

# Tuulivoimatuotannon vaihtelut ja niiden arviointi

Hannele Holttinen, Esa Peltola & Göran Koreneff

VTT Energia



ISBN 951-38-4995-3  
ISSN 1235-0605  
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1996

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Energijärjestelmät, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6538

VTT Energi, Energisystem, Teknikvägen 4 C, PB 1606, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6538

VTT Energy, Energy Systems, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6538

Holttinen, Hannele, Peltola, Esa & Koreneff, Göran. Tuulivoimatuotannon vaihtelut ja niiden arviointi [Seasonal and long-term variations of wind energy production in Finland]. Espoo 1996, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1800. 42 s. + liitt. 9 s.

**UDK** 620.9:621.311.24:311.17

**Avainsanat** energy, energy production, wind energy, wind velocity, variations, statistical analysis, evaluation, production control, efficiency

## TIIVISTELMÄ

Tuulivoimatuotannon vaihteluita tutkittiin sekä pitkäaikaisten meteorologisten havaintosarjojen että tuulivoiman tuotantotilastojen perusteella.

Tuotannon arvioimisen menetelmiä kehitettiin siten, että nykyisen pitkän aikavälin keskimääräisen vuosituotannon lisäksi saadaan selvitettyä myös keskimääräinen kuukausituotanto sekä vaihteluvälit, joiden sisällä yksittäisen kuukauden tuotanto pysyy 90 %:n varmuudella.

Sääasemien tuulenopeustietojen perusteella Suomen rannikolla keskituulenopeuden vaihtelu on vuositasolla 5 - 15 % (keskihajonta suhteessa keskinopeuteen). Kesäkuukausina vaihtelu on samansuuruista kuin vuositason vaihtelu, talvella suhteelliset hajonnat ovat yli 20 %. Tuulen nopeuden vaihteluista seuraava tuulivoimalaitosten tuotannon vaihtelu on vuositasolla 10 - 30 % (keskihajonta suhteessa keskimääräiseen tuotantoon). Kesäkuukausina vaihtelu on alle 30 %, talvikuukausina suhteellinen hajonta on jopa yli 60 %.

Tuulivoimalaitoksen keskimääräiselle kuukausituotannolle Suomen etelä- ja län-sirannikoilla konstruointiin indeksisarjat käyttäen hyväksi Hailuodon mittausten perusteella selvitettyä tuulivoimalaitosten kuukausituotannon ja tuulen nopeuden kuukausikeskiarvon välistä lineaarista yhteyttä. Lisäksi WASP-menetelmää kehitettiin siten, että on mahdollista laskea keskimääräisiä kuukausituotantoarvioita halutulle sijoituspaikalle ja voimalaitostyypille.

Yksittäisen kuukauden tuotanto voi vaihdella laajoissa rajoissa erityisesti talvella. Kuukausituotannon 90 %:n varmuusväliksi saadaan tällöin jopa yli  $\pm 90$  % keskimääräisestä tuotannosta, eli talvikuukausina yksittäisen kuukauden tuotantoa ei käytännössä voi ennustaa. Kesäaikana vaihteluväli on pienempi.

Holtinen, Hannele, Peltola, Esa & Koreneff, Göran. Tuulivoimatuotannon vaihtelut ja niiden arviointi [Seasonal and long-term variations of wind energy production in Finland]. Espoo 1996, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1800. 42 p. + app. 9 p.

**UDC** 620.9:621.311.24:311.17

**Keywords** energy, energy production, wind energy, wind velocity, variations, statistical analysis, evaluation, production control, efficiency

## ABSTRACT

The study of seasonal and long-term variations of wind power production is based on wind power production statistics and long-term meteorological wind data from weather stations on the coast of Finland.

Presently the wind energy production estimates are made for yearly average production only. The methods have been developed to assess the average monthly production and the range of variations for an individual month.

According to the meteorological stations' wind speed measured along the Finnish coastline, the yearly wind speed variations are 5 - 15 % (standard deviation/average calculated from the yearly mean wind speeds). Variations of the monthly mean wind speeds in summertime are of the same order of magnitude as the yearly variations, whereas the variations are more than 20 % during the winter months. The yearly variations of wind power production resulting from wind speed variations are 10 - 30 %. The monthly variations of wind power production are below 30 % in summer months and up to 60 % during winter months.

Index series of average monthly wind power production has been constructed for both the southern and western coasts of Finland. For this the linear relation between monthly mean wind speed and monthly mean wind power as measured in Hailuoto, Finland has been used.

In addition to this, the WASP-method for wind power production estimates has been developed, in order to estimate the monthly average wind power production for a specific site and wind turbine.

The wind power production of an individual month can vary a lot especially in wintertime. The statistical estimation gives ranges of variations up to  $\pm 90$  % of the average production. So, in practise it is impossible to predict the production of an individual winter month. The range of the monthly variations is lower in summertime.

# ALKUSANAT

Tämä raportti on syntynyt osana NEMO2-tutkimusohjelman projektia Tuulivoima jakelusähkölaitosten sähkön tuotannon osana. Raporttiin liittyvä työ on tehty pääasiassa VTT Energiassa, missä projektipäällikkönä on toiminut dipl.ins. Esa Peltola. Valtaosan työstä on tehnyt dipl.ins. Hannele Holttinen. dipl.ins. Göran Koreneff on antanut panoksensa tilastollisten suureiden laskentaan.

Työn pohjana oleva meteorologinen tilastoaineisto on hankittu Ilmatieteen laitokselta.

Tuulivoimalaitosten tuotantotilasto on syntynyt voimalaitosten käyttäjäyhteisöjen eli Korsnäs Vindkraftspark Ab:n, Revon Sähkö Oy:n, Kemin tuulivoimapuisto Oy:n, Ålands Vindandelslagin, Kemijoki Oy:n, Enontekiön kunnan sähkölaitoksen ja Kuivaturve Oy:n kuukausittain toimittamien tietojen pohjalta, mistä heille lämmin kiitos. Tätä tilastoa on koottu ja ylläpidetty VTT Energiassa osana tuulien energia-alan IEA-yhteistyötä.

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ .....	3
ABSTRACT .....	4
ALKUSANAT .....	5
SYMBOLILUETTELO .....	8
1 JOHDANTO .....	9
1.1 TAUSTAA .....	9
1.2 TAVOITE .....	11
2 AINEISTO JA MENETELMÄT .....	12
2.1 TILASTOAINEISTO .....	12
2.1.1 Meteorologiset tuulihavainnot .....	12
2.1.2 Tuulivoiman tuotantotilastot .....	13
2.2 TUULIOLOSUHTEIDEN ARVIOINTI WAsP-MENETELMÄLLÄ .....	13
2.3 VUOSITUOTANNOSTA KUUKAUSIARVIOIHIN .....	14
3 TUULIOLOSUHTEIDEN JA TUOTANNON VAIHTELUT VUOSITASOLLA .....	16
3.1 TUULEN KESKINOPEUDEN VUOTUISET VAIHTELUT .....	16
3.2 TUOTANNON VAIHTELUT TILASTOJEN MUKAAN .....	18
4 KUUKAUSITASON VAIHTELUT TILASTOJEN MUKAAN .....	20
4.1 TUULEN KESKINOPEUS .....	20
4.2 TUULIVOIMAN TUOTANTO .....	22
4.3 TUOTANNON JA KESKINOPEUDEN VÄLINEN RIIPPUVUUS .....	23
5 KUUKAUDEN KESKIMÄÄRÄINEN TUULIVOIMATUOTANTO .....	26
5.1 KUUKAUSITUOTANTOINDEKSI TILASTOJEN PERUSTEELLA .....	26
5.2 KESKIMÄÄRÄINEN KUUKAUSITUOTANTO WAsP-MALLIN AVULLA .....	29
5.2.1 Kuukausittainen atlastiedosto .....	30
5.2.2 Kuukausittaiset tehokäyrät .....	30
5.2.3 Maaston rosoisuuden vaihtelu .....	31
6 VUOSI- JA KUUKAUSITUOTANNON VAIHTELUN ARVIOIMINEN .....	32
6.1 TILASTOLLINEN ANALYYSI .....	32
6.1.1 Esimerkkejä .....	33
6.2 TUOTANTOARVION LUOTETTAVUUSVÄLI JA TUOTANNON VAIHTELUVÄLI .....	34
6.3 WEIBULL-JAKAUMAN SOVITUKSEEN LIITTYVÄ EPÄTARKKUUS .....	36

6.4 TUOTANTOARVIOT VERRATTUNA TOTEUTUNEeseen	
TUOTANTOON.....	37
6.4.1 Korsnäs.....	38
6.4.2 Hailuoto.....	39
7 YHTEENVETO.....	40
7.1 TUULISUUDEN VAIHTELU.....	40
7.2 KUUKAUSITTAISET TUOTANTOARVIOT JA VAIHTELUVÄLIT.....	40
LÄHDELUETTELO.....	42

## LIITTEET

1. Sääasemilla mitatut kuukausikeskinopeudet
2. WASP-menetelmän käyttämän atlastiedoston muokkaaminen keskimääräisen kuukausituotannon arvioinnissa
3. Tuulen nopeuden pitkän ajan kuukausikeskiarvot ja keskihajonnat rannikon sääasemilta

# SYMBOLILUETTELO

## Matemaattiset merkit

a, b	kertoimia
A	Weibull-jakauman parametri
E	energia
k	Weibull-jakauman parametri
P	teho
T	kuukauden tunnit
v	tuulen nopeus
$\sigma_E$	energian keskihajonta
$\sigma_v$	tuulen nopeuden keskihajonta

## Lyhenteet

WAsP <sup>®</sup>	tuuliolosuhteiden ja tuulivoimalaitoksen tuotannon laskentamenetelmä ja -ohjelmisto
-------------------	-------------------------------------------------------------------------------------



# 1 JOHDANTO

## 1.1 TAUSTAA

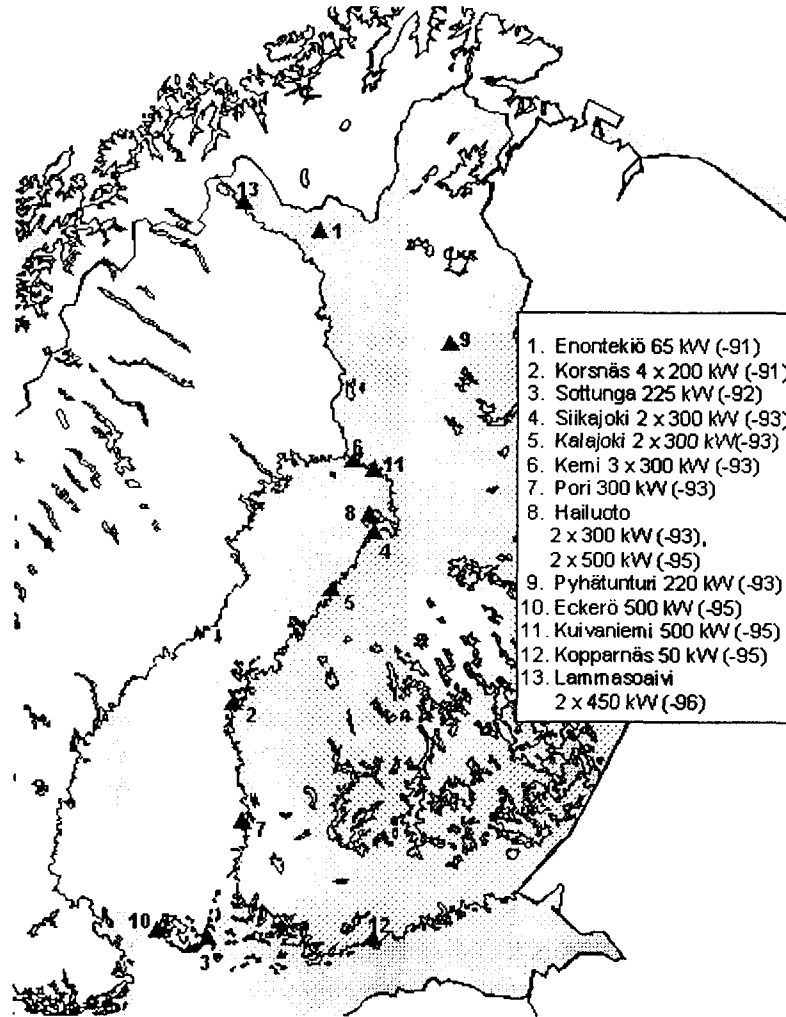
Vuonna 1996 Suomessa oli käytössä 24 tuulivoimalaitosta (kuva 1). Pääosa on rakennettu rannikkoalueille, mutta Lapissakin on käytössä neljä voimalaitosta. Rannikolle rakennetut voimalaitokset ovat nimellisteholtaan 200 - 500 kW. Voimalaitoksia ovat rakentaneet pääasiassa jakelusähkölaitokset, kuten Revon Sähkö Oy ja Porin kaupungin energialaitos, tai erilliset yhtiöt, kuten Korsnäs Vindkraftspark Ab ja Kemin tuulivoimapuisto Oy, joissa paikallisilla sähkölaitoksilla on merkittävä osuus. Kemijoki Oy pystytti yhdessä Enontekiön kunnan sähkölaitoksen kanssa ensimmäisen arktisen tuulipuiston (2 x 450 kW) Enontekiön Lammasoivi-tunturille syyskuussa 1996.

Tähän asti toteutetuilla hankkeilla on sekä valtakunnallisesti että varsinkin paikallisesti ollut selvä demonstraatioluonne. Hankkeita suunniteltaessa on käytetty hyväksi NEMO-tutkimusohjelman puitteissa saatuja tuloksia, ja kauppa- ja teollisuusministeriö on myöntänyt niille investointiavustusta yleensä 35 - 40 %.

Tekninen kehitys sekä siihen liittyvä kaupallisten tuulivoimalaitosten koon kasvaminen nyt 500 kW:n teholuokkaan ja lähimmän kahden vuoden aikana edelleen MW-luokkaan on lisännyt sähkölaitosten kiinnostusta tuulivoimaan. Teknisen kehityksen ja koon kasvun mukana myös investointikustannukset ovat alentuneet. Parhailtaan onkin suunnitteilla useampia hankkeita, joissa on tarkoituksena rakentaa vähintään 500 kW:n laitoksia. Rakenteilla oleva lisäkapasiteetti on arviolta 3 MW kesään 1997. Iin energia hankkii yhden 500 kW voimalaitoksen alueelleen vuoden 1996 lopulla, Ålands Vindandelslag kaksi 600 kW:n laitosta Lemlandiin ja Revon Sähkö kaksi 600 kW:n laitosta Siikajoelle keväällä 1997. Lisäksi hankkeita on viireillä mm Jyllinkosken Sähkö Oy:llä, Lumijoen kunnalla, Kokkolan ja Porin energialaitoksilla, Korpelan Voima Oy:llä, Espoon Sähkö Oy:llä sekä Ahvenanmaan tuuliosuuskunnalla.

Jo demonstraatiovaiheessa, mutta varsinkin tuulivoimaa kaupallisesti hyödynnettäessä, luotettava tuotantoarvio tuulivoimalaitokselle tai tuulipuistolle on hankkeen investoijan kannalta tärkeä. Suomessa toteutetuissa projekteissa tuulisuus- ja tuotantoarviot on tehty Suomen tuuliatlasta (TAMMELIN, 1991 a) ja WASP-menetelmää (MORTENSEN et al. 1993) käyttäen. Joissakin tapauksissa WASP-arvioiden tukena on käytetty paikalla tehtyjä lyhyitä tuulimittausjaksoja.

WASP-menetelmä on Euroopassa yleisimmin käytetty työkalu etsittäessä tuulivoimalaitosten sijoituspaikkoja ja arvioitaessa voimalaitosten tuotantoa. Menetelmä on kehitetty tuulen nopeuden ja vertailtavien tuulivoimalaitosten tuotannon pitkän aikavälin keskiarvojen arvioimiseksi.



Kuva 1. Verkkoonkytetyt tuulivoimalaitokset Suomessa vuonna 1996. Kopparnäsissä 300 kW:n demonstraatiolaitos purettiin ja uusi 50 kW:n prototyyppi pystytettiin 1995.

Tuulivoimalaitoksen tuotannon vaihtelu eri vuosina on investointia arvioitaessa merkittävä epävarmuuden lähde. Epävarmuutta voidaan kuitenkin täsmentää ja pienentää muodostamalla arviolle vaihteluvälit. Lisäksi tuotantoarvioiden vaihteluväli voi toimia toteutuneen tuotannon mittarina ja seurantavälineenä. Tuulivoimatuotannolle on ominaista tietty keskimääräinen kausivaihtelu sekä rannikolla kesäaikaan havaittavissa oleva maa-merituuli -ilmiöön perustuva säännöllinen vuorokausivaihtelu.

Sähkölaitosten kannalta tuulivoima on uudenlainen tuotantomuoto. Tuulivoimatuotannon arvo riippuu ensi sijassa tuotannon määrästä vuositasolla, joka WASP-menetelmällä kyetään kohtuullisella tarkkuudella arvioimaan. Kuitenkin myös tuotannon ja kulutuksen kausi- ja vuorokausivaihtelu sekä näiden yhteensopivuus ovat talouden kannalta merkityksellisiä. Tuotanto vaihteluineen vaikuttaa muun sähkön hankinnan tarpeeseen ja kustannuksiin. Mitä paremmin tuottaja pystyy arvioimaan tuulivoimatuotantonsa, sitä korkeampi arvo hänen tuottamallaan sähköllä on.

## 1.2 TAVOITE

Tässä työssä tarkastellaan tuulivoimatuotannon vaihteluita ja selvitetään, missä rajoissa tuulivoiman vuosituotanto ja kuukausituotanto vaihtelevat.

Raportissa esitetään keinoja mm. WAsP-menetelmän käytön kehittämiseksi siten, että tuulivoimatuotannon vaihteluiden luonnetta ja suuruutta voitaisiin kuvata tuulivoimalaitosten potentiaalisten käyttäjien tarpeiden mukaisesti. Erityisesti on pyritty löytämään tuotantovaihteluihin liittyviä säännönmukaisuuksia sekä pohdittu tapaa, jolla esiintyviä vaihteluita voidaan järkevällä tavalla etukäteen arvioida.

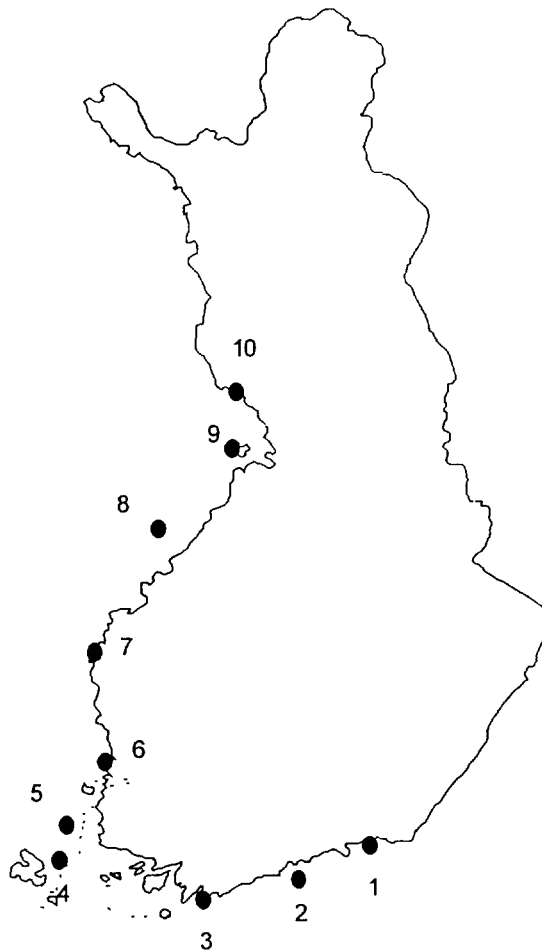
Aineistona tutkimuksessa on käytetty tuulivoimalaitosten käyttäjiltä tuotantotilastoinnin yhteydessä saatuja todellisia kuukausituotantolukuja sekä Ilmatieteen laitokselta hankittuja tuulennopeuden kuukausikeskiarvoja.

## 2 AINEISTO JA MENETELMÄT

### 2.1 TILASTOAINEISTO

#### 2.1.1 Meteorologiset tuulihavainnot

Tätä työtä varten hankittiin tuulimittausaineisto 10 sääasemalta (kuva 2). Asemat valittiin siten, että ne kattaisivat mahdollisimman hyvin Suomen koko rannikon. Aineiston laajuus oli 11 - 20 vuotta. Osa asemista on perustettu 1980-luvulla ja Helsinki Katajaluodon ja Korsnäs Moikipään asemat eivät enää ole käytössä.



*Kuva 2. Rannikolla sijaitsevat sääasemat: 1. Kotka Rankki 2. Helsinki Katajaluoto 3. Hanko Russarö 4. Kumlinge Bärö 5. Kustavi Isokari 6. Pori Mäntyluoto 7. Korsnäs Moikipää 8. Ulkokalla 9. Hailuoto Marjaniemi 10. Kemi Ajos.*

Sääasemien tuulimittaukset edustavat sijaintialueensa tuulisuutta kohtalaisesti: tuuliatlaksessa annetun luokituksen mukaan Ulkokallan ja Kumlingen edustavuus

on hyvä, muiden kohtalainen. Ulkokallassa mittausten kattavuus on ajoittain heikko. Kustavi Isokarilla mittari on sijoitettu suurehkon rakennuksen katolle, mikä vaikuttaa tuulisuuteen.

Mittarin korkeus eri sääasemilla vaihtelee, ainoastaan Hailuodon ja Kumlingen mittarit ovat lähellä tuulivoimalaitoksen napakorkeutta (30 - 40 m). Muilla asemilla tuulen keskinopeutta pitää korjata ylöspäin, jos tarkastellaan tuulivoiman tuotantoa.

Sääasemilla tuulen nopeutta mitataan kolmen tunnin välein (jolloin rekisteröidään yksi 10 minuutin keskiarvo). Tämä antaa pitemmillä ajanjaksoilla tilastollisesti yhtä luotettavat tuulen keskinopeuden arvot kuin jatkuva mittaus.

### **2.1.2 Tuulivoiman tuotantotilastot**

Tuulivoiman tuotantotilastoja on kerätty ja ylläpidetty VTT Energiassa vuodesta 1991, jolloin Suomeen rakennettiin Korsnäsin tuulipuisto ja Enontekiön 65 kW:n koevoimalaitos. Tällöin asennettu tuulivoimateho ylitti 1 MW:n rajan.

Tuotantotilastoihin on koottu tiedot laitosten tuotannosta kuukausittain. Tilastot on julkaistu neljännesvuosittain Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n Tuulensilmä- ja Vindkraftföreningen rf:n Vindögat-lehdissä.

Nykyinen tilasto käsittää kuvassa 1 esitetyt yli 50 kW verkkoonkytketyt laitokset, yhteensä 23 voimalaitosta. Asennettu teho on yhteensä 7,3 MW (marraskuu 1996).

## **2.2 TUULIOLOSUHTEIDEN ARVIOINTI WAsP-MENETELMÄLLÄ**

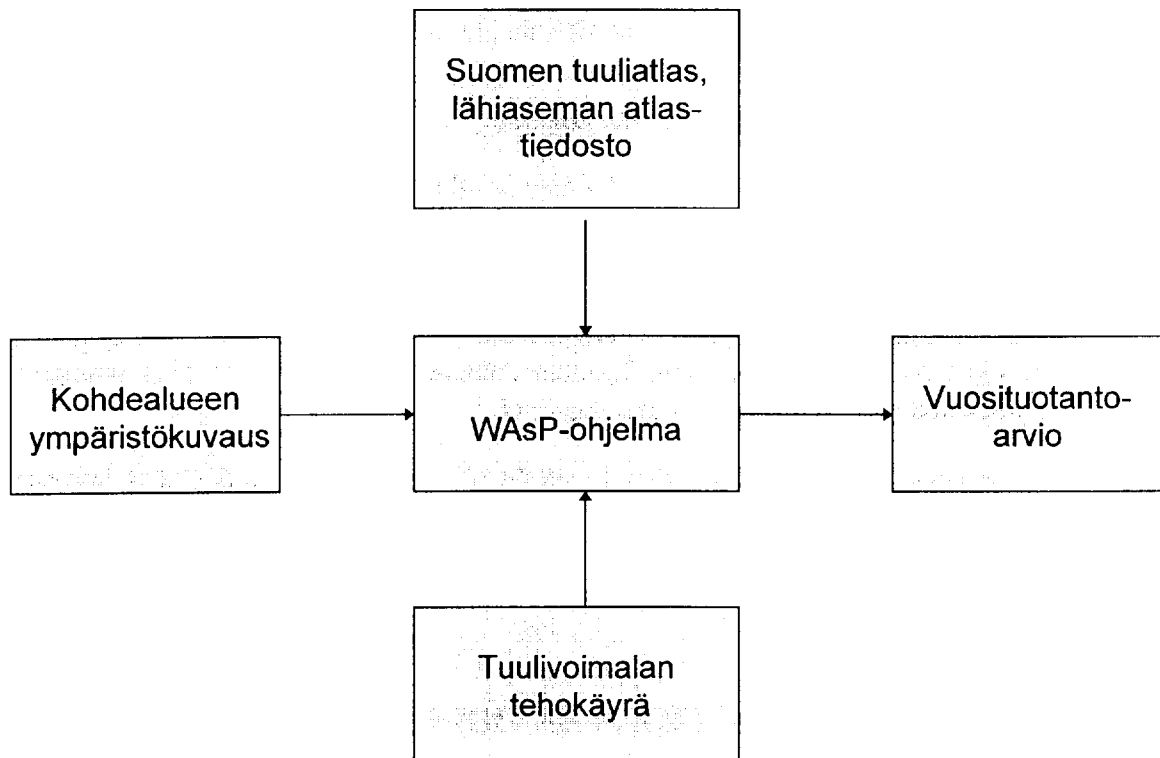
Suomen tuuliatlasta ja WAsP-menetelmää käyttäen voidaan arvioida tuulen nopeuden ja eri tuulivoimalaitosten tuotannon pitkän aikavälin keskiarvoa.

Suomen tuuliatlas on Ilmatieteen laitoksella NEMO-tutkimusohjelman tuulienergiakartoituksen yhteydessä valmistunut teos, jossa 60 säähavaintoasemaa käyttäen on muodostettu kuva tuulioolosuhteista Suomessa (TAMMELIN, 1991a). Sääasemien tuulihavainnot on koottu, tarkistettu ja saatettu WAsP-ohjelman vaatimaan muotoon alueellisiksi tuuliatlaksiksi.

WAsP-menetelmää ja tuuliatlaksen tiedostoja käyttäen voidaan arvioida kohdealueen tuulisuutta kuvan 3 yksinkertaistetun periaatteen mukaisesti. Sääasemaa ympäröivä maasto on tuuliatlasta varten kuvattu maaston peitteisyyden ja esteiden osalta. Sääaseman tuulitiedot on "puhdistettu" näin riippumattomaksi ympäröivästä maastosta niin sanotuiksi tuuliatlastiedostoiksi. Näitä tuuliatlastiedostoja voidaan tämän jälkeen käyttää mallin lähtötietoina, ja kohdealueen tuulisuus saadaan arvioitua, kun

mallille kuvataan tuulivoimalaitoksen sijoituspaikan maasto (korkeuskäyrät, maaston peitteisyys, esteet).

WAsP-menetelmällä lasketun keskimääräisen tuulennopeuden virheeksi on arvioitu alle 10 %, mikäli maasto on homogeenista. Epätasaisen maaston tapauksessa virhe voi nousta lähemmäs 15 %:a. Tuulivoimalaitosten tuotantoarvioiden epävarmuus on yleensä 20 - 30 %. Alle 15 - 20 %:n epävarmuuksiin ei yleensä voi päästä, vaikka yrittäisi eliminoida kaikki virhelähteet, koska tuulennopeuden 20 vuoden keskiarvossa on 5 - 15 % :n keskihajonta (FRANSEN & CHRISTENSEN, 1992).



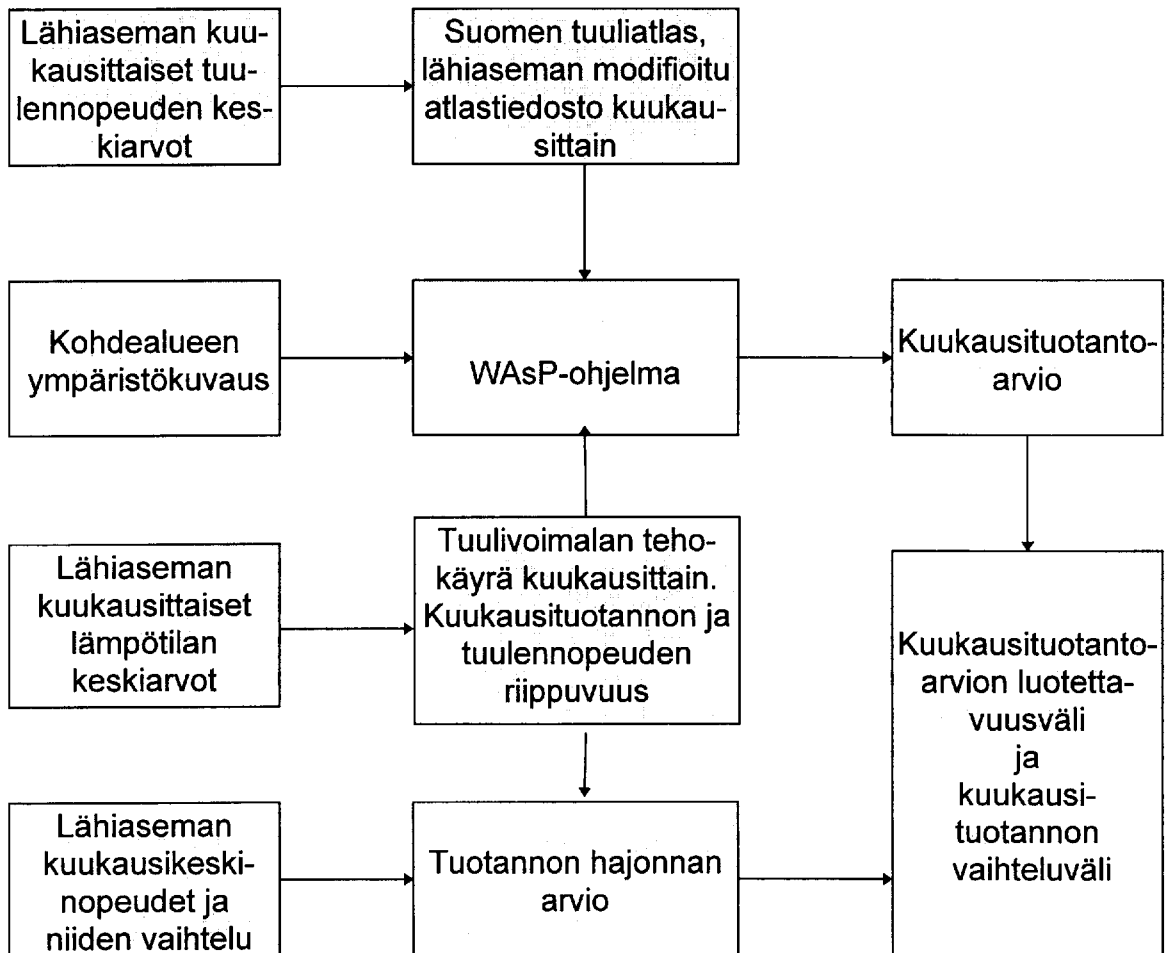
*Kuva 3. WAsP-menetelmän käyttö yksinkertaistettuna tuulivoimalaitoksen vuosituotantoarvion laskemiseksi.*

## 2.3 VUOSITUOTANNOSTA KUUKAUSIARVIOIHIN

Tässä työssä kehitettiin kuvassa 3 esitettyä WAsP-menetelmän käyttöä edelleen siten, että vuosituotantoarvion lisäksi on mahdollista laskea myös tuotannon kuukausiarvio, tämän kuukausiarvion luotettavuusväli sekä arvio kuukausituotannon vaihtelusta. Tätä lähestymistapaa havainnollistetaan kuvassa 4.

Näiden tuotantoa kuvaavien lukujen laskemiseksi tarvitaan sekä tuulen nopeuden että ulkolämpötilan kuukausikeskiarvoja pidemmältä ajalta. Pitkäaikaisten kuukausittaisten keskinopeuksien ja keskilämpötilojen avulla voidaan laskea kuukausituotantoarvio.

Kuukausittaisten tuotantoarvioiden luotettavuusvälien sekä kuukausittaisen tuotannon vaihteluvälin laskemiseksi tarvitaan lisäksi yksittäisiä kuukausikeskinopeuksia, joita tässä työssä on ollut käytettävissä 20 vuoden ajalta 10 sääasemalta.



Kuva 4. Tässä työssä käytetty lähestymistapa WAsP-menetelmän käytön laajentamiseksi siten, että tuloksena saadaan tuulivoimalaitoksen kuukausituotantoarvio, tuotantoarvion luotettavuusväli ja kuukausituotannon vaihteluväli.

### 3 TUULIOLOSUHTEIDEN JA TUOTANNON VAIHTELUT VUOSITASOLLA

Tuulen nopeuden vuosikeskiarvojen vaihteluksi on usein arvioitu  $\pm 10$  % pitkän ajanjakson keskiarvosta. Tämä arvio perustuu pitkän ajan mittauksiin sääasemilta, jotka sijaitsevat yleensä lentokentillä, ja joilla tuulen vuotuinen keskinopeus on alle 5 m/s. Euroopan tuuliatlaksen (TROEN & PETERSEN, 1989) mukaan tuulivoimalaitoksen vuosituotannon keskihajonta jää 10 %:n tuntumaan, mikä vastaa tuulen vuo-sikeskiarvoissa keskihajontaa 3 - 5 %.

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin tuulen nopeuden vuosikeskiarvojen ja tuulivoimalaitosten vuosituotannon vaihteluita Suomessa.

#### 3.1 TUULEN KESKINOPEUDEN VUOTUISET VAIHTELUT

Taulukkoon 1 on koottu tuulen mitattu keskinopeus ja keskihajonta kymmeneltä rannikon sääasemalta (kuva 2). Keskiarvot on laskettu kuukausikeskiarvoista vuosilta 1975 - 1994. Verrattuna Suomen tuuliatlakseen taulukon 1 luvut ovat pidemmältä ajanjaksolta. Tuuliatlas on tehty vuonna 1989, jolloin Kotkan, Helsingin, Hangon ja Korsnäsin asemilta oli käytössä noin 15 vuotta ja muista noin 5 vuotta pitkä mittausaineisto. Tuulen nopeuden keskiarvot ovat taulukossa 1 samaa luokkaa kuin tuuliatlaksessa Kumlingea ja Ulkokallaa lukuun ottamatta, joiden tuulienopeus oli tuuliatlaksen käyttämällä ajanjaksolla selvästi korkeampi (7,2 ja 7,0 m/s).

*Taulukko 1. Tuulen keskinopeus ja keskihajonta 10:llä Suomen rannikon sääasemalla.*

Sääasema	Mittarin korkeus (m)	Ajanjakson pituus (vuosia)	Keskiarvo (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Keskihajonta (%)
Kotka Rankki	20	20	5,4	0,60	11
Helsinki Katajaluoto	10	10	6,3	0,57	9,0
Hanko Russarö	15	20	6,1	0,29	4,8
Kumlinge	35	11	6,6	0,91	14
Kustavi Isokari	23	11	7,1	0,59	8,3
Pori Mäntyluoto	16	11	6,5	0,41	6,3
Korsnäs Moikipää	18	18	6,1	0,57	9,3
Ulkokalla	18	14	6,6	0,57	8,6
Hailuoto Marjaniemi	29	11	6,6	0,45	6,8
Kemi Ajos	25	10	6,1	0,45	7,4

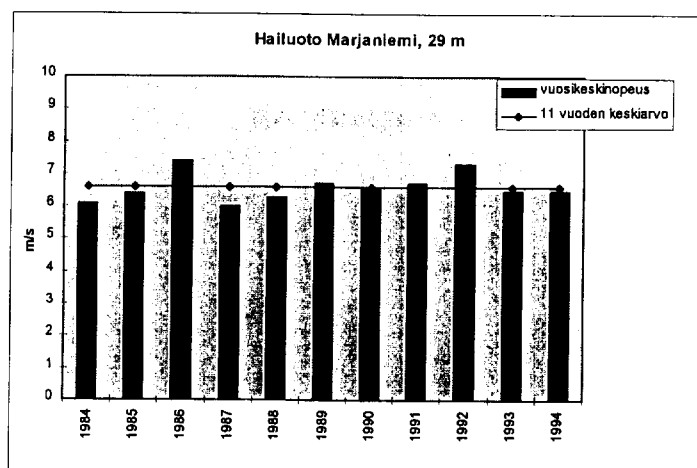
Keskinopeuden keskihajonta vuositasolla on eri paikkakunnilla pienimmillään 4,8 % (Hanko Russarö) ja suurimmillaan 14 % (Kumlinge). Keskihajonta on keskimäärin 8,6 % keskiarvosta. Vaihteluvälit ovat noin  $\pm 15$  % keskiarvosta.



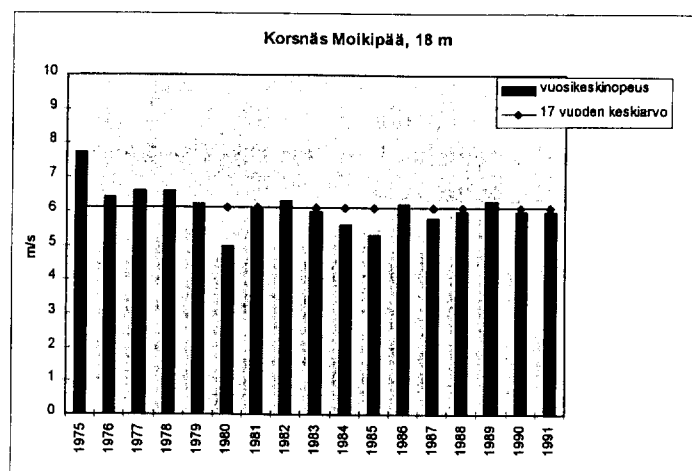
Hailuodossa, Hangossa ja Porissa vaihteluväli on noin  $\pm 10\%$  ja Kumlingessa, Kotkassa ja Korsnäsissa vaihteluvälit ovat suurempia kuin  $\pm 15\%$ .

Jo tämän aineiston perusteella voidaan todeta, että tuulen nopeuden vaihteluväli  $\pm 10\%$  ja keskihajonta 3 - 5 % pitävät paikkaansa Suomessa vain osalla sääasemista ja että tuulen nopeuden vaihtelu vuositasolla on yleensä suurempaa.

Hailuodon ja Korsnäsän sääasemien vuosikeskinopeudet esitetään lisäksi kuvissa 5 ja 6. Hailuotoa ja Korsnäsia käytetään tässä raportissa esimerkkeinä, koska paikkakunnilla on sekä sääasema että tuulivoimalaitoksia.



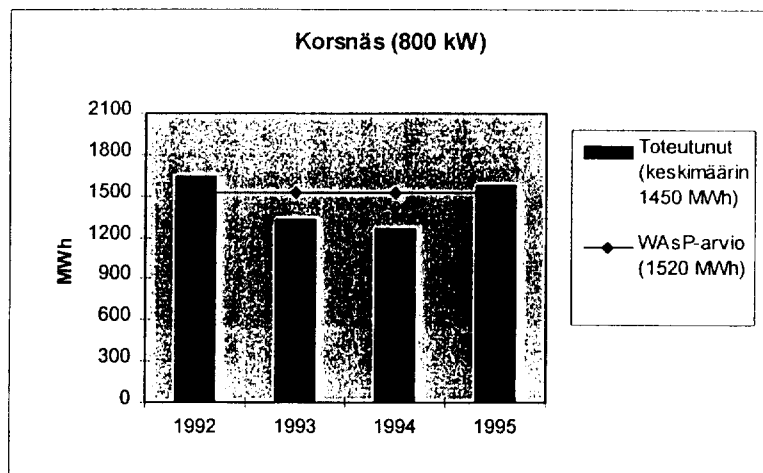
Kuva 5. Hailuoto Marjanleimen sääasemalla mitattu vuosikeskinopeus (6,0 - 7,4 m/s) verrattuna keskiarvoon 6,6 m/s. Vuosikeskinopeuksien keskihajonta on noin 7 % ja vaihteluväli -9 % ... + 12 % keskiarvosta.



Kuva 6. Korsnäs Moikipään sääasemalla mitattu vuosikeskinopeus (5,0 - 7,7 m/s) verrattuna keskiarvoon 6,1 m/s. Vuosikeskinopeuksien keskihajonta on 9,7 % ja vaihteluväli -19 % ... + 25 % keskiarvosta.

### 3.2 TUOTANNON VAIHTELUT TILASTOJEN MUKAAN

Koska tuulivoimalaitoksia on Suomessa, Kopparnäsin koetuulivoimalaitosta lukuun-ottamatta, ollut vasta vuodesta 1991 lähtien, ei käytännön kokemusta tuotannon vaihtelusta juuri ole. Pisimmän ja parhaiten dokumentoidun esimerkkiaineiston tarjoaa Korsnäsän tuulipuisto, joka otettiin käyttöön marraskuussa 1991. Korsnäs on myös ensimmäinen toteutunut tuulivoimakohde, jonka suunnitteluvaiheessa käytettiin WAsP-menetelmää. Alkuperäinen arvio antoi tuulen vuotuiseksi keskinopeudeksi 6,4 m/s ja puiston vuosituotannoksi 1 600 MWh, mutta arvio tarkennettiin korjatulla tuuliatlaksella 1993, jolloin tuulen vuotuiseksi keskinopeudeksi saatiin 6,0 m/s ja puiston vuosituotannoksi 1 520 MWh (viiva kuvassa 7).

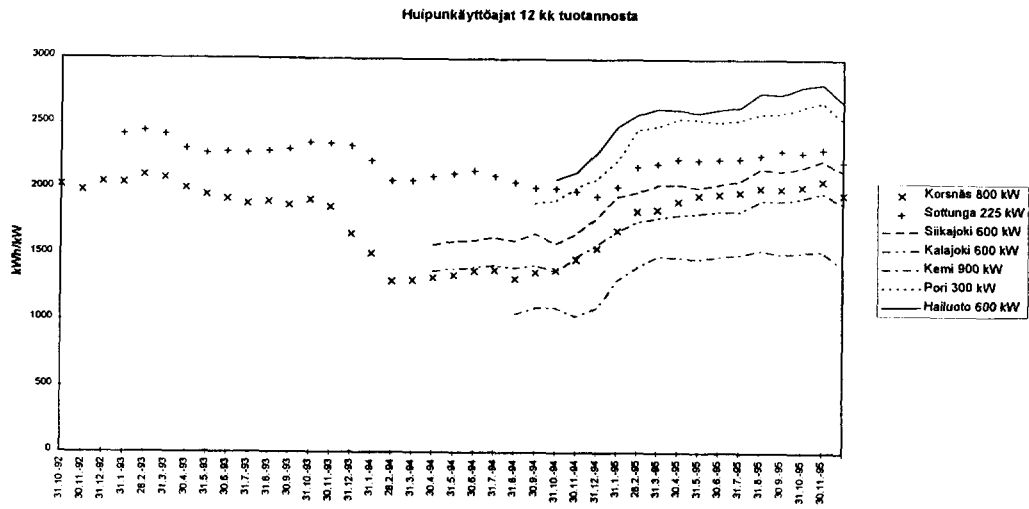


Kuva 7. Toteutunut tuotanto Korsnäsän tuulipuistossa verrattuna arvioon.

Korsnäsän tuulipuiston vuosituotanto on vaihdellut välillä 1 240 -1 640 MWh vuosina 1992 - 95. Toteutunut tuotanto on ollut 83 - 108 % arvioidusta. Jos lasketaan liukuvat 12 kuukauden yhteenlasketut tuotannot, saadaan vielä alhaisempi toteutunut tuotanto (maaliskuusta -93 helmikuuhun -94) 1 035 MWh ja korkeimmaksi tuotannoksi (maaliskuusta -92 helmikuuhun -93) 1 684 MWh eli vaihteluväliksi 68 - 111 % arvioidusta vuosituotannosta.

Tuotannon vaihtelu on ollut samansuuntaista kaikilla Suomen rannikolle sijoitetuilla tuulivoimalaitoksilla. Kuvassa 8 esitetään tuulivoimalaitosten huipunkäyttöajan 12 kuukauden liukuva arvo.

Kuvan 8 mukaan Korsnäsän ja Sottungan laitokset aloittivat toimintansa keskimääräistä tuulisemmalla ajanjaksolla. Vuonna 1993 pystytetyillä voimalaitoksilla oli puolestaan ensimmäinen toimintavuosi keskimääräistä heikkotuulisempaa aikaa, ja vasta maaliskuusta 1994 tuulet saavuttivat ja ylittivät keskimääräiseksi arvioidun tason.



*Kuva 8. Tuulivoimalaitosten vuosituotannon vaihtelu: 12 kuukauden huipunkäyttöaika (liukuva summa) ajalta 1.11.1991 - 31.12.1995 (jakson päättymispäivämäärä merkitty x-akselille).*

## 4 KUUKAUSITASON VAIHTELUT TILASTOJEN MUKAAN

Tässä luvussa käsitellään tuulen nopeuden kuukausikeskiarvojen ja tuulivoimalaitoksen kuukausituotannon vaihteluita vuodesta toiseen. Lisäksi esitetään kuukausituotannon ja keskinopeuden välinen riippuvuus kahdelle laitostyypille. Kuukausittaisten tuulen nopeuksien ja tuotantojen keskimääräistä käyttäytymistä kuvataan tarkemmin luvussa 5.

### 4.1 TUULEN KESKINOPEUS

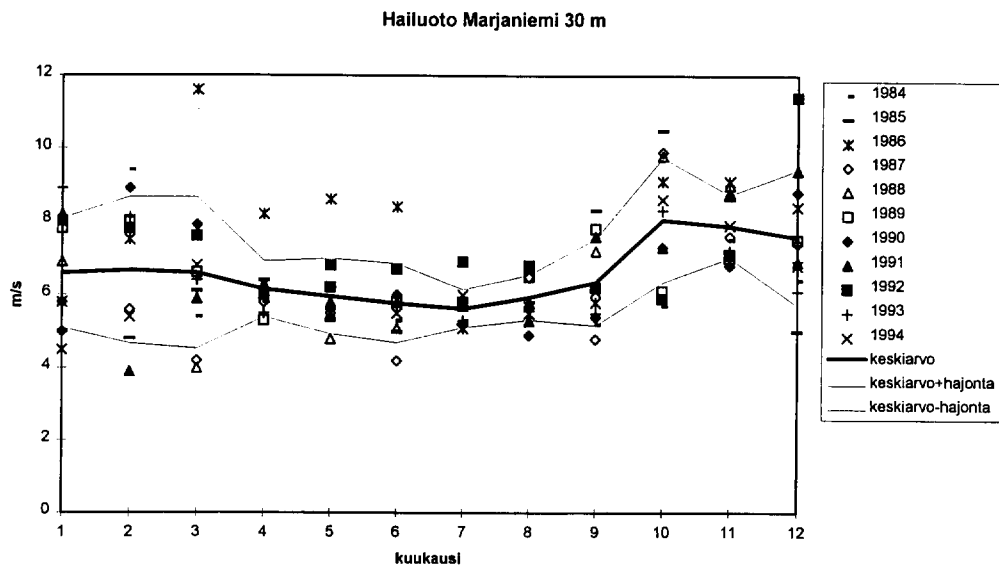
Tuulen keskinopeuden kuukausikeskiarvot vaihtelevat vuodesta toiseen enemmän kuin vuosikeskiarvot. Talvikuukausien vaihtelut ovat huomattavasti suurempia kuin kesäkuukausien ja marraskuun vaihtelut.

Kymmenen rannikkoaseman kuukausikeskinopeuksista lasketut hajonnat ovat kesällä yleensä noin 13 % pitkän ajan kuukausikeskiarvosta (kaikilla asemilla alle 20 %) ja talvella 20 %. Helmikuun kuukausikeskinopeudet vaihtelevat eniten: keskihajonta ylittää 20 % lähes kaikilla rannikon asemilla. Tähän lienee syynä se, että vaikka talvikuukaudet ovat usein hyvin tuulisia, keskitalvella saattaa esiintyä pitkiä, tyyniä korkeapaineita, jotka pudottavat tuotannon hyvinkin alas.

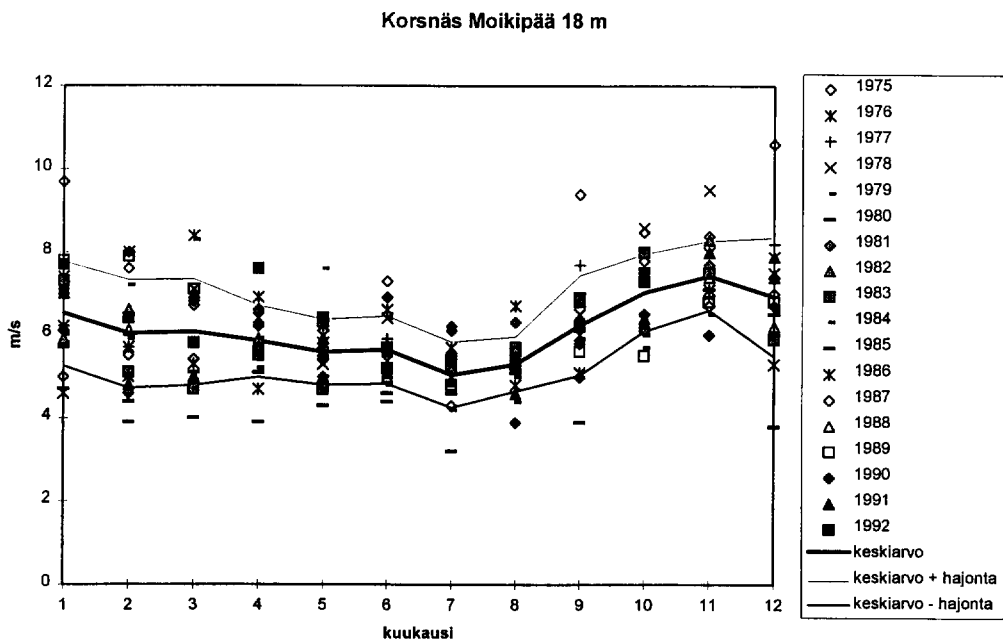
Useimpien rannikkoasemien kuukausituulennopeudet pysyvät  $\pm 20$  %:n sisällä keskiarvosta kesäkuukausina sekä marraskuussa. Talvikuukausina puolestaan  $\pm 40$  %:in raja ylittyy useamman aseman kohdalla. Suurimmat yksittäiset vaihtelut olivat helmikuulta: -53 % ja +87 % helmikuun pitkän ajan keskiarvosta.

Suurimmat vaihteluvälit löytyvät Korsnäsän, Kotkan, Kumlingen ja Hailuodon asemilta ja pienimmät vaihtelut Hangon, Helsingin, Kustavin ja Porin asemilta. Kuukausitasolla suurimmat vaihtelut löytyvät samoilta sääasemilta, joilla vuosittaisen keskinopeuden vaihtelut ovat olleet suurimpia. Poikkeuksen tekee Hailuoto, jossa kuukausikeskinopeuksien vaihteluvälit ovat suuremmat kuin monilla muilla asemilla, vaikka vuosikeskinopeuksien vaihtelut ovat muita sääasemia pienemmät.

Hailuoto Marjaniemen ja Korsnäs Moikipään mitatut tuulennopeudet verrattuna koko ajanjakson keskiarvoihin ja keskihajontoihin esitetään kuvissa 9 ja 10 kuukausittain. Muilta sääasemilta vastaavat kuvat esitetään liitteessä 1.



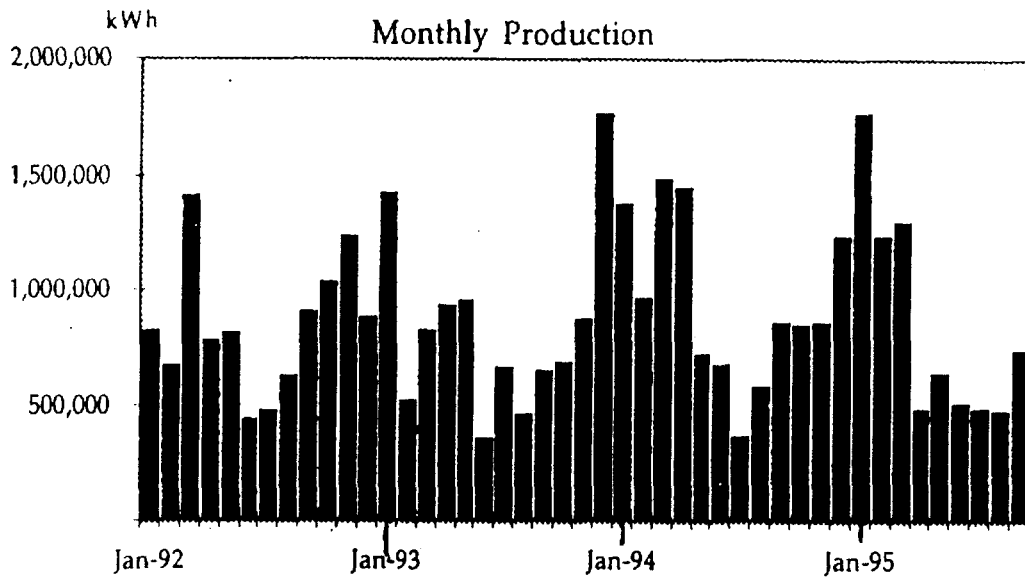
Kuva 9. Mitatut kuukausikeskituulennopeudet sääasemalta Hailuoto Marjaniemi verrattuna mittausjakson keskiarvoon, ja hajonnan perusteella lasketut vaihteluvälit.



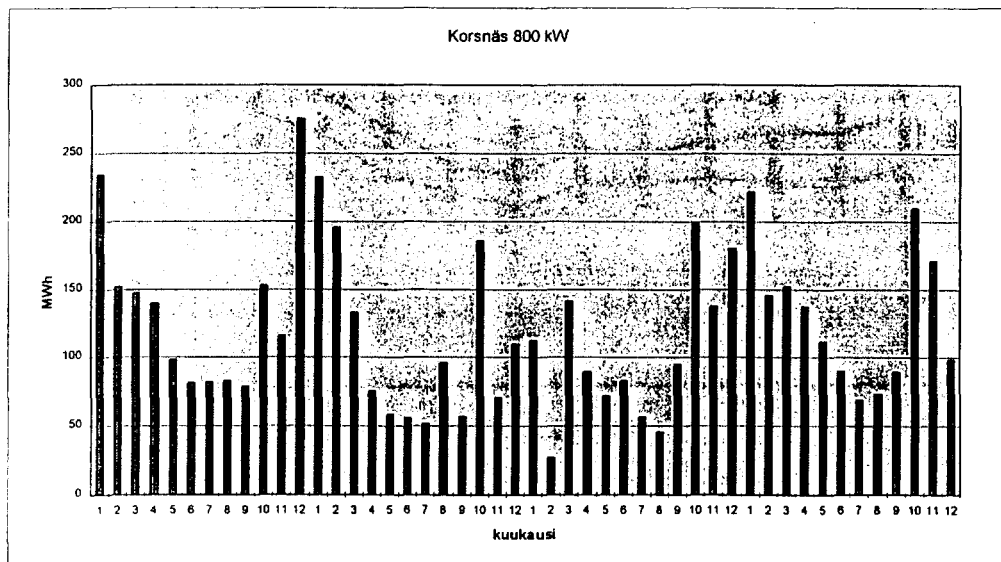
Kuva 10. Mitatut kuukausikeskituulennopeudet sääasemalta Korsnäs Moikipää verrattuna mittausjakson keskiarvoon, ja hajonnan perusteella lasketut vaihteluvälit.

## 4.2 TUULIVOIMAN TUOTANTO

Tuulivoimalaitosten kuukausituotanto vuosina 1992 - 95 Delabolessa, Walesissa, sijaitsevalle tuulipuistolle ja Korsnäsän tuulipuistolle esitetään kuvissa 11 ja 12.



Kuva 11. Kuukausittainen tuotanto Delabolen tuulipuistossa vuosina 1992 - 1995 (10 kpl 400 kW:n laitoksia, MILBORROW, 1995).



Kuva 12. Kuukausittainen tuotanto Korsnäsän tuulipuistosta (4 kpl 200 kW:n laitoksia) vuosilta 1992 - 1995.

Englannissa vuosi 1992 oli heikkotuulisempi kuin seuraavat vuodet, Suomessa taas päinvastoin. Kuvista on nähtävissä suuri ero kesä- ja talvikuukausien välillä: tuulivoimatuotannosta suurin osa saadaan talvella. Talvikuukausien tuotanto voi olla jopa nelinkertainen kesäkuukausiin verrattuna. Kuukausituotannon vaihtelut eri vuosina ovat erittäin suuria. Erityisen selvästi näkyy helmikuun tuotannon laaja vaihteluväli jo tällä tarkasteluvälillä (kuva 12).

Tuulivoimalaitosten tähänastisen toiminnan perusteella tuotanto on ollut kesäkuukausina eri vuosina tasaisempaa ja talvikuukausina on ollut suuria vaihteluja tuulisuudessa. Sääasemilta mitatut kuukausikeskinopeudet tukevat tätä havaintoa: talvikuukausien tuotanto on vaikeammin arvioitavissa, ja suuria eroja tuotantoon saattaa tulla riippuen sääolosuhteista. Jos tuulisuus on tavallista huomattavasti heikompiä yhtenäkin talvikuukautena, on sillä selvä vaikutus vuoden kokonaistuotantoon; vastaavasti tuulinen talvi nostaa koko vuoden tuotantoluvun keskimääräistä paremmaksi.

#### 4.3 TUOTANNON JA KESKINOPEUDEN VÄLINEN RIIPPUVUUS

Tuulivoimalaitoksen tuotanto riippuu tuulen hetkellisestä nopeudesta tehokäyrän osoittamalla tavalla. Vaikka tuulen energiasisältö kasvaa tuulen nopeuden kolmannen potenssiin verrannollisesti, tuulivoimalaitos ei voi hyödyntää vastaavaa tehon kasvua täysimääräisesti. Voimalaitos käynnistyy yleensä noin 4 - 5 m/s tuulella. Tuulen nopeusalueella 4 - 12 m/s voimalaitoksen teho kasvaa, mutta sen jälkeen teho rajoitetaan nimellistehoon, kunnes noin 25 m/s myrskyssä voimalaitos pysäytetään (kuva 19 tehokäyrästä kohdassa 5.2.2).

Tuulivoimalaitoksen kuukausi- tai vuosituotannon ja tuulen keskinopeuden välinen riippuvuus onkin edellä mainitusta syystä johtuen lähes lineaarinen. Kuukausikeskitehon ja kuukausikeskinopeuden arvojen perusteella on tehty suoran sovitus Suomessa käytössä oleville 200 kW ja 300 kW:n voimalaitoksille.

Hailuodossa sijaitsevien kahden 300 kW:n voimalaitoksen noin vuoden käytön perusteella on sovitettu suora kuvaamaan yhteenlasketun keskitehon  $P$  riippuvuutta tuulen keskinopeudesta  $v$  (yhtälö 1, HOLTINEN et al. 1994).

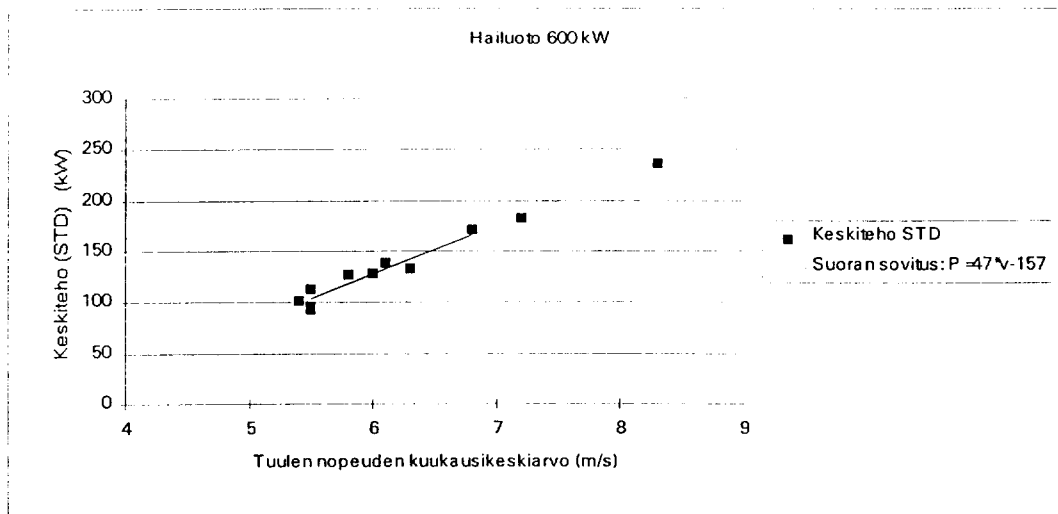
$$\bar{P}_{STD} = 47 \frac{kW}{m/s} v - 157 kW \quad (1)$$

Vastaavasti Korsnäsin 200 kW:n voimalaitokset ovat tuottaneet energiaa kuukausikeskitecholla, jota voidaan arvioida kuukausikeskinopeuden suhteen yhtälöllä 2 (HOLTTINEN & PELTOLA, 1994). Hailuodon tapauksessa tehoarvot on korjattu vastaamaan normaaliolosuhteita (tarkemmin kohdassa 5.2.2), koska laskuissa käytetyllä ajanjaksolla oli erittäin kylmiä kuukausia. Korsnäsin tapauksessa vastaava korjaus ei ollut tarpeen.

$$\bar{P} = 71 \frac{kW}{m/s} v - 245 kW \quad (2)$$

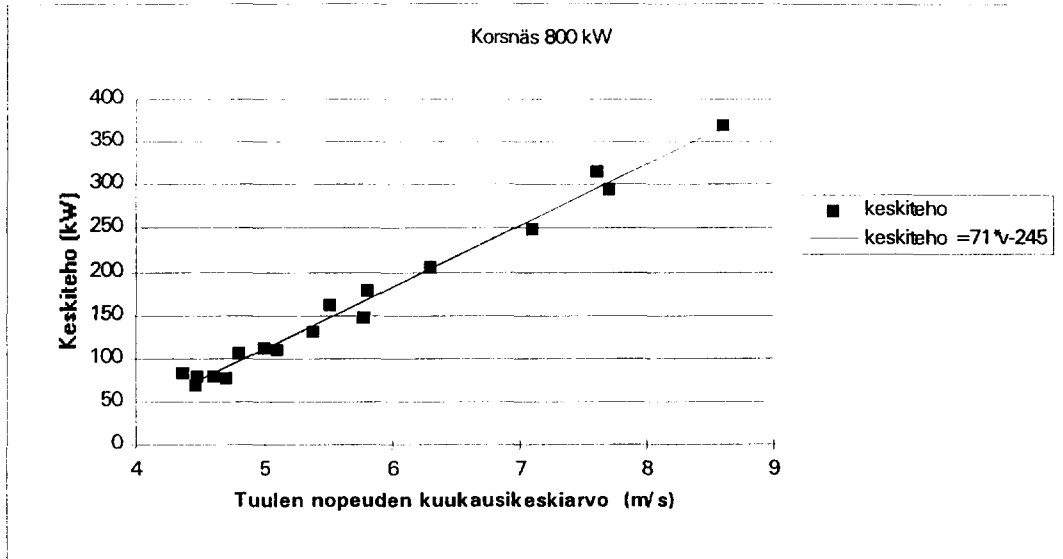
missä P on 4 x 200 kW:n voimalaitosten yhteistehon kuukausikeskiarvo.

Yhtälöt 1 ja 2 sekä niiden pohjana oleva aineisto on piirretty myös kuviin 13 ja 14. Kuukausituotannon ja tuulenopeuden kuukausikeskiarvon välillä oleva riippuvuus näyttää olevan lineaarinen ainakin välillä  $4,5 \text{ m/s} < v < 9 \text{ m/s}$ .



Kuva 13. Hailuodon 2 x 300 kW:n tuulipuiston kuukausikeskitheho standardiolosuhteissa kuukausikeskinopeuden funktiona sekä pisteiden perusteella tehty suoran sovitus.





*Kuva 14. Korsnäsin 4 x 200 kW:n tuulipuiston kuukausikeskiteho kuukausikeskinopeuden funktiona sekä pisteiden perusteella tehty suoran sovitus.*

## 5 KUUKAUDEN KESKIMÄÄRÄINEN TUULIVOIMATUOTANTO

Tuulisilla paikoilla on usein suuri kausivaihtelu eli talvikuukaudet ovat huomattavasti tuulisempia kuin kesäkuukaudet. Lisäksi on huomattu, että paikoilla, joilla kausivaihtelu on suurta, tuulen nopeus ylittää tai alittaa joinakin vuosina 10 %:lla ja jopa 15 %:lla pitkän ajan keskiarvon (BAKER et al. 1990 ja PALUTIKOF et al., 1990). Tässä luvussa käsitellään tarkemmin kausivaihtelua Suomessa.

### 5.1 KUUKAUSITUOTANTOINDEKSI TILASTOJEN PERUSTEELLA

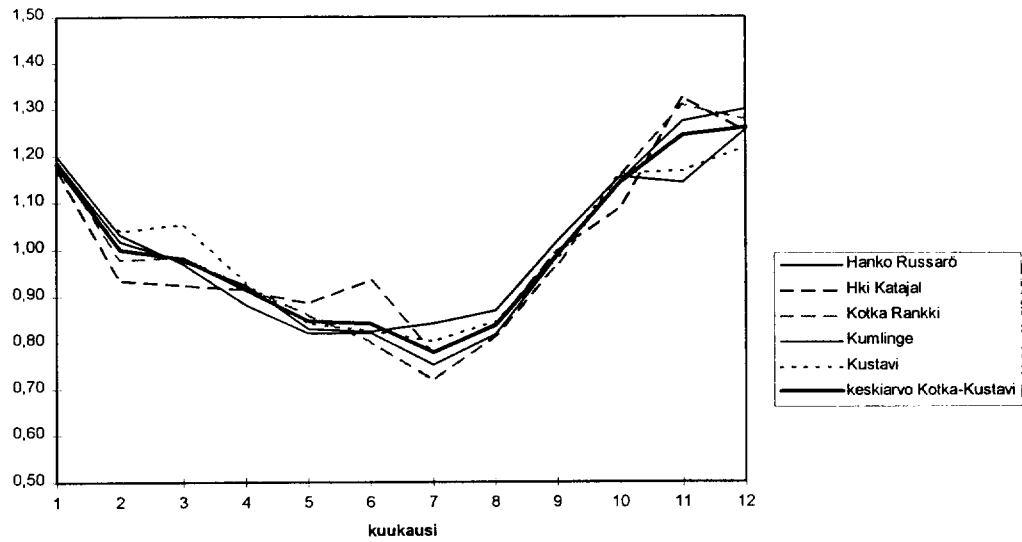
Sääasemien kausivaihteluiden kuvaamiseksi keskimääräiset kuukausituulennopeudet on esitetty suhteutettuna kunkin aseman vuosikeskinopeuteen (kuvat 15 - 16).

Suomen etelärannikon sääasemilla on nähtävissä selvä kausivaihtelu: talvikuukausina lokakuusta tammikuuhun tuulennopeudet ovat noin 20 % korkeampia kuin vuoden keskiarvo, kesäkuukausina toukokuusta elokuuhun taas 15 - 20 % alle vuosikeskiarvon. Kausivaihtelun suuruus ja jakautuminen eri kuukausille riippuu sääasemasta. Kuvassa 16 Suomen länsirannikon asemilla loka- ja marraskuu korostuvat joidenkin asemien kohdalla selvästi tuulisempina kuukausina ja kesä- ja talvikuukausien tuulennopeuksissa on pienemmät erot.

Johtaako suuri kausivaihtelu suuriin vuosittaisiin tuulennopeuden vaihteluihin? Jos näin on, etelärannikon sääasemilla pitäisi esiintyä suuremmat vaihtelut vuosittaisissa tuulennopeuksissa kuin länsirannikolla. Kumlingessa ja Kotka Rankissa onkin mitattu suurimmat vaihtelut, mutta Hanko Russarön sääasemalla puolestaan pienimmät. Vastaavasti länsirannikon Pori, Hailuoto ja Kemi edustavat pienten kausivaihteluiden ja pienten vuosittaisten vaihteluiden joukkoa, mutta Korsnäs Moikipäässä puolestaan esiintyy suuria vuosittaisia vaihteluita, vaikka keskimääräinen kausivaihtelu on pientä.

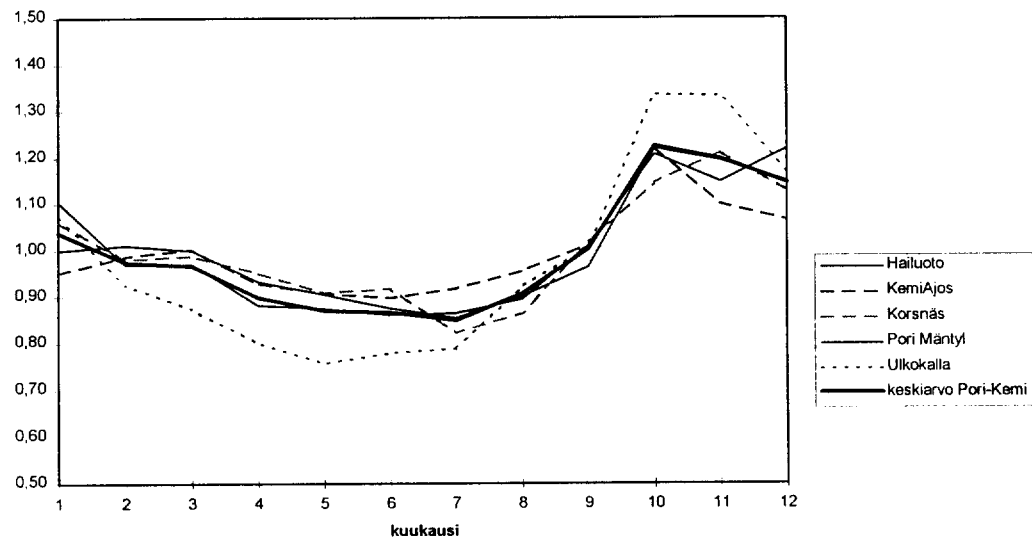
Paikalliset tuuliolot voivat erota alueen yleisistä tuulioloista huomattavastikin esimerkiksi metsän tai muiden esteiden estäessä tuulen vapaan virtauksen vallitsevilta tuulensuunnilta. Myös siirtyminen ulkosaaristosta sisäsaaristoon tai sisämaahan voi muuttaa kausivaihtelun suuruutta ratkaisevasti. Esimerkiksi Korsnäsin tuulipuiston tuotannossa on ollut selvempi kausivaihtelu kuin Korsnäs Moikipään sääaseman mittausten perusteella arvioitiin.

Tuulen kuukausikeskinopeus suhteessa vuosikeskinopeuteen



Kuva 15. Viiden Suomenlahden ja Saaristomeren sääaseman mitattu keskimääräinen kuukausituulennopeus suhteessa aseman keskimääräiseen vuosituulennopeuteen sekä näiden keskiarvo.

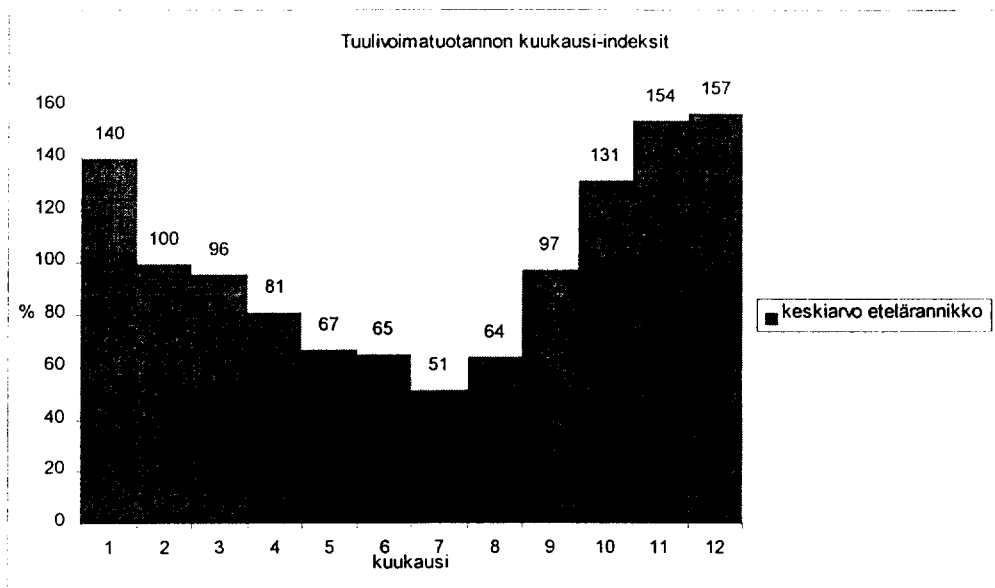
Tuulen kuukausikeskinopeus suhteessa vuosikeskinopeuteen



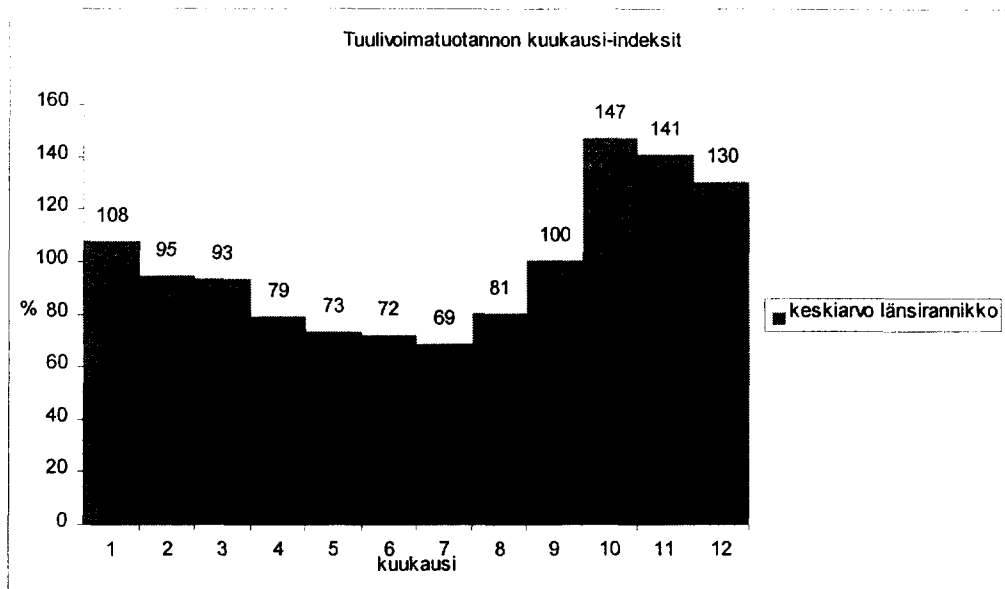
Kuva 16. Viiden Selkä- ja Perämeren sääaseman mitattu keskimääräinen kuukausituulennopeus suhteessa aseman keskimääräiseen vuosituulennopeuteen sekä näiden keskiarvo.

Tuulivoimalaitosten tuotannossa kausivaihtelu korostuu. Tuulivoimalaitosten keskimääräistä kuukausituotantoa kuvaavat indeksit on laskettu kuviin 17 ja 18. Indeksien arvo 100 merkitsee, että kuukauden tuotanto on vuosituotanto jaettuna 12:lla. Indeksit riippuvat jonkin verran tuulivoimalaitosten tehokäyristä. Nämä indeksit on laskettu 300 kW:n laitoksille käyttäen yhtälöä 1.

Kuvia 17 ja 18 voidaan käyttää tuulivoimalaitoksen tai tuulipuiston kuukausittaisen tuotannon arvioimiseen silloin, kun kohdealue on etelä- tai länsirannikolla. Toinen mahdollisuus kuukausituotantoarvion laskemiseksi on käyttää WASP-mallia seuraavassa kohdassa kuvatulla tavalla.



*Kuva 17. Tuulivoiman kuukausituotannon indeksisarja etelärannikolla laskettuna viiden sääaseman keskimääräisen kuukausituulennopeuden sekä 300 kW:n voimalaitoksen tehokäyrän mukaan.*



Kuva 18. Tuulivoiman kuukausituotannon indeksisarja länsirannikolla laskettuna viiden sääaseman keskimääräisen kuukausituulennopeuden sekä 300 kW:n voimalaitoksen tehokäyrän mukaan.

## 5.2 KESKIMÄÄRÄINEN KUUKAUSITUOTANTO WAsP-MALLIN AVULLA

WAsP-menetelmä on tarkoitettu tuulivoimalaitoksen tuotannon pitkän aikavälin vuosikeskiarvon arvioimiseen. Menetelmällä ei suoraan ole mahdollista arvioida tuotannon jakautumista eri kuukausille. Tässä luvussa käydään läpi WAsP-mallin käyttäminen siten, että saadaan arvioitua kuukausittainen tuulen keskinopeus ja tuulivoimalaitoksen tuotanto.

Jotta vuosiarvioista päästään kuukausiarvioihin, on mallin syöttötiedot muutettava vuositasolta kuukausitasolle. Käytännössä tämä tarkoittaa tuulisuustietojen eli tuuli-atlasten muokkaamista, tuulivoimalaitoksen tietojen eli tehokäyrien muokkaamista sekä jossain määrin myös maastonkuvauksen muuttamista.

Koska WAsP-malli on suunniteltu koko vuoden arvojen laskemiseen, pitäisi mallia muuttaa myös meteorologisten parametrien (stabiilisuus, lämpövuoto ym.) osalta laskehtaessa kuukausittaisia arvioita. Tämä vaatisi mallin kehittäjien panostusta asiaan. Tässä on yritetty saada käsitystä kuukausittaisesta tuulisuudesta niillä työkaluilla mitä käytettävissä on ollut.

### 5.2.1 Kuukausittainen atlastiedosto

Kuukausittaiset tuuliatlakset saadaan muokkaamalla Suomen tuuliatlaksen tiedostoa Weibull-parametrien osalta.

Tuulen nopeusjakauma kuvataan WASP-menetelmässä Weibull-jakauman avulla (yhtälö 3, jakauman arvo nopeudella  $v_x$  kertoo, millä todennäköisyydellä nopeus on suurempi kuin  $v_x$ ). Tuuliatlas sisältää Weibull-jakauman parametrit A ja k eri korkeuksilla ja maastoluokissa (sääasemaa ympäröivästä maastosta puhdistetut arvot). Tuulen suuntajakauma ilmoitetaan 30 asteen sektoreittain prosentteina (suoraan sääasemalla mitattu suuntajakauma).

$$F(v > v_x) = 1 - e^{-\frac{v_x^k}{A}} \quad (3)$$

Suomen tuuliatlas sisältää tietoa myös tuulennopeuden kuukausijakaumista. Näiden avulla on mahdollista saada selville Weibull-jakauman parametrit A ja k kuukausitasolla. Tämän jälkeen kuukausittainen tuuliatlas saadaan kertomalla tuuliatlaksen Weibull-parametrit kuukausittaisten ja vuosittaisten parametrien suhteella (yksityiskohtaisempi selostus tuuliatlasten muokkauksesta on liitteessä 2).

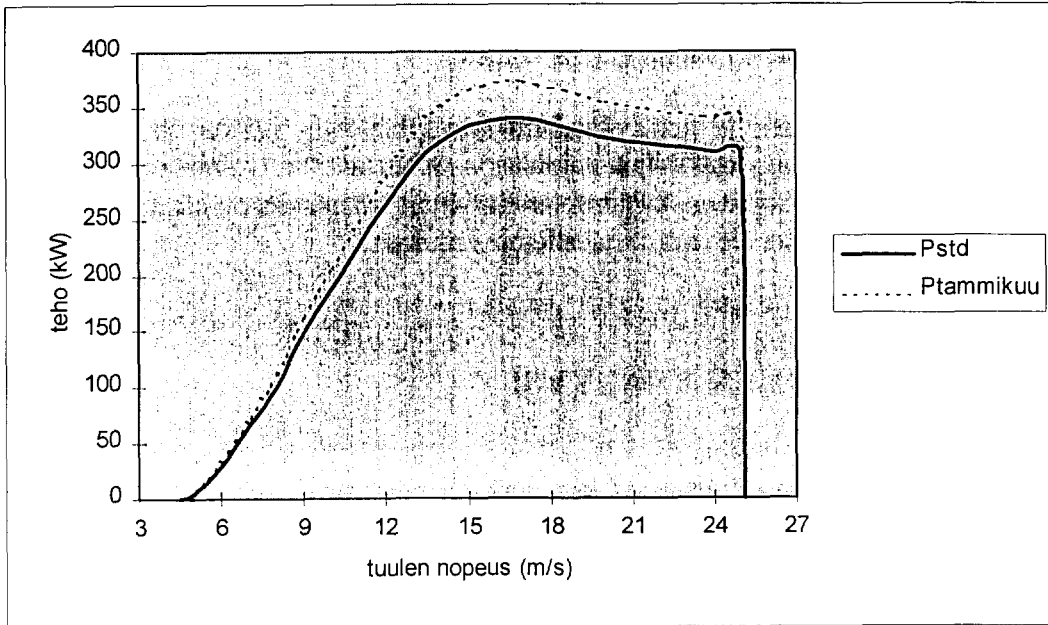
### 5.2.2 Kuukausittaiset tehokäyrät

WASP-malli käyttää tuulivoimalaitoksen tuotannon arviointiin tehokäyriä. Tehokäyrä ilmoittaa keskimääräisen tehon tuulennopeuden funktiona (kuva 19, yleensä 10 minuutin keskiarvojen perusteella laskettu käyrä).

Tuulivoimalaitoksen teho riippuu tuulennopeuden ja roottorin pyörähdyspinta-alan lisäksi myös mm. ilman tiheydestä. Ilman tiheys puolestaan riippuu lämpötilasta ja ilmanpaineesta. Mitä kylmempää ilma on ja mitä suurempi ilmanpaine, sitä enemmän tuulivoimalaitos tuottaa.

Tehokäyrät ilmoitetaan yleensä standardiolosuhteissa (lämpötila +15 °C, ilmanpaine 1 013,3 mbar). Suomen oloissa standardiolosuhteet toteutuvat yleensä vain kesäkuukausina. Talvikuukausina (lämpötilan ollessa pakkasen puolella) on saksissa säättöisen tuulivoimalaitoksen tehontuotto noin 10 % suurempi kuin standardiolosuhteissa. Lapakulmasäättöisillä laitoksilla ilman tiheys ei kasvata tehoa nimellistehon yläpuolella, joten kylmästä ilmasta aiheutuva tehon lisäys on pienempi. Ilmanpaineen vaihtelut eri kuukausina vaikuttavat merkittävästi tehokäyriin vain silloin, kun ollaan satojen metrien korkeudella merenpinnasta.

Kun tiedetään kuukauden keskimääräinen lämpötila ja ilmanpaine, saadaan korjattua tehokäyrä joka kuukauden keskimääräisiä olosuhteita vastaavaksi (FRANDSEN & PEDERSEN, 1990).



Kuva 19. Sakaussäätöisen tuulivoimalaitoksen (Nordtank 300 kW) tehokäyrä standardiolosuhteissa (+15 °C, 1 013 mbar) ja Kemin keskimääräisen tammikuun olosuhteissa (-12 °C, 1 011 mbar, HEINO & HELLSTEN, 1983).

### 5.2.3 Maaston rosoisuuden vaihtelu

Maasto kuvataan WAsP-mallille rosoisuusparametrien avulla. Avoimilla alueilla tämä parametri on pieni, ja se kasvaa sitä suuremmaksi mitä enemmän maasto jarruttaa tuulta.

Maasto vaihtelee eri vuodenaikoina lähinnä lehtipuiden ja meren osalta. Suurin vaikutus tuulisuutta arvioitaessa on meren jääpeitteellä, jolloin rosoisuus kasvaa avoimen meren 0,0002 m:stä jään 0,001 m:iin.

Tässä työssä on käytetty kahta eri rosoisuuskuvausta, kesäkaudelle avoimen meren rosoisuusparametria (esim. Korsnäsissa Vaasan lähellä huhtikuusta lokakuuhun) ja talvikaudelle jään rosoisuusparametria (esim. Korsnäsissa marraskuusta maaliskuuhun).

## 6 VUOSI- JA KUUKAUSITUOTANNON VAIHTELUN ARVIOIMINEN

Tässä luvussa lasketaan kuukausittaista tuulivoimatuotannon vaihtelua pitkän ajan kuukausituulennopeuksien vaihteluun perustuen.

Kuukausikeskinopeuden ja tuulivoimalaitoksen keskitehon välistä yhteyttä käyttämällä voidaan arvioida keskitehon hajontaa ja sitä kautta tuulivoimalaitoksen kuukausituotantolukujen hajontaa. Sääasemien keskituulennopeudet on käsitelty 10 - 20 vuoden ajalta saatavissa olevien mittaustietojen mukaan.

### 6.1 TILASTOLLINEN ANALYYSI

Keskimääräisen kuukausituotannon keskihajonta voidaan laskea yhtälön 4 avulla kuukauden keskinopeuden hajonnan suhteen (PELTOLA & ROUVALI, 1991):

$$\begin{aligned}\bar{E} &= (a\bar{v} + b)T \\ \sigma_E &= \sigma_v aT\end{aligned}\tag{4}$$

missä a ja b ovat vakioita yhtälöistä 1 ja 2 ,  
v tuulen kuukausikeskinopeus,  
E voimalaitoksen keskimääräinen kuukausituotanto,  
 $\sigma_v$  tuulen nopeuden keskihajonta  
 $\sigma_E$  kuukausituotannon keskihajonta ja  
T kuukauden tuntien lukumäärä.

Sääaseman tuulennopeuksien perusteella arvioituja keskimääräisiä teho- ja tuotantolukuja ei voida sellaisenaan soveltaa tuulivoimalaitoksen sijoituspaikalle, ellei sijoituspaikka satu sijaitsemaan aivan sääaseman välittömässä läheisyydessä ja sääaseman tuulennopeus ole mitattu lähellä tuulivoimalaitoksen napakorkeutta. Tämän vuoksi on olemassa menetelmiä, joilla saadaan arvioitua erilaisen maaston ja eri korkeuden aiheuttamat erot tuulennopeuteen ja sitä kautta tuotantoon, esim. WASP.

Tuulen kuukausikeskinopeuden suhteellinen hajonta oletetaan samaksi laajemmalla alueella. Tuulennopeuden hajonnasta lasketun tuotannon hajonnan perusteella voidaan sijoituspaikalle arvioida keskimääräisen kuukausituotannon vaihteluväliä.



### 6.1.1 Esimerkkejä

Taulukkoon 2 on yhtälön 4 perusteella arvioitu 2 x 300 kW:n tuulivoimalaitosten vuo-situotannon hajontaa. Tuulen keskinopeuden hajonta on laskettu saadusta tilastoaineistosta (Taulukko 1), ja 300 kW:n voimalaitoksen tuotannon hajonta on laskettu käyttämällä yhtälöä 1 tilastoaineiston kuukausikeskinopeuksille ja laske-malla edelleen vuosikeskitehojen keskiarvo ja keskihajonta. Taulukosta 2 nähdään, että tuulen keskinopeuden keskihajonnan 5 - 15 %:n vaihtelut merkitsevät tuulivoi-malaitoksen tuotannossa 10 - 30 %:n hajontaa.

*Taulukko 2. Tuulivoimatuotannon keskihajonta eri paikkakunnilla (2 x 300 kW:n voimalaitoksille).*

Sääasema	Mittarin korkeus (m)	Tuulen nopeuden vuosikeskiarvon keskihajonta (%)	Tuulivoimalaitoksen vuosituotannon keskihajonta (%)
Kotka Rankki	20	11	30
Helsinki Katajaluoto	10	9,0	20
Hanko Russarö	15	4,8	11
Kumlinge	35	14	26
Kustavi Isokari	23	8,3	16
Pori Mäntyluoto	16	6,3	10
Korsnäs Moikipää	18	9,3	21
Ulkokalla	18	8,6	16
Hailuoto Marjaniemi	29	6,8	14
Kemi Ajos	25	7,4	17

Taulukkoon 3 on laskettu kuukausituotannon hajonnat Hailuodossa. Kun verrataan suhteellisia hajontoja eri kuukausina, huomataan, että Hailuodon tapauksessa pienimmät hajonnat ovat heinä- ja elokuussa ja suurimmat helmi- ja maaliskuussa. Tuotannon suhteellinen vaihtelu on noin kaksinkertainen verrattuna tuulen keskinopeuden vaihteluun.

Yhdeksän muun rannikon sääaseman tuulennopeusarvojen perusteella lasketut keskihajonnat ovat liitteessä 3. Suurimmat hajonnat esiintyvät yleensä tammikuusta maaliskuuhun ja pienimmät kesäkuukausina sekä marraskuussa. Kesäkuukaudet ovat siis lähes aina heikkotuulisia, ja marraskuussa tuulee lähes aina paljon.

Taulukko 3. Hailuoto Marjaniemi, 11 vuoden kuukausikeskinopeuksien keskiarvot ja hajonnat sekä näiden perusteella lasketut 300 kW:n tuulivoimalaitoksen keskimääräiset kuukausituotannot ja tuotantojen keskihajonnat.

Kuukausi	Keskinopeus (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Keskihajonta/keskinopeus	Keskimääräinen tuotanto (MWh)	Tuotannon keskihajonta (MWh)	Keskihajonta/keskimääräinen tuotanto
tammi	6,6	1,49	0,23	57	26	0,46
helmi	6,7	2,00	0,30	52	32	0,60
maalis	6,6	2,06	0,31	57	36	0,63
huhti	6,2	0,76	0,12	48	13	0,27
touko	6,0	1,03	0,17	46	18	0,39
kesä	5,8	1,08	0,19	41	18	0,44
heinä	5,6	0,52	0,09	40	9	0,23
elo	5,9	0,61	0,10	45	11	0,24
syys	6,4	1,18	0,19	51	20	0,39
loka	8,0	1,70	0,21	82	30	0,36
marras	7,9	0,86	0,11	77	14	0,19
joulu	7,6	1,85	0,24	74	31	0,44

## 6.2 TUOTANTOARVION LUOTETTAVUUSVÄLI JA TUOTANON VAIHTELUVÄLI

Yksittäisille kuukausituotannon arvoille voidaan määrittää vaihteluvälit, joiden sisällä tuotanto todennäköisesti pysyy eri vuosina. Lisäksi voidaan muodostaa luotettavuusväli keskimääräisen kuukausituotantoarvion hyvyyden mittaamiseksi.

Keskimääräisen kuukausituotantoarvion luotettavuusväli saadaan muodostettua tuulen keskinopeuksien hajonnan avulla hyödyntäen tuulen keskinopeuden ja kuukausituotannon lineaarista yhteyttä (yhtälöt 1 - 2):

$$E = \bar{E} \pm 1,64 \cdot \frac{\sigma_E}{\sqrt{n_v}} \quad (5)$$

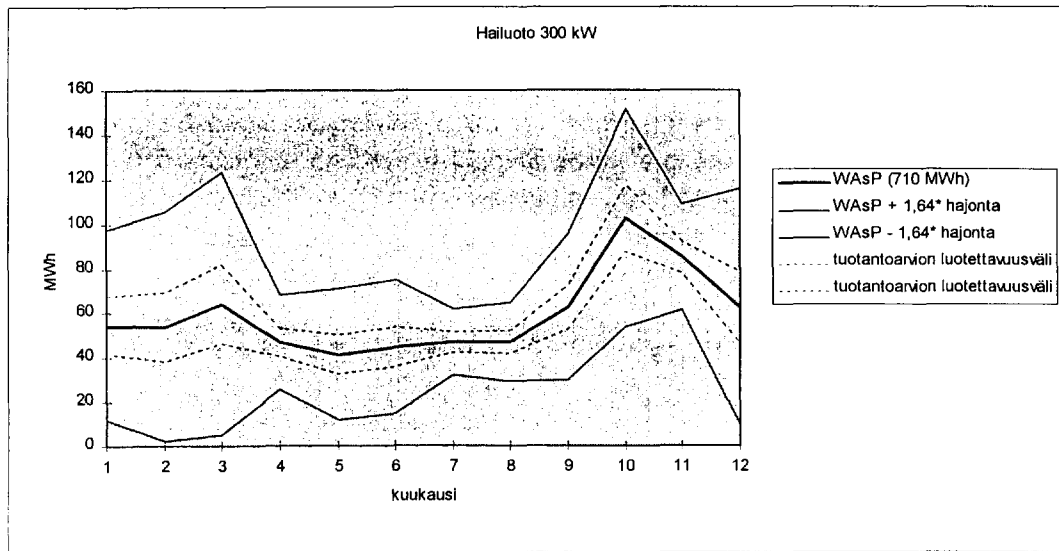
missä  $E$  on kuukauden keskituotanto,  $\sigma_E$  on keskituotannon keskihajonta (laskettu yhtälön 4 avulla kuukausituulenopeuksien keskihajonnasta), ja  $n_v$  on tilastovuosien lukumäärä (WADSWORTH, 1990).

Yksittäisen vuoden kuukausituotannoille puolestaan voidaan laskea vaihteluväli, jonka sisällä 90 % tuotantoarvoista on:

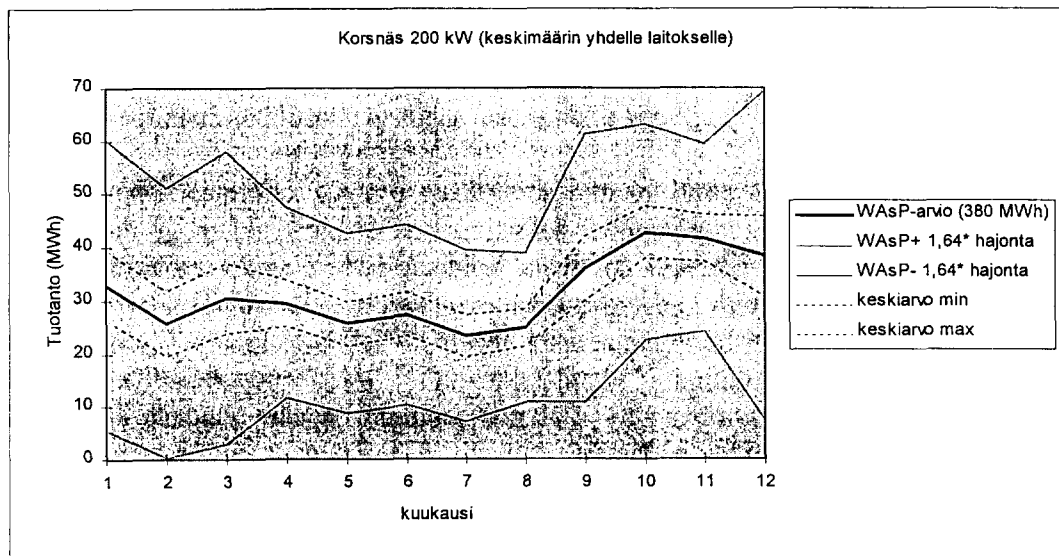
$$E = \bar{E} \pm 1,64 \cdot \sigma_E \quad (6)$$

Yhtälöissä 5 ja 6 on oletettu, että eri vuosien kuukausikeskinopeudet ovat normaali-jakautuneita ja mitattujen tuulenopeusarvojen perusteella tiedetään jakauman hajonta ja keskiarvo. Tuulen keskinopeuden muuttaminen tehoksi aiheuttaa epävarmuutta, jota tässä ei ole otettu huomioon.

Hailuodon ja Korsnäsän kuukausittaiset tuotantoarviot sekä niille lasketut luotettavuus- ja vaihteluvälit on esitetty kuvissa 20 ja 21.



Kuva 20. Hailuoto Marjaniemen tuulivoimalaitoksen tuotantoarvio, keskimääräiselle tuotannolle laskettu luotettavuusväli sekä yksittäisille kuukausituotantoluville laskettu vaihteluväli.



Kuva 21. Korsnäsän tuulivoimalaitoksen tuotantoarvio, keskimääräiselle tuotannolle laskettu luotettavuusväli sekä yksittäisen kuukauden tuotannolle laskettu vaihteluväli.

Hailuodon ja Korsnäsin tapauksissa keskiarvon luotettavuusväli on eri kuukausina  $\pm 8 - \pm 29$  % eli samaa suuruusluokkaa kuin WAsP-mallin virhearvio. Vaihteluvälit ovat  $\pm 30 - \pm 100$  % keskimääräisestä kuukausituotannosta.

Tapauksissa, joissa vaihteluväli lähestyy  $\pm 100$  %:a, ei tilastollinen menetelmä anna enää oikeaa kuvaa tuulivoimatuotannon käyttäytymisestä. Vaikka kuukauden keskituulennopeus olisikin alle tuulivoimalaitoksen kynnystuulennopeuden, esim. 4 m/s, on kuukauden aikana todennäköisesti aina joitakin jaksoja, jolloin tuulen nopeus ylittää 4 m/s ja tuulivoimalaitos tuottaa sähköä. Yhtälön 6 avulla voi siis arvioida yksittäisen kuukauden vaihteluvälejä vain tapauksissa, joissa keskihajonta ei ole suuri verrattuna keskiarvoon, ja tämä raja näyttää ylittyvän tuulivoimatuotannon tapauksessa joidenkin sääasemien joidenkin kuukausien kohdalla. Esimerkiksi helmikuun tapauksessa, kun tuotannon alarajaksi saadaan yhtälöstä 6 lähes nolla, tuotantoa on käytännössä mahdoton ennustaa.

### 6.3 WEIBULL-JAKAUMAN SOVITUKSEEN LIITTYVÄ EPÄ-TARKKUUS

Tässä luvussa käsitellään mahdollisuutta kytkeä WAsP-malliin myös kuukausituotannon vaihteluvälien laskeminen.

Arvioitaessa tuulennopeuden keskiarvoa sijoituspaikalle käytetään lähtötietona pitkän aikavälin tuulennopeusmittauksia sovitettuna Weibull-jakaumaksi (yhtälö 3). Weibull-jakauma ei huomioi tyyniä tilanteita ja tavallisesti yliarvioi pienimpien tuulennopeuksien osuuden. Se myös tasoittaa jakauman huippua (TAMMELIN, 1991b). Jakauma kuvaa tuulennopeusjakaumaa hyvin yleensä vain suurilla tuulennopeuksilla: kun tuulennopeus on suurempi kuin 7 m/s (liitteen 2 kuva 1). Tämä on kuitenkin tuulivoimalaitoksen tuotantoa arvioitaessa juuri tärkein osa tuulennopeusjakaumaa, koska suurin osa tuotannosta saadaan suurilla tuulennopeuksilla.

Tuulennopeustietojen Weibull-jakaumasovituksen hyvyys vaihtelee riippuen siitä, miten hyvin sääaseman tuulennopeusjakauma on Weibull-jakauman muotoinen. Laskettaessa Weibull-jakauman sovitusta voidaan laskea myös luotettavuusrajat parametreille A ja k (yhtälö 3). Näiden avulla voidaan muodostaa kaksi hypoteettista jakaumaa: paljon pieniä tuulennopeuksia sisältävä ”alarajajakauma” sekä suuriin tuulennopeuksiin painottunut ”ylärajajakauma”. WAsP-menetelmällä voidaan laskea tuotantoarvot käyttäen ylä- ja alarajajakaumia, ja näin saadaan kuukausittaisille tuotantoarvioille ylä- ja alarajat.

WAsP-malliin kytketty kuukausitason arviointi vaihteluväleineen on mahdollista. Weibull-jakaumien sovituksesta lähtöisin oleva epävarmuus on luonteeltaan ja suuruusluokaltaan erilaista kuin tuulisuserot eri vuosina. Sovituksesta johtuva epävarmuus on erityisen suurta kesäkuukausina ja huomattavasti pienempää talvikuukausina ilmeisesti jakauman muodosta johtuen. Sen vuoksi heinäkuusta syyskuuhun saadaan suuremmat vaihteluvälit parametreihin ja sen kautta tuotantoarvioihin.

Tämä ei kuitenkaan kuvaa todellista tilannetta, jossa vaihtelut ovat suuria nimenomaan talvikuukausina.

Weibull-jakaumien sovitukselta johtuva epävarmuus ei anna kuvaa siitä vaihtelusta, mikä tuulenopeudella on vuodesta toiseen.

Yksi tapa saada WAsP-mallista ylä- ja alarajatuotantoja olisi ajaa mallia todellisten jakaumien mukaisesti eli huipputuulisen ja ennätystyynen kuukauden perusteella laskettujen jakaumien avulla. Yhden kuukauden mittaustietojen perusteella laskettu jakauma ei kuitenkaan välttämättä ole Weibull-jakauman muotoinen, vaikka kuukauden tuulisuus keskimäärin olisikin Weibull-jakautunut.

## 6.4 TUOTANTOARVIOT VERRATTUNA TOTEUTUNEeseen TUOTANTOON

Tuulivoimalaitoksia on tällä hetkellä Suomessa 12 paikkakunnalla. Tässä raportissa on tuotantovertailuja tehty Korsnäs ja Hailuodon tuulipuistoille. Korsnäs on ollut toiminnassa noin 5 vuotta, Hailuoto noin 3 vuotta. Arvioiden vertaaminen tuulivoimalaitosten tuotantoon on sen vuoksi ollut mahdollista vain vuosilta 1992 - 1996. Jaksolla on kaksi keskimääräistä tuulisempaa vuotta (1992 ja 1995) sekä kaksi keskimääräistä tyynempää vuotta (1993 ja 1994). Myös joulukuusta 1995 huhtikuuhun 1996 oli keskimääräistä tyynempää. Pidemmän ajan vertailuja on tehty sääasemilta mitatuille tuulenopeushavainnoille. Tässä on esitetty vertailut tilastollisten menetelmien avulla saaduille vaihteluväleille.

Kuukausittainen tuotantoarvio on tehty WAsP-menetelmällä Korsnäs ja Hailuodon ja tuulipuistoille. Korsnäs ja Hailuodon voimalaitosten keskimääräisen varjostusvaikutuksen on arvioitu alentavan tuulipuiston tuotantoa noin 7 %. Hailuoto Marjaniemessä varjostus on vähäisempää (alle 5 %). Laitosten käytettävyydet ovat olleet 95 - 99 %. WAsPilla tehtyjä arvioita on tässä pienennetty Korsnäsille 93 %:iin ja Hailuodolle 95 %:iin mallin antamista tuloksista (mallin tulokset olettavat teknisen käytettävyyden 100 %:ksi eikä lainkaan varjostusta).

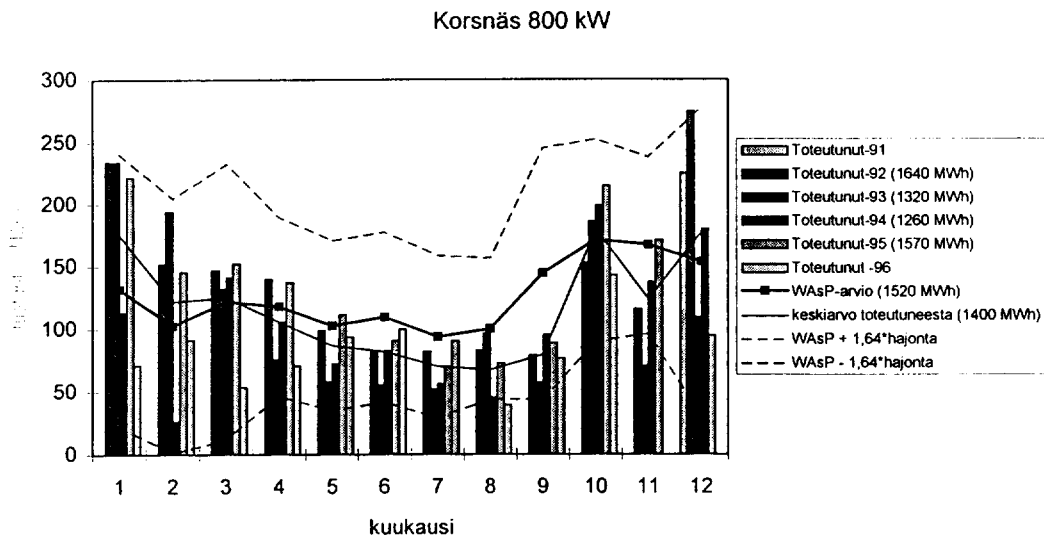
Jos oletetaan, että tiedämme sääaseman tuulenopeusmittausten perusteella kuukausikeskiarvon hajonnan ja sen, että kuukausikeskiarvot ovat normaalijakautuneita, saadaan vaihteluväliksi 1,64 kertaa keskihajonta (yhtälö 6). Tuulivoimatuotannon tapauksessa hajonta on joinakin kuukausina niin suurta, että vaihteluväliksi tulee lähes  $\pm 100$  % tuotannosta, jolloin alaraja on lähellä nollaa. Tällöin ei saada tietoa siitä, mitä tuotanto yhtenä kuukautena on. Rajat kertovat kuitenkin sen tosiasian, että joinakin kuukausina tuulivoimatuotannon vaihtelu on erittäin suurta.

## 6.4.1 Korsnäs

Seuraavassa kuvassa on esitetty Korsnäsin tuulipuiston tuotanto kuukausittain sekä kuukausituotantoarvio. Korsnäsin tuulipuiston toteutunut tuotanto osoittaa vielä selvemmin tuulivoimatuotannon painottumisen talvijaksolle kuin mitä tehty arvio. Kun talvikuukaudet ovat tuulisia, on kausivaihtelu erittäin voimakas. Tyynet talvet kuitenkin saavat toteutuneen tuotannon keskiarvon lähestymään keskimääräistä tuulisuusarviota.

Talvikuukausien liian matalat arviot saattavat johtua tuulimittausten epäluotettavuudesta jäätävissä sääolosuhteissa: mitatut tuulienopeusarvot, joihin kaikki arviot perustuvat, jäävät liian pieniksi, jos mittareissa on jäätä. Kesäkuukausien pienet tuotantoluvut voivat johtua siitä, että sääasema (Korsnäs Moikipää) on sijainnut lähempänä avomerta kuin tuulipuiston sijoituspaikka, ja kausivaihtelu voi siksi jäädä sääasemalla pienemmäksi kuin tuulipuistossa. Marraskuun liian pienet tuotantoluvut saattavat johtua siitä, että tuulivoimalaitosten lapoihin tarttuva jää pienentää ratkaisevasti tuulivoimalaitoksen sähköntuotantoa.

Korsnäsin tuulipuistolle laskettu tuotannon vaihteluväli (kuva 22) on  $\pm 42 - \pm 99 \%$  keskimääräisestä kuukausituotannosta: loka - marraskuussa alle  $\pm 50 \%$  ja helmi - maaliskuussa yli  $\pm 90 \%$ .



Kuva 22. WAsP-menetelmällä laskettu kuukausiarvio 200 kW laitoksen tuotannolle Korsnäsiin sekä Korsnäs Moikipään tuulienopeuksien hajontaan perustuvat vaihteluvälit verrattuna toteutuneeseen tuotantoon Korsnäsin tuulipuistossa (4 x 200 kW).

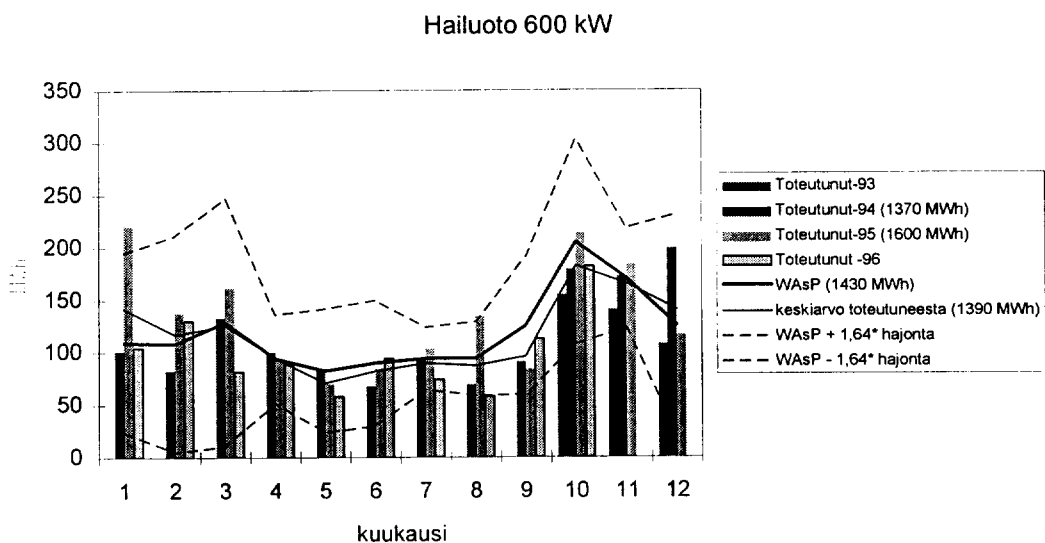
Toteutuneen kuukausituotannon vaihtelu viimeisen 5 vuoden ajalta on ollut suurimmillaan helmikuussa  $-78 \%$  -  $+60 \%$  kuukauden keskimääräisestä tuotan-

nosta, eli vaihtelu on todella suurta. Kuvan mukaan toteutunut tuotanto on pysynyt kuukausituotannolle lasketun 90 % vaihteluvälin sisällä hyvin. Vaihteluvälit näyttävät talvikuukausina olevan suhteellisen samansuuruiset kuin toteutunut vaihtelu, mutta muuten välit näyttävät suuremmilta kuin toteutunut vaihtelu. Erityisesti kesällä laskettu vaihteluväli on huomattavan suuri verrattuna toteutuneisiin tuotantolukuihin.

## 6.4.2 Hailuoto

Hailuodon kohdalla keskimääräinen tuotantoarvio näyttää kuvaavan toteutunutta tuotantoa hyvin (kuva 23). Toteutunut tuotanto vuosilta 1993 - 96 sisältää enemmän keskimääräistä tynempiä jaksoja kuin keskimääräistä tuulisempia, joten keskiarvo toteutuneesta jää alakanttiin ja todennäköisesti toteutunut tuotanto on pidemmällä aikavälillä yli arvioidun.

Vaihteluvälit ovat  $\pm 28$  -  $\pm 96$  % keskimääräisestä kuukausituotannosta: heinä-, eloj- ja marraskuussa noin  $\pm 30$  % ja helmi - maaliskuussa yli  $\pm 90$  %. Toteutunut tuotanto pysyy vaihtelujen rajoissa hyvin, mutta vaihteluvälit näyttävät joidenkin kuukausien kohdalla huomattavasti suuremmilta kuin toteutunut vaihtelu.



Kuva 23. WAsP-menetelmällä laskettu kuukausiarvio 2 x 300 kW:n laitoksen tuotannolle Hailuotoon sekä sääaseman kuukausituulennopeuksien hajontaan perustuvat vaihteluvälit verrattuna toteutuneeseen tuotantoon.

## 7 YHTEENVETO

### 7.1 TUULISUUDEN VAIHTELU

Tuulivoimatuotannon vaihteluita on tutkittu sekä pitkäaikaisten meteorologisten havaintosarjojen että tuulivoiman tuotantotilastojen perusteella. Tarkastelukohteena olivat rannikon sääasemat ja tuulivoimalaitokset, koska tunturialueilta ei ole vielä riittävästi tuulimittaus- eikä tuulivoimatuotantoaineistoa.

Tuulivoimatuotantoon liittyy selvä kausivaihtelu: talvella tuotanto on yleensä huomattavasti korkeampaa kuin kesällä. Kausivaihtelu on kuitenkin paikallinen ilmiö: tuotannon jakautuminen eri kuukausille on erilainen eri puolilla Suomea. Tarkastelun kohteena olevat sääasemat jakautuivat kausivaihtelun suhteen kahteen osaan: etelärannikolla ja Saaristomerellä talvet ovat selvästi kesiä tuulisempia, länsirannikolla puolestaan selvästi muita tuulisempia kuukausia ovat vain loka- tai marraskuu. Lisäksi erityisesti helmikuun tuotanto voi vaihdella laajoissa rajoissa.

Tuulivoimalaitosten tähänastisen toiminnan perusteella tuotanto on kesäkuukausina ollut eri vuosina tasaisempaa, ja talvikuukausina on ollut suuria vaihteluita tuulisuudessa. Sääasemilta mitatut kuukausikeskinopeudet tukevat tätä havaintoa: talvikuukausien tuotanto on vaikeammin arvioitavissa ja suuria eroja tuotantoon saattaa tulla riippuen sääolosuhteista. Jos tuulisuus on tavallista heikompaa yhtenäkin talvikuukautena, on sillä selvä vaikutus koko vuoden tuotantoon, ja vastaavasti tuulinen talvi nostaa koko vuoden tuotantoluvut keskimääräistä paremmaksi.

Tuulen nopeuden vaihtelut korostuvat tuulivoimalaitoksen tuotannossa - tuotannon suhteellinen vaihtelu (keskihajonta suhteessa keskiarvoon) on noin kaksinkertainen verrattuna tuulen keskinopeuden vaihteluihin.

Suomen rannikon sääasemien tuulennopeustietojen perusteella keskituulennopeuden vaihtelu on vuositasolla 5 - 15 % (keskihajonta suhteessa keskinopeuteen). Kesäkuukausina vaihtelu on samansuuruista kuin vuositason vaihtelu, talvella suhteelliset hajonnat ovat yli 20 %. Tuulen nopeuden vaihteluista seuraava tuulivoimalaitosten tuotannon vaihtelu on vuositasolla 10 - 30 % (hajonta suhteessa keskimääräiseen tuotantoon). Kesäkuukausina vaihtelu on alle 30 %, ja talvikuukausina suhtellinen hajonta on jopa yli 60 %.

### 7.2 KUUKAUSITTAISET TUOTANTOARVIOT JA VAIHTELUVÄLIT

Tuotannon arvioimisen menetelmiä on kehitetty siten, että nykyisen pitkän aikavälin keskimääräisen vuosituotannon lisäksi saadaan arvioitua myös keskimääräinen kuu-



kausituotanto sekä vaihteluvälit, joiden sisällä yksittäisen kuukauden tuotanto pysyy 90 %:n varmuudella.

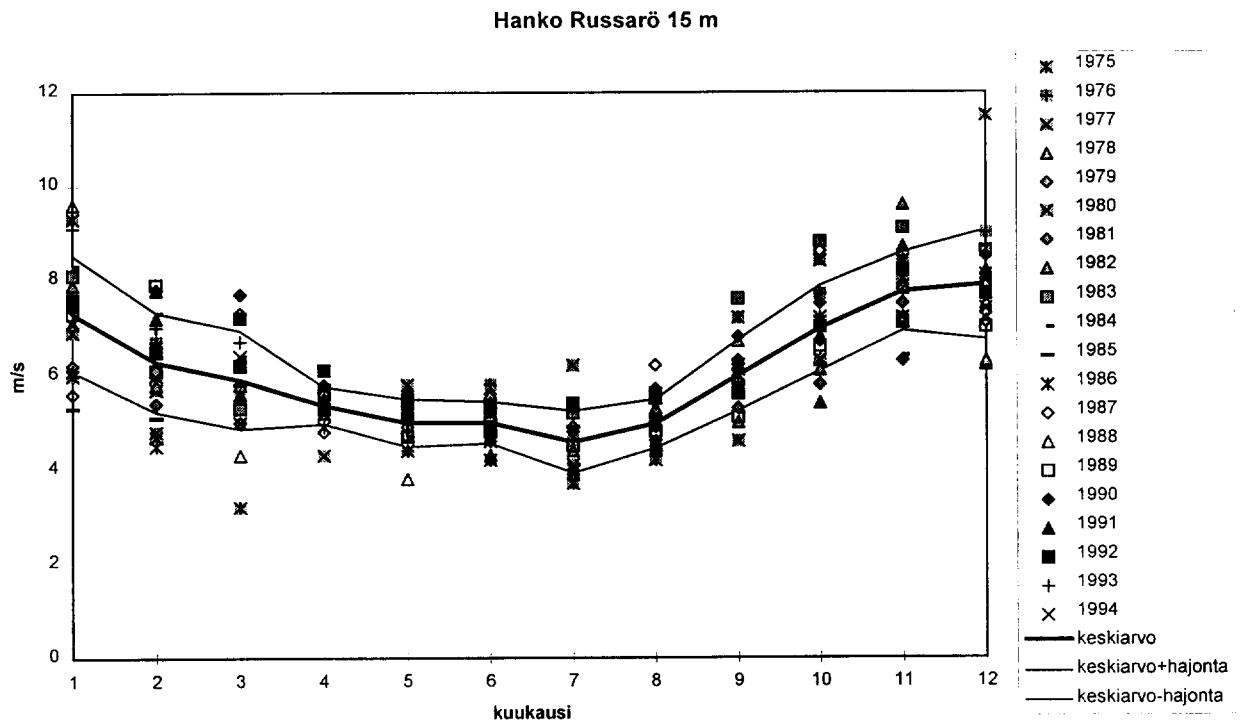
Tuulivoimalaitoksen keskimääräiselle kuukausituotannolle Suomen etelä- ja länsirannikoilla on konstruoitu indeksisarjat käyttäen hyväksi Hailuodon mittausten perusteella selvitettyä tuulivoimalaitosten kuukausituotannon ja tuulen nopeuden kuukausikeskiarvon välistä lineaarista yhteyttä. Lisäksi WAsP-menetelmää on kehitetty siten, että on mahdollista laskea keskimääräisiä kuukausituotantoarvioita halutulle sijoituspaikalle ja voimalaitostyypille.

Yksittäinen kuukausituotantoarvo pysyy 90 %:n todennäköisyydellä välillä keskiarvo  $\pm 1,64$  kertaa keskihajonta. Tuulivoimalaitoksien tuotannolle lasketut keskihajonnat ovat talvikuukausina niin suuria, että joinakin kuukausina tuotannon vaihteluväliksi tulee yli  $\pm 90$  %. Näiden yksittäisten kuukausien osalta ei 90 %:n vaihteluvälejä voi käyttää tuulivoimatuotannon arviointiin. Toteutuneen tuotannon vaihtelu viimeisen 5 vuoden ajalta vahvistaa sen, että talvikuukausina vaihteluvälit ovat erittäin suuret ja yksittäisen kuukauden tuotantoa on talvella käytännössä mahdoton ennustaa.

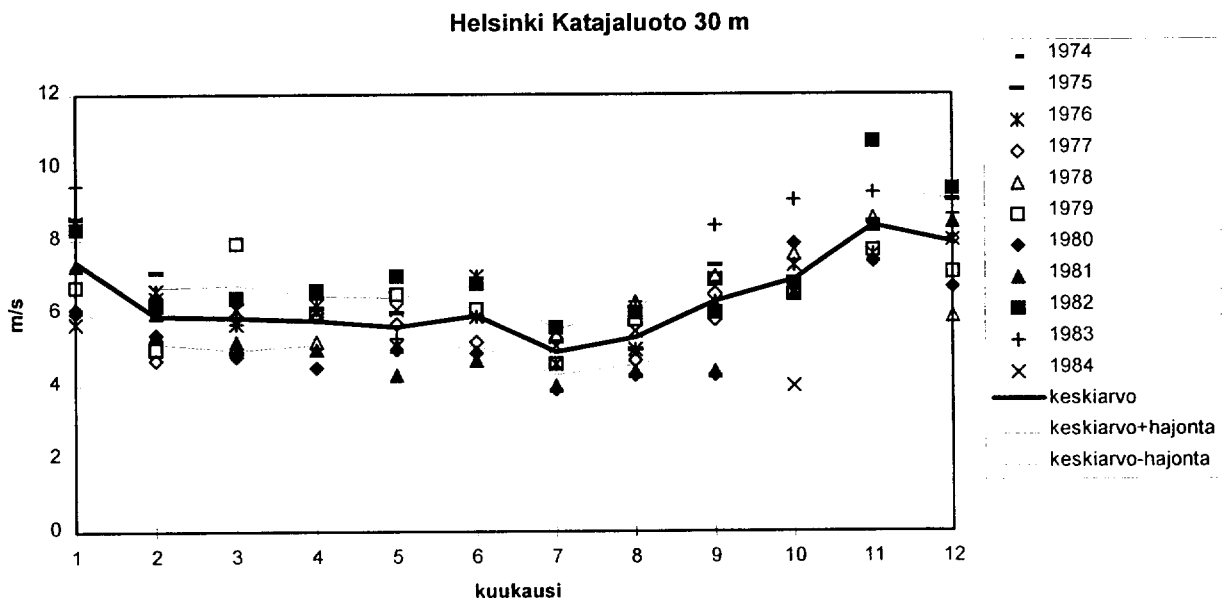
## LÄHDELUETTELO

- BAKER, R. W., WALKER, S. N., WADE, J. E. 1990. Annual and seasonal variations in mean wind speed and wind turbine energy production. *Solar Energy*, vol. 45, no. 5, s. 285 - 289.
- FRANDBSEN, S., PEDERSEN, B. M. (ed.) 1990. Recommended practises for wind turbine testing 1. Power performance testing. International Energy Agency.
- FRANDBSEN, S., CHRISTENSEN, C. J. 1992. Accuracy of estimation of energy production from wind power plants. *Wind Engineering*, vol. 16, no.5, s. 257 - 268.
- HEINO, R., HELLSTEN, E., (ed.) 1983. Tilastoja Suomen ilmastosta 1961 - 1980. Ilmatieteen laitos, Helsinki.
- HOLTTINEN, H., PELTOLA, E. 1994. Korsnäsin tuulipuiston toiminta ja mitaukset. Espoo, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1566. 52 s. + liitt. 8 s.
- HOLTTINEN, H. et al. 1994. Experiences in first Finnish wind parks. Proceedings of EWEC'94 Thessaloniki 10 - 14 October, 1994. S. 1008 - 1013.
- MILBORROW, D. 1995. Windfarm performance. *Windstat*, vol. 8, no. 4.
- PALUTIKOF, J. P. et al. 1990. Estimation of the wind resource at proposed wind turbine sites: the problems of spatial and temporal variability. Proceedings of EWEC'89 Glasgow 10 - 13 July 1989. Peter Peregrinus Ltd. S. 901 - 905.
- PELTOLA, E., ROUVALI, J. 1991. An analytical approach to probabilistic uncertainty and sensitivity analysis. Proceedings of Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems PMAPS'91, London 3 - 5 July 1991. The Institution of Electrical Engineers, London. S. 261 - 266.
- MORTENSEN, N. et al. 1993. Wind Atlas Analysis and Application Program WAsP. User's guide. Risö-I-666(EN), Risö National Laboratory, Tanska.
- TAMMELIN, B. 1991a. Suomen Tuuliatlas. Ilmatieteen laitos, Helsinki.
- TAMMELIN, B., 1991b. Meteorologista taustatietoa tuulienergiakartoitukselle. Ilmatieteen laitos, Helsinki.
- TROEN, I., PETERSEN, E. 1989. European Wind Atlas. Risö National Laboratories, Tanska.
- WADSWORTH, H. M. 1990. Handbook of Statistical Methods for Engineers and Scientists. McGraw-Hill, USA.

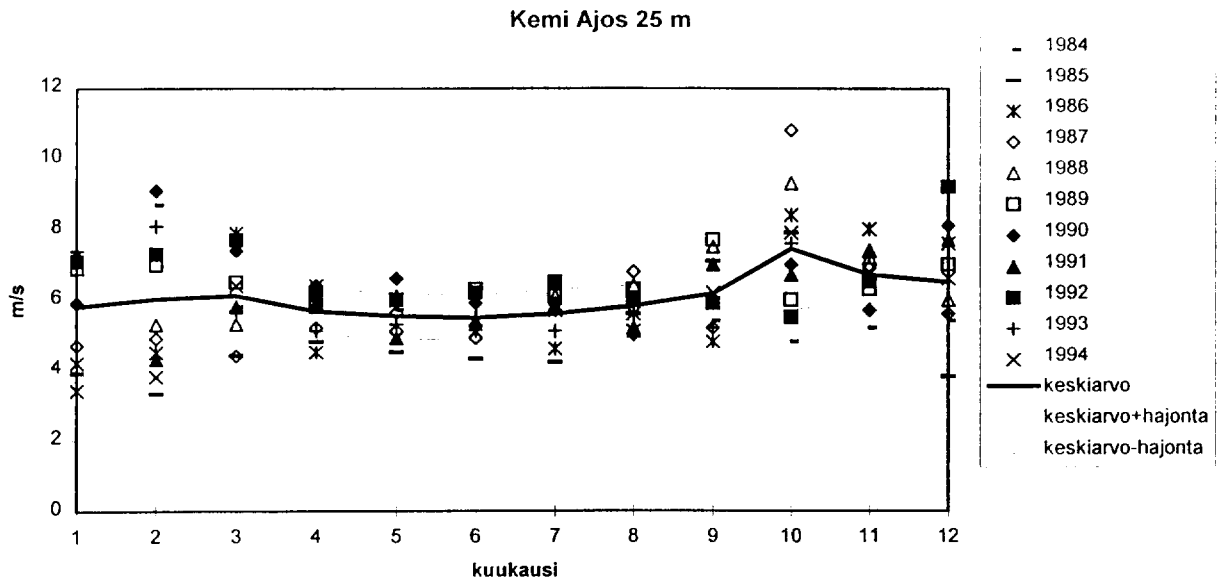
## SÄÄASEMILLA MITATUT KUUKAUSIKESKINOPEUDET



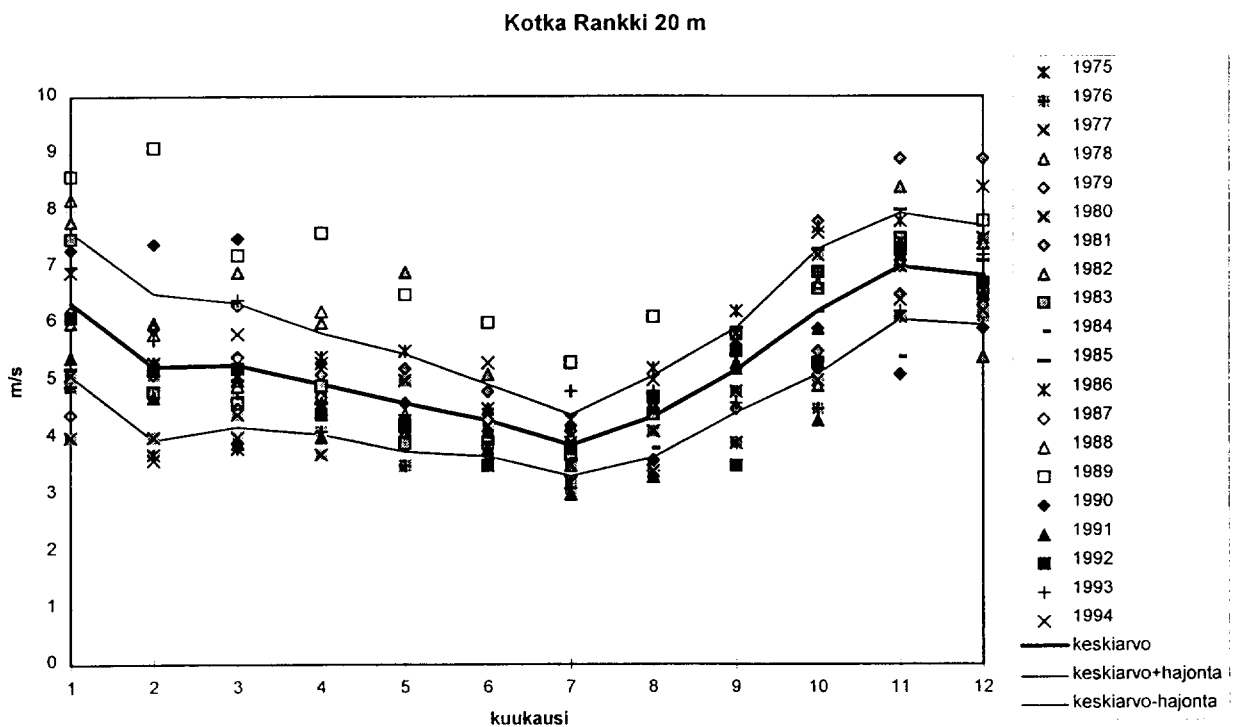
Kuva 1. Mitatut kuukausikeskituulennopeudet sääasemalta Hanko Russarö verrattuna mittausjakson keskiarvoon ja hajonnan perusteella lasketut vaihteluvälit.



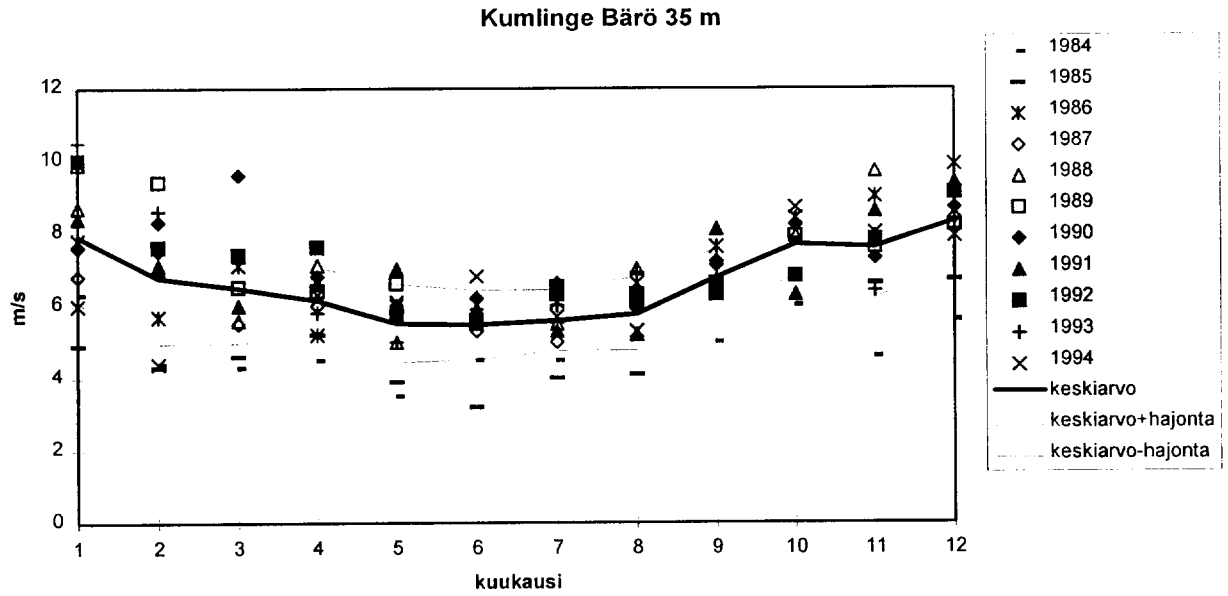
Kuva 2. Mitatut kuukausikeskituulennopeudet sääasemalta Hki Katajaluo verrattuna mittausjakson keskiarvoon ja hajonnan perusteella lasketut vaihteluvälit.



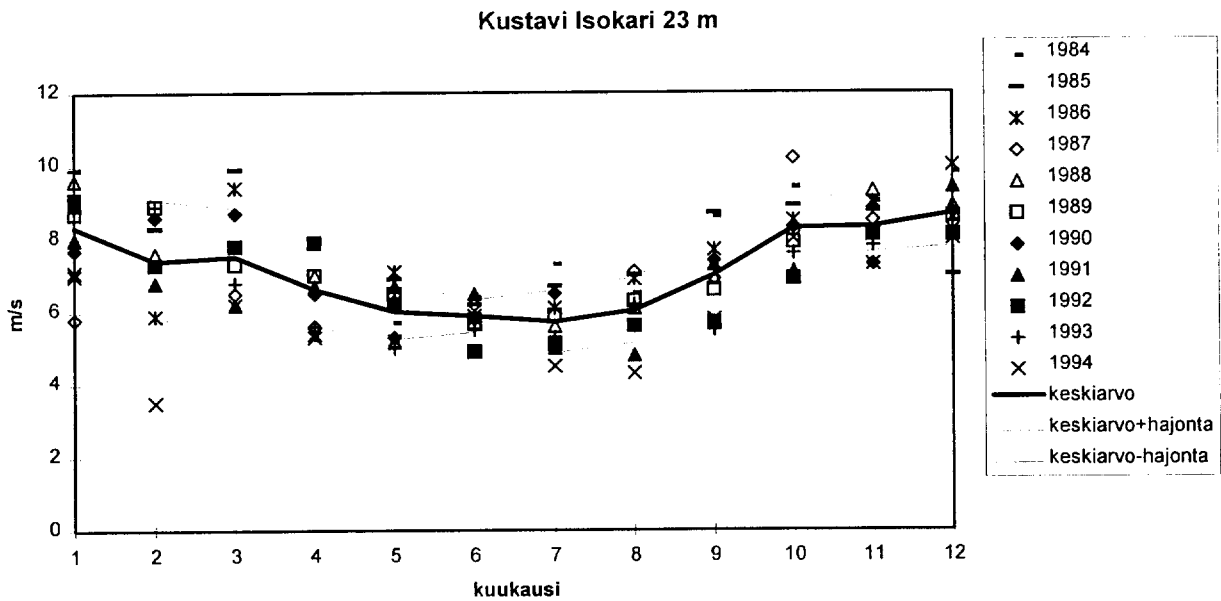
Kuva 3. Mitatut kuukausikeskituulennopeudet sääasemalta Kemi Ajos verrattuna mittausjakson keskiarvoon ja hajonnan perusteella lasketut vaihteluvälit.



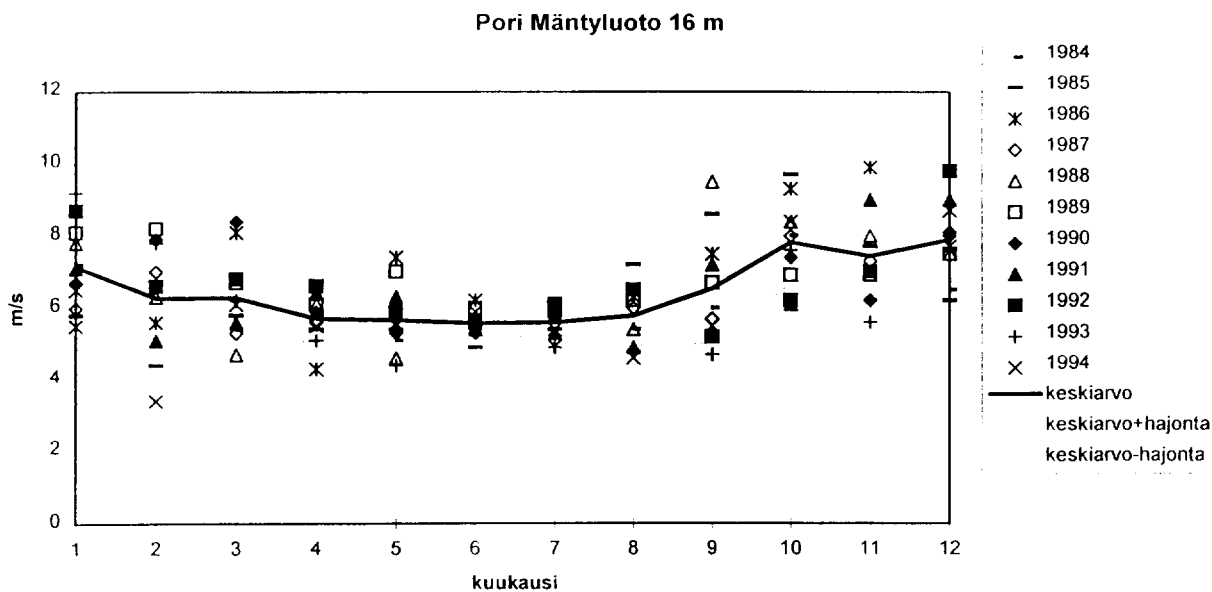
Kuva 4. Mitatut kuukausikeskituulennopeudet sääasemalta Kotka Rankki verrattuna mittausjakson keskiarvoon ja hajonnan perusteella lasketut vaihteluvälit.



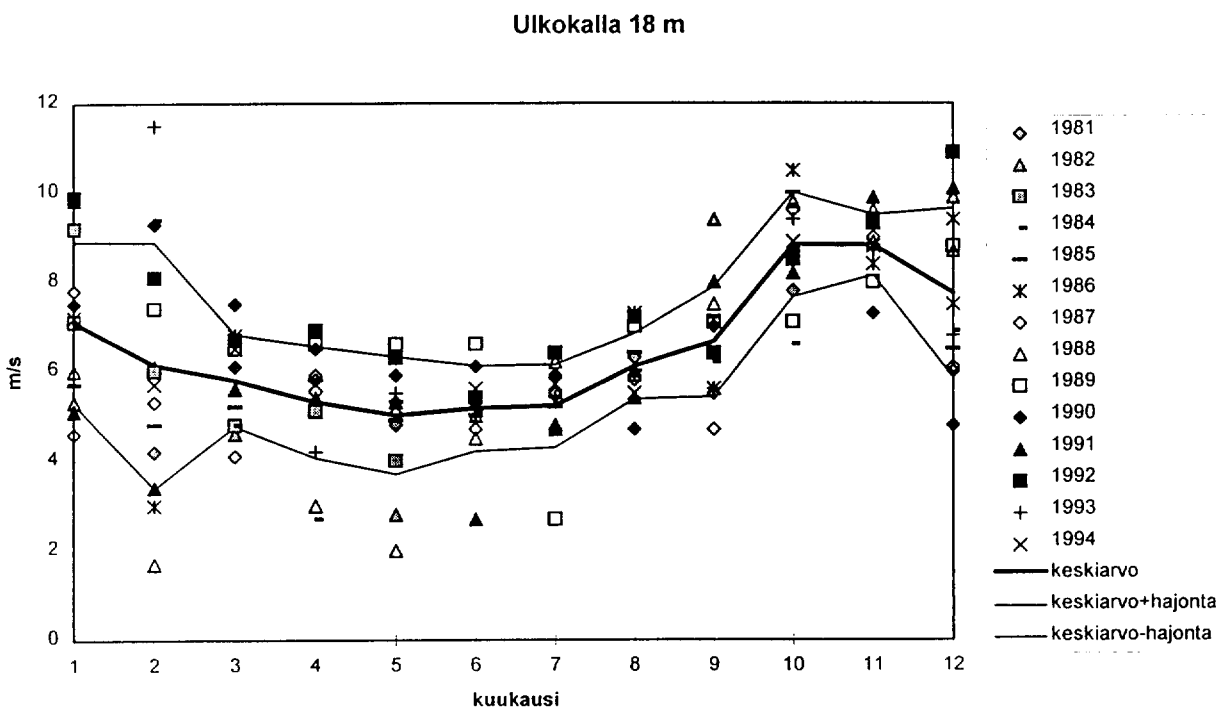
Kuva 5. Mitatut kuukausikeskituulennopeudet sääasemalta Kumlinge Bärö verrattuna mittausjakson keskiarvoon ja hajonnan perusteella lasketut vaihteluvälit.



Kuva 6. Mitatut kuukausikeskituulennopeudet sääasemalta Kustavi Isokari verrattuna mittausjakson keskiarvoon ja hajonnan perusteella lasketut vaihteluvälit.



Kuva 7. Mitatut kuukausikeskituulennopeudet sääasemalta Pori Mäntyluoto verrattuna mittausjakson keskiarvoon ja hajonnan perusteella lasketut vaihteluvälit.



Kuva 8. Mitatut kuukausikeskituulennopeudet sääasemalta Ulkokalla verrattuna mittausjakson keskiarvoon ja hajonnan perusteella lasketut vaihteluvälit.

## WASP-MENETELMÄN KÄYTTÄMÄN ATLASTIEDOSTON MUOKKAAMINEN KESKIMÄÄRÄISEN KUUKAUSITUOTANNON ARVIOINNISSA

Tuulen pitkäaikaiset nopeus- ja suuntatiedot on tuuliatlaksessa muokattu jakaumiksi. Tuulen nopeusjakauma kuvataan WASP-menetelmässä Weibull-jakauman avulla. Tuuliatlas sisältää Weibull-jakauman parametrit A ja k eri korkeuksilla ja maastoluokissa (sääasemaa ympäröivästä maastosta puhdistetut arvot). Tuulen suuntajakauma on suoraan sääasemalla mitattu suuntajakauma ja se ilmoitetaan 30 asteen sektoreittain prosentteina.

Suomen tuuliatlas sisältää tietoa myös tuulennopeuden kuukausijakaumista. Näiden avulla on mahdollista saada selville Weibull-jakauman parametrit A ja k kuukausitasolla. Tämän jälkeen kuukausittainen tuuliatlas saadaan kertomalla tuuliatlaksen Weibull-parametrit kuukausittaisten ja vuosittaisten parametrien suhteella.

### Tuulennopeusjakauman sovitus

Weibull-jakauman parametrit A ja k saadaan ratkaistua tuulennopeuden pysyvyyskäyrän avulla. Weibull-jakauman pysyvyysfunktio  $1 - F$  on muotoa

$$1 - F = e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (1)$$

Kun pysyvyysfunktio linearisoidaan, voidaan mittauksista saatujen pysyvyysfunktion arvojen avulla sovittaa funktion parametrit A ja k esimerkiksi lineaarisen regressioon kautta. Linearisoitu pysyvyysfunktio on muotoa:

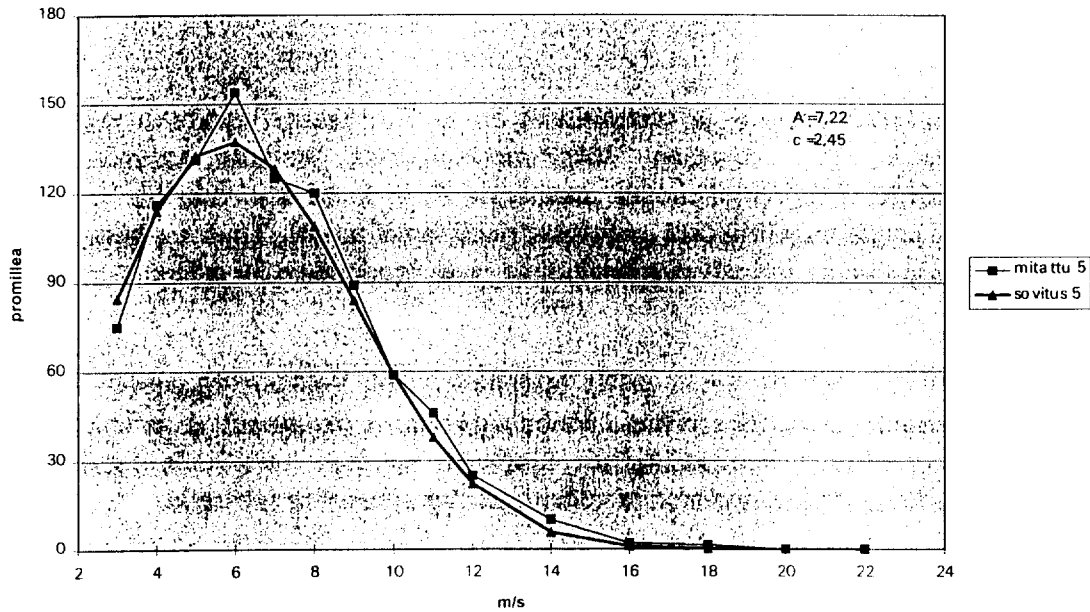
$$\ln(-\ln(1 - F)) = k \ln v - k \ln A \quad (2)$$

Tästä päästään suoran yhtälöön  $y = ax + b$  merkitsemällä

$$\begin{aligned} y_i &= \ln(-\ln(1 - F)) \\ x_i &= \ln v_i \\ a &= k \\ b &= -k \ln A \end{aligned} \quad (3)$$

Tuuliatlaksesta saatujen mitattujen pysyvyysfunktioiden ( $v$  ja  $1-F$ ) avulla voidaan tehdä sovitus (lineaarinen regressio) ja ratkaista suoran yhtälö ( $a$  ja  $b$ ) ja sitä kautta Weibull-parametrit A ja k.

Esimerkki yhden kuukauden pysyvyyskäyrän sovituksen perusteella lasketusta Weibull-jakaumasta verrattuna mitattuun tuulennopeusjakaumaan on kuvassa 1.



Kuva 1. Tuulennopeusjakauma Hailuoto Marjaniemestä toukokuun tuulennopeusmittausten perusteella (neliöillä merkitty viiva) verrattuna Weibull-sovitukseen.

## Atlastiedostojen muokkaus

Kuukausittaiset tuuliatlakset saadaan muokkaamalla Suomen tuuliatlaksen tiedostoa Weibull-parametrien osalta.

Sovittamalla kuukausi- ja vuositasolla mitatut pysyvyysfunktiot Weibull-jakaumaksi saadaan laskettua sääaseman Weibull-parametrit joka kuukaudelle ( $A_{kk}$  ja  $k_{kk}$ ) sekä vastaavasti koko vuodelle ( $A_{vuosi}$  ja  $k_{vuosi}$ ). Tuuliatlaksessa ilmoitetut Weibull-parametrit  $A$  ja  $k$  on käsitelty siten, että sääasemaa ympäröivä maasto ei näy jakauman parametreissa, ne eivät siis ole suoraan sääaseman vuotuisia parametreja. Tämän vuoksi niitä ei voi korvata suoraan kuukausittaisilla parametreilla, vaan niitä muokataan kuukausittaisen arvon ja vuosittaisen arvon suhteella

$$A' = A \frac{A_{kk}}{A_{vuosi}} \quad (4)$$

$$k' = k \frac{k_{kk}}{k_{vuosi}}$$

Käsittelemällä joka kuukauden kohdalla atlastiedostoa yllä kuvatulla tavalla saadaan 12 kuukaudelle omat tuuliatlastiedostot.

Tuulen suuntajakaumia ei tässä työssä ole muutettu kuukausittaisten suuntajakaumien mukaiseksi.



*Taulukko 1. Hanko Russarö, 20 vuoden kuukausikeskinopeuksien keskiarvot ja hajonnat.*

Kuukausi	Keskinopeus (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Hajonta/keskinopeus
tammi	7,3	1,2	0,17
helmi	6,3	1,1	0,17
maalis	5,9	1,0	0,18
huhti	5,4	0,4	0,07
touko	5,0	0,5	0,10
kesä	5,0	0,4	0,09
heinä	4,6	0,7	0,14
elo	5,0	0,5	0,10
syys	6,0	0,8	0,12
loka	7,0	0,9	0,13
marras	7,8	0,8	0,11
joulu	7,9	1,2	0,15

*Taulukko 2. Helsinki Katajaluoto, 10 vuoden kuukausikeskinopeuksien keskiarvot ja hajonnat.*

Kuukausi	Keskinopeus (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Hajonta/ keskinopeus
tammi	7,4	1,3	0,17
helmi	5,9	0,8	0,13
maalis	5,9	0,9	0,15
huhti	5,8	0,7	0,12
touko	5,6	0,8	0,14
kesä	5,9	0,8	0,14
heinä	4,9	0,6	0,13
elo	5,3	0,8	0,14
syys	6,3	1,3	0,20
loka	6,9	1,3	0,19
marras	8,4	1,1	0,13
joulu	7,9	1,2	0,15

*Taulukko 3. Kemi Ajos, 10 vuoden kuukausikeskinopeuksien keskiarvot ja hajonnat.*

Kuukausi	Keskinopeus (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Hajonta/ keskinopeus
tammi	5,8	1,5	0,26
helmi	6,0	2,1	0,34
maalis	6,1	1,2	0,20
huhti	5,7	0,7	0,12
touko	5,5	0,6	0,12
kesä	5,5	0,6	0,12
heinä	5,6	0,7	0,12
elo	5,8	0,6	0,10
syys	6,2	1,0	0,16
loka	7,5	1,7	0,23
marras	6,7	0,8	0,12
joulu	6,5	1,6	0,24

Taulukko 4. Korsnäs Moikipää, 18 vuoden kuukausikeskinopeuksien keskiarvot ja hajonnat.

Kuukausi	Keskinopeus (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Hajonta/ keskinopeus
tammi	6,5	1,3	0,19
helmi	6,0	1,3	0,22
maalis	6,1	1,3	0,21
huhti	5,8	0,9	0,15
touko	5,6	0,8	0,14
kesä	5,6	0,8	0,14
heinä	5,1	0,8	0,15
elo	5,3	0,7	0,12
syys	6,2	1,2	0,19
loka	7,0	0,9	0,13
marras	7,4	0,8	0,11
joulu	6,9	1,4	0,21

Taulukko 5. Kotka Rankki, 20 vuoden kuukausikeskinopeuksien keskiarvot ja hajonnat.

Kuukausi	Keskinopeus (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Hajonta/ keskinopeus
tammi	6,4	1,3	0,20
helmi	5,2	1,3	0,24
maalis	5,3	1,1	0,21
huhti	4,9	0,9	0,18
touko	4,6	0,9	0,19
kesä	4,3	0,6	0,15
heinä	3,9	0,5	0,14
elo	4,4	0,7	0,16
syys	5,2	0,7	0,14
loka	6,2	1,1	0,18
marras	7,0	1,0	0,14
joulu	6,8	0,9	0,13

Taulukko 6. Kumlinge Bärö, 11 vuoden kuukausikeskinopeuksien keskiarvot ja hajonnat.

Kuukausi	Keskinopeus (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Hajonta/ keskinopeus
tammi	7,9	1,8	0,23
helmi	6,8	1,8	0,27
maalis	6,5	1,5	0,23
huhti	6,1	0,9	0,15
touko	5,5	1,1	0,19
kesä	5,5	0,9	0,17
heinä	5,6	0,8	0,15
elo	5,8	1,0	0,17
syys	6,8	0,8	0,12
loka	7,7	0,9	0,12
marras	7,6	1,4	0,18
joulu	8,3	1,3	0,16

*Taulukko 7. Kustavi Isokari, 11 vuoden kuukausikeskinopeuksien keskiarvot ja hajonnat.*

Kuukausi	Keskinopeus (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Hajonta/ keskinopeus
tammi	8,3	1,3	0,16
helmi	7,4	1,7	0,23
maalis	7,5	1,3	0,18
huhti	6,6	1,0	0,16
touko	6,0	0,8	0,13
kesä	5,9	0,5	0,08
heinä	5,7	0,9	0,15
elo	6,0	0,9	0,15
syys	7,0	1,1	0,15
loka	8,3	1,0	0,12
marras	8,3	0,7	0,08
joulu	8,7	0,9	0,10

*Taulukko 8. Pori Mäntyluoto, 11 vuoden kuukausikeskinopeuksien keskiarvot ja hajonnat.*

Kuukausi	Keskinopeus (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Hajonta/ keskinopeus
tammi	7,2	1,2	0,17
helmi	6,3	1,5	0,24
maalis	6,3	1,2	0,18
huhti	5,7	0,6	0,11
touko	5,7	0,9	0,16
kesä	5,6	0,4	0,07
heinä	5,6	0,4	0,07
elo	5,8	0,8	0,14
syys	6,5	1,5	0,23
loka	7,8	1,2	0,15
marras	7,4	1,2	0,16
joulu	7,9	1,1	0,14

*Taulukko 9. Ulkokalla, 14 vuoden kuukausikeskinopeuksien keskiarvot ja hajonnat.*

Kuukausi	Keskinopeus (m/s)	Keskihajonta (m/s)	Hajonta/ keskinopeus
tammi	7,1	1,8	0,26
helmi	6,1	2,8	0,45
maalis	5,8	1,0	0,18
huhti	5,3	1,2	0,23
touko	5,0	1,3	0,26
kesä	5,2	1,0	0,18
heinä	5,2	0,9	0,18
elo	6,1	0,7	0,12
syys	6,7	1,2	0,19
loka	8,8	1,2	0,13
marras	8,8	0,7	0,08
joulu	7,8	1,9	0,25