

Juho-Tuomas Luukkonen

# Myrskyjen vaikutus tuulivoimatuotantoon Suomessa

## Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 19.4.2012.

Työn valvoja:

Prof. Liisa Haarla

Työn ohjaaja:

TkT Hannele Holttinen



Aalto-yliopisto  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

Tekijä: Juho-Tuomas Luukkonen

Työn nimi: Myrskyjen vaikutus tuulivoimatuotantoon Suomessa

Päivämäärä: 19.4.2012

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 7+57

Sähkötekniikan laitos

Professori: Sähkönsiirtojärjestelmät

Koodi: S-18

Valvoja: Prof. Liisa Haarla

Ohjaaja: TkT Hannele Holttinen

Tuulivoimalat joutuvat pysähtymään myrskyjen aikana, jotta ne eivät rikkoutuisi altistuttuaan liian suurille mekaanisille voimille. Myrskypysäytykset aiheuttavat voimalaitoksen tehontuotannon putoamisen nolnaan. Myrskyjen aikana on vaarana, että suuri määrä tuotannosta menetetään lyhyessä ajassa. Tämä voi aiheuttaa haasteita sähköverkon tehotasapainosta huolehtimiseen.

Tässä työssä tutkittiin tuulivoimaloista mitatun datan avulla myrskyjen esiintyvyyttä ja niiden vaikutusta tuulivoiman tuotantoon Suomessa. Dataa saatiin viideltä eri paikkakunnalta eri puolilta länsirannikkoa vuosilta 1999–2011. Tavoitteena oli selvittää kuinka usein myrskyjä esiintyy, ja kuinka myrskyrintamat vaikuttavat useiden paikkakuntien tuulisuuteen. Päämääränä oli tarkastella myös koko Suomen tuulivoimatuotannon käyttäytymistä myrskyjen aikana. Työssä haluttiin selvittää myrskyjen mahdollisia vaikutuksia laajamittaiseen tuulivoimatuotantoon.

Työn perusteella tuulivoimaloiden toimintaan vaikuttavat myrskyt ovat harvinaisia Suomessa. Kovimpia myrskyjä, jotka ylittivät rajan 25 m/s, havaittiin esiintyneen vain kahtena päivänä ja vain vuonna 2008 tarkasteltavista vuosista. Rajan 20 m/s ylittäneitä 10 minuutin arvoja esiintyi keskimäärin 10–86 kertaa vuodessa eri paikkakunnilla. Tarkasteltavina vuosina yhdentoista myrskyn aikana useammalla kuin yhdellä paikkakunnalla ylittyi 20 m/s:n raja. Myrskyt ajoittuivat pääasiassa syksyyn ja talveen. Vuonna 2008 myrskyt aiheuttivat suurimmat tuntivaihtelut Suomen tuulivoimatuotannossa (kasvu 18,9 % ja lasku 19,0 % kapasiteetista). Myös muissa kuin myrskytilanteissa Suomen tuulivoiman tuotantovaihtelu on ollut muutaman kerran vuodessa yli 15 % kapasiteetista. Analyysien perusteella voimaloiden myrskysuojausraja 20 m/s saattaisi aiheuttaa Suomessa ongelmia tuotannon supistumisen vuoksi myrskytilanteissa. Myrskysuojausrajalla 20 m/s laajat alueet voivat olla tuottamatta samanaikaisesti myrskyn takia. Myrskysuojausraja 25 m/s havaittiin olevan riittävä työn perusteella, koska samanaikaisia rajan ylityksiä eri paikkakunnilla ei havaittu ja ylitykset olivat todella harvinaisia.

Avainsanat: Tuulivoima, myrsky, myrskysuojaus, tehovaihtelu

Author: Juho-Tuomas Luukkonen

Title: The Impact of Storms on Wind Power Production in Finland

Date: 19th of april 2012

Language: Finnish

Number of pages: 7+57

Department of Electrical Engineering

Professorship: Electrical Transmission Systems

Code: S-18

Supervisor: Prof. Liisa Haarla

Instructor: D.Sc. (Tech.) Hannele Holttinen

Wind turbines shut down during storms to prevent damage due to extreme mechanical loads. The wind turbine ceases power production when it shuts down. During storms large amount of wind power production can be lose at short notice. This can pose a threat to power balance management in electrical grid.

In this work the incidence of storms and their impact on wind power production in Finland were studied. The analyzed data was measured from 5 different localities on the west coast of Finland from the years 1999–2011. The purpose of this work was to determine how often storms have occurred and how storm fronts have appeared in different locations. The wind power variation and ramp events of whole wind power production were also examined during storms. The object of the thesis was to investigate possible effects of storms on the large scale wind power production.

The study shows that storm events at the height of a turbine are very rare in Finland. There was only two days in one year when wind farms average speeds exceeded value 25 m/s. Meanwhile 10-minute wind speed value 20 m/s have exceeded on average 10–86 times per year in different localities. The 20 m/s value exceeded simultaneously at least in two localities during eleven storms. The storms were more common in the autumn and winter. In 2008, the largest hourly production variations were observed within stormy days and those were about 19 % of the installed capacity. However the maximum variations of the non-stormy days were also a couple of times over 15 % of the installed capacity. The analysis proved that widely used cut-out wind speed value 20 m/s might lead to very large reductions of production. Large geographical areas could be out of production, if shutdown wind speed 20 m/s are widely used. Cut-out wind speed 25 m/s turned out to be adequate because the limit were not exceeded simultaneously in different localities and storms over 25 m/s were very rare.

Keywords: Wind power, storm, storm control, power variation

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty siirtotekniikan tutkimusryhmässä sähkötekniikan laitoksella Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulussa. Diplomityö on osa Tekes-rahoitettua ja VTT:n koordinoimaa tutkimusprojektia tuulivoiman järjestelmävaikutuksien arvioinnista.

Haluan kiittää työni ohjaajaa TkT Hannele Holttista asiantuntevista neuvoista ja datan hankkimisesta tutkimusta varten. Haluan kiittää yhteistyöstä Winwind Oy:tä, Lumituuli Oy:tä, Suomen Hyötytuuli Oy:tä sekä Innopower Oy:tä. Haluan kiittää myös työn valvojaa professori Liisa Haarlaa diplomityön järjestämisestä ja opastuksesta työn aikana. Kiitokset kuuluvat myös DI Matti Koivistolle datan analysointiin liittyvästä opastuksesta.

Haluan kiittää myös kaikkia työkavereitani miellyttävästä työilmapiiristä sekä hyvistä keskusteluista. Kiitän myös perhettäni ja ystäviäni tuesta opintojeni aikana.

Espoossa 6.4.2012

Juho-Tuomas Luukkonen

# Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Alkusanat	iv
Sisältö	v
Lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
2 Tuulisuus ja myrskyt Suomessa	3
2.1 Suomen tuuliolot	3
2.2 Voimakkaat matalapaineet	4
2.3 Puuskaisuus	5
2.4 Tuulen vertikaalinen profiili	6
3 Tuulivoima	8
3.1 Tuulivoimalan toimintaperiaate	8
3.2 Tehokäyrä	9
3.3 Myrskyrajat	10
3.4 Tehonsäätö	11
3.5 Myrskysäätötekniikat	12
4 Sähköjärjestelmä ja tuulivoima	13
4.1 Suomen sähköjärjestelmä	13
4.2 Tehotasapaino	14
4.3 Tuulivoiman vaikutuksia sähköjärjestelmään	15
5 Myrskyjen vaikutukset laajamittaiseen tuulivoiman tuotantoon	17
5.1 Myrskyjen aiheuttamien tehonmuutosten vaikutusten minimointi sähköverkossa	17
5.1.1 Maantieteellinen hajauttaminen	17
5.1.2 Tehonmuutosten ennustaminen	17
5.1.3 Tuulivoimalan myrskysäätöominaisuudet	19
5.2 Tutkimuksia ja kokemuksia myrskyistä	19
5.2.1 Gudrun-myrsky	19
5.2.2 TradeWind-projekti	20
5.2.3 Tanskalaisten tutkimukset	21
6 Tutkimuksessa käytetty tuulioimadata ja analysointimenetelmät	24
6.1 Datan mittauspaikat	24
6.2 Myrsky tapahtuman määrittely ja datan analysointimenetelmät	26
6.3 Datan kattavuus	26
7 Myrskyjen esiintyvyys Suomessa	29
7.1 Myrskyjen tilastollinen tarkastelu	29
7.1.1 Myrskyjen määrä koko datasta	29
7.1.2 Myrskyjen jakaantuminen vuosittain	30
7.1.3 Myrskyjen jakaantuminen kuukausien mukaan	33
7.1.4 Myrskyjen ajoittuminen kellonajan mukaan	36
7.1.5 Myrskyjen kestot	39
7.1.6 Tuulen nopeuden vaihtelu 10 minuutin sisällä myrskyjen aikana Porissa	41
7.2 Myrsky tapahtumien tarkastelu	42
7.2.1 10 minuutin myrskyraja ylittynyt	42
7.2.2 Puuskaraja ylittynyt	43
7.2.3 Myrskysäätörajan riittävyys	45

7.2.4	Myrskypäivien tehontuotannon tuntivaihtelut Suomessa	47
8	Tulosten tarkastelu ja pohdinta	48
8.1	Datan kattavuus	48
8.2	Myrskyjen esiintyvyys Suomessa	49
8.3	Tehontuotannon vaihtelut	50
8.4	Myrskypysäytystapahtumat ja -rajat	50
8.5	Tuulivoimatuotannon maantieteellinen sijainti myrskyjen kannalta	51
9	Johtopäätökset	53
10	Lähdeluettelo	54

## Lyhenteet

IEC

International Electrotechnical Commission,  
sähköalan kansainvälinen standardisoimisjärjestö

# 1 Johdanto

Ilmastotavoitteet ovat kasvattaneet uusiutuvien energiamuotojen osuutta energiantuotannossa. Euroopan unionin tavoitteena on lisätä uusiutuvien energialähteiden osuus keskimäärin 20 prosenttiin energian loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Tuulivoima on yksi merkittävimmistä uusiutuvista energiamuodoista. Suomessakin on odotettavissa lähiaikoina merkittävää tuulivoimakapasiteetin kasvua. Päästöjen vähentämisen tuomien hyötyjen lisäksi tuulivoima tuo myös vaihtelevan tuotantonsa vuoksi haasteita tehotasapainon ylläpitämiseen sähköverkossa.

Tuulivoimalat tuottavat enemmän tehoa kovilla tuulilla kuin pienillä tuulen nopeuksilla. Tuulivoimalat joutuvat kuitenkin myrskyjen aikana pysähtymään. Tällä pyritään välttämään voimalan liiallinen mekaaninen rasittuminen ja mahdollinen rikkoutuminen. Nykyisin valtaosa tuulivoimaloista ovat sellaisia, että ne pysähtyvät heti, kun tuulen nopeus kasvaa yli voimalaitoksille asetettujen myrskysuojajousrajojen. Tämä aiheuttaa myös yksittäisen voimalaitoksen tehontuotannon laskun täydestä nimellistuotannosta nolnaan.

Laajamittaisessa tuulivoiman tuotannossa myrskyjen aikana on vaarana, että suuri määrä tehontuotantoa menetetään useiden voimaloiden myrskypysäytysten takia. Sähköverkossa tulee pyrkiä säilyttämään tasapaino tuotetun ja kulutetun tehon välillä, jotta verkon taajuus pysyisi miltei vakiona. Taajuus on pidettävä sallituissa rajoissa tai muuten on vaarana, että verkon stabiilius menetetään. Epästabiili tilanne voi johtaa verkon romahtamiseen. Myrskyn aikana voi tuulivoimatuotannon supistumisen vuoksi tehotasapaino järkkäytyä, joka tulee korjata reservituotannon avulla. Mitä enemmän tuulivoimatuotantoa menetetään myrskyn aikana, sitä enemmän reservituotantoa tarvitaan korvaamaan menetetty tehontuotanto.

Tässä työssä tutkitaan myrskyjen esiintyvyyttä Suomessa ja niiden seurauksena aiheutuneita tuulivoimantuotannon vaihteluita. Tutkimus tehdään analysoimalla tuulivoimaloista mitattua dataa. Paikkakuntia, joiden tuulivoimadataa tutkitaan, on yhteensä viisi: Oulunsalo, Lumijoki, Kokkola, Kristiinankaupunki ja Pori. Kaikki paikkakunnat sijaitsevat Suomen länsirannikolla, jonne suurin osa Suomen tuulivoimantuotannosta tulee tulevaisuudessakin painottumaan. Lisäksi työssä tutkitaan koko Suomen tuulivoimatuotannon käyttäytymistä myrskyjen aikana.

Työn tavoitteena on saada käsitys siitä, kuinka usein Suomessa esiintyy sellaisia myrskyjä tuulivoimaloiden napakorkeudella, jotka voisivat aiheuttaa suuria tehonvaihteluita tulevaisuudessa, kun tuulivoimakapasiteetti tulee kasvamaan. Tavoitteena on myös selvittää kuinka paljon aikaa kuluu myrskyrintamien etenemisessä eri paikkakuntien välillä, ja kuinka kauan myrskyt kestävät paikkakunnilla. Näin ollen tarkoituksena on arvioida kuinka laajoja alueita Suomen rannikolla voi olla samanaikaisesti myrskyn vaikutuksen alaisena.

Työn luvussa 2 tutustutaan Suomen tuulisuuteen ja myrskyihin. Katsaus suoritetaan erityisesti niiltä osin, jotka vaikuttavat merkittävimmin tuulivoimaan. Luvussa 3 paneudutaan tuulivoimaan ja tuulivoimaloiden ominaisuuksiin. Luvussa 4 puolestaan keskitytään sähköjärjestelmään, ja käsitellään tuulivoiman aiheuttamia vaikutuksia siihen. Luku 5 keskittyy tarkastelemaan myrskyjen vaikutusta laajamittaiseen tuulivoiman tuotantoon. Luvussa esitellään myrskyjen vaikutusten minimointimahdollisuuksia sähköverkossa. Luvussa tutustutaan myös muutama aiemmin tehtyyn aiheeseen liittyvään tutkimukseen sekä esitetään esimerkitapaus myrskyn vaikutuksesta tuulivoiman tuotantoon. Luvussa 6 esitetään tässä työssä käytetyn mittausdatan mittauspaikkakunnat ja tärkeimmät ominaisuudet, sekä esitellään datan analysointimenetelmät. Luvussa 7 esitellään tuulivoimadatan analyysien tuloksia. Luku 8 keskittyy työn tulosten tarkasteluun

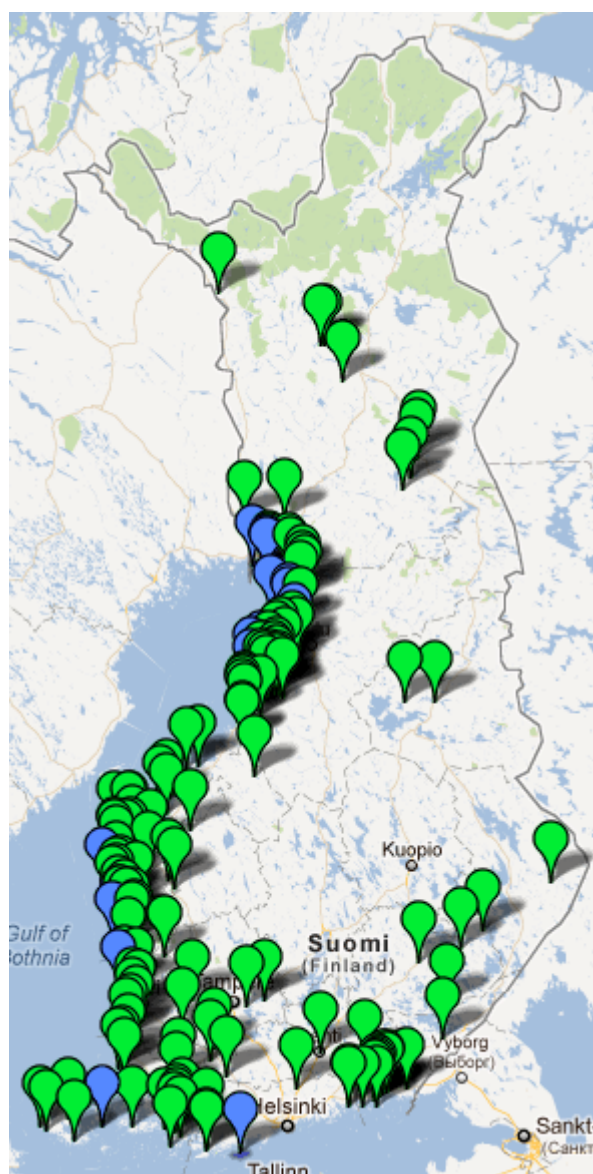


ja samalla luvussa pohditaan tulosten pohjalta myrskyjen mahdollisia vaikutuksia tulevaisuuden laajamittaiseen tuulivoimantuotantoon. Luvussa 9 esitellään työn johtopäätökset.

## 2 Tuulisuus ja myrskyt Suomessa

### 2.1 Suomen tuuliolot

Suomen tuulioloihin vaikuttaa ennen kaikkea maantieteellinen sijaintimme sekä yleisimmin Atlantilta suuntautuvat matalapaineet ja niiden kulkemat reitit [1]. Tuulivoiman kannalta tuuliolot ovat suotuisimmat merellä, saaristossa ja tuntureiden laeilla. Erityisesti näillä tuulisilla alueilla vuodenaikavaihtelut ovat huomattavia. Talvikuukaudet ovat huomattavasti tuulisempia kuin kesäkuukaudet. Sisämaassa tuulen nopeuden vuodenaikavaihtelut ovat varsin pieniä ja tuulen nopeudet ovat alhaisia. [2]. Tämän vuoksi Suomessa suurin osa tuulivoimahankkeista on sijoittunut rannikolle, kuten kuvasta 1 voidaan havaita [3].



*Kuva 1: Vuoden 2011 loppuun mennessä julkaistut tuulivoimahankkeet. Sinisellä merkityt kohteet ovat merituuipuistoja. [3]*

## 2.2 Voimakkaat matalapaineet

Suomessa esiintyy keskileveysasteiden eli leveyspiirien 35° – 70° matalapaineita, jotka voivat aiheuttaa hyvin voimakkaita tuulia. Keskileveysasteilla matalapaineiden syntymisessä erilämpöiset ilmamassat ovat merkittävä tekijä matalapaineen voimistumisprosessissa. Nämä matalapaineet kehittyvät pääasiassa horisontaalisista lämpötilaeroista johtuvasta energiasta. Keskileveysasteiden matalapaineille on myös tunnusomaista, että voimakkaimmat tuulet esiintyvät laajalla alueella, eivätkä myrskyn keskuksessa. [4]

Kun tuulen kymmenen minuutin keskiarvo ylittää Suomessa kynnysarvon 21 m/s, kutsutaan tuulta myrskyksi. Kansainvälisesti käytetään usein myrskyn raja-arvoa 25 m/s. Taulukossa 1 on esitelty tuulten nimitykset eri tuulen nopeuksilla ja kerrottu niiden vaikutuksista. [4]

*Taulukko 1: Tuulten nimitykset ja niiden vaikutukset luonnossa [4]*

Tuulen nopeus (m/s)	Tuulen nimitys	Tuulen vaikutus maalla	Tuulen vaikutus merellä
0	Tyyntä	Savu nousee pystysuoraan.	Peilityyni meri.
1–2	Heikko	Tuulen suunnan näkee savun liikkeestä. Tuuliviiri ei käänny.	Meren pinnalla pientä karettä.
2–3	Heikko	Tuulen tuntee iholla. Puiden lehdet kahisevat. Tavallinen viiri kääntyy.	Lyhyitä aaltoja, jotka eivät murru.
4–5	Kohtalaista	Puiden lehdet ja lehvät liikkuvat. Kevyt lippu suoristuu.	Aallon harjat murtuvat silloin tällöin. Läpinäkyvää vaahtoa aallon harjalla.
6–7	Kohtalaista	Pienet oksat heiluvat. Nostaa maasta pölyä ja irtonaisia paperin palasia.	Pitkähköjä aaltoja. Vaahtopäitä, jotka kohahtelevat.
8–10	Naukkaa	Pienuhköjä lehtipuut heiluvat. Järven selällä vaahtopäitä.	Aallon harjat kauttaaltaan valkoisina vaahtopäinä. Meri kohisee jatkuvasti.
11–13	Naukkaa	Suuret oksat heiluvat. Tuuli suhisee sattuessaan taloihin ja kiinteisiin esineisiin.	Aaltojen vaahto leviää. Meri kohisee kumeasti.
14–16	Kovaa	Puut heiluvat. Tuulta vasten kulkemisen vaikeaa.	Aaltojen huiput murtuvat. Vaahto järjestyy tuulen suuntaiseksi juoviksi. Kohina kuuluu kauas.
17–20	Kovaa	Katkoo puiden oksia. Ulkona liikkumisen vaikeaa.	Aallot pitkiä ja verraten korkeita. Vaahto tiheinä tuulen suuntaisina juovina.
21–24	Myrsky	Katkoo puita. Vaurioittaa heikohkoja rakennuksia, irrottaa kattotiiliä ja särkee savupiipun hattuja.	Aallot korkeita. Aaltojen pärske huonontaa näkyvyyttä hiukan. Meri pauhaa.

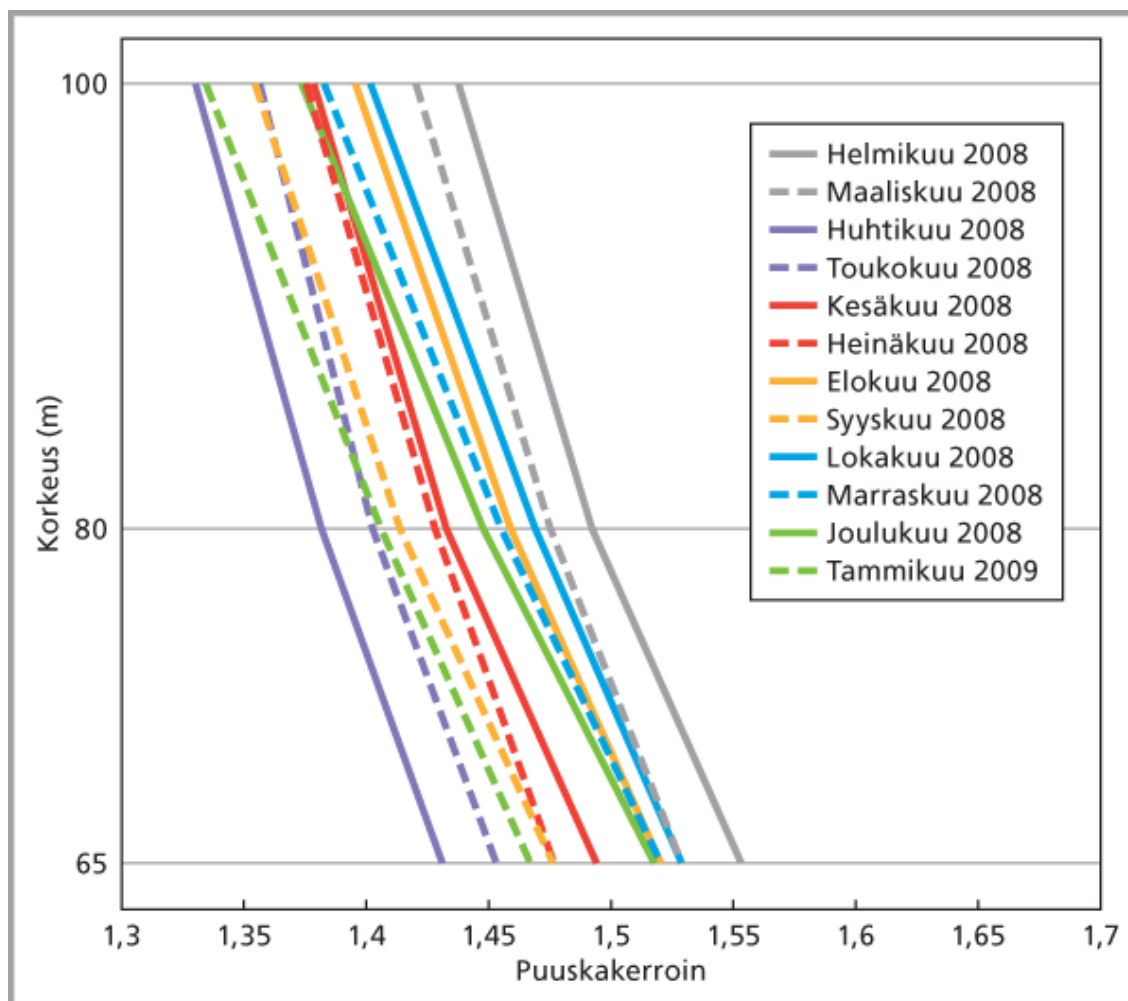
25–28	Kovaa myrskyä	Kiskoo puita juurineen. Aiheuttaa huomattavaa vahinkoa rakennuksille. Sattuu harvoin sisämaassa.	Aaltovuoria. Merenpinta valkoisena vaahdosta. Pauhu kovaa, puuskittaista. Aaltojen pärske huonontaa näkyvyyttä.
29–32	Ankaraa myrskyä	Kaataa metsää. Siirtää rakennuksia. Sattuu erittäin harvoin sisämaassa.	Näköpiirissä olevat laivat katoavat aaltovuorien taakse. Koko merenpinta valkoisena. Pärske huonontaa näkyvyyttä huomattavasti.
33 tai enemmän	Hirmu myrskyä	Tuhoaa perinpohjin rakennukset ym.	Koko merenpinta valkoisena. Näkyvyys erittäin huono.

## 2.3 Puuskaisuus

Usein puhuttaessa tuulen nopeudesta, käytetään arvoina 10 minuutin keskituulta niin havainnoissa kuin ennustuksissakin. Kova 10 minuutin keskituuli voi aiheuttaa vahinkoja, mutta merkittävämpi tuhojen aiheuttaja on lyhytaikaisempi tuulen puuskaisuus. Puuskaisuus johtuu turbulenssin aiheuttamista pyörteistä ilmakehän alimmassa kerroksessa eli rajakerroksessa. Turbulenssiin vaikuttaa huomattavasta rajakerroksen stabiilius, tuulen nopeus, korkeusmaanpinnasta sekä pinnan rosoisuus. Tuulen puuskaisuutta voidaan kuvata puuskakertoimen avulla. Yhtälön 1 mukaisesti puuskakerroin  $G$  voidaan laskea halutun aikaikkunan tuulen maksiminopeuden ja tuulen keskinopeuden suhteena

$$G = \frac{U_{\max}}{U} \quad (1)$$

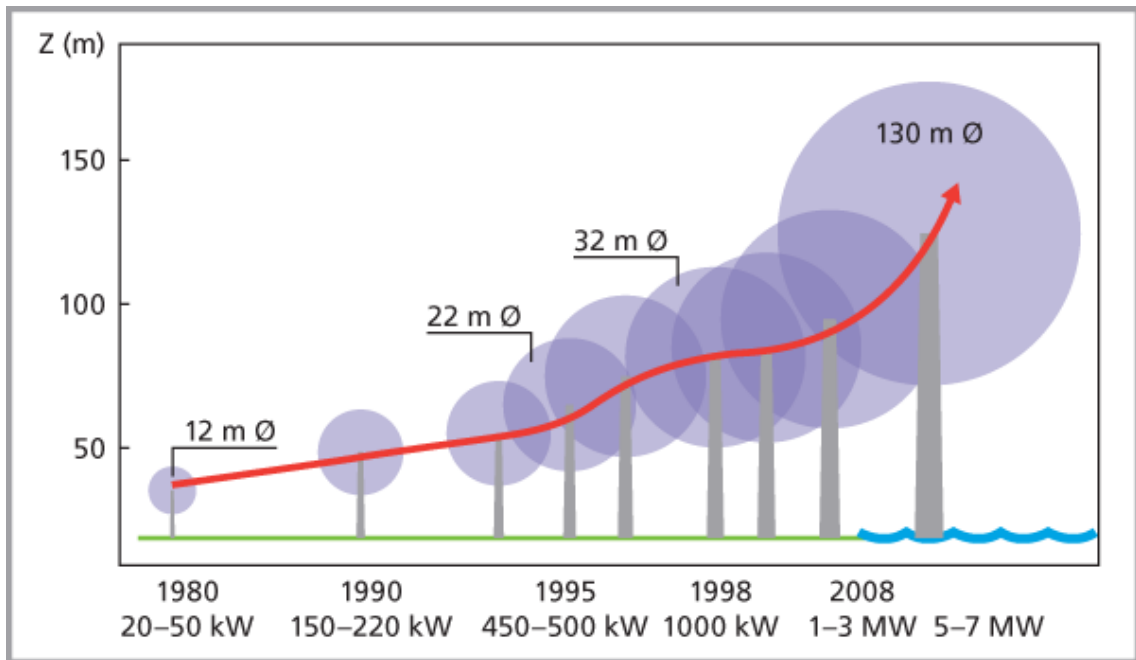
missä  $U_{\max}$  on tuulen maksimiarvo ja  $U$  tuulen keskiarvo, joka yleensä on laskettu 10 minuutin ajalta. [5]. Kuvassa 2 on esitetty Suomen tuuliatlaksen mukaan vuoden 2008 osalta etelärannikon puuskakertoimien keskiarvot korkeuden funktiona.



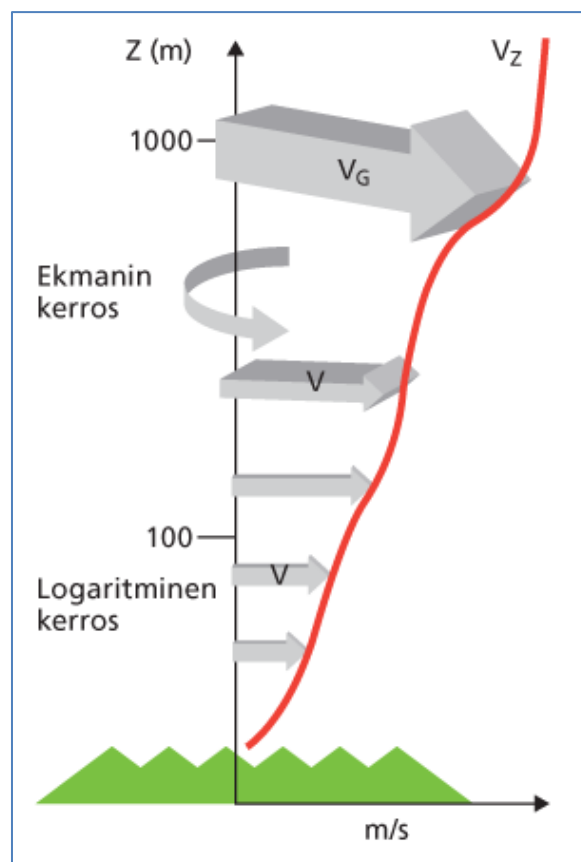
Kuva 2: Puuskakertoimen kuukausikeskiarvot etelärannikolla Suomen tuuliatlaksessa: puuskakerroin pienenee korkeuden kasvaessa ja on keskimäärin pienin huhti-toukokuussa, jolloin merenpinta on ilmaa kylmempi. [1]

## 2.4 Tuulen vertikaalinen profiili

Ilmatieteen laitoksen sääasemat mittaavat tuulen nopeutta ja suuntaa 10 metrin korkeudella maanpinnasta tai 10 metriä korkeammalta kuin muu maasto kuten puusto [4]. Modernien tuulivoimaloiden napakorkeus eli etäisyys maan pinnasta roottorin keskipisteeseen saattaa olla jopa yli 100 metriä. Ero sääasemien mittausten ja tuulivoimalan koke-man tuulen nopeuden kohdalla on merkittävä. Tuulen nopeuden vertikaalinen profiili kasvaa likimain logaritmisesti maaston yläpuolella tuulivoimaloiden korkeusluokassa, kuten kuvasta 4 voidaan havaita. Mitä korkeammalle mennään maanpinnasta, sitä kovempaa tuulee. Täten on erittäin tärkeää mitata tuulen nopeus tuulivoimalan napakorkeudelta tai vähintään estimoida korkeuden vaikutus tuulen nopeuteen. [6] Maaston rosoisuus vaikuttaa kuitenkin tuulen vertikaaliseen profiiliin ja täysin logaritmisia tuuli-profiileja esiintyy vain laajoilla tasaisilla alueilla, kuten merellä ja pelloilla. Profiilia on vaikea arvioida muilla alueilla. [2]



Kuva 3: Tuulivoimaloiden napakorkeuden ja nimellistehon kehitys 1980-luvulta alkaen [1]



Kuva 4: Vertikaalinen tuuliprofiili. Korkeuden kasvaessa maanpinnasta, kasvaa myös tuulen nopeus [2].

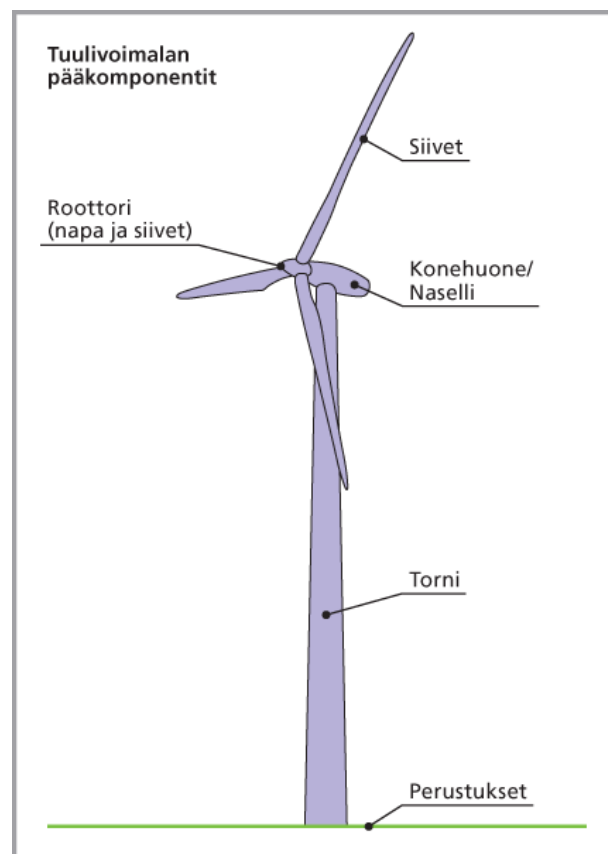
## 3 Tuulivoima

### 3.1 Tuulivoimalan toimintaperiaate

Tuulivoimalan toiminta perustuu siihen, että tuulen liike-energia muutetaan pyörimisenergiaksi tuuliturbiinin lapojen avulla. Pyörimisenergia puolestaan muutetaan generaattorin avulla sähköksi. Tuulivoimalakonsepteja on olemassa muutamia erilaisia, mutta tässä työssä tuulivoimalalla tarkoitetaan kolmelapaista ja vaaka-akselista konseptia (Kuva 5). Tämän mallin energiantuotanto suhteessa kustannuksiin on huomattavasti parempi kuin muilla konsepteilla suurissa teholuokissa [7]. Tuulivoimalat kääntyvät suuntamoottoreiden avulla tuulen suunnan mukaan. Tuulen tehon yhtälö on

$$P_{\text{tuuli}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

missä  $\rho$  on ilman tiheys,  $A$  turbiinin lapojen pyyhkäisyypinta-ala ja  $v$  on tuulen nopeus. Havaitaan, että tuulen sisältämä teho on verrannollinen tuulen kolmanteen potenssiin. Siksi tuulen nopeudella on hyvin merkittävä vaikutus tehon tuotantoon.

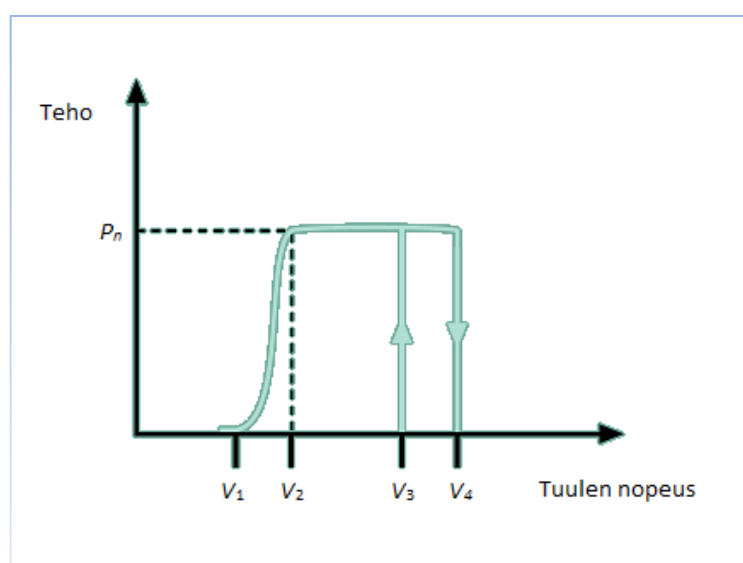


Kuva 5: Kolmilapainen vaaka-akselinen tuulivoimala ja sen pääkomponentit [8]

Tuulen sisältämää tehoa ei kuitenkaan saada edes teoriassa muutettua kokonaisuudessaan turbiinin tehoksi. Jos kaikki energia saataisiin talteen tuulesta, tulisi ilman olla täysin pysähtynyttä turbiinin jälkeen. Betzin lain mukaan teoreettinen turbiinin hyötysuhteen maksimi on  $16/27$  eli noin 59 %. [9]

## 3.2 Tehokäyrä

Tuulivoimalan tehokäyrä kuvaa voimalan tuottamaa sähkötehoa tuulen nopeuden funktiona. Kuvassa 6 on esitetty malli perinteisestä tuulivoimalan tehokäyrän muodosta. Ainakin suurimmilla valmistajilla on useita erilaisia malleja, joista ostaja voi valita tuuliolosuhteiden mukaan optimaalisen vaihtoehdon. Erilaisten mallien tehokäyrät poikkeavat hieman toisistaan, mutta muoto on perinteisesti kuvan 6 mukainen. Sähköalan kansainvälinen standardoimisjärjestö IEC on määritellyt kolme tuuliluokkaa tuuliturbiineille. Luokan III turbiinit ovat suunniteltu alhaisille tuuliolosuhteille (vuotuinen keskituuli 7,5 m/s), luokan II keskikoville tuuliolosuhteille (vuotuinen keskituuli 8,5 m/s) ja luokan I kova tuulisille (vuotuinen keskituuli 10 m/s) olosuhteille. [10] On hyvä myös huomioida, että tehokäyrä kuvaa voimalan tuotantoa aina tietyissä olosuhteissa, kuten esimerkiksi tietyllä ilman tiheydellä.



Kuva 6: Perinteinen tuulivoimalan tehokäyrän muoto [11]

Kuten kuvasta 6 nähdään, tuulivoimala aloittaa tehon tuotannon tuulen nopeuden ylittäessä energiantuotannon kannalta järkevän raja-arvon  $V_1$ .  $V_1$  on yleensä suuruusluokaltaan 3–4 m/s. Tätä raja-arvoa suuremmilla nopeuksilla voimala tuottaa likimain kaavan 2 mukaisesti tehoa aina pisteeseen  $V_2$  asti, jolloin voimala saavuttaa nimellistehonsa  $P_n$ . Nimellisteho saavutetaan tyypillisesti tuulen nopeuden ollessa 12–16 m/s riippuen erilaisiin tuulioloihin suunnitelluista tuulivoimaloista.

Tuulen nopeuden saavutettua nimellistehon tuottavan rajan  $V_2$ , voimalaitoksen tehontuotantoa rajoitetaan nimellistehoonsa, vaikka tuulen nopeus kasvaisi. Tehontuotantoa rajoitetaan, koska on järkevää valita jokin generaattorikoko. Tuulivoimala tuottaa nimellistehollaan tuulen nopeuden kasvaessa aina pysähtymisnopeuteen  $V_4$  asti. Pysähtymisnopeuden arvo  $V_4$  on tavallisesti 20–25 m/s, mutta erittäin kovatuulisille alueille tarkoitetuissa voimaloissa voi raja olla hieman suurempi. Rajaa kutsutaan myös usein myrskyrajaksi. Voimalaitos halutaan pysäyttää ennen kuin kovan tuulen aiheuttamat mekaaniset rasitukset kasvavat liian suuriksi, ja näin ollen pyritään välttämään voimalaitoksen vaurioituminen. Jos pysäytysraja halutaan korkeaksi, tulee voimalan mekaaniseen kestoisuuteen panostaa enemmän.

Kun voimalaitos on pysähtynyt saavutettuaan myrskyrajan, se ei jatka toimintaansa välittömästi, kun tuulen nopeus tippuu alle rajan  $V_4$ . Voimalaitos odottaa niin kauan,



että tuulen nopeus laskee alle raja-arvon  $V_3$ , jonka jälkeen se aloittaa tehontuotannon normaalisti. Kuten kuvasta 6 voidaan nähdä, muodostuu pisteiden  $V_3$  ja  $V_4$  ympärille silmukka. Tätä myrskysäätötapaa voidaan kutsua hystereesisäädöksi, koska säätö vähentää tarpeettomia käynnistymisiä ja pysähtymistä. Hystereesisilmukkaa kuvataan tässä työssä merkinnällä  $[V_3 V_4]$ . Ilman hystereesisäätöä kohdistuisi voimalaitoksen rakenteisiin rasituksia ja tuotantoon aiheutuisi suurta tehonheilahtelua tuulen nopeuden vaihtuessa myrskyrajan ympärillä, koska tuotanto vaihtelisi nimellistehon ja nollan välillä.

### 3.3 Myrskyrajat

Edellisessä luvussa 3.2 esitelty myrskyraja-arvo on usein jonkin ajanjakson keskiarvo-tuulen arvo, jolla tuulivoimala pysähtyy. Voimaloiden valmistajat usein ilmoittavat tuote-esitteissään vain yhden pysäytysrajan. Sitä kuinka pitkän ajan keskiarvosta on kyse, ei useinkaan niissä tuoda julki. Lisäksi todellisuudessa valmistajilla saattaa olla useampia voimalaitoksen pysäytysrajoja erimittaisten ajanjaksojen tuulen keskiarvoille. Erittäin puuskaisilla alueilla voivat lyhyemmän aikaikkunan puuskarajat nousta merkittäviksi tekijöiksi. Taulukossa 2 ja 3 on esitelty Winwindin kahden eri tuulivoimalan, tehoiltaan 1 MW ja 3 MW, puuskarajat. Taulukossa 4 on esitetty Siemensin tuulivoimaloiden puuskarajat.

*Taulukko 2: Winwindin 1 MW:n tuulivoimalan puuskarajat eri roottorin halkaisijoilla*

Roottorin halkaisija	10 min keskiarvo	30 s keskiarvo	Pysäytetään välittömästi
56 m	24 m/s	26 m/s	28 m/s
60 m	20 m/s	22 m/s	25 m/s
64 m	20 m/s	22 m/s	25 m/s
Voimala käynnistetään uudelleen, kun tuulen 10 minuutin keskiarvo on alle 18 m/s			

*Taulukko 3: Winwindin 3 MW:n tuulivoimalan puuskarajat*

10 min keskiarvo	1 min keskiarvo	1 s keskiarvo
22 m/s	26 m/s	33 m/s
Voimala käynnistetään uudelleen, kun tuulen 10 minuutin keskiarvo on alle 18 m/s		

Taulukko 4: Siemensin/Bonuksen puuskarajat kaikille IEC:n tuuliluokkien I ja II voimaloille

10 min keskiarvo	30 s keskiarvo	1 s keskiarvo
25 m/s	28 m/s	32 m/s
Voimala käynnistetään uudelleen, kun tuulen 10 minuutin keskiarvo on alle 20 m/s		

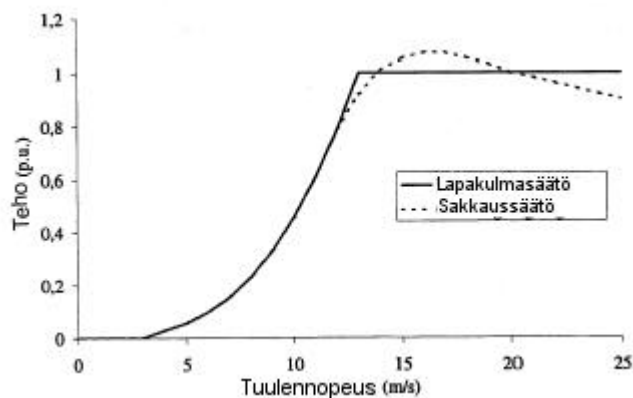
### 3.4 Tehonsäätö

Tuulivoimaloiden tulee pystyä säätämään tehontuotantoaan, jotta turbiini ei rikkoutuisi liian suurten mekaanisten rasitusten johdosta ja jotta generaattorin nimellistehoa ei ylitettäisi. Tehonsäätömekanismit säätävät roottorin aerodynaamisia ominaisuuksia. Tehonsäätö tuulivoimaloissa perustuu sakkaukseen tai lapakulman säätöön.

Yksinkertaisin menetelmä säätää tehoa on passiivinen sakkaussäätö. Passiivisakkausta käytävässä voimalassa lavat on pultattu kiinteästi roottorin napaan. Passiivisakkauksen tehonsäätö perustuu siihen, että tuulennopeuden kasvaessa ja virtauksen kohtauskulman kasvaessa lapa alkaa sakata, jonka seurauksena aerodynaaminen hyötysuhde pienenee. [9] Menetelmää ei enää nykyisin käytetä uusissa voimaloissa, koska lapojen suunnittelu on vaikeaa ja suurilla tuulilla tehontuotanto ei ole vakio [12].

Aktiivisessa sakkauksessa sakkaustaipumusta voidaan säädellä lapaa kääntämällä. Menetelmällä saadaan aikaiseksi parempi tehonsäätö. Ongelmina ovat ilmiön monimutkainen hallittavuus sekä melu suurilla tuulen nopeuksilla. Menetelmää käytetään pienissä ja yksinkertaisissa koneissa. [12]

Nykyisin yleisin ja käytetyin konsepti tehonsäätöön on lapakulmasäätö. Tehoa säädetään muuttamalla roottorin lapojen kohtauskulmaa tuuleen nähden. Menetelmän etuna on se, että kohtauskulma voidaan pitää optimaalisena ja sakkausta ei esiinny, mikä vähentää mekaanista värähtelyä ja kuormitusta. Etuna on myös se, että suurilla tuulen nopeuksilla teho pystytään pitämään hyvin lähellä nimellistehoa. Joissakin laitoksissa lapakulma säätöy kaikissa lavoissa yhtäaikaisesti, mutta varsinkin suuremmissa laitoksissa lapakulman säätö tapahtuu erikseen jokaisessa lavassa. Menetelmän haittapuolena verrattuna sakkaussäätöön voidaan pitää lapojen kääntämiseen tarvittavan koneiston aiheuttamat kustannukset, joka rajoittaa menetelmän käytön suuriin voimalaitoksiin. [13] [9] [12]



Kuva 7: Lapakulma- ja sakkaussäädetyin voimalaitoksen tehokäyrät [13].

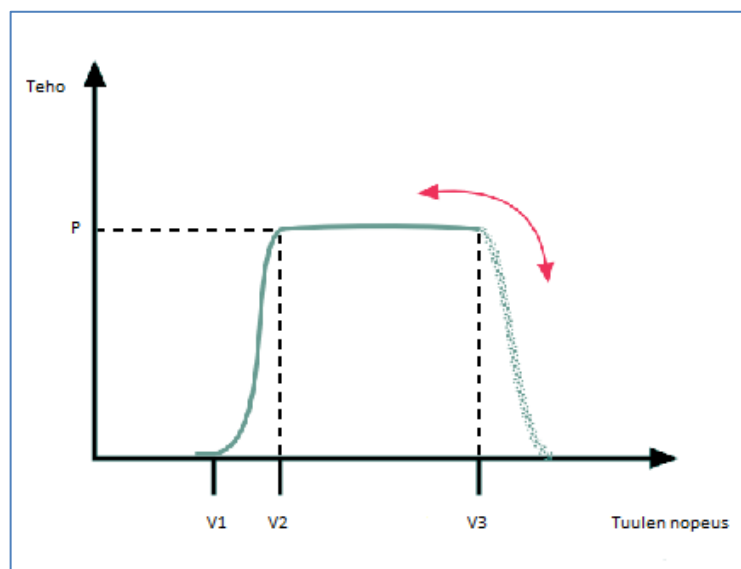
### 3.5 Myrskysäätötekniikat

Kun tuulenopeus kasvaa myrskyrajan yli, tuulivoimala pysäytetään turvallisuuden takia. Pysäytykseen käytetään aerodynaamista jarrutusta ja apujarrutusta. Sakkaussäätöissä ja lapakulmasäätöissä voimaloissa on erilainen myrskysäätötekniikka. Nykyisin rakennettavat MW-luokan voimalat ovat lapakulmasäätöisiä. Sakkaussäätöissä voimaloissa on usein niin sanottu kärkijarru. Lavoissa on kääntyvä kärkiosa, joka kääntyy 90 astetta. Jarruttava kärkiosa on hieman alle 10 prosenttia koko lavan pituudesta. Jokaisen lavan kärkijarru riittää pysäyttämään yksinäänkin pysäyttämään voimalaitoksen. Myös erilaisten vastuslevyjen käyttö on sakkausvoimaloissa mahdollista.

Lapakulman säätöön perustuvissa voimaloissa myrskysäätö toimii samalla tavalla kuin normaalissäätökin. Pysäytettäessä voimalaitosta lapakulmaa kasvatetaan niin kauan, että lavan etureuna on kohtisuorassa tuulta vastaan. Mekaanisella jarrulla varmistetaan voimalaitoksen pysähtyminen jarrutuksen loppuosalla. Mekaanisena jarruna voi toimia levy- tai rumpujarru.

Kokemusten mukaan aerodynaaminen jarrujärjestelmä on erittäin turvallinen ja riittävän nopea pysäytysjärjestelmä. Aerodynaaminen jarrujärjestelmä on lisäksi hyvin hellävarainen eikä aiheuta liian suuria rasituksia torniin tai koneistoon. [9] [14]

Tulevaisuudessa saattaa yleistyä saksalaisen tuulivoimalavalmistajan Enerconin kehittämä myrskysäätötekniikka. Tällöin tuulivoimalat eivät lopeta tehontuotantoaan myrskyrajan ylittyessä äkillisesti vaan tehontuotantoa vähennetään joustavasti. Kuvassa 8 on esitetty Enerconin myrskysäädöllä varustetun tuulivoimalan tehokäyrä. Tuulen nopeuden ylittäessä pisteen V3 voimalaitosta ei pysäytetä vaan turbiinin pyörimisnopeutta vähennetään joustavasti tuulen nopeuden kasvaessa. Pyörimisnopeutta muutetaan säätämällä lapakulmia kevyesti. Kun tuulen nopeus laantuu, kääntyvät lavat jälleen normaaliasentoon ja tehontuotanto voi jatkua välittömästi täydellä teholla. [15] Enerconin tuulivoimaloissa tehontuotantoa supistetaan tuulenopeuden ollessa 28–34 m/s [11]. Suurimmista valmistajista espanjalaisella Gamesalla on muutamassa mallissa vastaavan tapainen myrskysäätö [16]. Myös saksalaisella Siemensillä on kehitteillä samankaltainen myrskyjen tehonsäätötekniikka [17].

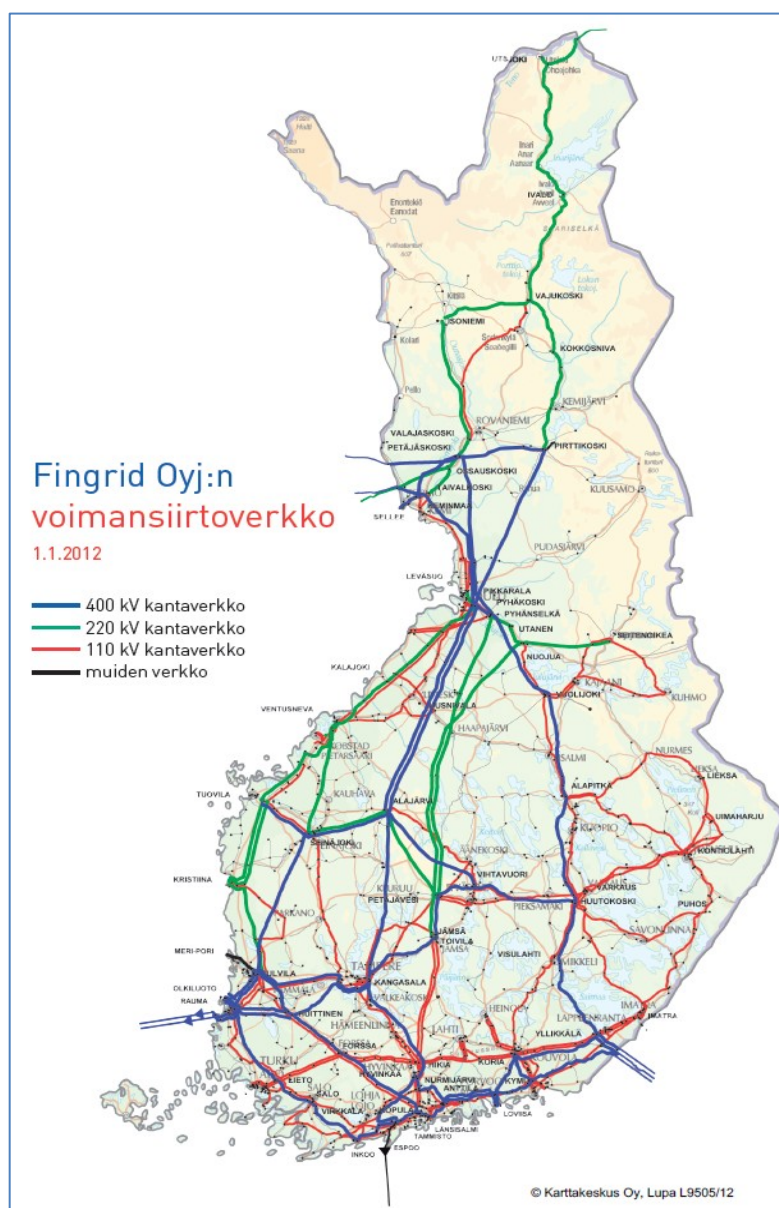


Kuva 8: Enerconin joustavalla myrskysäätötekniikalla varustetun tuulivoimalan tehokäyrä [15].

## 4 Sähköjärjestelmä ja tuulivoima

### 4.1 Suomen sähköjärjestelmä

Suomen sähköjärjestelmään kuuluvat voimalaitokset, kantaverkko, alueverkot, jakeluverkot sekä kuluttajat. Suomi on osa pohjoismaista sähköjärjestelmää, joka on yhteydessä myös muihin järjestelmiin tasasähköyhteyksien välityksellä. Suomessa järjestelmävastuuta kantaa kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj. Kantaverkonhaltija vastaa sähköverkon teknisestä toimivuudesta ja käyttövarmuudesta sekä huolehtii verkon käytön suunnittelusta ja valvonnasta. Järjestelmävastaavan tulee myös kehittää sähköverkkoa. Sähkövoimajärjestelmän on oltava tehokas ja taloudellinen. Sen on myös tarjottava hyvät toimintaedellytykset toimiville sähkömarkkinoille. Järjestelmävastaava huolehtii myös kulutuksen ja tuotannon tasapainosta eli taseesta.



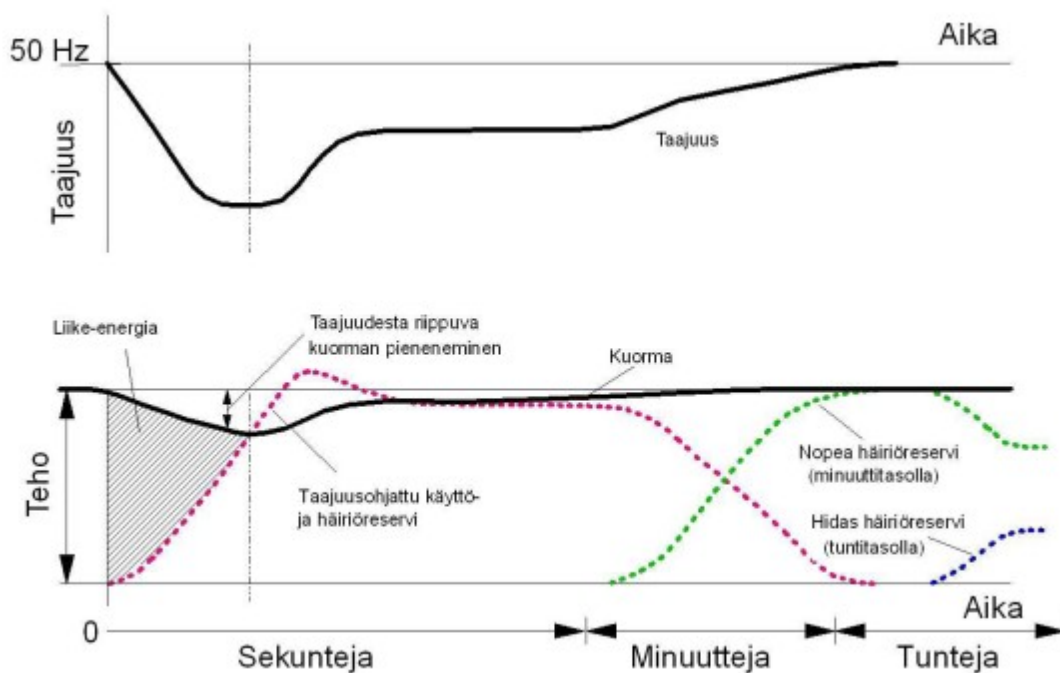
Kuva 9: Suomen kantaverkkoyhtiön Fingrid Oyj:n voimansiirtoverkko alkuvuodesta 2012 [18]

## 4.2 Tehotasapaino

Sähköverkko on epälineaarinen ja dynaaminen järjestelmä, jossa tuotannot, kuormat ja siirtotilanteet muuttuvat joka hetki. Stabiilissa tilanteessa voimajärjestelmä kykenee pitämään tahtigeneraattorit tahdissa sekä jännitteen ja taajuuden sallituissa rajoissa. Stabiilissa verkossa häiriön jälkeen järjestelmä pystyy saavuttamaan tasapainotilan ja järjestelmä pysyy pääosin ehjänä. Epästabiili syntyy kun vähintään jokin stabiilin tilanteen määritelmistä ei täyty. Epästabiili tilanne voi johtaa verkon tai sen osan romahtamiseen. [19]

Verkossa vallitsee joka hetki tasapaino tuotetun ja kulutetun tehon välillä sekä pätö- että loistehon osalta. Kun kuormituksessa tai tuotannossa tapahtuu muutos, seuraa siitä epätasapainotilanne tuotannon ja kulutuksen välille. Jos pätötehon tuotanto pienenee verrattuna kulutukseen, ottaa kuormitus tehonsa tahtigeneraattoreiden akselistojen pyörivästä liike-energiasta. Tämä hidastaa generaattoreiden pyörimistä ja sen seurauksena verkon taajuus pienenee. Jos pätötehon tuotanto puolestaan kasvaa suhteessa tuotantoon, tahtigeneraattorien liike-energia kasvaa ja sen seurauksena verkon taajuus kasvaa. Normaalitilanteessa taajuus saa vaihdella välillä 49,9–50,1 Hz. Suuria hetkellisiä taajuuden muutoksia syntyy verkkojen välisten yhdysjohtojen lauetessa raskaasti kuormitettuna tai suurten voimalaitosten irrotessa verkosta. [19]

Voimajärjestelmän toiminnan kannalta on tärkeää, että taajuus pidetään miltei vakiona. Koska kuormitus ja tuotanto vaihtelevat osin ennustamattomasti, tarvitaan taajuudensäätöä. Tehotasapainoa pidetään yllä sekä taajuusohjatuilla reserveilla että manuaalisilla säädöillä. Reservit voidaan jakaa käyttötilanteen mukaan edelleen käyttö- ja häiriöreserveihin. Normaalitilassa säätö hoidetaan taajuusohjatuilla käyttöreserveilla ja manuaalisilla reserveilla. Taajuusohjatut käyttöreservit pyrkivät pitämään taajuuden 50 Hz:ssä, ja aktivoituvat poikkeaman suuruuden mukaisesti. Taajuusohjatut häiriöreservit puolestaan käynnistyvät, kun taajuus laskee alle normaalitilanteen eli 49,9 Hz:n. Nopeat häiriöreservit puolestaan käynnistetään manuaalisesti 15 minuutin sisällä häiriön alkamisesta. Hitaat häiriöreservit käynnistyvät yli 15 minuutin kuluttua taajuuspoikkeamasta, ja niiden tehtävä on vapauttaa nopeita reserveja uudelleen käyttövalmiiksi. [19] [20] Kuvassa 10 on havainnollistettu tehoreservien aktivointi ajan funktiona tilanteessa, jossa suuri voimalaitos kytkeytyy irti järjestelmästä.



Kuva 10: Reservien käynnistyminen ajan funktiona suuren tuotantolaitoksen pudotessa järjestelmästä [21]

### 4.3 Tuulivoiman vaikutuksia sähköjärjestelmään

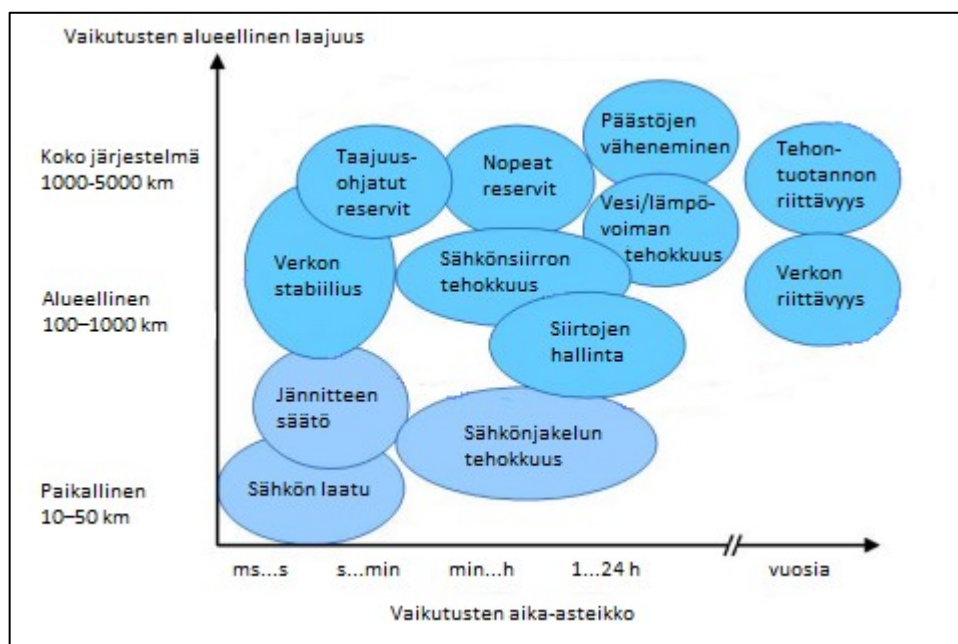
Tulevaisuudessa tuulivoimakapasiteetin kasvu aiheuttaa vaikutuksia sähköjärjestelmään. Tuulisuuden vaihtelusta aiheutuva tuulivoimatuotannon vaihtelu vaikuttaa taseesta huolehtimiseen. Vuoden 2011 lopussa Suomen tuulivoimakapasiteetti oli 197 MW [22]. Tällä hetkellä tuulivoiman kokonaiskapasiteetti on niin pieni, että tuulivoiman tuotantotehovaikutukset eivät ole merkittäviä koko järjestelmän kannalta. Vuoden 2012 tammikuun loppuun mennessä tuulivoimahankkeita on julkaistu kuitenkin noin 7800 MW:n verran, joista 3000 MW:n on merituulipuistoja [3]. Mitä enemmän tuulivoimaa on, sitä enemmän sen ominaispiirteisiin on kiinnitettävä huomiota sähköjärjestelmässä ja voimansiirtoverkon suunnittelussa. Laajamittaiseen tuulivoimatuotannon verkostovaikutuksiin vaikuttaa myös toteutuneiden hankkeiden sijainti ja tuotantoyksiköiden kokoluokat. Tuulivoimahankkeet on järkevä sijoittaa hyvätuulisille alueille, joka saattaa aiheuttaa myös tarvetta alueiden verkon vahvistamiselle.

Tuulivoima tuo sähköjärjestelmään lisää vaihtelevuutta ja epävarmuutta. Tällä saattaa olla vaikutusta järjestelmän käyttövarmuuteen ja tehokkuuteen. [23] Osin ennustamattoman laajamittaisen tuulivoiman tuotannon vaihtelu voi johtaa käyttövarmuuden heikkenemiseen. Käyttövarmuuden ylläpitämiseksi voidaan tehdä sekä ennakoivia, että käyttötilanteessa toteutettavia toimenpiteitä. Ennakoiviin toimenpiteisiin lasketaan muun muassa siirtokapasiteetin ja reservikapasiteetin kasvattaminen. Käyttötilanteen aikana voidaan puolestaan tehdä automaattisia tai manuaalisia ohjauksia tehotasapainon ylläpitämiseksi. [24]

Tuulivoiman järjestelmävaikutuksen tarkastelussa on tarkasteltavalla ajanjaksolla merkitystä tarkasteltaviin asioihin. Sääntötehon tarpeeseen sekunneista tuntiin vaikutta-

vat tuulivoimantuotannon ja kuorman ennustevirheet sekä siirtojen hallinnasta ja järjestelmän muuttuneesta liike-energiasta aiheutuvat säädöt. Säättöteho saadaan tunnin sisäiseen vaihteluun säätösähkömarkkinoilta ja reserveistä. Tunneista aina vuorokauteen asti tarkasteltavan tuulivoiman tuotannon vaihtelun voi hoitaa sähkömarkkinoiden kautta, jos ennusteet ovat onnistuneet. Ennustevirheet johtavat säätösähkömarkkinoiden ja reservin käyttöön. Laajamittainen tuulivoima voi aiheuttaa tarpeita myös nykyisten sähkömarkkinoiden uudistamille, kuten siirtymistä nykyisestä päivä etukäteen tuntituotteina toimivista markkinoista lyhyempiin. [24] [23]

Pidemmällä aikavälillä nousee siirtokapasiteetin riittävyys tärkeäksi tekijäksi. Riittävällä siirtokapasiteetilla voidaan hyödyntää säättövoiman käyttö koko verkon alueella. Siirtokapasiteetin on katettava tuulivoiman tuotannon muutosten lisäksi myös riittävä reservitehon siirto. Useiden vuosien aikavälillä tulee laajamittainen tuulivoima vaikuttamaan myös kokonaistehon riittävyyteen huippukulutustuntien osalta. Riittävän tehokapasiteetin tulee kestää myös tuulivoiman tuotannon vaihtelu. On myös mahdollista kasvattaa kulutuksenjoustoa, jotta pystytään varmistamaan tuotannon ja kulutuksen tasapaino. [24] [23]



Kuva 11: Tuulivoiman aiheuttamia mahdollisia vaikutuksia sähköjärjestelmässä [23]

## 5 Myrskyjen vaikutukset laajamittaiseen tuulivoiman tuotantoon

### 5.1 Myrskyjen aiheuttamien tehonmuutosten vaikutusten minimointi sähköverkossa

Tuulivoiman tuottaman tehon vaihtelu aiheuttaa haasteita tehotasapainon ylläpitämiseen. Yleensä tuotannon vaihtelu johtuu tuulen nopeuden vaihtelusta, mutta myös harvoin tapahtuvat myrskyt voivat aiheuttaa suuria tuotannon vaihteluita. Kun tarkastellaan perinteistä tuulivoimalan tehokäyrää (Kuva 6), voidaan havaita, että suurin tehonmuutos tapahtuu, kun tuulen nopeus ylittää myrskysuojausrajan. Yksittäisen voimalaitoksen tehontuotanto putoaa nimellistehosta nolnaan. Laajamittaisessa tuulivoiman tuotannossa on siis vaarana, että myrskyrintama aiheuttaa lyhyessä ajassa suuren tehonpudotuksen. Myrskyn aiheuttama tehonpudotus on jossain määrin samankaltainen N-1 -vian kanssa, jos tuulituotannon vaihtelu on suuruudeltaan suurimman tuotantoyksikön koko luokkaa. N-1 -periaate tarkoittaa sitä, että järjestelmä suunnitellaan ja sitä käytetään niin, että se kestää aina yhden komponentin vikaantumisen tai irtoamisen [19]. Tuulipuiston tehonpudotus tosin ei tapahdu äkillisesti. Voimajärjestelmän tulee kyetä korvaamaan tuotanto säätötehon avulla. Myrskyjen sattuessa tehontuotannon supistumisesta aiheutuvia ongelmatilanteita verkossa voidaan välttää tai niiden vaikutusta voidaan minimoida. Seuraavassa esitellään muutamia merkittäviä keinoja, joilla voidaan vähentää rajuja tehonmuutoksia myrskyjen aikana.

#### 5.1.1 Maantieteellinen hajauttaminen

Ennen kuin tuulivoimakapasiteettiä on pystytetty, voidaan tuulivoimahankkeiden sijoittelulla vaikuttaa suuriin tehonmuutoksiin. Hyvien tuuliolosuhteiden lisäksi olisi hyvä huomioida, että koko järjestelmän kannalta on järkevää hajauttaa tuulivoiman tuotanto mahdollisimman suurelle maantieteelliselle alueelle. Tehontuotannon vaihtelut tasoittuvat huomattavasti hajautetussa tuotannossa. Erityisesti tuotannon tuntivaihtelut ja tunnin sisäiset vaihtelut tasaantuvat huomattavasti hajauttamisen johdosta. [25] Hajauttamisella on siis suuri merkitys myrskyjen aiheuttamaan tehontuotannon romahtamiseen. Mitä laajemmalle alueelle tuotanto jakaantuu, sitä pienempi myrskysuojauksen aiheuttama tehonmuutos tapahtuu koko järjestelmässä. Kun myrskyjä aiheuttava matalapainerintama etenee, laajalle alueelle hajautetusta tuotannosta vain osa kohtaa rintaman samalla ajan hetkellä. Pienellä maantieteellisellä alueella, kuten Tanskan 209 MW:n Horns Rev 2 merituulipuistoissa, on mahdollista, että koko puiston tehontuotanto laskee alle viidessä minuutissa täydestä tehosta nolnaan. [17] Länsi-Tanskassa tuulivoimatuotannon suurin tehonmuutos on ollut 90 %:sta 10 %:iin kapasiteetista 6 tunnissa [26].

#### 5.1.2 Tehonmuutosten ennustaminen

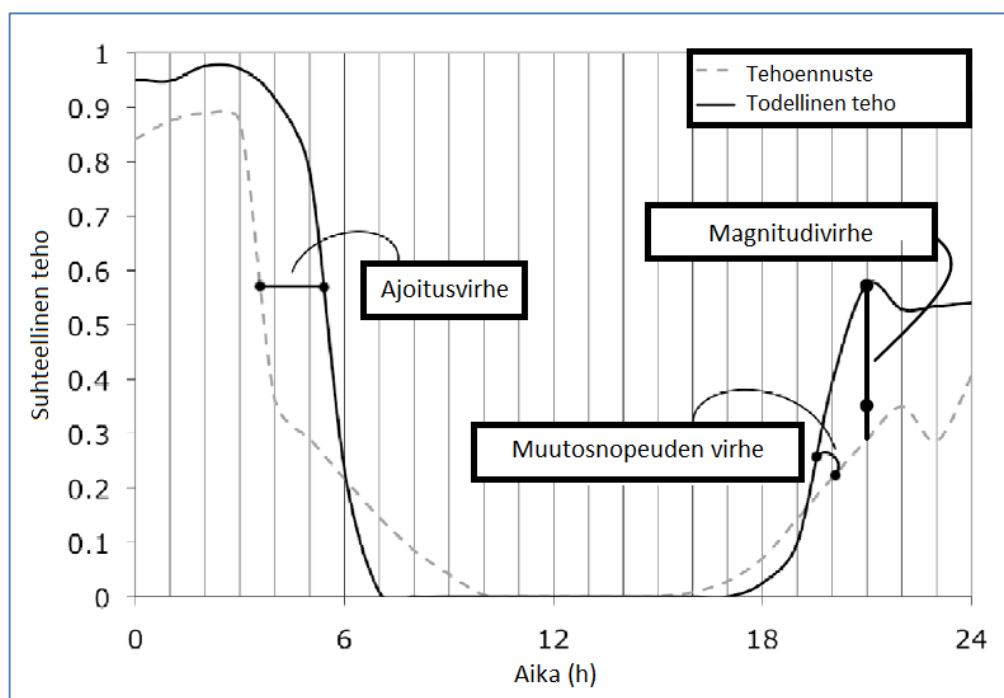
Myrskyjen ja suurien tuulen muutosten ennustaminen on yksi tapa välttää yllättävät tehonmuutokset verkossa. Jos myrskytilanteet pystytään onnistuneesti ennustamaan, on mahdollista, että voimaloiden tehontuotantoa rajoitetaan etukäteen. Myrskyjen harvinaisuudesta johtuen tehonrajoituksella ei ole vaikutusta vuosituotantoon juuri lainkaan. Jos myrskyn takia useat voimalat tai puistot pysähtyvät, tehonrajoitusta hyödynnettäessä vaadittava säätöteho ei ole niin suuri kuin tilanteessa jossa voimalat tuottaisivat täydellä



teholla. Ennakoiva tehonrajoitus kannattaa järjestelmän kannalta ottaa käyttöön vasta, kun tuulivoimakapasiteettia on paljon pienellä maantieteellisellä alueella. [27]

Suurten tehonmuutosten ennakoiminen saattaa olla kuitenkin hankalaa. Tehotasapainon hallinnan kannalta on valitettavaa, että tuulen ennustamisessa esiintyy enemmän epävarmuutta kuin kuormien ennustamisessa. Päivää ennen tehdyt tunnitaiset ennusteet voivat johtaa huomattaviin virheisiin erityisesti haasteellisten myrskytuulien kohdalla. [28] Myrskyjen aiheuttama tehonmuutos voi olla hyvin nopeaa, jolloin ennusteita pitäisi tehdä muutama tunti etukäteen tehonrajoituksia varten. Ennakoiva tehonrajoitus on ongelmallista tehontuottajien kannalta, sillä he menettävät energiantuotantoa, ja näin ollen kärsivät taloudellisesti siitä. Hyvä ennustemenetelmä pitää myös tehonrajoituksen aiheuttaman energiahäviön mahdollisimman pienenä. On myös hyvä huomioida, että myrskyttilanteet ovat melko harvinaisia, joten energiahäviöt eivät välttämättä nouse suuriksi. [17]

Ennusteet voivat mennä väärin joko ajan, tuulen voimakkuuden tai sijainnin mukaan. Kuvassa 12 on esitetty esimerkkitilanne, jossa on tehty aluksi ennustevirhe ajallisesti ja myöhemmin kaksi voimakkuusvirhettä. Tapahtuma, jossa sattuu ajoitusvirhe, on luonteeltaan sellainen, että ennuste on voimakkuudeltaan oikea, mutta tapahtuu eri aikaan ennusteeseen nähden. Voimakkuusvirhe sattuu, kun puolestaan ajoitus on oikein, mutta voimakkuus on väärä. Voimakkuusvirhe voi olla joko muutosnopeuden virhe tai magnitudivirhe. Maantieteelliseen sijaintiin liittyvä virhe voi aiheuttaa ajallisen ja voimakkuuden virheen, jos esimerkiksi säärintama menee eri reittiä kuin on ennustettu. [28] Tieteellisen tutkimuksen määrä on tällä hetkellä huomattava tuulen ja tuulivoimatuotannon ennusteiden alalla.



Kuva 12: Esimerkkitalanne tehontuotannon ennustamisen virheistä [28].

### 5.1.3 Tuulivoimalan myrskysäätöominaisuudet

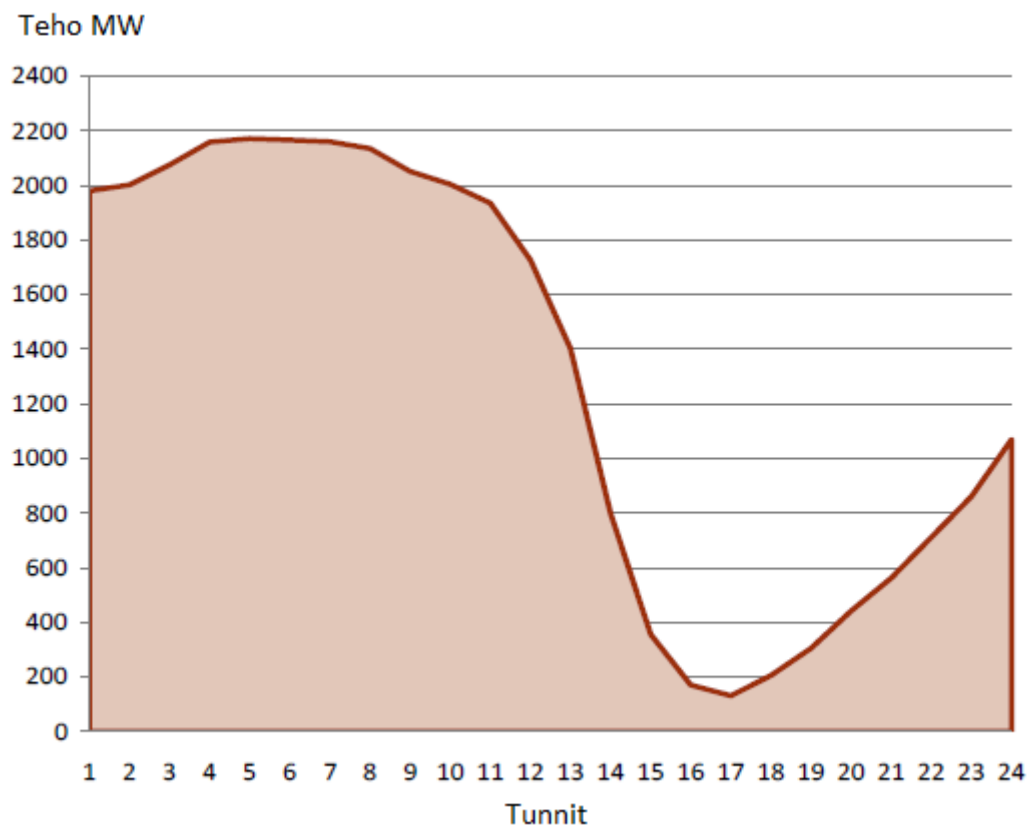
Kuten luvussa 3.2 kerrottiin, löytyy tuulivoimalavalmistajilla erilaisia malleja, jotka ovat tarkoitettu erilaisiin tuuliolosuhteisiin. Tuulivoiman tuottajan kannalta ei myrskyradjalla ole välttämättä kovinkaan suurta merkitystä, koska sen vaikutukset tuotetun vuosien energian kannalta ovat hyvin pienet. Sähköverkon kannalta on oleellista, että laajamittaisessa tuulivoiman tuotannossa voimaloiden myrskyrajat ovat riittävät tuuliolosuhteisiin nähden. Jos voimaloiden myrskyrajat ovat liian matalat, on mahdollista, että tehontuotantoa menetetään kerralla suuria määriä. On myös mahdollista asettaa tuotantoalueelle eri myrskysuojausrajat yksittäisille voimalaitoksille, jolloin tehontuotannon supistumisen muutosnopeus pienenee [29].

Myrskyjen aiheuttamaa tehonvaihtelua voidaan myös hillitä saksalaisen tuuliturbiinivalmistajan Enerconin kehittämällä joustavalla myrskysäädöllä, joka esitettiin luvussa 3.5. Joustavan myrskysäädön etuina verrattaessa perinteiseen myrskysäätöön ovat menetetyt energian pieneminen ja tuotannon ennustettavuuden helpottuminen myrskyjen aikana. Haittapuolena on tuulivoimalan pieni eliniän lyheneminen. [17] On hyvä huomioda, että yksittäisen tuulivoimalan nimellistehon kasvaessa joustava myrskysäätö nousee yhä merkittävämmäksi tekijäksi tehonmuutosten minimoinnissa. Mitä suuremmaksi voimalaitokset kasvavat, sitä suuremmaksi perinteisellä myrskysäädöllä tapahtuva yksittäisen voimalaitoksen tehonmuutos täydestä tuotannosta nolnaan kasvaa. Tällöin myös tuulipuiston tai useamman lähekkäisen tuulipuiston pysähtyminen aiheuttaa nopeammat ja suuremmat tehonmuutokset. Kovimpien myrskyjen aikana joustavan myrskysäädön avulla tehontuotannon supistumisesta ei päästä eroon, mutta tuotannon muutosnopeudet pienenevät.

## 5.2 Tutkimuksia ja kokemuksia myrskyistä

### 5.2.1 Gudrun-myrsky

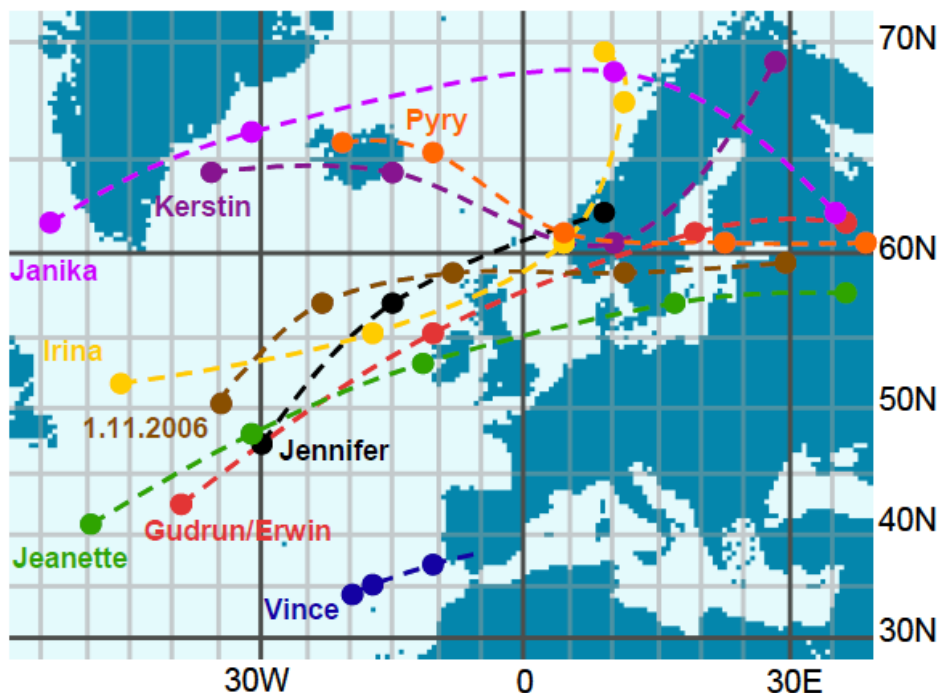
Euroopan yli kulki tammikuussa 2005 Gudrun-myrsky, joka aiheutti tuhoa erityisesti Tanskassa ja Ruotsissa. Tanskan tuulivoimatuotanto laski yli 2000 MW:sta alle kymmenesosaan kahdeksassa tunnissa (Kuva 13). Vaikka myrsky oli erityisen kova, kaikki voimalat eivät pysähtyneet samaan aikaan. Suurimmillaan tehontuotannon supistuminen oli hieman yli 600 MW tunnissa. Tilanne pystyttiin hoitamaan säätösähkömarkkinoiden ja Norjan ja Tanskan välisen tasasähköyhteyden avulla. [30] [26]



*Kuva 13: Tuulivoimatuotanto Länsi-Tanskassa Gudrun-myrskyn aikana 8.tammikuuta 2005 [30]*

### 5.2.2 TradeWind-projekti

TradeWind oli EU-projekti, joka keskittyi laajamittaisen tuulivoiman tuotannon vaikutuksiin, siirtoyhteyksien riittävyyteen ja sähkömarkkinoiden kehittämiseen Euroopassa. Osana projektia on tutkittu simulaatioiden avulla muutamien Euroopan yli kulkeneiden matalapainerintamien vaikutuksia tehontuotantoon ja tehonsiirtoon. Valitut matalapaineet, jotka ovat 2000-luvulla tapahtuneita myrskyjä, on esitetty kuvassa 14 ja niiden esiintymispäiviä on lueteltu taulukossa 5. Simuloinnit tehtiin vuoden 2015 arvioidulle tuulivoimakapasiteetille.



Kuva 14: TradeWind projektissa tutkittujen matalapainerintamien reitit [31].

Taulukko 5: 2000-luvulla Euroopassa esiintyneitä laajoja myrskyrintamia ja niiden päivämäärät [31] [32] [33].

Myrsky	Päivämäärä
Kerstin	29–31.1.2000
Pyry	1–2.11.2001
Janika	14–16.11.2001
Jennifer	28–29.1.2002
Jeanette	27–28.10.2002
Vince	8–11.10.2005
Gudrun/Erwin	8–9.1.2005

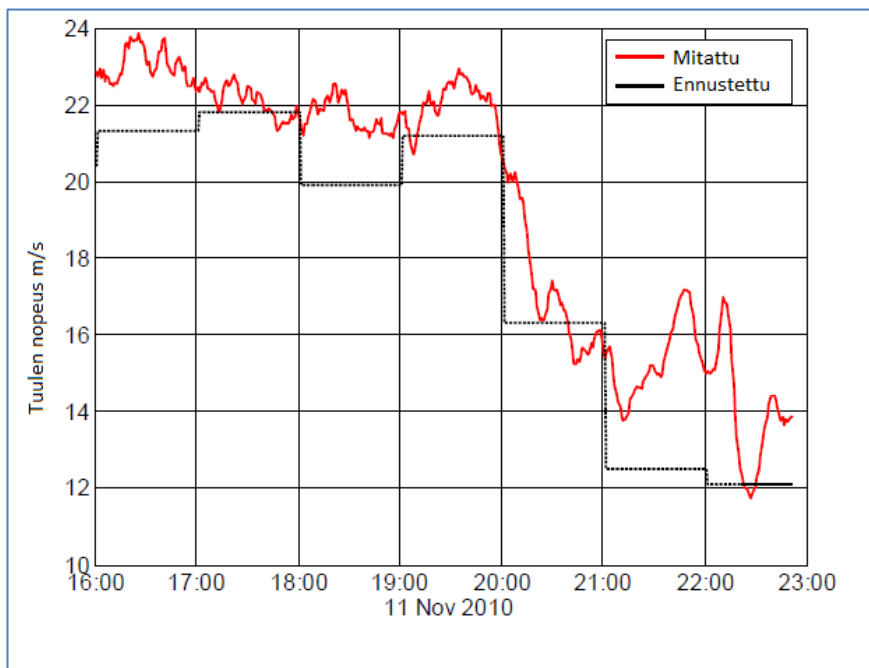
Simuloinnit osoittivat, että myrskyjen vaikutusten analysointi tuulivoiman tuotantoon ja siirtoihin Euroopan laajuisesti ei ole yksinkertaista. Analysointia vaikeutti se, että matalapainerintamien vaikutukset on vaikea erottaa kuorman vaihtelun vaikutuksesta. Huomionarvoista on myös se, että simuloitu tuulivoimakapasiteetti on muutamaa tuulivoiman edelläkävijämaata lukuun ottamatta varsin pieni verrattuna maiden kuormiin ja niiden vaihteluihin. Ongelmia syntyi myös siinä, että osa siirtoyhteyksistä oli riittämättömiä ilman tuulivoimaakin. Myrskyrajat ylittyivät usein vain yksittäisillä alueille, kun taas toisaalla tehonlasku aiheutui tuulen nopeuden pienenemisestä. [23]

### 5.2.3 Tanskalaisten tutkimukset

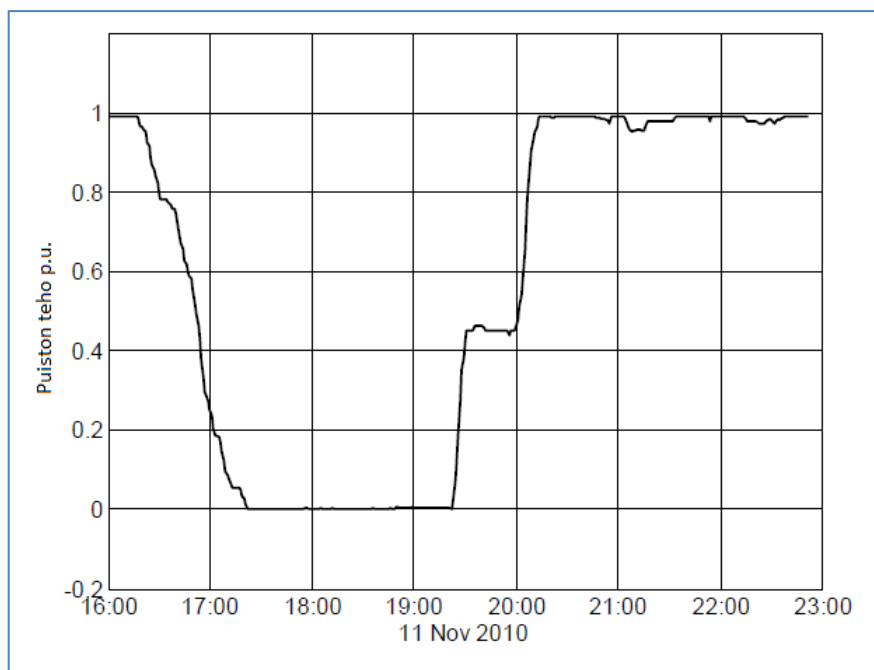
Tanskan teknillinen yliopisto DTU yhdessä Tanskan kantaverkkoyhtiö Energinet.dk:n kanssa ovat tutkineet merituulipuistojen toimintaa myrskyjen aikana. Tanskalla on nykyisestä suuresta tuulivoimakapasiteetista huolimatta kovat tuulivoimatuotannon lisää-

mistavoitteet. Tanskassa suurin osa uudesta kapasiteetista tulee sijoittumaan merituulipuistoihin, joissa myrskyjä esiintyy useammin. [27]

Myrskyjen aiheuttamien tehonmuutosten ennustamista on tutkittu analysoimalla Horns Rev 2-merituulipuiston menneitä ennusteita, joita on vertailtu meteorologisella simuloinnilla mallinnettuun dataan. Horns Rev 2-merituulipuiston kapasiteetti on 209 MW [34]. Tutkimuksen kohteena olleet voimalat pysähtyvät tuulen nopeudella 25 m/s ja käynnistyvät uudelleen kun tuuli laskee alle 20 metriin sekunnissa, joten luvussa 3.2 esitetyn merkintätavan mukaan hystereesiväli on [20 25]. Tulokset osoittivat, että ennustemalli yliarvioi voimaloiden pysäyttämisen aiheuttavien tapahtumien lukumäärän. Myrsky-tapahtumien tuotannon ennustevirheet puolestaan olivat usein miltei koko tuotantokapasiteetin suuruisia. Tutkimuksessa analysoitiin myös 11.11.2010 tapahtunut myrsky Horns Rev 2:ssa, joka on esitetty kuvissa 15 ja 16. Mielenkiintoinen tulos oli se, että vaikka yksittäinen tuulivoimalan myrskysuojauksen kannalta mielenkiintoinen hystereesiväli on [20 25], mitattaessa koko puiston keskiarvotuulta, jo keskiarvotuuli 22,5 m/s aiheutti tehontuotannon supistumista voimaloiden myrskypysähtymisten takia. Puolestaan tuotanto palautui myrskysuojauksen jälkeen ennalleen vasta, kun puiston keskituulennopeus alitti rajan 18 m/s. [17]



Kuva 15: Horns Rev 2-merituulipuiston mitattu ja ennustettu puiston keskituulen nopeus 11.11.2010 [27]



*Kuva 16: Horns Rev 2-tuulipuiston tehontuotanto 11.11.2010 [27]*

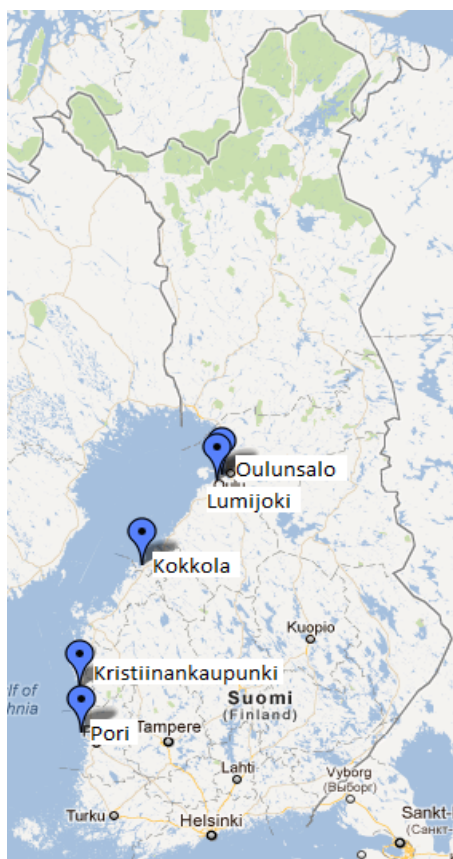
Eräs tanskalaisten tekemä tutkimus vertailee perinteistä myrskysäätötekniikkaa ja luvussa 3.5 esitettyä joustavaa myrskysäätöä. Tutkimuksessa vertailtiin myös keskitettyä merituulituotantoa ja maantieteellisesti hajautettua tuotantoa. Tulosten mukaan suurimmat tehonmuutokset aiheutuvat perinteisellä myrskysäätötekniikalla, mutta merkittävästi enemmän tehonmuutokseen vaikuttaa tuotannon maantieteellinen sijoittaminen. Suurimmat tehonmuutokset tapahtuvat keskitetyllä tuotannolla ja perinteisellä myrskysäätötekniikalla, kun puolestaan pienimmät muutokset saatiin hajautetulla tuotannolla ja joustavan myrskysäädön avulla. [35]

## 6 Tutkimuksessa käytetty tuulivoimadata ja analysointimenetelmät

Tässä työssä tutkittiin tuulivoimaloista mitatun datan avulla myrskyjen esiintymistä ja vaikutusta tuulivoiman tuotantoon. Kaikissa voimaloissa tuulen nopeus on mitattu tuulivoimalan konehuoneen päältä, joten mittaukset eivät ole täysin tarkkoja. Data saatiin Winwind Oy:ltä, Lumituuli Oy:ltä sekä Suomen Hyötytuuli Oy:ltä. Tuulivoimadataa saatiin yhteensä viideltä eri paikkakunnalta: Oulunsalosta, Lumijoelta, Kokkolasta, Kristiinankaupungista (lyhennetään taulukoissa Kristiina) ja Porista. Kaiken kaikkiaan dataa oli vuosilta 1999–2011 vaihtelevasti paikkakunnittain. Lisäksi vuodelta 2008 ja muutamilta valikoiduilta päiviltä muilta vuosilta saatiin dataa koko Suomen tuulivoimantuotannosta. Koko Suomen data on VTT:llä laskettuja tuulivoimantuotannon tuntiarvoja suhteessa asennettuun kapasiteettiin, jotka perustuvat Energiategollisuuden tuntituotantodataan. Tässä luvussa esitellään datan mittauspaikat sekä datan analysointiin käytettyjä menetelmiä.

### 6.1 Datan mittauspaikat

Kuvassa 17 on esitetty viisi paikkakuntaa, joilta mitattua dataa saatiin. Saadut mittauspaikkakunnat ovat alueilla, joille on suunnitteilla merkittäviä määriä tuulivoimaa (kuva 1). Porin, Kristiinankaupungin, Kokkolan ja Oulunsalon voimalaitokset sijaitsevat aivan meren läheisyydessä rantaviivalla. Lumijoen voimalaitos on rakennettu keinosaaressa merelle.



Kuva 17: Datan mittauspaikkojen sijainnit kartalla.

Taulukko 6: Datan mittauspaikkojen väliset etäisyydet kilometreinä

km	Oulunsalo	Lumijoki	Kokkola	Kristiina	Pori
Oulunsalo	0	10	164	361	421
Lumijoki	10	0	154	351	411
Kokkola	164	154	0	199	263
Kristiina	361	351	199	0	70
Pori	421	411	263	70	0

Eri paikkakunnilta saatiin hieman erilaista dataa. Tässä työssä datasta tarkasteltiin tuulen nopeutta ja sähköverkkoon tuotettua pätötehoa. Myös käsiteltävien tuulivoimaloiden lukumäärissä oli eroa paikkakunnittain. Lukuun ottamatta Lumijoen dataa, tuulivoimaloiden data oli 10 minuutin keskiarvoina mitattua. Lumijoen datan arvot olivat tunnittaisia keskiarvoja. Porista oli lisäksi saatavilla 10 minuutin sisällä mitatun tuulennopeuden maksimi- ja minimiarvo.

Taulukko 7: Analysoitavien paikkakuntien tuuli- ja tehodatan tärkeimmät ominaisuudet

Paikkakunta	Käsiteltäviä tuulivoimaloita	Keskiarvojen laskenta-aika	Laskenta-ajan tuulen sisäinen maksimi ja minimi	Paikkakunnan tuulivoimaloiden valmistaja ja malli	Voimalan napakorkeus
Oulunsalo	3	10 min	ei	Winwind WWD-1 MW/D56	66 m
Lumijoki	1	1 h	ei	Vestas V47-660 kW	50 m
Kokkola	2	10 min	ei	Winwind WWD-1 MW/D56	66 m
Kristiina	3	10 min	ei	Winwind WWD-1 MW/D56	66 m
Pori	1	10 min	on	Bonus B76/2 MW	80 m



## 6.2 Myrskytapahuman määritelmä ja datan analysointimenetelmät

Kuten luvussa 2.2 kerrottiin, myrsky määritellään niin, että tuulen 10 minuutin keskiarvo on yli 21 m/s. Suurimmilla tuulivoimaloiden valmistajilla on tuotevalikoimassaan yleisesti muutamia malleja, joiden pysäytysnopeus on 20 m/s. Tämän vuoksi tässä työssä myrskytapahumiksi laskettiin sellaiset 10 minuutin tuulen keskiarvot, jotka ylittävät rajan 20 m/s. Toisaalta suurimmilla voimalavalmistajilla on eniten malleja, joissa myrskyrajana on 25 m/s. Siksi tässä työssä toinen tarkasteltava raja-arvo oli 25 m/s.

Tuulivoimaloista mitattua dataa analysoitiin tilastollisesti jaotteleamalla eri kriteerein ja tapauskohtaisesti. Tilastollisella jaottelulla pyrittiin selvittämään kuinka usein ja milloin myrskyjä esiintyi. Tilastollinen jaottelu tehtiin pääasiassa puistojen keskiarvotuulien avulla. Paikkakunnan keskiarvotuulilla analysointi antaa paremman kuvan laajamittaisen tuulivoiman käyttäytymisestä myrskyjen aikana kuin yksittäisen tuulivoimalan kohtaaman tuulen nopeuden analysointi. Koska eri paikkakunnilta oli käytössä eri määrä dataa, analyysien tuloksia on esitetty myös suhteessa datan määrään.

Toinen analysointimenetelmä oli myrskyjen tapauskohtainen tarkastelu. Tapauskohtaisessa tarkastelussa tutkittiin voimalaitosten tehontuotannon käyttäytymistä myrskytilanteissa. Tarkastelussa kiinnitettiin erityisesti huomiota siihen kuinka myrskyn aikana koko Suomen tuulivoimantuotanto käyttäytyy, kun jossain tässä työssä käsitellyissä voimalaitoksissa on havaittu myrskypysäytys. Tapauskohtaisessa tarkastelussa tutkittiin myös kuinka usealla paikkakunnalla oli myrskyä samanaikaisesti. Oulunsalon, Kokkolan ja Kristiinankaupungin käsiteltävät voimalaitokset olivat Winwindin 1 MW:n laitoksia, jonka myrskysuojaustiedot on esitetty taulukossa 2. Porin data saatiin Bonuksen (nykyisin Siemens) 2 MW:n voimalaitoksesta, jonka myrskysuojaustiedot on esitetty taulukossa 4. Lumijoen tuulivoimala on Vestasin valmistama 660 kW:n voimala, joka pysähtyy tuulen 10 minuutin keskiarvolla 25 m/s ja aloittaa uudelleen toimintansa, kun tuulen nopeus laskee alle 20 metriin sekunnissa [36].

## 6.3 Datan kattavuus

Eri paikkakunnilta oli dataa saatavilla eri ajanjaksoilta. Taulukoissa 8 ja 10 on esitetty kunkin paikkakunnan käsiteltävien tuulen keskiarvojen määrä vuosittain. Taulukot 9 ja 11 puolestaan esittävät kunkin paikkakunnan mittausdatan kattavuuden.

Taulukko 8: Käsiteltävien 10 minuutin keskiarvojen lukumäärä vuosittain eri paikkakunnilla. Vuodessa 10 minuutin jaksoja on 52560 (karkausvuosina 2004 ja 2008 jaksoja on 52704).

Käsiteltävien 10 minuutin keskiarvojen lukumäärä vuosittain										
Paikkakunta	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Yhteensä
Oulunsalo <sup>1)</sup>	16596	42418	50969	51021	51667	50914	52483	50622	33587	400227
Kokkola <sup>2)</sup>	-	-	47164	51549	52283	52097	52063	52494	33366	341016
Kristiina <sup>3)</sup>	-	45719	52447	50956	52218	52162	52353	52358	34325	392538
Pori <sup>4)</sup>	-	-	-	-	44572	52098	52508	21599	-	170777

1) Oulunsalon data alkoi 24.8.2003 ja päättyi 28.8.2011

2) Kokkolan data alkoi 2.2.2005 ja päättyi 26.8.2011

3) Kristiinan data alkoi 1.1.2004 ja päättyi 27.8.2011

4) Porin data alkoi 19.1.2007 ja päättyi 31.5.2010

Taulukko 9: Taulukon 8 mittausarvojen kattavuus vuosittain eri paikkakunnilla vuosina 2003–2011.

Käsiteltävien arvojen määrä prosentteina vuosittain									
Paikkakunta	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Oulunsalo	86,47 %	80,48 %	96,97 %	97,07 %	98,30 %	96,60 %	99,85 %	96,31 %	97,52 %
Kokkola	-	-	98,51 %	98,08 %	99,47 %	98,85 %	99,05 %	99,87 %	97,54 %
Kristiina	-	86,75 %	99,79 %	96,95 %	99,35 %	98,97 %	99,61 %	99,62 %	99,93 %
Pori	-	-	-	-	89,32 %	98,85 %	99,90 %	99,99 %	-

Taulukko 10: Käsiteltävien tunnin keskiarvojen lukumäärä vuosittain Lumijoella. Vuodessa on 8760 tuntia (karkausvuosina 2000, 2004 ja 2008 tunteja on 8784).

Käsiteltävien tunnin keskiarvojen lukumäärä vuosittain Lumijoella													
1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Yhteensä
6705	8518	8704	8231	7874	8684	8345	8050	8573	8763	8760	5904	8376	105486

1) Lumijoen data alkoi 23.3.1999 ja päättyi 16.12.2011

Taulukko 11: Taulukon 10 mittausarvojen kattavuus vuosittain Lumijoella vuosina 1999–2011

Käsiteltävien arvojen määrä prosentteina Lumijoella vuosina 1999–2011												
1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
100,0 %	96,97 %	99,36 %	93,96 %	89,89 %	98,86 %	95,26 %	91,89 %	97,87 %	99,76 %	100,0 %	67,40 %	100,0 %

Taulukoista 9 ja 11 voidaan havaita, että suurin osa vuosista kattaa riittävän määrän dataa eri paikkakunnilla. Vertailtaessa paikkakuntia keskenään on huomioitava datan alkamis- ja päättymisajankohta sekä datan kattavuus tarkasteltavalta vuodelta.

## 7 Myrskyjen esiintyvyys Suomessa

### 7.1 Myrskyjen tilastollinen tarkastelu

Tässä luvussa esitetään tulokset tuulidatalle tehdyistä myrskyanalyyseistä. Myrskyjen esiintymistä tarkasteltiin saadun tuulidatan mukaan joko 10 minuutin keskiarvojen tai tunnin keskiarvojen perusteella. Lisäksi tässä luvussa tarkastellaan myös tuulen 10 minuutin sisäistä vaihtelua Porin osalta. Dataa oli kattavasti vuosilta 2005–2010 lukuun ottamatta vuoden 2010 osalta Poria ja Lumijokea.

#### 7.1.1 Myrskyjen määrä koko datasta

Taulukoissa 12–14 on esitetty myrskyjen määriä koko datasta eri paikkakunnilla. Kaiken kaikkiaan myrskytapaukset ovat kuitenkin melko harvinaisia. Yli 20 m/s:n keskiarvotuulet ovat huomattavasti yleisempiä kuin yli 25 m/s:n keskiarvotuulet. Analyysin perusteella Porissa sattuu yli 20 m/s:n tuulia keskimäärin 86,5 10 minuutin jaksoa vuodessa. Kokkolan yli 25 m/s:n tuulien prosenttiosuus 0,0044 % vastaa puolestaan keskimäärin 2,3 arvoa per vuosi.

Huomion arvoista on, että yli 25 m/s:n keskiarvotuulia on esiintynyt vain pohjoisimmilla paikkakunnilla. Verrattaessa taulukon 12 paikkakunnan keskiarvotuulien mukaan laskettujen myrskyjen määriä taulukon 13 paikkakunnan suurimman mitatun tuulen arvon mukaan laskettuihin myrskyjen määriin voidaan havaita, että yli 20 m/s:n arvoja on huomattavasti enemmän paikkakunnan suurimmilla arvoilla laskettaessa. Yli 25 m/s:n tuulia ei sen sijaan esiinny merkittävästi paikkakunnan suurimmankaan nopeuden mukaan laskettaessa. Porissa on eniten yli 20 m/s:n tuulia, mutta ei ainuttakaan yli 25 m/s:n rajaa rikkovaa tapahtumaa.

*Taulukko 12: Myrskyrajan ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden määrä puistojen keskiarvotuulen mukaan.*

Paikkakunnan voimaloiden tuulen nopeuksien keskiarvo	> 20 m/s	> 20 m/s % datasta	> 25 m/s	> 25 m/s % datasta	dataa yhteensä
Oulunsalo	100	0,0250 %	11	0,0027 %	400227
Kokkola	84	0,0246 %	15	0,0044 %	341016
Kristiina	72	0,0183 %	0	0,0000 %	392538
Pori	281	0,1645 %	0	0,0000 %	170777
<b>SUMMA</b>	<b>537</b>	<b>0,0412 %</b>	<b>26</b>	<b>0,0020 %</b>	<b>1304558</b>

Taulukko 13: Myrskyrajan ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden määrä puistojen maksimituulen mukaan.

Paikkakunnan voimaloiden tuulen nopeuksien suurin arvo	> 20 m/s	> 20 m/s % datasta	> 25 m/s	> 25 m/s % datasta	dataa yhteensä
Oulunsalo	271	0,0677 %	13	0,0032 %	400227
Kokkola	99	0,0290 %	17	0,0050 %	341016
Kristiina	272	0,0693 %	3	0,0008 %	392538
Pori	281	0,1645 %	0	0,0000 %	170777
<b>SUMMA</b>	<b>923</b>	<b>0,0708 %</b>	<b>33</b>	<b>0,0025 %</b>	<b>1304558</b>

Taulukko 14: Myrskyrajan ylittäneiden datapisteiden määrä Lumijoella tunnittaisen datan perusteella

Tunnittainen tuulen nopeus	> 20 m/s	% datasta	> 25 m/s	% datasta	dataa yhteensä
Lumijoki	108	0,1024 %	3	0,0028 %	105486

### 7.1.2 Myrskyjen jakaantuminen vuosittain

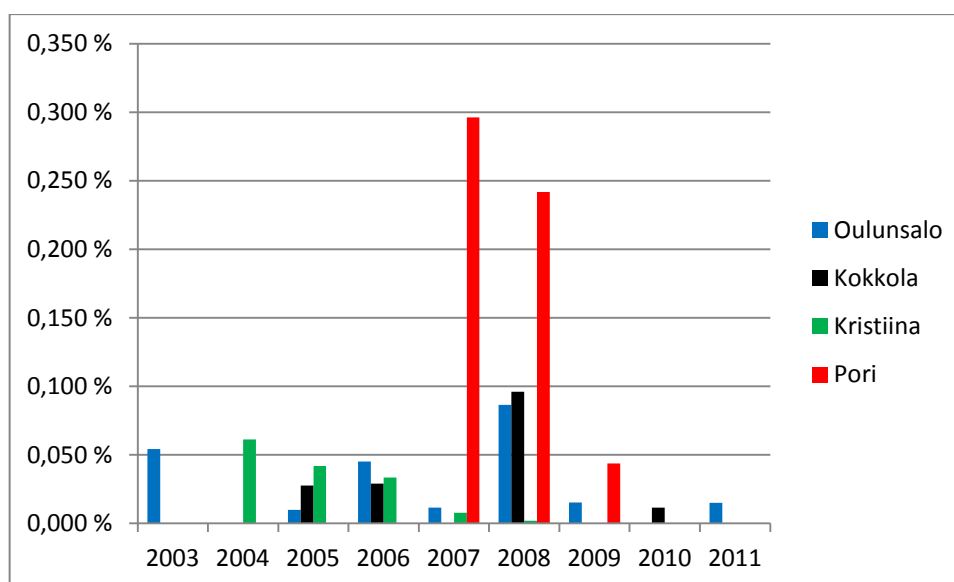
Taulukoissa 15–18 on esitetty yli 20 m/s:n tuulien jakaantumista vuosittain eri paikkakunnilla. Taulukoista 15 ja 16 voidaan huomioida, että erityisesti vuonna 2008 on esiintynyt huomattavasti myrskyjä. Taulukoista voidaan myös havaita, että eri vuodet eroavat huomattavasti myrskyjen määrissä. Vertaamalla taulukoita 15 ja 16 Lumijoen vastaaviin tilastoihin, taulukot 17 ja 18, on havaittavissa, että 2000-luvun alkupuolella on ollut ainakin Lumijoella enemmän rajan 20 m/s ylittäviä myrskyjä kuin myöhempinä vuosina, kuten vuonna 2008.

Taulukko 15: Rajan 20 m/s ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden jakautuminen vuosittain eri paikkakunnilla puiston keskiarvotuulen mukaan laskettuna.

> 20 m/s	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Oulunsalo	9	0	5	23	6	44	8	0	5
Kokkola	-	-	13	15	0	50	0	6	0
Kristiina	-	28	22	17	4	1	0	0	0
Pori	-	-	-	-	132	126	23	0	-
<b>SUMMA</b>	<b>9</b>	<b>28</b>	<b>40</b>	<b>55</b>	<b>142</b>	<b>221</b>	<b>31</b>	<b>6</b>	<b>5</b>

Taulukko 16: Rajan 20 m/s ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden osuus kaikista mitatuista arvoista vuosittain eri paikkakunnilla puiston keskiarvotuulen mukaan laskettuna.

> 20 m/s	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Oulunsalo	0,054 %	0,000 %	0,010 %	0,045 %	0,012 %	0,086 %	0,015 %	0,000 %	0,015 %
Kokkola	-	-	0,028 %	0,029 %	0,000 %	0,096 %	0,000 %	0,011 %	0,000 %
Kristiina	-	0,061 %	0,042 %	0,033 %	0,008 %	0,002 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %
Pori	-	-	-	-	0,296 %	0,242 %	0,044 %	0,000 %	-
<b>SUMMA</b>	<b>0,054 %</b>	<b>0,032 %</b>	<b>0,027 %</b>	<b>0,036 %</b>	<b>0,071 %</b>	<b>0,107 %</b>	<b>0,015 %</b>	<b>0,003 %</b>	<b>0,005 %</b>



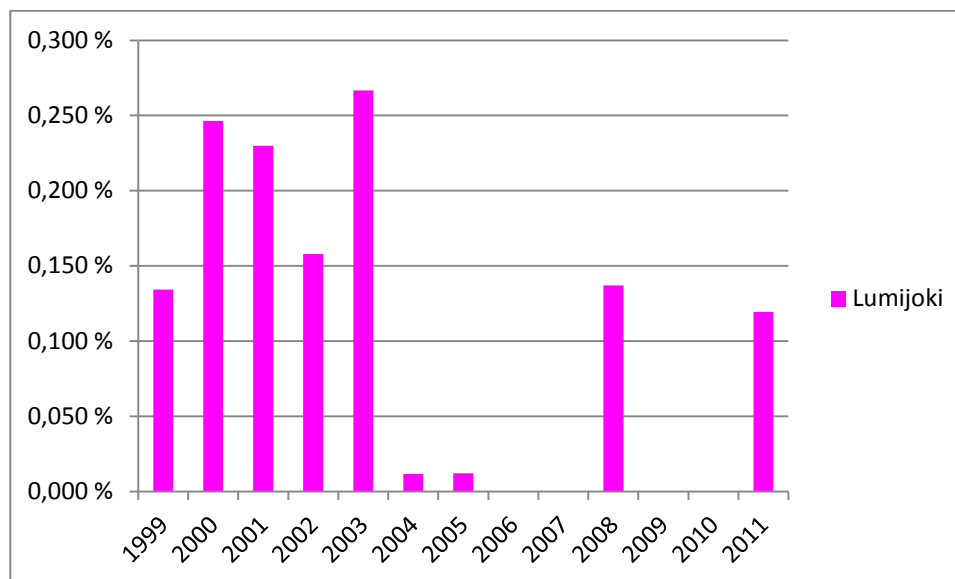
Kuva 18: Rajan 20 m/s ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden osuus kaikista mitatuista arvoista vuosittain eri paikkakunnilla puiston keskiarvotuulen mukaan laskettuna.

Taulukko 17: Yli 20 m/s:n tunnittaisten tuulen nopeuden keskiarvojen jakautuminen vuosittain Lumijoella.

> 20 m/s	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Lumijoki	9	21	20	13	21	1	1	0	0	12	0	0	10

Taulukko 18: Yli 20 m/s:n tunnittaisten tuulen nopeuden keskiarvojen osuus kaikista mitatuista arvoista vuosittain Lumijoella.

> 20 m/s	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Lumijoki	0,134 %	0,247 %	0,230 %	0,158 %	0,267 %	0,012 %	0,012 %	0,000 %	0,000 %	0,137 %	0,000 %	0,000 %	0,119 %



Kuva 19: Yli 20 m/s:n tunnittaisten tuulen nopeuden keskiarvojen osuus kaikista mitatuista arvoista vuosittain Lumijoella.

Taulukoissa 19–22 on esitetty yli 25 m/s:n tuulien jakaantumista vuosittain eri paikkakunnilla. Ainoastaan vuonna 2008 on esiintynyt yli 25 m/s:n tuulia. Kokkolassa tuuli ylitti 25 m/s:n rajan 23.11.2008. Oulunsalossa ja Lumijoella raja ylittyi vuoden viimeisenä päivänä 31.12.2008. Vaikka taulukoiden 17 ja 18 mukaan 2000-luvun alussa on Lumijoella ollut merkittävästi yli 20 m/s:n tuulia, ei raja 25 m/s ole kuitenkaan kyseisinä vuosina ylittynyt kertaakaan.

Taulukko 19: Rajan 25 m/s ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden jakautuminen vuosittain eri paikkakunnilla puiston keskiarvotuulen mukaan laskettuna.

> 25 m/s	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Oulunsalo	0	0	0	0	0	11	0	0	0
Kokkola	-	-	0	0	0	15	0	0	-
Kristiina	-	0	0	0	0	0	0	0	0
Pori	-	-	-	-	0	0	0	0	-
<b>SUMMA</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>26</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Taulukko 20: Yli 25 m/s:n puiston keskiarvotuulien osuus kaikista mitatuista arvoista vuosittain eri paikkakunnilla.

> 25 m/s	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Oulunsalo	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,022 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %
Kokkola	-	-	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,029 %	0,000 %	0,000 %	-
Kristiina	-	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %
Pori	-	-	-	-	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	-
<b>SUMMA</b>	<b>0,000 %</b>	<b>0,000 %</b>	<b>0,000 %</b>	<b>0,000 %</b>	<b>0,000 %</b>	<b>0,013 %</b>	<b>0,000 %</b>	<b>0,000 %</b>	<b>0,000 %</b>

Taulukko 21: Yli 25 m/s:n tunnitusten tuulen nopeuden keskiarvojen jakautuminen vuosittain Lumijoella.

> 25 m/s	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Lumijoki	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0

Taulukko 22: Yli 25 m/s:n tunnitusten tuulen nopeuden keskiarvojen osuus prosentteina vuosittain Lumijoella.

> 25 m/s	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Lumijoki	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,034 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %

### 7.1.3 Myrskyjen jakaantuminen kuukausien mukaan

Rajan 20 m/s ylittävien myrskyjen jakaantuminen kuukausien mukaan on esitetty taulukoissa 23–28. Myrskyt ajoittuvat pääsääntöisesti syys- ja talvikuukausille. Kaiken kaikkiaan jokaisella kuukaudella on kuitenkin esiintynyt vähintään yksi yli 20 m/s:n tapahtuma. Eteläisimmillä paikkakunnilla myrskyjä on ollut eniten syksyllä, kun taas pohjoisimmilla paikkakunnilla Oulunsalolla ja Lumijoella myrskyt ovat painottuneet marrastammikuun ajalle. Porissa on myös huhtikuussa ollut merkittävästi myrskyjä. Kesäkuukaudet Poria lukuun ottamatta ovat olleet täysin myrskyttömiä.

Taulukko 23: Rajan 20 m/s ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden jakautuminen kuukausittain eri paikkakunnilla puiston keskiarvotuulen mukaan laskettuna.

> 20 m/s	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Oulunsalo	18	0	3	5	7	0	0	0	2	0	12	53
Kokkola	0	11	0	0	0	0	0	0	0	33	37	3
Kristiina	4	0	0	0	1	0	0	0	12	17	27	11
Pori	10	29	18	54	8	1	4	0	33	42	67	15
<b>SUMMA</b>	<b>32</b>	<b>40</b>	<b>21</b>	<b>59</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>47</b>	<b>92</b>	<b>143</b>	<b>82</b>

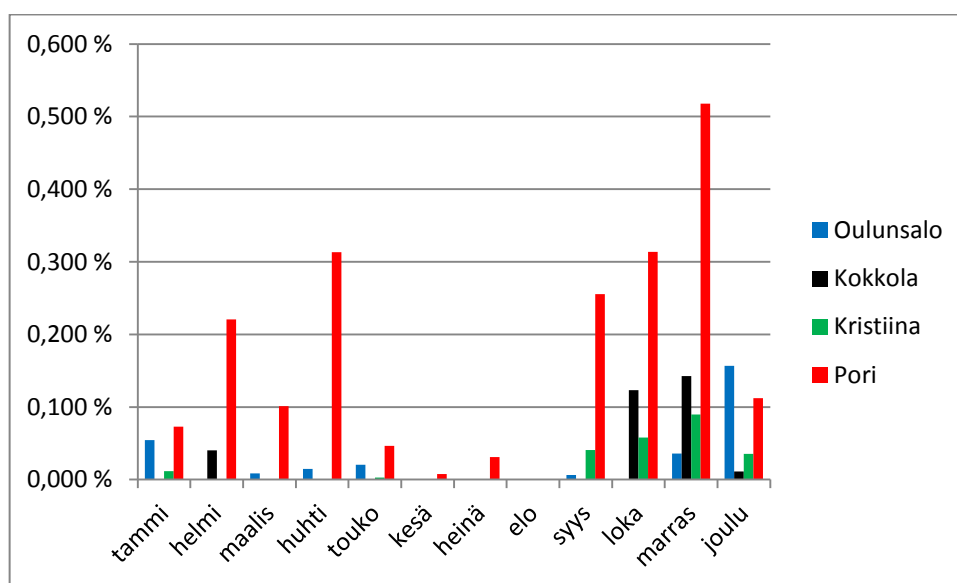


Taulukko 24: Yli 20 m/s:n puiston keskiarvotuulien jakautuminen prosentteina kuukausien mukaan eri paikkakunnilla

> 20 m/s	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Oulunsalo	18 %	0 %	3 %	5 %	7 %	0 %	0 %	0 %	2 %	0 %	12 %	53 %
Kokkola	0 %	13 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	39 %	44 %	4 %
Kristiina	6 %	0 %	0 %	0 %	1 %	0 %	0 %	0 %	17 %	24 %	38 %	15 %
Pori	4 %	10 %	6 %	19 %	3 %	0 %	1 %	0 %	12 %	15 %	24 %	5 %
<b>SUMMA</b>	<b>6 %</b>	<b>7 %</b>	<b>4 %</b>	<b>11 %</b>	<b>3 %</b>	<b>0 %</b>	<b>1 %</b>	<b>0 %</b>	<b>9 %</b>	<b>17 %</b>	<b>27 %</b>	<b>15 %</b>

Taulukko 25: Yli 20 m/s:n puiston keskiarvotuulien osuus kaikista mitatuista arvoista kuukausittain eri paikkakunnilla.

> 20 m/s	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Oulunsalo	0,054 %	0,000 %	0,009 %	0,015 %	0,021 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,006 %	0,000 %	0,036 %	0,157 %
Kokkola	0,000 %	0,040 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,123 %	0,143 %	0,011 %
Kristiina	0,012 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,003 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,041 %	0,058 %	0,090 %	0,035 %
Pori	0,073 %	0,221 %	0,101 %	0,313 %	0,046 %	0,008 %	0,031 %	0,000 %	0,255 %	0,314 %	0,518 %	0,112 %
<b>SUMMA</b>	<b>0,030 %</b>	<b>0,039 %</b>	<b>0,018 %</b>	<b>0,051 %</b>	<b>0,014 %</b>	<b>0,001 %</b>	<b>0,004 %</b>	<b>0,000 %</b>	<b>0,047 %</b>	<b>0,089 %</b>	<b>0,139 %</b>	<b>0,078 %</b>



Kuva 20: Yli 20 m/s:n puiston keskiarvotuulien osuus kaikista mitatuista arvoista kuukausittain eri paikkakunnilla.

Taulukko 26: Yli 20 m/s:n puiston tunnitaitaisten keskiarvotuulien jakautuminen kuukausien mukaan Lumijoella

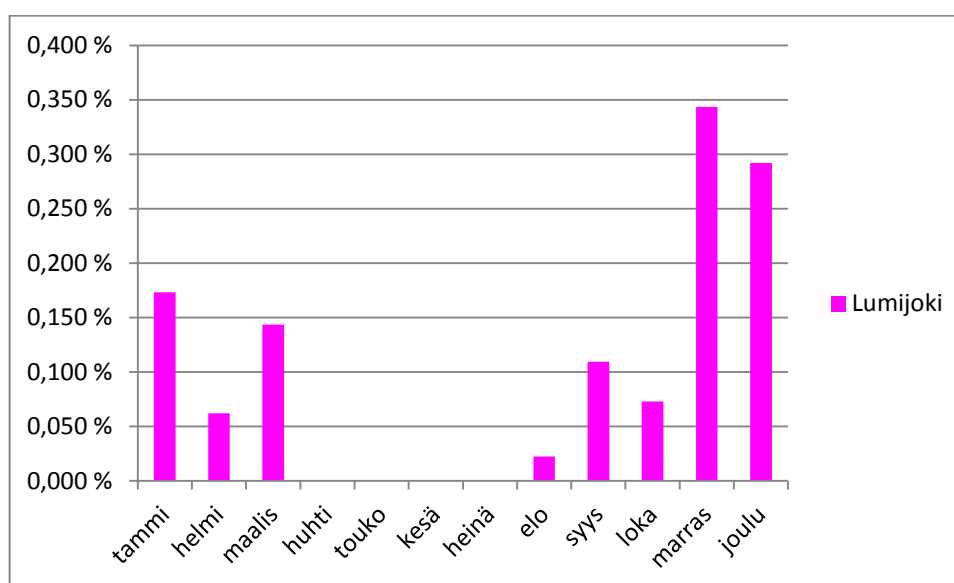
> 20 m/s	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Lumijoki	14	5	13	0	0	0	0	2	10	7	32	25

Taulukko 27: Yli 20 m/s:n puiston tunnitaitaisten keskiarvotuulien jakautuminen prosentteina kuukausien mukaan Lumijoella

> 20 m/s	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Lumijoki	13 %	5 %	12 %	0 %	0 %	0 %	0 %	2 %	9 %	6 %	30 %	23 %

Taulukko 28: Yli 20 m/s:n puiston keskiarvotuulien osuus kaikista mitatuista arvoista kuukausittain Lumijoella

> 20 m/s	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Lumijoki	0,173 %	0,062 %	0,143 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,000 %	0,022 %	0,109 %	0,073 %	0,343 %	0,292 %



Kuva 21: Yli 20 m/s:n puiston keskiarvotuulien osuus kaikista mitatuista arvoista kuukausittain Lumijoella

Taulukoissa 29–30 on puolestaan esitetty rajan 25 m/s ylittäneiden myrskyjen jakautuminen kuukausittain. Ainoastaan marras- ja joulukuussa on esiintynyt kovia myrskyjä, ja niitäkin vain pohjoisimmilla paikkakunnilla. Kokkolassa tuuli ylitti 25 m/s:n rajan 23.11.2008. Oulunsalossa ja Lumijoella raja ylittyi 31.12.2008

*Taulukko 29: Rajan 25 m/s ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden jakautuminen kuukausittain eri paikkakunnilla puiston keskiarvotuulen mukaan laskettuna.*

> 25 m/s	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Oulunsalo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
Kokkola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0
Kristiina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pori	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>SUMMA</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>11</b>

*Taulukko 30: Yli 25 m/s:n puiston tunnitaiten keskiarvotuulien jakautuminen kuukausien mukaan Lumijoella*

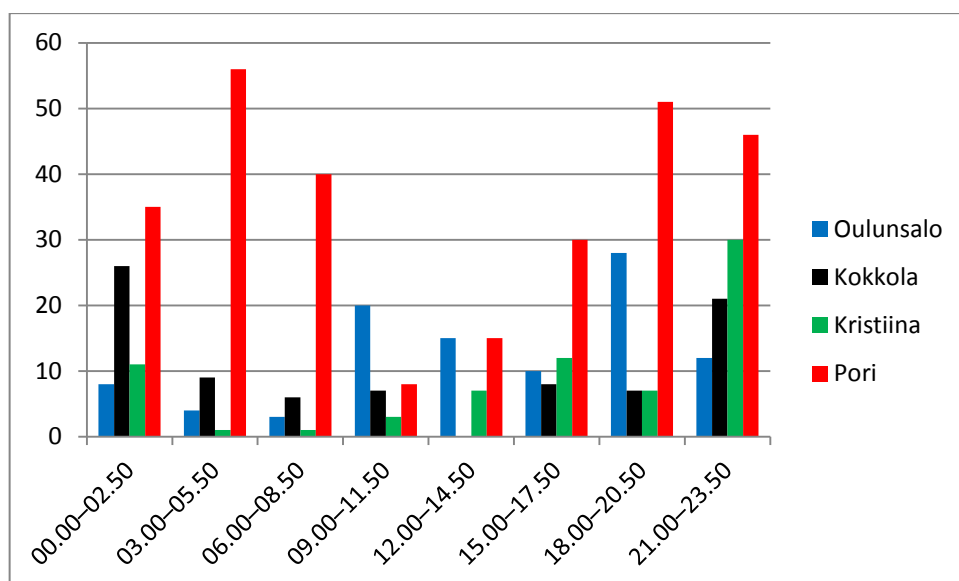
> 25 m/s	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Lumijoki	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

#### 7.1.4 Myrskyjen ajoittuminen kellonajan mukaan

Taulukoissa 31–34 on esitetty yli 20 m/s:n myrskyjen ajoittuminen kellonajan mukaan. Voidaan havaita, että myrskyjä on esiintynyt jokaisena vuorokauden aikana. Myrskyjen ajoitukset painottuvat hieman eri tavalla eri paikkakunnilla. Kaiken kaikkiaan myrskyt ovat painottuneet hieman enemmän iltaan ja yöhön. Kokkolassa ja Kristiinankaupungissa painotus on selkeämmin yöaikaan, mutta muilla paikkakunnilla myrskyt ovat jakaantuneet tasaisemmin.

*Taulukko 31: Rajan 20 m/s ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden jakautuminen kellonajan mukaan eri paikkakunnilla puiston keskiarvotuulen mukaan laskettuna.*

> 20 m/s	00.00– 02.50	03.00– 05.50	06.00– 08.50	09.00– 11.50	12.00– 14.50	15.00– 17.50	18.00– 20.50	21.00– 23.50
Oulunsalo	8	4	3	20	15	10	28	12
Kokkola	26	9	6	7	0	8	7	21
Kristiina	11	1	1	3	7	12	7	30
Pori	35	56	40	8	15	30	51	46
<b>SUMMA</b>	<b>80</b>	<b>70</b>	<b>50</b>	<b>38</b>	<b>37</b>	<b>60</b>	<b>93</b>	<b>109</b>



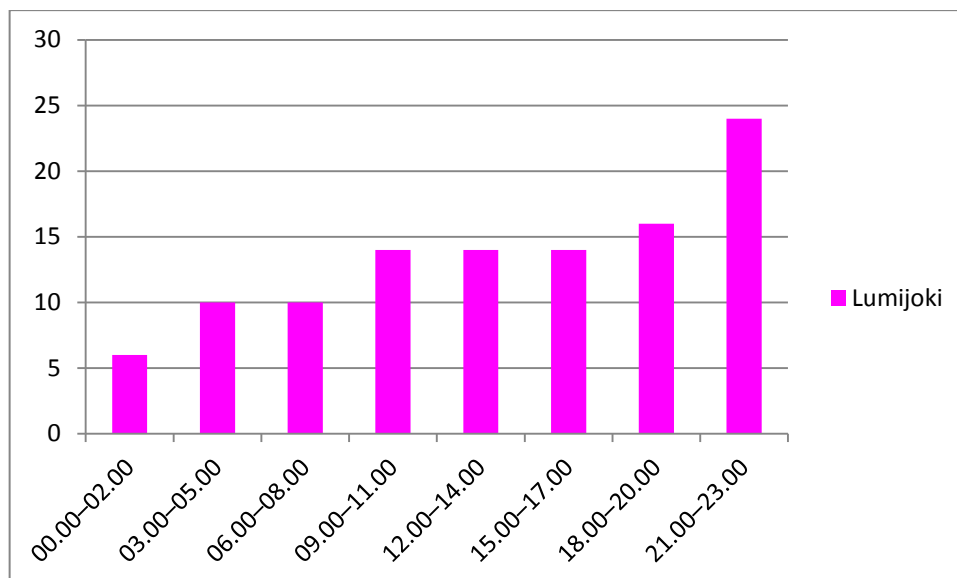
Kuva 22: Rajan 20 m/s ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden jakautuminen kellonajan mukaan eri paikkakunnilla puiston keskiarvotuulen mukaan laskettuna.

Taulukko 32: Yli 20 m/s:n puiston keskiarvotuulien jakautuminen prosentteissa kellonajan mukaan eri paikkakunnilla

> 20 m/s	00.00–02.50	03.00–05.50	06.00–08.50	09.00–11.50	12.00–14.50	15.00–17.50	18.00–20.50	21.00–23.50
Oulunsalo	8 %	4 %	3 %	20 %	15 %	10 %	28 %	12 %
Kokkola	31 %	11 %	7 %	8 %	0 %	10 %	8 %	25 %
Kristiina	15 %	1 %	1 %	4 %	10 %	17 %	10 %	42 %
Pori	12 %	20 %	14 %	3 %	5 %	11 %	18 %	16 %
<b>SUMMA</b>	<b>15 %</b>	<b>13 %</b>	<b>9 %</b>	<b>7 %</b>	<b>7 %</b>	<b>11 %</b>	<b>17 %</b>	<b>20 %</b>

Taulukko 33: Yli 20 m/s:n puiston tunnitusten keskiarvotuulien jakautuminen kellonajan mukaan Lumijoella

> 20 m/s	00.00–02.00	03.00–05.00	06.00–08.00	09.00–11.00	12.00–14.00	15.00–17.00	18.00–20.00	21.00–23.00
Lumijoki	6	10	10	14	14	14	16	24



Kuva 23: Yli 20 m/s:n puiston tunnitusten keskiarvotuulien jakautuminen kellonajan mukaan Lumijoella

Taulukko 34: Yli 20 m/s:n puiston tunnitusten keskiarvotuulien jakautuminen prosentteina kellonajan mukaan Lumijoella

> 20 m/s	00.00–02.00	03.00–05.00	06.00–08.00	09.00–11.00	12.00–14.00	15.00–17.00	18.00–20.00	21.00–23.00
Lumijoki	6 %	9 %	9 %	13 %	13 %	13 %	15 %	22 %

Yli 25 m/s:n myrskyjen jakautumista kellonajan mukaan on tarkasteltu taulukoissa 35–38. Taulukoista voidaan havaita, että kaikki kovat myrskyt ovat ajoittuneet keskipäivän ja puolen yön väliselle ajalle. Kokkolassa rajan 25 m/s ylittänyt myrsky tapahtui 23.11.2008 klo 20.30–23.30 välisenä aikana. 31.12.2008 tapahtunut myrsky aiheutti rajan 25 m/s ylitykset Lumijoella klo 14–16 ja Oulunsalossa klo 17.30–20.20 välisenä aikana.

Taulukko 35: Rajan 25 m/s ylittäneiden 10 minuutin datapisteiden jakautuminen kellonajan mukaan eri paikkakunnilla puiston keskiarvotuulen mukaan laskettuna.

> 25 m/s	00.00–02.50	03.00–05.50	06.00–08.50	09.00–11.50	12.00–14.50	15.00–17.50	18.00–20.50	21.00–23.50
Oulunsalo	0	0	0	0	0	2	9	0
Kokkola	0	0	0	0	0	0	2	13
Kristiina	0	0	0	0	0	0	0	0
Pori	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>SUMMA</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>11</b>	<b>13</b>

Taulukko 36: Yli 25 m/s:n puiston keskiarvotuulien jakautuminen prosenteissa kellonajan mukaan eri paikkakunnilla

> 25 m/s	00.00– 02.50	03.00– 05.50	06.00– 08.50	09.00– 11.50	12.00– 14.50	15.00– 17.50	18.00– 20.50	21.00– 23.50
Oulunsalo	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	18 %	82 %	0 %
Kokkola	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	13 %	87 %
Kristiina	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Pori	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
<b>SUMMA</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>	<b>8 %</b>	<b>42 %</b>	<b>50 %</b>

Taulukko 37: Yli 25 m/s:n puiston tunnitusten keskiarvotuulien jakautuminen kellonajan mukaan Lumijoella

> 25 m/s	00.00– 02.00	03.00– 05.00	06.00– 08.00	09.00– 11.00	12.00– 14.00	15.00– 17.00	18.00– 20.00	21.00– 23.00
Lumijoki	0	0	0	0	1	2	0	0

Taulukko 38: Yli 25 m/s:n puiston tunnitusten keskiarvotuulien jakautuminen prosentteina kellonajan mukaan Lumijoella

> 25 m/s	00.00– 02.00	03.00– 05.00	06.00– 08.00	09.00– 11.00	12.00– 14.00	15.00– 17.00	18.00– 20.00	21.00– 23.00
Lumijoki	0 %	0 %	0 %	0 %	33 %	67 %	0 %	0 %

### 7.1.5 Myrskyjen kestot

Myrskyjen esiintymistiheyden lisäksi on mielenkiintoista tietää kuinka pitkään ne sattuessaan ovat kestäneet. Taulukossa 39 on esitetty 20 m/s rajan ylittäneiden myrskyjen yhtäjaksoiset kestot ja tapahtumien lukumäärät. Kesto on siis määritelty niin, että tapahtuma alkaa, kun puiston keskituulen nopeus ylittää rajan 20 m/s ja loppuu, kun nopeus alittaa kyseisen rajan.

Taulukko 39: Yhtäjaksoisten rajan 20 m/s ylittäneiden myrskyjen kestot ja lukumäärät eri paikkakunnilla.

kesto (min)	Oulunsalo	Kokkola	Kristiina	Pori	kesto (min)	Oulunsalo	Kokkola	Kristiina	Pori
10	15	8	14	38	200	-	-	-	-
20	7	8	5	21	210	-	-	-	1
30	7	2	3	6	220	-	-	-	-
40	1	2	1	5	230	-	-	-	-
50	4	-	-	4	240	-	-	-	-
60	-	-	-	-	250	-	-	-	-
70	-	-	-	1	260	1	-	-	-
80	-	-	1	2	270	-	-	1	-
90	-	1	-	1	280	-	-	-	1
100	-	-	-	-	290	-	-	-	-
110	-	-	-	1	300	-	-	-	-
120	-	-	-	-	310	-	-	-	-
130	-	-	-	-	320	-	-	-	-
140	-	-	-	-	330	-	-	-	-
150	-	-	-	1	340	-	-	-	-
160	-	-	-	1	350	-	-	-	-
170	-	-	-	-	360	-	-	-	-
180	-	-	-	1	370	-	1	-	-
190	-	-	-	-	380	-	-	-	-

Taulukosta 39 nähdään että, yleensä tuulen nopeus ylittää 20 m/s vain 10–20 minuuttia kerrallaan. Paikkakunnittain pisimmät myrskyt ovat kestäneet Oulunsalossa 260 minuuttia eli 4 tuntia 20 minuuttia, Kokkolassa 370 minuuttia eli 6 tuntia 10 minuuttia, Kristiinankaupungissa 270 minuuttia eli 4 tuntia 30 minuuttia ja Porissa 280 minuuttia eli 4 tuntia 40 minuuttia. Yli tunnin kestäneitä myrskyjä on sattunut Oulunsalossa 1, Kokkolassa 2 ja Porissa 10 kappaletta.

Taulukossa 40 on esitetty rajan 25 m/s ylittäneiden myrskyjen kestot Oulunsalossa ja Kokkolassa. Kokkolassa on esiintynyt kolme yli 25 m/s:n myrskyä, joista pisin on kestänyt 1,5 tuntia ja ne ovat sattuneet kaikki 23.11.2008. Oulunsalon rajan 25 m/s ylitykset ovat tapahtuneet 31.12.2008 sattuneen myrskyn aikana.

Taulukko 40: Yhtäjaksoisten rajan 25 m/s ylittäneiden myrskyjen kestot ja lukumäärät eri paikkakunnilla

kesto (min)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Oulunsalo	3	1	0	0	1	0	0	0	0
Kokkola	0	1	0	1	0	0	0	0	1

Lumijoen myrskyjen kestot on esitetty taulukossa 41. Yli 25 m/s:n rajan ylittäneitä myrskyjä on ollut vain yksi 31.12.2008 ja sen kesto on ollut 3 tuntia.

*Taulukko 41: Yhtäjaksoisten 20 m/s:n ja 25 m/s:n rajojen ylittäneiden myrskyjen kestot ja lukumäärät Lumijoella*

kesto (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
>20 m/s	11	3	5	3	5	0	1	0	1	1	0	0	1
>25 m/s	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 7.1.6 Tuulen nopeuden vaihtelu 10 minuutin sisällä myrskyjen aikana Porissa

Kuten luvussa 6.1 mainittiin, Porin tuulivoimalan mittausaineistossa oli 10 minuutin tuulen keskiarvon lisäksi myös 10 minuutin sisäinen tuulen maksimi- ja minimiarvo. Taulukossa 42 on tarkasteltu 10 minuutin sisäisen maksimi- ja minimiarvon käyttäytymistä, kun tuulen keskiarvo on ylittänyt rajan 20 m/s.

*Taulukko 42: Porin 10 minuutin sisäisen tuulen nopeuden minimi- ja maksimiarvojen poikkeamat keskiarvosta myrskyjen aikana, kun tuulen 10 minuutin keskiarvo on ollut yli 20 m/s. Kaikista sisäisistä maksimeista ja minimeistä on esitetty keskiarvot ja ääriarvot.*

Tuulen 10 min keskiarvo	Tuulen 10 min <u>sisäiset</u> maksimit		Tuulen 10 min <u>sisäiset</u> minimit		Tuulen 10 min ajanjaksojen maksimin ja minimin erotus	
	sisäisten maksimien keskiarvo	sisäisten maksimien suurin arvo	sisäisten minimien keskiarvo	sisäisten minimien pienin arvo	erotusten keskiarvo	erotusten suurin arvo
20–20,9	24,8	29,1	16,1	9,9	8,7	15,6
21–21,9	26,0	31,2	17,3	14,1	8,7	16,6
22–22,9	27,3	31,2	17,7	16,1	9,6	14,9
23–23,9	28,3	29,1	18,5	18,0	9,8	10,4
24–24,9	29,3	29,5	19,4	17,9	9,9	11,6

Taulukosta 42 voidaan havaita, että keskimäärin tuulen 10 minuutin sisäinen maksimi on 10 minuutin keskiarvoon verrattuna noin 5 m/s suurempi. Suurimmat maksimit ovat kuitenkin ylittäneet 31 m/s:n nopeuden, vaikka keskiarvo on ollut vain hieman yli 20 m/s. 10 minuutin sisäiset minimiarvot vaihtelevat keskimäärin samassa suhteessa kuin maksimit eli minimi on keskimäärin noin 5 m/s pienempi kuin keskiarvo. Tarkastelemalla yksittäisten myrskytahtumien 10 minuutin sisäisen maksimin ja minimin ero-



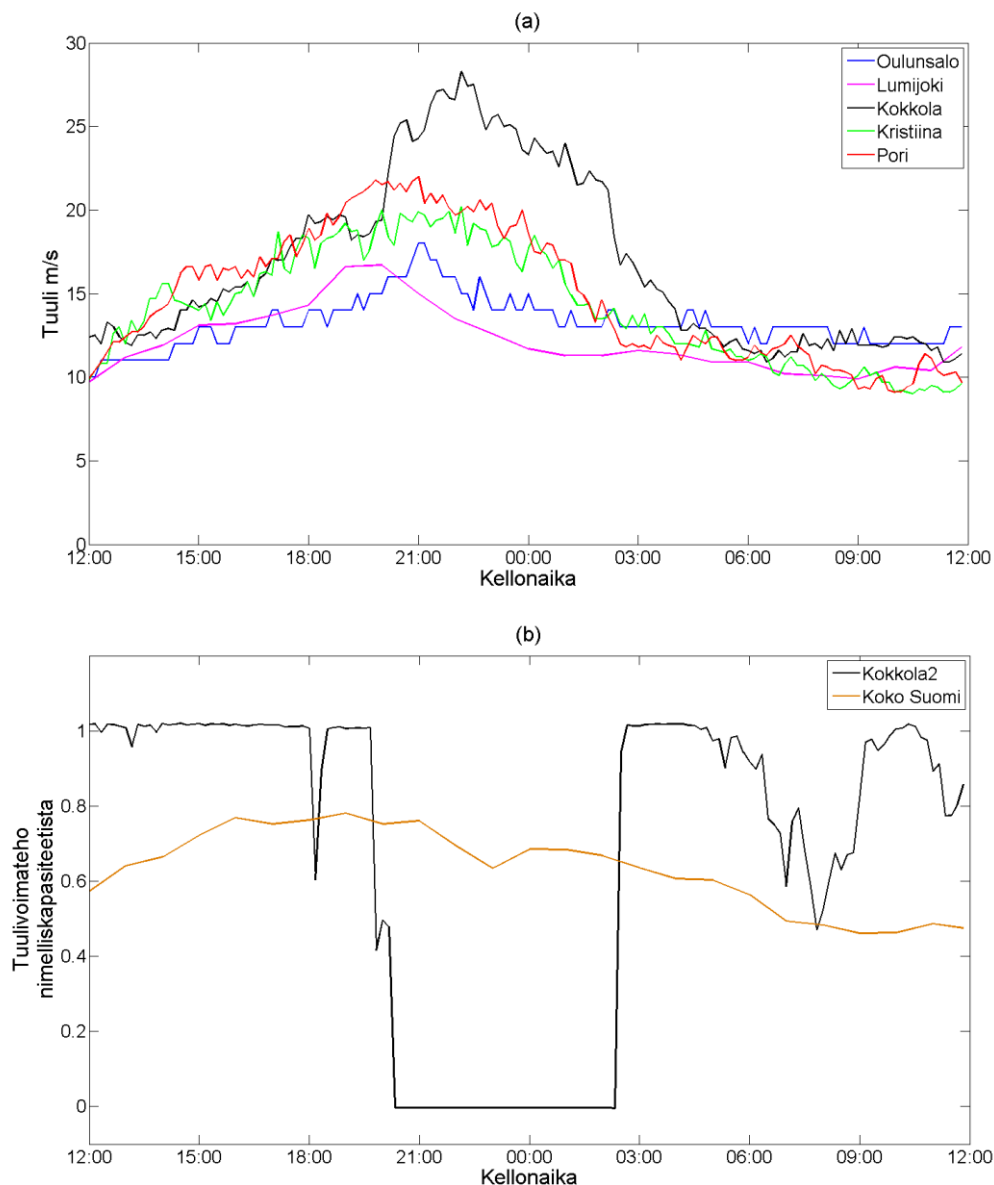
tusta, voidaan havaita, että 10 minuutin sisäinen vaihtelu on huomattavaa myrskyjen aikana. Suurimmillaan 10 min sisäisen minimin ja maksimin erotus on ollut yli 16 m/s.

## 7.2 Myrskytapahtumien tarkastelu

Tässä luvussa tarkastellaan yksittäisiä myrskytapahtumia. Myrskytapahtumista esitetään esimerkkitapauksia, joissa voimalaitoksia on pysähtynyt myrskyn seurauksena. Tarkastelun kohteena oli myös koko Suomen tuulivoiman tehontuotannon käyttäytyminen myrskyjen aikana. Kuvissa tuulen nopeus on puiston suurin nopeus, joka on mitattu puiston voimaloista. Tehontuotantoa tarkastellaan puolestaan niiden voimaloiden osalta, joissa on tapahtunut myrskysuojauksen kannalta jotain mielenkiintoista sekä koko Suomen tuulituotannon osalta. Tehontuotanto on esitetty kuvissa prosentteina kapasiteetista, jolloin vertailu eri voimaloiden välillä on helpompaa. Voimalat on nimetty tässä työssä paikkakunnan ja valitun numeron mukaan (viralliset nimet poikkeavat osin tässä työssä käytetyistä nimistä).

### 7.2.1 10 minuutin myrskyraja ylittynyt

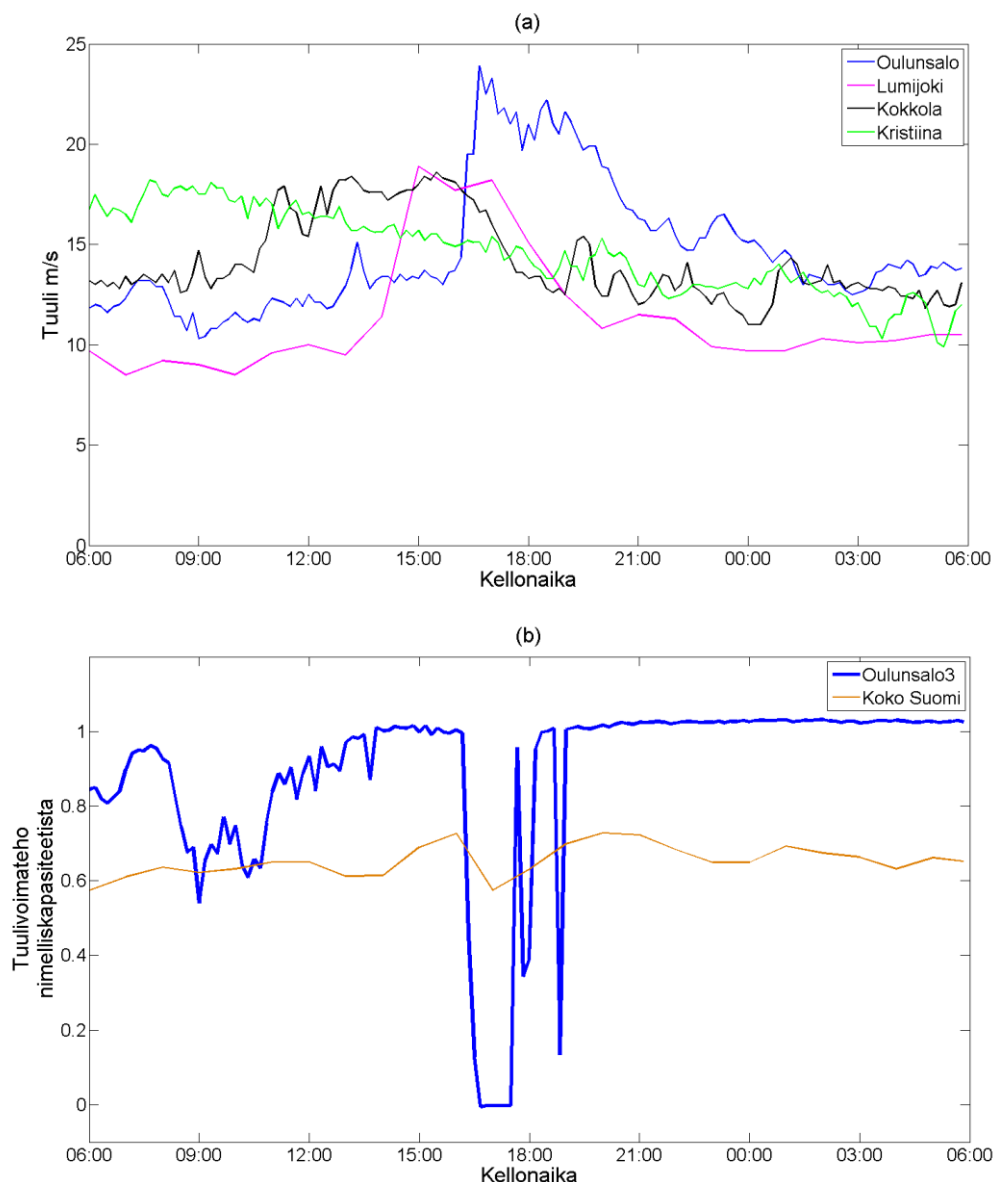
Kuvassa 24 on esitetty marraskuun 23. ja 24. päivänä vuonna 2008 sattuneen myrskyn tuulen nopeudet eri paikkakunnilla ja tehontuotanto Kokkolassa ja koko Suomen osalta. Päivä on ollut poikkeuksellisen kovatuulinen, sillä Kokkolassa, Kristiinankaupungissa ja Porissa on ylittynyt 20 m/s. Kuitenkin voimalaitosten myrskyraja on ylittynyt vain Kokkolassa, jossa tehon tuotanto on pudonnut noltaan 6 tunnin ja 10 minuutiksi. Koko Suomen tuotantoon myrsky ei ole juurikaan vaikuttanut. Suurin tehontuotannon supistuminen on -7 % tunnissa Suomen koko kapasiteetista – ja silloin Kokkolan laitos on ollut jo pois päältä.



Kuva 24: 23–24.11.2008 esiintyneen myrskyn (a) tuulen käyttäytyminen eri paikkakunnilla sekä (b) tehontuotanto Kokkolassa ja koko Suomen osalta.

### 7.2.2 Puuskaraja ylittynyt

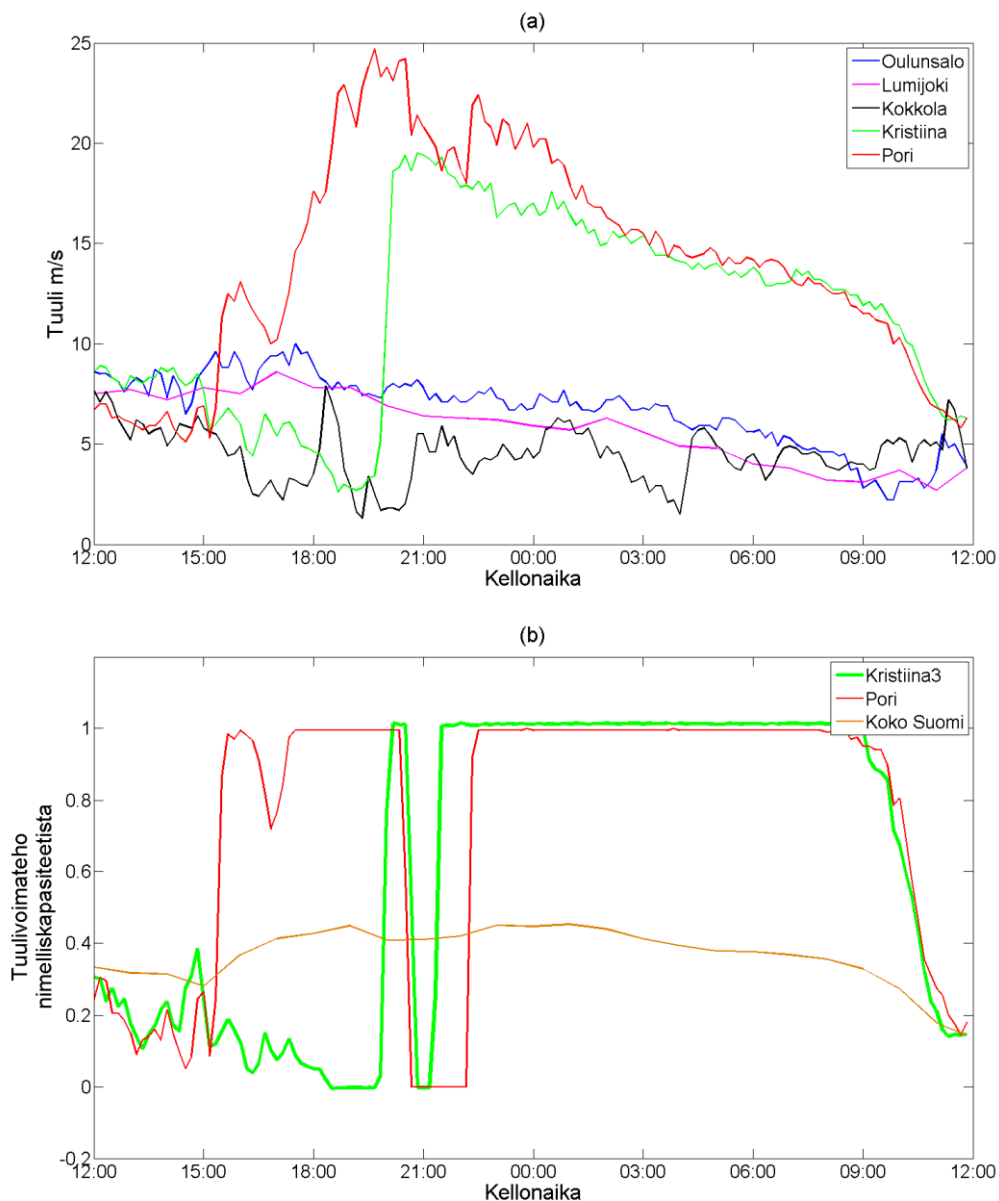
Kuvassa 25 on esitetty esimerkkitapaus tuulivoiman käyttäytymisestä myrskyn aikana, kun 10 minuutin myrskysuojajausraja ei ole ylittynyt. Kuvassa 25a on esitetty tuulen nopeuden käyttäytyminen neljällä eri paikkakunnalla. Oulunsalossa on ainoastaan esiintynyt myrskyä. Kuvasta 25b nähdään, että voimalaitos Oulunsalo3 on pysähtynyt noin klo 16.20. Voimalaitos on pysähtynyt, vaikka tuulen nopeus ei ole saavuttanut 10 minuutin myrskyrajaa 24 m/s (suurin arvo 23,8 m/s). On siis todennäköistä, että jompikumpi lyhyemmän aikaikkunan myrskyraja on ylittynyt. Mielenkiintoisinta on kuitenkin, että hieman ennen Oulunsalo3 voimalaitoksen reagoimista, on Suomen koko tuulivoiman tuotanto kääntynyt voimakkaasti laskuun. Tehontuotannon jyrkin lasku on -15,2 % tunnissa Suomen koko kapasiteetista.



Kuva 25: 26–27.11.2006 esiintyneen myrskyn (a) tuulen käyttäytyminen eri paikkakunnilla sekä (b) tehontuotanto Oulunsalossa ja koko Suomen osalta.

Kuvassa 26 on esitetty 15.9.2007 tapahtuneen myrskyn käyttäytyminen. Kuvasta 26a nähdään, että tuuli on nopeasti kasvanut ensin Porissa ja todella jyrkästi noin kolme tuntia myöhemmin Kristiinankaupungissa. Kummallakaan paikkakunnalla voimaloiden 10 minuutin myrskyraja ei ole ylittynyt, mutta Porin ja Kristiina3:n voimalaitokset ovat pysähtyneet. Porissa voimalaitos on pysähtynyt, kun 10 minuutin sisäinen maksimi on saanut arvon 29,5 m/s. 30 sekunnin puuskarajan 28 m/s ylittyminen on todennäköisesti pysäyttänyt voimalaitoksen. Kristiina3:n pysähdys voi samoin johtua jonkin puuskarajan ylittymisestä, varsinkin kun tuulen nopeuden muutos on ollut todella nopeaa. Tästä myrskyn aikana koko Suomen tuotanto ei ole reagoinut nopeasti, vaan tuotanto on myrskyn ajan ollut hyvin tasaista. Kello 15 Porissa tuulen nopeuden kasvaessa, on koko Suomen tuotanto kasvanut 8,8 % koko kapasiteetista tunnissa. Puolestaan myrsk-

kyn laannuttua noin kello 10–11 on koko Suomen tehon tuotannon suurin lasku tunnissa ollut -9,5 % koko kapasiteetista.

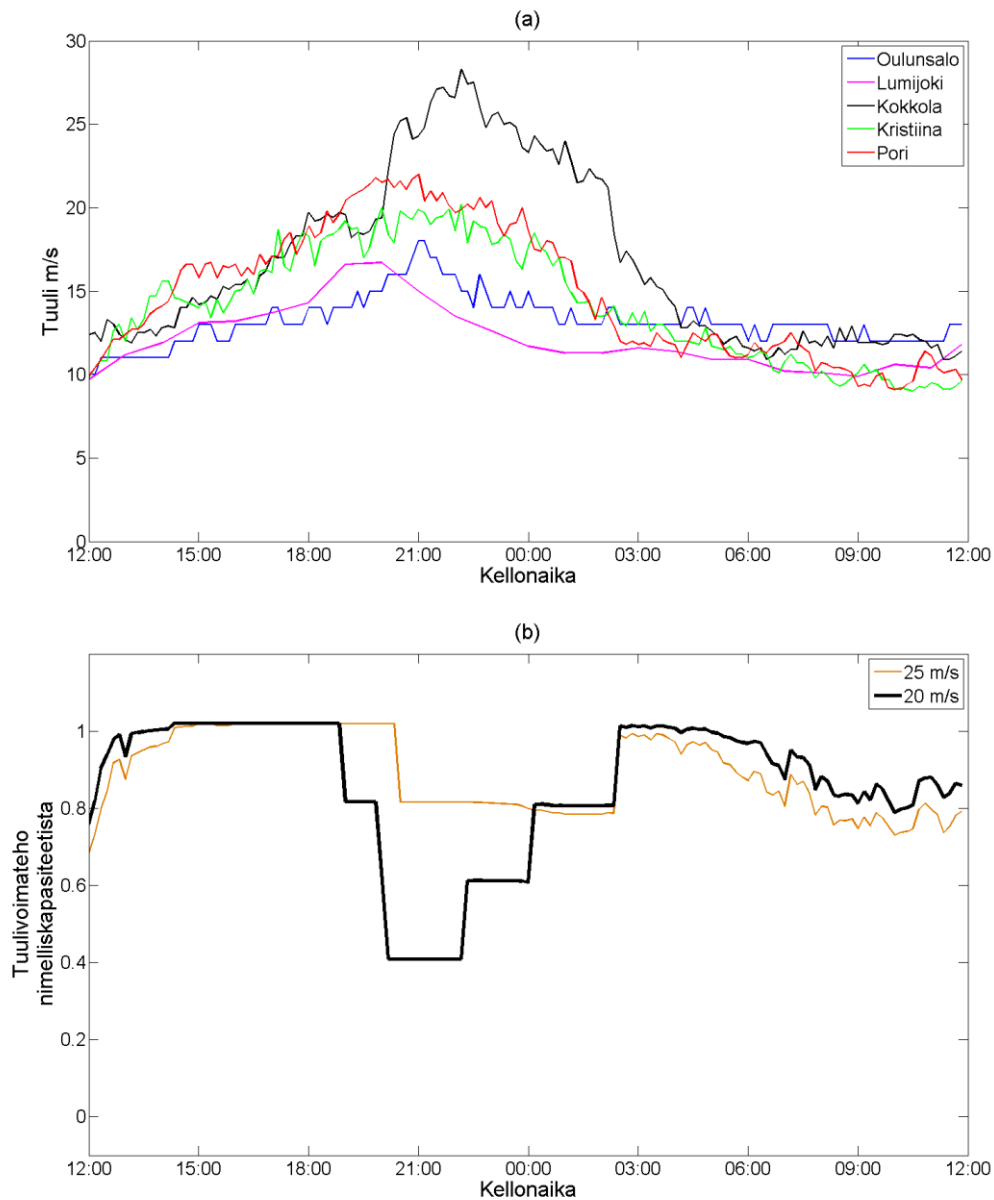


Kuva 26: 15–16.09.2007 esiintyneen myrskyn (a) tuulen käyttäytyminen eri paikkakunnilla sekä (b) tehontuotanto Kristiinassa, Porissa ja koko Suomen osalta.

### 7.2.3 Myrskysätörajan riittävyys

Myrskysätörajan riittävyttä vertailtiin simuloinnin avulla pysäytysnopeuksilla 25 m/s ja 20 m/s (10 minuutin keskiarvo). Vertailu tehtiin niin, että jokaiselle paikkakunnalle asetettiin sama myrskyraja ja ainoastaan yksi voimalaitos, joka tuotti valittujen tehokäyrien mukaisesti todellisesti mitattujen tuulen nopeuksien mukaan. Simuloinnit toteutettiin myrskyille, joita tämän työn datassa havaittiin. Myrskyrajasimulointien perusteella tuotannon supistumisen kannalta pahin tilanne on esitetty kuvassa 27. Kuvassa 27a on esitetty 23–24.11.2008 todellisesti esiintyneen myrskyn tuulen nopeudet eri paikkakunnilla. Kuvassa 27b on esitetty voimaloiden yhteenlaskettu teho suhteessa viiden voima-

laitoksen nimelliskapasiteettiin molemmilla pysäytysrajoilla. 25 m/s rajalla tuotanto laskee vain yhdellä paikkakunnalla nolnaan myrskysuojauksen vaikutuksesta. Myrskysuojausrajalla 20 m/s puolestaan ainoastaan pohjoisimmat paikkakunnat Oulunsalo ja Lumijoki jatkavat tuotantoaan nimellisteholla kokonaistuotannon ollessa alimmillaan.



*Kuva 27: 23–24.11.2008 esiintyneen myrskyn (a) tuulen käyttäytyminen eri paikkakunnilla sekä yhteenlaskettu (b) tehontuotanto voimaloista kahdella eri voimaloiden myrskypysäytysrajalla: 25 m/s ja 20 m/s, jos viidellä paikkakunnalla olisi yhtä paljon tuulivoimaa. Molemmissa tapauksissa tuotanto aloitetaan myrskypysäytyksen jälkeen kun tuulen nopeus alittaa 18 m/s.*

### 7.2.4 Myrskypäivien tehontuotannon tuntivaihtelut Suomessa

Myrskypäivien tehontuotannon tuntivaihtelua tutkittiin koko Suomen tuulivoimatuotannon datan perusteella. Tuntivaihteluita tutkittiin vuoden 2008 datan osalta, sekä muutamalta valituilta myrskypäiviltä muilta vuosilta. Suurimmat tuntituotannon vaihtelut myrskypäivinä on esitetty taulukossa 43. Tuotannon käyttäytymistä tarkasteltiin, jos 24 tunnin sisällä oli jollain paikkakunnalla ylitetty tuulen nopeus 20 m/s.

Suurin tuotannon kasvu oli 18,9 % asennetusta kapasiteetista. Kasvu tapahtui hieman yli 12 tuntia ennen kuin 20 m/s:n raja rikkoutui Porissa ja Kristiinankaupungissa. Suurin tuotannon lasku havaittiin vuoden 2008 viimeisenä päivänä myrskyn aikana. Lasku oli suuruudeltaan 19,0 % kapasiteetista. Nämä myrskypäivien tuotantovaihtelut olivat myös koko vuoden osalta suurimmat tuotannon laskut ja kasvut.

Suomen tuulivoimatuotannon tuntivaihteluja on aiemmin tutkittu Hannele Holttisen väitöstyössä vuodelta 2004 ”The impact of large scale wind power production on the Nordic electricity system” [25] ja Mikko Holmgrenin diplomityössä vuodelta 2008 ”Tuulivoiman tarvitsemat säätoresurssit ja niiden tekniset toteuttamismahdollisuudet Suomessa” [29]. Näissä töissä saadut suurimmat tehontuotannon tuntivaihtelut on esitetty taulukossa 43.

*Taulukko 43: Koko Suomen tuulivoimatuotannon suurimmat tuntivaihtelut prosentteina koko tuulivoimakapasiteetista vuosilta 2000–2002 ja 2005–2007 [25] [29]*

	Vuodet			
	2000–2002	2005	2006	2007
<b>Suurin tuotannon kasvu</b>	16,2 %	14,0 %	15,8 %	12,9 %
<b>Suurin tuotannon lasku</b>	15,7 %	14,5 %	15,2 %	16,2 %

Verrattaessa vuoden 2008 tuotannon tuntivaihteluita aiempien vuosien vaihteluihin Suomessa, ovat vaihtelut olleet hieman suurempia vuonna 2008 kuin aiemmin.

## 8 Tulosten tarkastelu ja pohdinta

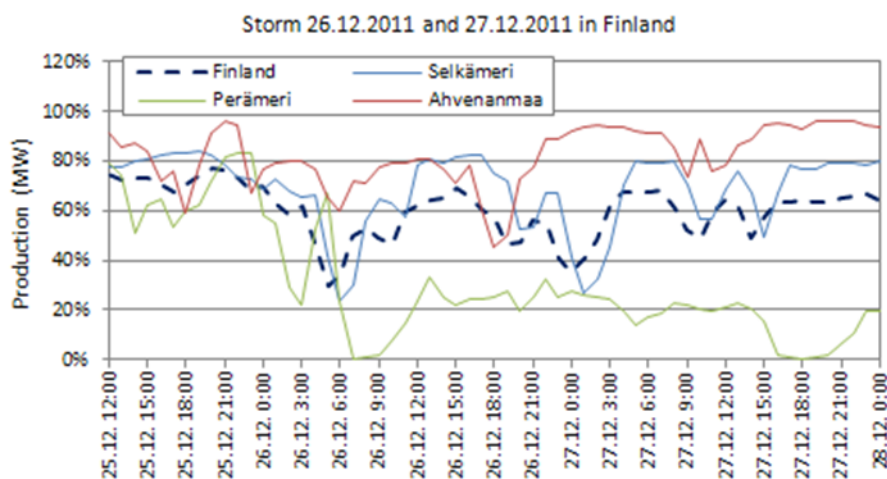
Tässä luvussa tarkastellaan ja pohditaan työn tuloksia, joita esitettiin luvussa 7. Analyysin tulosten kattavuutta arvioidaan, ja pohditaan niiden perusteella laajamittaisen tuulivoiman tuotannon mahdollista käyttäytymistä myrskyissä.

### 8.1 Datan kattavuus

Tässä työssä käytettyä tuulivoimadataa oli useammalta paikkakunnalta kattavasti vuosilta 2005–2010 sekä vuodelta 2011 elokuun lopulle asti. Datan mittauspaikkakunnat olivat tarpeeksi laajalta alueelta, ja juuri niiltä seuduilta, joiden lähettyville on suunnitteilla merkittävästi tuulivoimaa. Voidaankin sanoa, että mittauspaikkakuntien sijainti oli riittävä siihen tarkasteluun, kuinka tuulen nopeudet voimalaitosten napakorkeudelta mitattuna käyttäytyvät myrskyjen aikana maantieteellisesti etäällä olevilla alueilla samanaikaisesti.

Kun tuulivoimaa rakennetaan Suomeen lisää, ainakin parhaille tuulisuusalueille voi olla energiantuotannon kannalta järkevää rakentaa paljon tuulivoimaa. Koska tässä työssä oli käytössä kultakin paikkakunnalta dataa 1–3 eri voimalaitoksesta, on vaikea arvioida, kuinka useampi voimalaitos käyttäytyy myrskyn aikana samalla paikkakunnalla. Tulevaisuudessa on siis mielenkiintoista tutkia myös suurimpien tuulipuistojen reagoimista myrskyihin, kun puistoissa on vähintään kymmenisen voimalaa.

Koska dataa oli saatavilla vain muutamien vuosien ajalta, ei voida olettaa, että nämä kyseiset vuodet kattaisivat kaikkein kovimpia myrskyjä. Itse asiassa vuoden 2011 joulukuussa 26–27. päivinä sattunut todella kova myrsky aiheutti Lumijoella kaiken kaikkiaan 3 peräkkäistä yli 25 m/s:n rajan ylittänyttä tuulen tunnin keskiarvoa. Pienin näistä arvoista oli 27,9 m/s ja suurin jopa 31,6 m/s. Suurin arvo oli selvästi korkein verrattuna tässä työssä analysoituun dataan. On hyvä huomioda, että kyseiset arvot ovat tunnittaisia keskiarvoja, joka on myrskyjen tarkastelun kannalta liian pitkä tarkasteluväli, koska se keskiarvoistaa myrskysuojauksen kannalta oleellisemmat 10 minuutin jaksot. Täten on siis mahdollista, että tuulen 10 minuutin keskiarvot tai puuskat ovat olleet todella suuria verrattuna aikaisempien vuosien kovimpiin tuuliin. Kuvassa 28 on esitetty VTT:n tutkimuksen [37] pohjalta edellä mainitun myrskyn ajalta koko Suomen tehontuotanto ja alueellinen tuotanto. Vaikka kyseinen myrsky aiheutti Lumijoella todella kovat tuulen nopeudet, koko Suomen tuotantoon se ei aiheuttanut suurempia tuntivaihteluja verrattuna tässä työssä havaittuihin vaihteluihin. Alueellisesti Perämeren tuotanto on laskenut jopa nolleen. Tämä esimerkki osoittaa hyvin hajauttamisen merkityksen myrskyjen aikana.



Kuva 28: Tuulivoimantuotanto Suomessa 26.–27.12.2011 kovan myrskyn aikana, jolloin myrskysuojauksen takia osa voimaloista pysähtyi. [37]

## 8.2 Myrskyjen esiintyvyys Suomessa

Luvussa 7 esitettyjen tulosten perusteella voidaan todeta, että myrskyt ovat melko harvinaisia Suomessa. Rajan 25 m/s ylittäneitä 10 minuutin jaksoja havaittiin vain kahtena vuorokautena: Kokkolassa 23.11.2008 ja Oulunsalossa ja Lumijoella 31.12.2008. Rajan 20 m/s ylittäneitä 10 minuutin keskiarvoja oli 537 kappaletta, joka oli noin 0,04 % koko datasta. Pääosa tässä työssä tutkituista myrskyistä oli sellaisia, että 20 m/s:n raja ylittyi vain niukasti.

Myrskyanalyysin perusteella voidaan sanoa, että kovimpia yli 25 m/s:n myrskyjä esiintyi vain pohjoisimmilla paikkakunnilla Kokkolassa, Lumijoella ja Oulunsalossa. Jos näille alueille tulee suuria keskittymiä tuulivoimaa, on mahdollista, että myrskyt aiheuttavat enemmän tuotannon supistumista kuin eteläisimmillä paikkakunnilla. Miellenkiintoista on kuitenkin se, että rajan 20 m/s ylittäneiden myrskyjen osuus puolestaan oli selvästi suurin tutkituista paikkakunnista eteläisimmällä Porilla.

Kovimmat myrskyt ajoittuvat loppusyksyyn ja talveen. Vuorokauden ajoilla ei näytä olleen kovinkaan suurta merkitystä myrskyjen esiintymisille. Merkittävää on kuitenkin se, että vuosien tasolla myrskyjen määrissä on ollut selviä eroja. Yli 25 m/s:n puiston keskiarvotuulia esiintyi tässä työssä vain vuonna 2008. Tämän tutkimuksen perusteella kuitenkin edes myrskyisinä vuosina kovia myrskyjä esiinny kovinkaan usein, ja kovimmat myrskyt saattavat esiintyä vain muutamilla paikkakunnilla. Tässä työssä ei havaittu yhtään sellaista myrskyä, että samanaikaisesti olisi kahdella eri paikkakunnalla ylitetty 25 m/s:n rajaa. Suurimmillaan kahdella paikkakunnalla, oli samanaikaisesti noin 22 m/s:n tuulen nopeudet.

Analyysin perusteella voidaan myös todeta yli 20 m/s:n tuulien kestävän usein vain lyhyen, noin 10–20 minuutin ajan. Analyysin perusteella yli 20 m/s:n myrsky voi kestää useita tunteja kovimpien myrskyjen aikana. Pisin yksittäisen 20 m/s:n rajan ylittäneen myrskyn kesto oli yli 6 tuntia. Yli 25 m/s:n rajan ylittäneistä myrskyistä pisin oli 1,5 tunnin kesto. Pisimmät 20 m/s:n myrskyt olivat usein sellaisia, joissa tuulen nopeus suurimmillaan kävi lähellä 25 m/s:n rajaa.



### 8.3 Tehontuotannon vaihtelut

Myrskyjen aiheuttamia tuotannon tuntivaihteluja tutkittiin koko Suomen tuulivoiman osalta eritoten vuoden 2008 ajalta. Myrskypäivien suurin tuotannon kasvu oli 18,9 % ja suurin lasku oli 19,0 % koko tuulivoimakapasiteetista. Muutokset olivat suurimmat koko vuoden osalta. Vuoden 2006 suurin lasku 15,2 % on sattunut myös myrskypäivänä 26–27. marraskuuta, joka esitettiin aiemmin luvussa 7.2.2 kuvassa 19. Voidaan siis sanoa, että myrskyt ovat olennaisesti vaikuttaneet suurimpiin tuotannon tuntivaihteluihin.

Vaikka vuoden 2008 suurimmat tuotannon tuntivaihtelut tapahtuivat myrskypäivinä, tapahtui myös suuria muutoksia, vaikka myrskyä ei esiintynytäkään. Niistä päivistä, joihin ei esiintynyt myrskyä, suurin tuotannon kasvu oli 15,2 % ja suurin tuotannon lasku 17,9 %. On myös hyvä huomioda, että suurin osa myrskyistä ei ole aiheuttanut suuria koko Suomen tuntituotannon vaihteluita, vaikka yksittäisiä voimaloita on pysähtynyt (luvun 7.2.2 kuvassa 20).

Reservien kannalta tulevaisuudessa tuulivoimakapasiteetin kasvaessa on pohdittava ja tutkittava, kuinka myrskyihin varaudutaan. Jos kovat myrskyt ovat harvinaisia, ei käyttöreserviä kannata välttämättä mitoittaa myrskyjen tehonvaihtelujen mukaan, vaan myrskyihin voidaan varautua häiriöreservien riittävyydellä. Käyttöreservin mitoittamiseen voi vaikuttaa enemmän kuinka tuotanto vaihtelee muina kuin myrskypäivinä.

Eri vuosien vertailussa on kuitenkin huomioitava, että tuulivoimakapasiteetti on muuttunut vuosien varrella. Vuonna 2000 Suomen tuulivoimakapasiteetti oli 38 MW ja 143 MW [38] vuonna 2008. Laajamittaisen tuulivoimatuotannon tehontuotannon tuntivaihteluihin vaikuttavat tuotannon hajauttaminen ja siihen liittyvät suurimmat tuulivoiman suurimmat keskittymät, kuten mahdolliset merituulipuistot. On myös hyvä huomioda, että tuotannon supistumiset laajalla alueella myrskyn aikana voivat johtua toisaalla myrskypysäytöksistä ja toisaalla tuulen nopeuden alenemisesta.

### 8.4 Myrskypysäytystapahtumat ja -rajat

Tapahtumia, joissa tuulipuiston jokin yksittäinen voimala ylitti 10 minuutin myrskypysäytysrajan, havaittiin vain 5 kappaletta koko datassa. Tämän työn data saatiin voimalaitoksista, joiden 10 minuutin myrskypysäytysrajat olivat joko 24 m/s tai 25 m/s. Näitä tapauksia sattui vain Oulunsalossa, Kokkolassa ja Kristiinankaupungissa. Näistä 10 minuutin myrskyrajan ylityksistä aiheutuneista voimalaitoksen pysäytöksistä pisin kesti 6 tuntia 10 minuuttia (luvussa 7.2.1 kuvassa 18). Edellä mainituissa tapauksissa lyhimmillään tuulen nopeuden tyyntyminen uudelleen käynnistämisenopeuden alle kesti 20 minuuttia. Sellaista selkeää tapausta, jossa useampi saman puiston voimala olisi pysähtynyt 10 minuutin myrskysuojauksen takia, ei havaittu.

Tässä työssä tarkasteltiin myös yksinkertaisella simuloinnilla myrskyrajan riittävyyttä kahdella eri myrskypysäytysrajalla, 20 m/s ja 25 m/s. Tämän perusteella voidaan todeta, että 20 m/s ei todennäköisesti riitä takaamaan riittävän pientä tehontuotannon supistumista myrskyn aikana. Jos myrskyraja 20 m/s olisi voimaloissa yleinen, voisivat myrskyt aiheuttaa suuria tehontuotannon supistumisia Suomessa. Testissä pahimmillaan vain 40 % kapasiteetista oli käytettävissä ja tehontuotannon lasku pahimmillaan jopa 40 % kapasiteetista 10 minuutissa. Toki tehty simulointi antaa äärimmäisen pessimistisen tuloksen, koska tutkittavia voimaloita oli yhteensä vain 5 kappaletta, yksi kullakin paikkakunnalla. Todellisuudessa paikkakunnilla on yleensä useita voimaloita, jotka myrskyrajan ylittyessä pysähtyvät hieman eri aikaan. Tällöin tehontuotannon lasku ei ole niin

yrkkä, kuin tässä testissä. Tästä huolimatta simulaatio osoittaa, että suuretkin tuotannon supistumiset ovat mahdollisia, vaikka sen suuruuteen ei voi ottaa kantaa testin perusteella. Tuotannon supistumiseen, myrskyrajoilla 20 m/s, vaikuttaisi erityisesti se, että useampi tuulipuisto eri paikkakunnilta voisi olla samanaikaisesti pysähtynyt myrskyrajan ylittymisen takia. Lisäksi, kuten edellisessä luvussa 8.1 todettiin, on 20 m/s:n rajan ylittäviä myrskyjä esiintynyt huomattavasti useammin kuin rajan 25 m/s ylittäviä myrskyjä. Yleisesti käytetty liian matala myrskysuojausraja saattaisi kasvattaa reservitehon tarvetta huomattavasti, jos tuulivoimakapasiteetti kasvaa Suomessa suureksi.

Tässä työssä tarkasteltujen voimalaitosten datan perusteella myrskysuojausraja 24 tai 25 m/s on riittävä takaamaan sen, että eri paikkakuntien puistoja ei ole samanaikaisesti myrskyn vuoksi pysähtyneinä. Kuten edellä mainittiin, yksittäisten voimaloiden myrskypysäytyksiä esiintyi vain viisi. Ainuttakaan sellaista tapahtumaa ei havaittu, että useammalla kuin yhdellä paikkakunnalla olisi esiintynyt näitä myrskyrajoja ylittäneitä tuulia samanaikaisesti.

Porin voimalaitoksesta oli saatavilla myös 10 minuutin mittausjakson keskiarvo-tuulen lisäksi tuulen maksimi ja minimi 10 minuutin ajanjakson ajalta. Porin datan perusteella voidaan todeta, että tuulen nopeus vaihtelee 10 minuutin aikana huomattavasti myrskyjen aikana. Suurimmillaan maksimi ja minimi ovat eronneet keskiarvosta yli 10 m/s. Datan perusteella oli siis mahdollista tutkia myös puuskarajojen ylittymistä 10 minuutin ajanjakson maksimiarvon avulla Porissa. Maksimiarvojen perusteella Porin voimalaitoksen 1 sekunnin puuskaraja 32 m/s ei ole ylittynyt kertaakaan, mutta sen sijaan löytyi tapauksia, joissa 30 sekunnin raja 28 m/s on ylittynyt. Koska datasta nähtiin vain tuulen maksimiarvo, ei voi varmuudella tietää onko 30 sekunnin ajan keskiarvo ylittynyt rajan 28 m/s, mutta voimalan tehontuotannon perusteella tällaisia tapauksia on sattunut. Myrskyjen tutkimisen tuloksena epäiltiin myös muiden paikkakuntien kuin Porin voimaloiden pysähtyneen puuskarajojen ylittymisen takia. Sellaista tilannetta ei kuitenkaan havaittu, että samalla paikkakunnalla olisi useampi voimala pysähtynyt samanaikaisesti puuskien vuoksi. Kaiken kaikkiaan tilanteita, joissa epäiltiin lyhyemmän ajanjakson puuskarajojen ylittymistä, oli vain muutama enemmän kuin sellaisia, joissa 10 minuutin keskiarvo olisi ylittänyt myrskysuojausrajan.

Laajamittaisen tuulivoimatuotannon kannalta puuskarajojen ylittymisellä ei välttämättä ole kuitenkaan kuin paikallisia vaikutuksia tuotantoon. Paikallisestikin tuulen puuskat saattavat pysäyttää vain yksittäisiä voimaloita tuulipuistoissa. Kun Suomeen rakennetaan lisää suuria tuulipuistoja, on mielenkiintoista tutkia, kuinka saman puiston voimalat reagoivat puuskiin.

Tulevaisuudessa saattaa myös, luvussa 5.1.3 ja kuvassa 12 esitetty, joustava myrskysäätötekniikka muuttaa myrskyjen vaikutuksen tuotannon supistumiseen. Koska joustavalla myrskysäädöllä varustettu voimala ei pysähdy äkillisesti myrskyssä, jää yksittäisen voimalaitoksen tehonmuutos huomattavasti pienemmäksi. Jos joustavalla myrskysäädöllä varustetut tuulivoimalat yleistyvät, ei kovimpienkaan myrskyjen aikana välttämättä esiinny niin suuria tehonvaihteluita kuin perinteisellä myrskysäädöllä. Tehonvaihtelujen suuruus riippuu toki myös siitä, että millä tuulen nopeudella tehontuotantoa aletaan joustavasti vähentää voimaloissa nimellisestä tehosta.

## 8.5 Tuulivoimatuotannon maantieteellinen sijainti myrskyjen kannalta

Tämän työn myrskytutkimusten tulosten perusteella on tuulivoimantuotanto tällä hetkellä Suomessa hajautunut tarpeeksi isolle maantieteelliselle alueelle myrskyjen kannalta.

Tässä työssä tarkastelluista puistoissa yhtäkään sellaista tapausta ei havaittu, jossa kahdessa puistossa olisivat kaikki tarkasteltavat voimalaitokset olleet pysähtyneitä myrskysuojauksen takia. Saman myrskyn aikana raja 20 m/s rikkoutui useilla paikkakunnilla, mutta ainuttakaan sellaista tilannetta ei esiintynyt, jossa pohjoisin Oulunsalo ja eteläisin Pori olisivat ylittäneet 20 m/s:n rajan saman myrskyn aikana.

Myrskyjen analysoinnin perusteella voidaan kuitenkin todeta, että tuulivoiman keskittäminen pienelle alueelle Suomessa voi olla hyvin riskialtista. Vaikkei yhtään eri paikkakunnilla samanaikaisesti vaikuttavaa yli 25 m/s:n myrskyä havaittukaan, voi silti paikkakuntien tuulen nopeuksien käyttäytymisen perusteella olla mahdollista, että maantieteellisesti lähekkäin olevat paikkakunnat saattavat joutua kovankin myrskyn kohteeksi samanaikaisesti. Myrskytapauksia tarkastellessa havaittiin, että useasti etenkin Porissa ja Kristiinankaupungissa 20 m/s:n raja ylittyi saman myrskytapauksen aikana. Hieman kovemman myrskyn sattuessa on mahdollista menettää suuria määriä tuotantoa samanaikaisesti, jos tuulivoimatuotanto keskittyy liian pienelle maantieteelliselle alueelle, vaikka myrskysuojausrajat voimaloissa olisivat lähellä 25 m/s. Pahimmillaan maantieteellisesti lähekkäin sijaitsevat paikkakunnat rikkoivat täysin samaan aikaan tai 10 minuutin sisällä myrskyrajan 20 m/s, mikä voi kovan myrskyn sattuessa tarkoittaa suuria tuotannon vaihteluita, jos tuotanto ei ole laajalle levittäytynyttä. Tällaisia samanaikaisesti rajan 20 m/s ylityksiä havaittiin pareilla Pori ja Kokkola, Pori ja Kristiinankaupunki sekä Kokkola ja Oulunsalo.

Suomeen mahdollisesti rakennettavat merituulipuistot tuovat lisähaasteita teho-  
tasapainon ylläpitämiseen, koska yleensä merituulipuistoissa on pienellä maantieteellisellä alueella paljon kapasiteettia. Myrskyjä esiintyy merellä myös useammin kuin rannikolla. Tällöin on Suomen kokonaiskapasiteetin riittävästä hajauttamisesta myös apua, vaikka keskittymiä esiintyisikin. Suuret keskittymät ilman tuotannon riittävää hajauttamista lisäävät mahdollisesti säätötarpeen määrää, mikä tulisi ottaa huomioon kokonaisuutta ajatellessa.

Luvussa 5.2.2 esiteltiin 2000-luvulla Euroopassa esiintyneitä ja kovia myrskyjä aiheuttaneita matalapainerintamia. Näiden laajojen myrskyrintamien vaikutusta ei näkynyt tässä työssä käytetyssä datassa kovinkaan merkittävästi. Kyseisten rintamien vaikutus näkyi tapauskohtaisesti vain jollain paikkakunnalla korkeintaan hieman keskimääräistä kovempana tuulena. Myrskyraja ei kuitenkaan edes hätyytelty. Laajamittaisen tuulivoimatuotannon kannalta on hyvä, että aivan kaikki Euroopan laajuiset matalapaineet eivät aiheuta laajalti myrskypysäytyksiä Suomessa. Toki on huomioitava, että näistäkin käsitellyistä Euroopan laajuisista matalapainerintamista vain muutama olivat sellaisia, että ne tapahtuivat aikana, jolloin tässä työssä oli käytössä kattavasti dataa.

## 9 Johtopäätökset

Tässä työssä selvitettiin myrskyjen esiintyvyyttä Suomen länsirannikolla tuulivoimaloiden napakorkeudelta mitattuna. Työssä tutkittiin myös yksittäisten tuulivoimaloiden käyttäytymistä myrskyjen aikana sekä koko Suomen tuulikapasiteetin tuotannon vaihtelua myrskypäivinä. Tutkimus toteutettiin analysoimalla tuulivoimaloista mitattua dataa, jota saatiin viideltä eri paikkakunnalta Suomen länsirannikolta. Dataa oli kattavasti vuosilta 2005–2010.

Tuulivoimaloista mitatun tuulidatan analyysin perusteella myrskytuulenopeuksien esiintyminen on harvinaista myös korkealla maan pinnasta, voimalaitosten napakorkeudella 50–80 m. Rajan 25 m/s ylittäneitä myrskyjä havaittiin vain kaksi kappaletta ja ne sattuivat pohjoisimmilla paikkakunnilla marras-joulukuussa. Kuitenkin rajan 20 m/s ylittäneitä tuulen arvoja esiintyi datassa yli 500 kappaletta useiden myrskyjen seurauksena. Kovimmat myrskyt ajoittuvat loppusyksyyn ja talveen. Vuositasolla on suuret erot myrskyjen esiintymisessä. Työssä havaittiin vain vuonna 2008 esiintyneen yli 25 m/s:n myrskyjä, kun puolestaan muutamina vuosina havaittiin rajan 20 m/s rikkoutuneen vain muutamia kertoja. Myrskyt kestävät paikkakunnilla yleensä vain 10–20 minuutin ajan, mutta kovimpien myrskyjen aikana myrskyt voivat kestää useita tunteja. Tutkimuksessa havaittiin puuskien pysäyttäneen yksittäisiä voimaloita tuulipuistoissa, mutta nämä tapaukset olivat todella harvinaisia. Porin 10 minuutin sisäisen datan perusteella maksimiarvo on keskimäärin noin 5 m/s suurempi kuin 10 minuutin keskiarvo, ja suurimmillaan maksimiarvo on ylittänyt 31 m/s, vaikka keskiarvo on ollut alle 22 m/s.

Myrskyt aiheuttivat koko Suomen tuulivoimatuotannon suurimmat tuntivaihtelut tarkasteltavana myrskyisinä vuonna 2008. Suurimmat tuotannon kasvut ja laskut olivat noin 19 % tunnissa koko Suomen tuulivoimakapasiteetista. Muina kuin myrskypäivinä sattui kuitenkin myös samaa suuruusluokkaa olleita tuotannon tuntivaihteluita. Vuonna 2008 sattui hieman suurempia tuotannon tuntivaihteluita kuin aiempina vuosina 2002–2002 ja 2005–2007.

Datan analysoinnin perusteella voidaan todeta, että myrskypysäytysraja 20 m/s ei riitä laajasti käytettynä takaamaan riittävän pientä tehonvaihtelua. Jos useilla paikkakunnilla olisi voimaloiden myrskysuojausrajana 20 m/s, on mahdollista, että samanaikaisesti laajoja maantieteellisiä alueita olisi tuottamatta myrskypysäytysten takia. Sen sijaan tässä työssä tutkittujen voimalaitosten myrskyrajat, 24 m/s tai 25 m/s, ovat analyysin perusteella riittäviä välttämään useamman paikkakunnan samanaikaiset myrskypysäytykset.

Työn tulosten perusteella tuulivoimantuotanto on levittänyt tällä hetkellä riittävän laajalle alueelle Suomessa myrskyjen kannalta. Sellaisia myrskyjä ei havaittu, että tässä työssä useammalla paikkakunnalla olisivat myrskyrajat ylittyneet samanaikaisesti. Tutkimuksen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että tuulivoiman keskittäminen pienelle maantieteelliselle alueelle on riskialtista, koska tuotannon vaihtelut saattavat kasvaa myrskyjen aikana suuriksi ja näin ollen vaikuttaa reservituotannon tarpeeseen.

Kaiken kaikkiaan työssä onnistuttiin kartoittamaan myrskyjen vaikutukset tuulivoimantuotantoon. Suuria ongelmia ei havaittu myrskyjen osalta, mutta tehotasapainon säilyttämisen kannalta merkittäviä uhkatekijöitä havaittiin, jos tuulivoimakapasiteetti poikkeaa ominaisuuksiltaan tai sijainniltaan merkittävästä tämän hetkisestä tilanteesta. On kuitenkin muistettava, että tässä työssä tutkittiin vain dataa muutamilta vuosilta. Tulevaisuudessa ilmastonmuutos saattaa vaikuttaa myrskyjen määrin ja voimakkuuksiin. Voimalaitosten joustavan myrskysäätötekniikan yleistyminen voi lieventää myrskyjen aiheuttamia tuotannon supistumisia, mutta se ei poista ongelmaa täysin.

## 10 Lähdeluettelo

- [1] *Suomen Tuuliatlas*.  
<http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>, viitattu 18.1.2012
- [2] Tammelin, B. *Tuulivoimameteorologia*, Luento, Aalto yliopisto, Ene-47.5140 Tuulienergia 2010.
- [3] *Suomen Tuulivoimayhdistys ry*  
<http://www.tuulivoimayhdistys.fi>, viitattu 5.2.2012
- [4] Ilmatieteen laitos, *Teematietoa*  
<http://ilmatieteenlaitos.fi/teematietoa>, viitattu 15.2.2012
- [5] Gredow, Venäläinen et al. *Vaaraa aiheuttavista sääilmiöistä Suomen muuttuvassa ilmastossa*, Ilmatieteen laitos, Helsinki, 2008. Verkkodokumentti.  
<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/1172/2008nro3.pdf;jsessionid=937C2082C215ABE6ED95D687CFEBB338?sequence=2>, viitattu 17.2.2012
- [6] EWEA, *Wind Energy The Facts*  
<http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-i-technology/chapter-2-wind-resource-estimation/local-wind-resource-assessment-and-energy-analysis/best-practice-for-accurate-wind-speed-measurements.html>, viitattu 15.2.2012
- [7] J. E. Anaya-Lara, Cartwright ja Hughes, *Wind Energy Generation Systems : Modelling and Control*, Wiley, 2009.
- [8] Motiva, *Tuulivoimaopas*  
<http://www.tuulivoimaopas.fi/>, viitattu 16.2.2012
- [9] Ackermann T. e. al. *Wind Power in Power Systems*, Wiley, 2005.
- [10] Vestas, *Wind Project Planning*  
<http://www.vestas.com/en/wind-power-plants/wind-project-planning/siting/wind-classes.aspx>, viitattu 6.4.2012
- [11] ENERCON, *Product overview*. Verkkodokumentti.  
[http://www.enercon.de/p/downloads/EN\\_Productoverview\\_0710.pdf](http://www.enercon.de/p/downloads/EN_Productoverview_0710.pdf), viitattu 20.2.2012
- [12] Lehtomäki, V. *Tuulivoimalan aerodynamiikka*. Luento Aalto yliopisto Ene-47.5140 Tuulienergia 2010.

- [13] Laaksonen H. ja Repo S. *Tuulivoimateknologia sähkönjakeluverkoissa*, Tampereen teknillinen yliopisto, 2003. Verkkodokumentti.  
<http://webhotel2.tut.fi/units/set/raportteja/dg/westwind/raportti1-2003.pdf>, viitattu 1.3.2012
- [14] Suomen tuulivoimayhdisys, *Tuulivoiman tietopaketti*  
<http://www.tuulivoimatieto.fi>, viitattu 5.2.2012
- [15] Enercon GmbH, *ENERCON wind energy converters*, 2010. Verkkodokumentti.  
[http://www.enercon.de/p/downloads/EN\\_Eng\\_TandS\\_0710.pdf](http://www.enercon.de/p/downloads/EN_Eng_TandS_0710.pdf), viitattu 9.2.2012
- [16] Gamesa, *Gamesa G9X-2.0 MW*, 2011. Verkkodokumentti.  
<http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/productos-servicios/aerogeneradores/catalogo-g9x-20-mw-eng.pdf>, viitattu 9.2.2012
- [17] Detlefsen N. K., Sørensen P. E. ja Eriksen P. B., *Managing Critical Weather Conditions in a Large-Scale Wind Based European Power System - The Twenties Project*, Power and Energy Society General Meeting, IEEE, San Diego, CA , 2011.
- [18] Fingrid, *Fingrid Oyj:n voimansiirtoverkko*, 2012. Verkkodokumentti.  
<http://www.fingrid.fi/attachments/fi/yritys/kantaverkko/verkko2011.pdf>, viitattu 17.2.2012
- [19] Elovaara J. ja Haarla L., *Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta*, Otatieto, 2011.
- [20] Sederlund J., *Taajuuden ylläpito sähköjärjestelmässä*, 2008.  
[http://www.fingrid.fi/portal/suomeksi/kantaverkon\\_abc/taajuuden\\_yllapito\\_sahkojarjestelmassa\\_1\\_2/](http://www.fingrid.fi/portal/suomeksi/kantaverkon_abc/taajuuden_yllapito_sahkojarjestelmassa_1_2/), viitattu 1.2.2012
- [21] Hirvonen R. ja Matilainen J., *Pätötehoreservit voimajärjestelmässä* Sähkö & Tele 70, 1997.
- [22] VTT, *Suomen tuulivoimatilastot*. 2011  
<http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/>, viitattu 10.4.2012
- [23] VTT, *IEA Wind Task 25: Design and operation of power systems with large amounts of wind power*, Helsinki, 2009.
- [24] Matilainen J., *Tuulivoima*, Luento, Aalto yliopisto, S-18.3201 Sähkönsiirtojärjestelmät II, 2011.
- [25] Holttinen H., *The impact of large scale wind power production on the Nordic electricity system*, Espoo: VTT, 2004. Väitöstyö

- [26] ENTSO-E, *IMPACT OF INCREASED AMOUNTS OF RENEWABLE ENERGY ON NORDIC POWER SYSTEM OPERATION*, 2010. Verkkodokumentti.  
[https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/library/publications/nordic/operations/20100909\\_Wind\\_report.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/nordic/operations/20100909_Wind_report.pdf), viitattu 13.2.2012
- [27] Cutululis, Detlefsen ja Sørensen, *Offshore Wind Power Prediction in Critical Weather Conditions*, 10th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, 2011.
- [28] Potter, Gritti ja Nijssen, *Potential Benefits of a Dedicated Probabilistic Rapid Ramp Event Forecast Tool*, Power Systems Conference and Exposition. PSCE '09. IEEE/PES, Seattle, WA, 2009.
- [29] Holmgren M., *Tuulivoiman tarvitsemat säätoresurssit ja niiden tekniset toteuttamismahdollisuudet Suomessa*, TKK, Espoo, 2008. Diplomityö
- [30] Ea Energy Analyses, *50% Wind Power in Denmark in 2025*, 2007  
[http://ea-energianalyse.dk/reports/642\\_50\\_per\\_cent\\_wind\\_power\\_in\\_Danmark\\_in\\_2025\\_July\\_2007.pdf](http://ea-energianalyse.dk/reports/642_50_per_cent_wind_power_in_Danmark_in_2025_July_2007.pdf), viitattu 13.2.2012
- [31] European Wind Energy Association, *TradeWind - Integrating Wind: Developing Europe's power market for the large-scale integration of wind power*, 2009.
- [32] Ilmatieteen laitos, *Janikan päivän myrsky Pyryn päivän myrskyä voimakkaampi*, 2001  
<http://ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/1006239658>, viitattu 29.2.2012
- [33] Franklin J., *Tropical Cyclone Report: Hurricane Vince*. National Hurricane Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2006. Verkkodokumentti.  
[http://www.nhc.noaa.gov/pdf/TCR-AL242005\\_Vince.pdf](http://www.nhc.noaa.gov/pdf/TCR-AL242005_Vince.pdf), viitattu 29.2.2012
- [34] Power T. W., *Wind turbines and wind farms database*,  
<http://www.thewindpower.net/index.php>, viitattu 9.2.2012
- [35] Cutululius, Zeni ja Sørensen, *Reliability indexes for offshore wind power production under extreme wind conditions*, 2010 European Wind Energy Conference and Exhibition, Varsova, 2010.
- [36] Vestas, *Vestas V47-660 kW*, 2000. Verkkodokumentti.  
[http://www.iufmrese.cict.fr/concours/2002/CG\\_2002STI\\_lycee/Pour\\_en\\_savoir\\_plus/Vestas\\_V47.pdf](http://www.iufmrese.cict.fr/concours/2002/CG_2002STI_lycee/Pour_en_savoir_plus/Vestas_V47.pdf), viitattu 8.3.2012
- [37] Holttinen H. ja Rissanen S., *Wind and Load Variability in Nordic Countries*, VTT Technology sarjassa julkaistava raportti, Espoo, 2012.

- [38] Holttinen h. ja Stenberg A., *Tuulivoiman tuotantotilastot*, 2008. Verkkodokumentti <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2009/W132.pdf>, viitattu 13.3.2012