tuulisuus aineistolle sekä stabiilille tilanteelle erikseen.

Tuulen suunta

Tuulen suunta ilmoittaa suunnan josta tuuli tulee. Esimerkiksi pohjoistuuli tarkoittaa, että tuuli puhaltaa pohjoisesta kohti etelää. Havainnoista on saatavilla tuulitietoa 0-360 asteen mittausalueella tietyltä mittauskorkeudelta, ja näiden havaintojen mittatarkkuus on alle 3 astetta. Numeeriset mallit laskevat puolestaan tuulen nopeuskomponentit u ja v , joista lasketaan tuulen suunta jokaiselle hilatasolle erikseen jatkuvana aikasarjana.

Suuntasektori

Tuulensuunnat on jaettu kahteentoista 30 asteen sektoriin. Sektorit on määritelty kuvan 6 mukaisesti niin, että pohjissektori (eli sektori 1) kattaa 15 astetta karttapohjoisen molemmiin puoliin (eli tuulensuunnat 346-15 astetta), sektori 2 tuulensuunnat 16-45, ja seuraavat sektorit siitä eteenpäin 30 asteen välein myötäpäivään kiertäen. Kaikki suuremman hilakoon tulokset on jaettu juuri näiden suuntasektoreiden mukaan. Tarkemman hilakoon suureita ei ole erikseen eritelty suuntasektoreittain.



Kuva 6. Tuuliatlaksessa käytetyt suuntasektorit.

Tuulen keskinopeus

Tuulen keskinopeus eli V on laskettu kullekin kuukaudelle aritmeettisena keskiarvona koko aikasarjasta (neljän kuukauden arvot), joka muodostuu 3 ja 6 tunnin pituisista mallisimulaatioista eli kahdeksasta arvosta vuorokaudessa. Tuulen nopeuden yksikkö on m/s.

Stabiilius

Ilman termisen vakauden eli stabiiliuden arvoa ei erikseen ole laskettu Tuuliatlaksen taulukoihin, mutta sitä käytetään eri suureiden luokittelussa. Stabiilius on luokiteltu Richardsonin lukuun perustuen. Richardsonin luku on dimensioton luku, joka kuvastaa turbulenttisen liike-energian määrään vaikuttavien nostevoimien ja mekaanisen tuottotermin välistä suhdetta. Suomen tuuliatlasta tuotettaessa on käytetty stabiilisuudelle seuraavaa jaottelua:

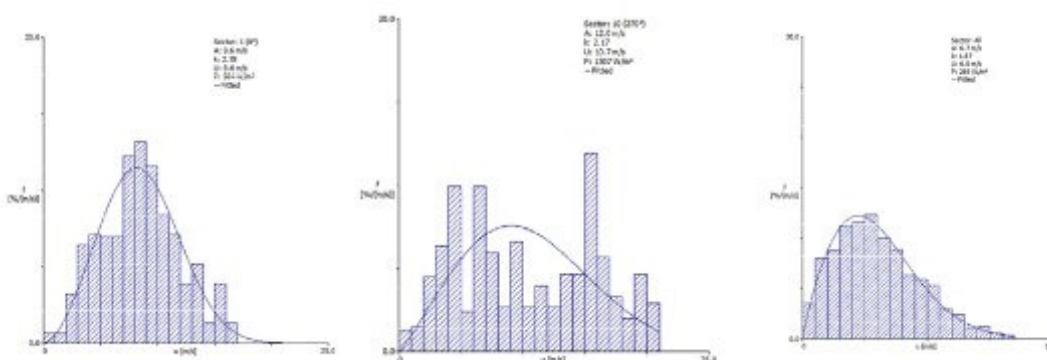
- Stabiili: $Ri > 0,05$
- Neutraali: $-0,15 \leq Ri \leq 0,05$
- Epästabiili: $Ri < -0,15$

Richardsonin luvut on laskettu AROME-mallin tuloksista käyttäen hyväksi niin kutsuttua gradientti Richardsonin lukua, joka on laskettu aina tiettyä vakiotasoa vastaavien lähimpien mallitasojen perusteella.

Weibull-jakauman A ja k

Mitatuista tuulennopeuksista voidaan muodostaa tasavälinen histogrammi, joka kertoo kuinka usein tietty tuulen nopeus esiintyy. Koko nopeusjakauman käyttö monissa sovellutuksissa on hankalaa, tai havaintoja on vähän riittävän tilastollisen edustavuuden aikaansaamiseksi, tästä johtuen tuulen nopeusjakaumaa voidaan kuvata jollakin tilastollisella funktiolla.

Tuulen nopeuden osalta, erityisesti tuulienergiasovellutuksissa, on yleiseksi käytännöksi muodostunut Weibull-jakauman käyttö. Weibull-jakaumalla pystytään hyvin kuvaamaan klimatologista tuulijakaumaa. Weibull-jakauma kuvaa jatkuvaa tilastollista todennäköisyysjakaumaa.



Kuva 7. Esimerkkejä mittauksiin perustuvista histogrammeista (pylväät) ja Weibull-jakaumista (viiva).

Weibull-jakaumasta Tuuliatlaksessa on annettu suuntasektoreittain A ja k parametrien arvot. A on niin kutsuttu skaalaparametri, joka osoittaa tuulen keskinopeuden sijainnin. k on puolestaan muotoparametri, joka kertoo onko jakauma oikealle vai vasemmalle vino, vai lähempänä normaalijakaumaa. Mitä pienempi k:n arvo on, sitä enemmän käyrä on vasemmalle kallistunut. Suomen tuuliatlasta tuotettaessa nämä A ja k parametrit on laskettu tuulen keskinopeuden sekä tuulen nopeuden keskihajonnan perusteella.

Weibull-jakauma on laskettu erikseen kaikille kolmelle stabiiliusluokalle sekä lisäksi koko aineistolle yhteensä. Stabiiliusluokkiin jakamisen perustana on käytetty edellä esitettyä Richardsonin lukua.

Ilman lämpötila

Annettu ilman keskilämpötila on laskettu kolmen tunnin ennusteiden yksittäisten arvojen aritmeettisena keskiarvona.

Turbulenssin intensiteetti

Tuulen nopeuden turbulenssin intensiteettiä tietyn mittausajan (esim. 10 tai 30 minuuttia) yli kuvataan yleisesti tuulen hetkellisten (esim. 1 s mittaus) havaintojen hajonnan suhteella ko. mittausvälin tuulen keskinopeuteen.

Numeerinen malli ei pysty kuvaamaan ajallisesti ja paikallisesti pieniä ilmapyörteitä, joten turbulenssin intensiteetti kullakin korkeustasolla lasketaan mallin turbulenttisen liike-energian (TKE) ja mallin ennustushetken tuulennopeuden suhteena, kuten alla olevassa kaavassa esitetään.

$$I = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} TKE}}{V}$$

Turbulenttisen intensiteetin laskemista varten malliaineisto on jaettu taulukossa 1 esitettyihin tuulennopeus luokkiin: 5-10 m/s, 10-15 m/s, 15-25 m/s sekä 15 m/s, ja edellä mainittua menetelmää on käytetty intensiteetin laskemiseksi.

Puuskakerroin

Puuskakertoimen arvoa ei saada suoraan ulos mallista, vaan se täytyy laskea mallin antamien muiden suureiden avulla. Puuskakerroin voidaan määrittää tietyllä vakiotasolle, kun tiedetään tämän tason sekä maanpinnan välisen ilmakerroksen suurin tuulen nopeus sekä keskimääräinen tuulen nopeus.

Puuskakerrointa laskettaessa täytyy tietää turbulenttisen liike-energian (TKE), tuulen keskinopeuden V arvot sekä sekoittumiseen vaikuttava stabiiliutta kuvaava lämpötilan pystyjakauma ΔT . Ilmakehän ollessa epästabiili on liikkeelle sysätyllä ilmapaketilla tietty kiihtyvyyksi eli nostevoima. Kun tämä nostevoima kasvaa suuremmaksi kuin TKE, on saavutettu se suurin korkeus jolta puuska voi saada

alkunsa. Näin saadaan määriteltyä sen kerroksen paksuus josta määritetään edellä mainitut maksimi ja keskituulen nopeudet.

Puuskakertoimet on laskettu erikseen stabiilille (s) tilanteelle sekä neutraalille ja konvektiiviselle (nc) tilanteelle. Puuskakerroin on laskettu kolmen tunnin ennusteista, joka korkeudelle ja kullekin tuulensuuntasektorille erikseen. Lisäksi on laskettu kaikille sektoreille yhteinen klimatologinen keskiarvo koko aikasarjasta.

Tuulen energiasäilytys

Tuulen energiasäilytys P on laskettu yksittäisistä ennusteista koko tuuliskaalalle sekä erikseen tuulen nopeuden ollessa 4–25 m/s. Jälkimmäinen vastaa tyypillistä tuuli-voimalan toiminta-alueita, mutta energiasäilytys poikkeaa esimerkiksi WAsP-analyysien tuottamasta arvosta, joka kattaa koko tuulen nopeusalueen (esim. 0–50 m/s). Koska tuulienergia on verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin, on yksittäisten (harvojen) erittäin suurten tuulennopeuksien vaikutus P :n arvoon huomattava.

$$P = \frac{1}{2} \rho |V|^3$$

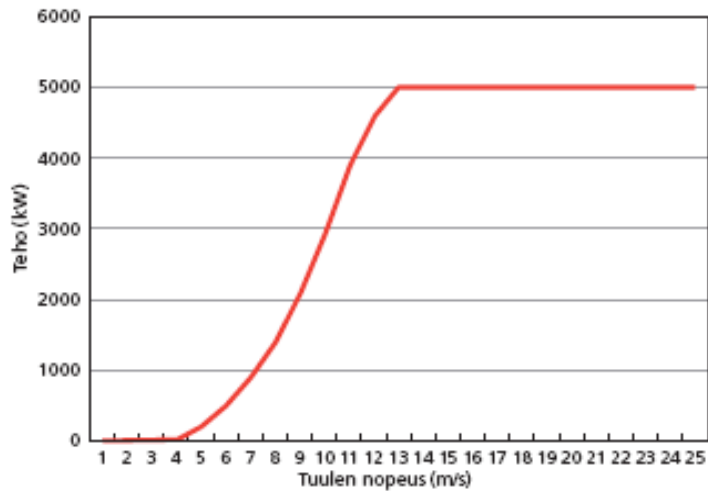
Kaavassa esiintyvä ilman tiheys eli ρ on laskettu ilmanpaineen ja ilman lämpötilan avulla, kullekin laskentatasolle erikseen. V on puolestaan tuulen nopeuden itseisarvo kyseisellä tasolla. Tuulen energiasäilytyksen yksikkö on W/m^2 .

Tuulivoimalan tuotto

Tuulivoiman tuotto on laskettu käyttäen kolmen tuulivoimalan yleisesti tunnettuja tehokäyriä. Nämä tuulivoimalatyypit ovat:

- WinWinD 1 MW, lapaväli 56 metriä (käynnistyy 4 m/s, pysähtyy 25 m/s),
- WinWinD 3 MW, lapaväli 90 metriä (käynnistyy 3 m/s, pysähtyy 25 m/s),
- REpower 5 MW, lapaväli 126 metriä (käynnistyy 3,5 m/s, pysähtyy 30 m/s).

Tuulivoimalan tuotto on laskettu kullekin tuulensuuntasektorille säämallin yksittäisistä kolmen tunnin välein otetuista tuuliarvoista käyttämällä kullekin voimalalle annettua tehokäyriä. Kaikille näille kolmelle nimellisteholtaan erikokoiselle tuulivoimalalle on laskettu voimalan tuotto (MWh) kuukausittain ja koko vuodelle. Lisäksi WinWinD 3 MW turbiinille on laskettu erikseen tuotto lämpötilan ollessa alle -15 °C sekä alle $+17\text{ °C}$, joka on raja-arvo lämmitystasopäiväluvulle jota käytetään lämmitystarpeen kuvaamiseen.



Kuva 8. REpower 5 MW tuuliturbiinin tehokäyrä. Vaaka-akselilla on tuulen nopeus (m/s) ja pystyakselilla sitä vastaava tuulivoiman teho kilowatteina (kW).

Tyynet ja kovatuuliset vuodet

Tyynille ja kovatuulisille vuosille on laskettu kuukausikeskiarvot tuulen nopeudesta ja Weibull-parametreista sekä vuotuinen tuulivoiman tuotto. Nämä luvut on laskettu yllä esitetyin menetelmin vain yhden tyynen tai kovatuulisen kuukauden malliaineistoon pohjautuen. Suppean aineiston vuoksi tuloksia ei ole jaettu eri tuulen suuntasektoreittain.

Liite 2 Tuuliatlaksen toteuttajat

Ohjausryhmä

Tuuliatlastyötä on valvonut ohjausryhmä, jonka puheenjohtajana on toiminut neuvotteleva virkamies Erkki Eskola työ- ja elinkeinoministeriöstä.

Ohjausryhmän jäsenet:

Antti Irjala, ympäristöministeriö; Esa Holttinen, wpd Finland Oy; Hannu Mars, Etelä-Pohjanmaan energiatoimisto; Kalevi Luoma, Kuntaliitto; Lauri Luopajarvi, PVO Innopower ja Energiateollisuus ry:n edustaja; Timo Mäki, Hyötytuuli Oy; Patrick Frostell, Teknologiateollisuus; Esa Peltola, VTT; Mauri Marjaniemi, Tekes; Bengt Tammelin Ilmatieteen laitos.

Motivan edustajat ohjausryhmässä: Timo Määttä, Olli Laitinen, Åsa Nystedt (vuonna 2008) ja liris Lappalainen Motiva Oy.

Tuuliatlasmallinnus ja käytännön toteutus

Bengt Tammelin, Ilmatieteen laitos, projektipäällikkö

Vertailujakson valinta: Timo Vihma, Reijo Hyvönen

Harmonie-malli: Carl Fortelius, Evgeny Atlaskin, Karoliina Ljungberg, Sami Niemelä

Mallitulosten laskenta tietokantaan: Evgeny Atlaskin

WASP Lib-tiedostot: Jake Badger (Risö DTU), Reijo Hyvönen

WASP-mallinnus: Reijo Hyvönen, Tarja Savunen, Jenni Latikka

AROME-mallitulosten vertailu mittauksiin: Juha Kilpinen, Evgeny Atlaskin

AROME-mallitulosten vertailu tutkatuuliin: Kirsti Salonen

AROME+WASP -mallitulosten vertailu mittauksiin: Jenni Latikka, Achim Drebs,

Bengt Tammelin, Reijo Hyvönen

Helsinki-Testbed -mittaukset: Juha Paldanius (Vaisala Oyj)

Maksimituulet ja lämpötila: Ari Venäläinen, Pentti Pirinen, Reijo Hyvönen

Puuskaisuus ja turbulenssi: Irene Suomi, Evgeny Atlaskin, Timo Vihma

Ilmastonmuutoksen vaikutus: Hilppa Gregow, Kimmo Ruosteenoja

Ilmastotilastoja: Niina Niinimäki

Tuuliatlas-karttaliittymän toteutus: Matti Horttanainen, Antti Samuli, Mikko

Parviainen, Mikko Kondratjeff

www-sivut: Tuija Vuorinen, Jaakko Forsius, Bengt Tammelin, Eija Vallinheimo

Tietokanta: Mikko Partio, Mikko Parviainen

Ilmatieteen laitoksen palvelinympäristö: Markku Hakola, Kari Hurtta

Neuvonantajat: Prof. Sylvain Joffre, Prof. Sergey Zilitinkevich

Ilmatieteen laitoksen omien mittausten lisäksi tuulimittauksia mallinnustulosten todentamista varten ovat tuottaneet Vaisala Oyj, wpd Finland Oy, Ålands Vindenergi Andelslag sekä yhteistyössä Ilmatieteen laitoksen kanssa Pyhätunturi Oy.