



**TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO**  
*Sähkötekniikan koulutusohjelma*

**MARKUS FLINCK**  
**TUULIVOIMALAN RAKENNE 1960-2008**  
Kandidaatintyö

Tarkastaja: Risto Mikkonen

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**FLINCK, MARKUS:** Tuulivoimalan rakenne 1960-2008

Kandidaatintyö

Toukokuu 2008

Pääaine: Moderni sähköenergiatekniikka

Tarkastaja: Risto Mikkonen

Avainsanat: Tuulivoima, tuulivoimala, Uusiutuvat energiamuodot, ilmastonmuutos

Tuulivoimala koostuu perustuksista, tornista, konehuoneesta ja roottorista. Tornin huipulla olevassa konehuoneessa on generaattori, vaihteisto ja muu säätöelektronikka. Tuulivoimaloissa yleisimmin käytetyt generaattorit ovat oikosulku- ja kestopagneettigeneraattori. Tuulivoimalat käynnistyvät tuulen nopeuden ollessa noin 3 m/s ja pysähtyvät tuulen nopeuden ollessa yli 20 m/s. Tuulivoimalan huipulla on tuulimittarit, joiden avulla tuulivoimalaa säädetään. Ennen tuulivoimalat olivat yksi- tai kaksinopeuksisia, mutta nykyään ollaan siirtymässä muuttuvanopeuksisiin. Vakionopeuksisissa voimaloissa käytettiin sakkaussäätöisiä lapoja ja muuttuvanopeuksisissa lapakulmasäätöisiä. Sakkaussäätöisen lavan profiili on tehty sellaiseksi, että suurilla tuulen nopeuksilla lavan muodostama noste häviää, ja roottorin pyörimisnopeus hidastuu. Lapakulmasäätöisessä voimalassa lapojen ja tuulen kohtauskulmaa säädetään optimaalisen aerodynamiikan saavuttamiseksi.

## SISÄLLYS

|   |    |
|---|----|
| 1. Johdanto.....  | 5  |
| 2. Tuulivoimaloiden historiaa.....                              | 6  |
| 3. Voimalatyypit.....   | 8  |
| 3.1. Pystyakseliset (VAWT).....                                 | 8  |
| 3.2. Vaaka-akseliset (HAWT).....                                | 9  |
| 4. Tuulivoimalan rakenne.....                                   | 10 |
| 4.1. Perustukset.....   | 10 |
| 4.2. Tornit.....  | 12 |
| 4.3. Generaattorit.....   | 12 |
| 4.4. Vaihteisto.....  | 13 |
| 4.5. Roottori.....  | 13 |
| 4.5.1. Lapojen määrä.....                                       | 14 |
| 4.6. Säädot.....  | 14 |
| 4.6.1. Vakio- ja muuttuvanopeuksiset.....                       | 14 |
| 4.6.2. Passiivisakkaus-, aktiivisakkaus- ja lapakulmasäätö..... | 15 |
| 5. Tuulivoiman ongelmat.....                                    | 16 |
| 6. Tuulisovellukset.....  | 18 |
| 7. Tuuliolosuhteet.....   | 19 |
| Lähteet.....  | 20 |

IV

## **TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT**

|                  |                              |
|------------------|------------------------------|
| <b>VAWT</b>      | Pysty akselinen tuulivoimala |
| <b>HAWT</b>      | Vaaka-akselinen tuulivoimala |
| <b>Off-shore</b> | Merelle asennettu tuulivoima |

# 1. JOHDANTO

Kasvihuoneilmiön kiihtyessä, on mielenkiinto uusiutuvia energiamuotoja kohtaan kasvanut huomattavasti. Erityisesti tuulivoimaa on rakennettu viime vuosina paljon. Tällä hetkellä tuulivoimaa on kaiken kaikkiaan asennettu noin 100 000 MW. Tuulivoimalla saadaan tuotettua täysin päästötöntä sähköä, mikäli voimalan rakentamiseenkin kuluva energia tuotetaan uusiutuvilla energiamuodoilla.

Tässä työssä tehdään aluksi pieni katsaus tuulivoimaloiden kehitykseen 1960-luvulta tähän päivään asti. Työn pääpaino on nykyaikaisen tuulivoimalan rakenteessa. Työssä käydään läpi tuulivoimalan eri osat sekä niiden tarkoitus. Lisäksi käydään tuulivoimalan toimintaa ja tekniikkaa.

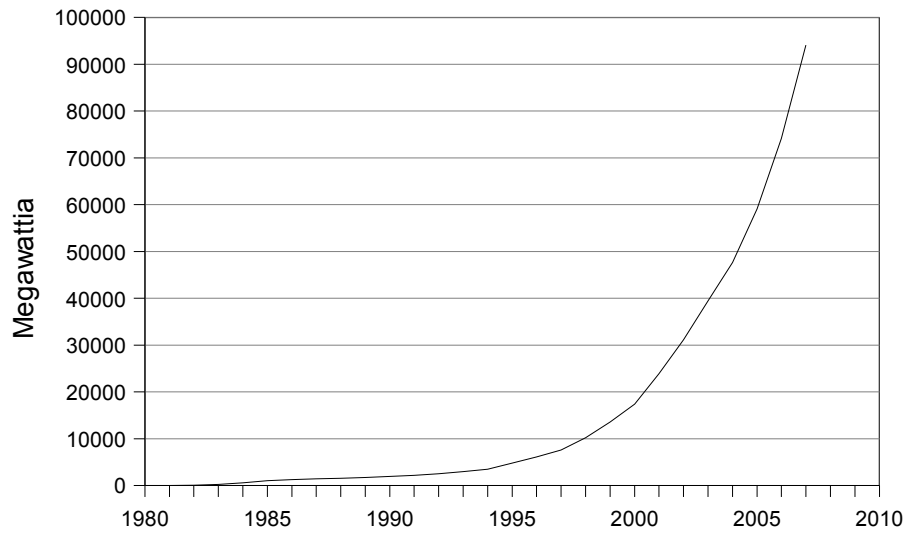
## 2. TUULIVOIMALOIDEN HISTORIAA

Tuulivoimaa on käytetty hyödyksi jo tuhansia vuosia aina ensimmäisistä purjeveneistä lähtien, mutta sähköntuotannossa tuulivoima on suhteellisen uusi käsite. Vuonna 1950 valmistui yksi Tanskan ensimmäisistä sähköntuotantoon tarkoitetuista koevoimaloista. Tällöin voimalan nimellisteho oli 15 kW ja turbiinin läpimitta 8 metriä. Seuraavana vuonna valmistui 35 kW:n tasavirtavoimala ja parin vuoden sisällä siitä kehitettiin 45 kW:n asynkronigeneraattorin omaava voimala. Vuonna 1956 aloitettiin jo 200 kW:n voimalan kehittäminen, mikä valmistui 1959. Tämä Gedser-myllyn nimellä tunnettu voimala oli kolmilapainen, vaaka-akselinen voimala, joka oli käytössä aina vuoteen 1967 asti, jolloin voimala otettiin pois käytöstä. Samoihin aikoihin myös Saksassa kehiteltiin vaaka-akselisia voimaloita, joissa käytettävät lasikuidusta valmistetut lavat oli muotoiltu lentokoneen siiven profiilin mukaan.

Vuoden 1973 öljykriisin seurauksena kiinnostus tuulivoimaa kohti kasvoi. Tällöin Saksa ja Tanska olivat tuulivoiman edelläkävijämaita. Neljä vuotta myöhemmin Gedser-voimala otettiin uudelleen käyttöön tanskalaisten tutkittavaksi. Näihin aikoihin Tanskan pienissä kylissä rakennettiin ja kehitettiin runsaasti pieniä tuulivoimaloita. Vuonna 1979 saavutettiin 22 kW:n nimellisteho, ja 80-luvun alkupuolella päästiin 55 kW:sta 75 kW:iin. 80-luvun puolivälin jälkeen useat tanskalaisyhtiöt pääsivät markkinoille, jonka ansiosta kunnollinen tuotekehitys pääsi käyntiin. Vuoteen 1987 mennessä oli saavutettu 100 kW:n raja. Tähän aikaan kaikki voimalat olivat sakkaussäätöisiä.

Vuonna 1985 alettiin kokeilla useiden tuulivoimaloiden rakentamista toistensa läheisyyteen, tuulipuistoiksi. Tuulipuistomalli oli lähtöisin Californiasta, ja megawattien tuotantotehoilla, se herätti myös sähkölaitosten kiinnostuksen. Iso harppaus voimaloiden koossa tapahtui vuonna 1987, kun nimellistehoissa päästiin jo 200 kW:n ja 250kW:n arvoihin. Näihin aikoihin kehitettiin myös ensimmäinen lapakulmasäätöinen voimala. Puolen megawatin kokoluokkaan päästiin 90-luvun alkupuolella ja ensimmäiset offshore-voimalat rakennettiin. [1, 2]

### Maailman asennettu tuulivoima 1980-2007



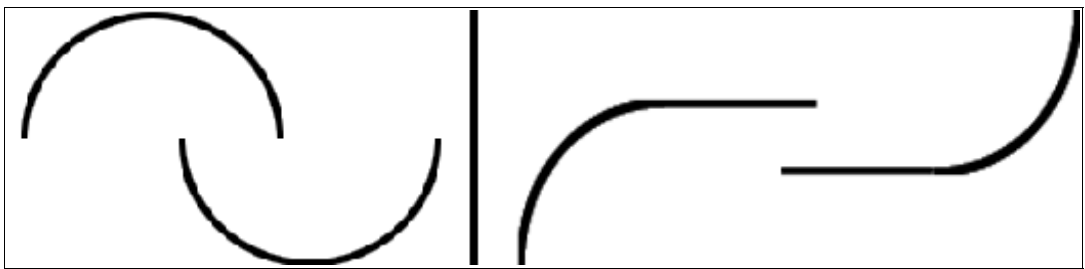
***Kuva 1. Maailman asennettu tuulivoima. [3]***

## 3. VOIMALATYYPIT

### 3.1. Pysty akseliset (VAWT)

Yleisimmät pysty akseliset tuulivoimalat ovat suomalaiskehitteinen Savonius-roottori ja Darrieus-roottori. Yksi pysty akselisten voimaloiden eduista on riippumattomuus tuulen suunnasta, jolloin erillistä kääntömekanismia ei tarvita. Toinen etu vaak akselisiin nähden on se, että pysty akselisten voimaloiden koneisto saadaan maanpinnalle, missä huoltotyöt on helpompi suorittaa. Pysty akselisisä voimaloissa on kuitenkin ongelmia, joiden takia ne eivät ole saavuttaneet vaak akselisten voimaloiden suosiota. Yksi suurimmista ongelmista on niiden pyörimisen aiheuttama rasitus voimalan rakenteisiin. Lisäksi roottorin suuri massa vaatii laakeroinnilla hyvin suurta kestävyyttä. Roottorin aiheuttaman rasituksen takia pysty akselisiä voimaloita ei voida sijoittaa yhtä korkealle kuin vaak akseliset voimalat, missä olisi suuremmat tuulenopeudet.

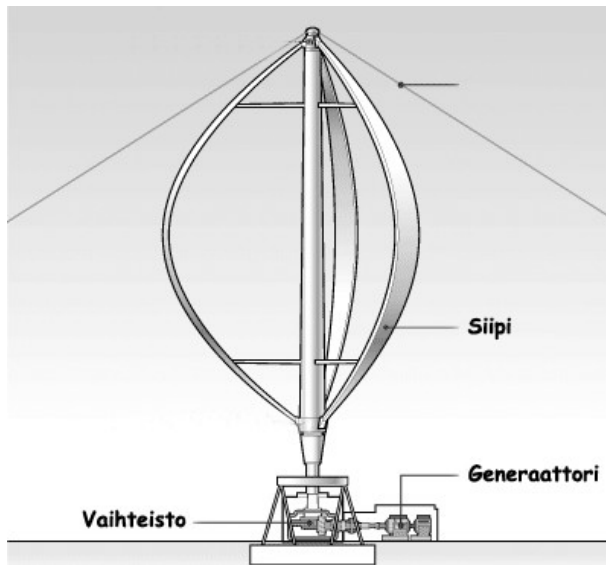
Savonius-roottori (kuva 2) koostuu pystysuunnassa halkaistusta sylinteristä, jonka puolikkaat on siirretty hieman lomittain siten, että ilma pääsee kulkemaan puoliskosta toiseen. Roottorin siiven kärkinopeus ei voi olla tuulen nopeutta suurempi, mistä johtuen roottorin pyörimisnopeus on suhteellisen hidas. Tämän takia Savonius-roottori soveltuu paremmin mekaanisiin sovelluksiin, kuten vedennostoon tai ilmastointiin. Roottorin toiminta perustuu sekä vastusperiaatteeseen että hieman myös siipiprofiilien muodostamaan nosteeseen.



**Kuva 2.** Savonius-roottori ja muokattu Savonius-roottori ylhäältä kuvattuna. [4]

Darrieus-roottorissa (kuva 3a) pystyssä olevaan akseliin on kiinnitetty kaksi tai useampi kaareva siipi, jotka on kiinnitetty akseliin ylä- ja alapäästä. Darrieus-roottorin toiminta perustuu siipien aiheuttamaan nosteeseen, ja on täten Savonius-roottoria tehokkaampi.





*Kuva 3a. Darrieus-roottori. [5]*

### 3.2. Vaaka-akseliset (HAWT)

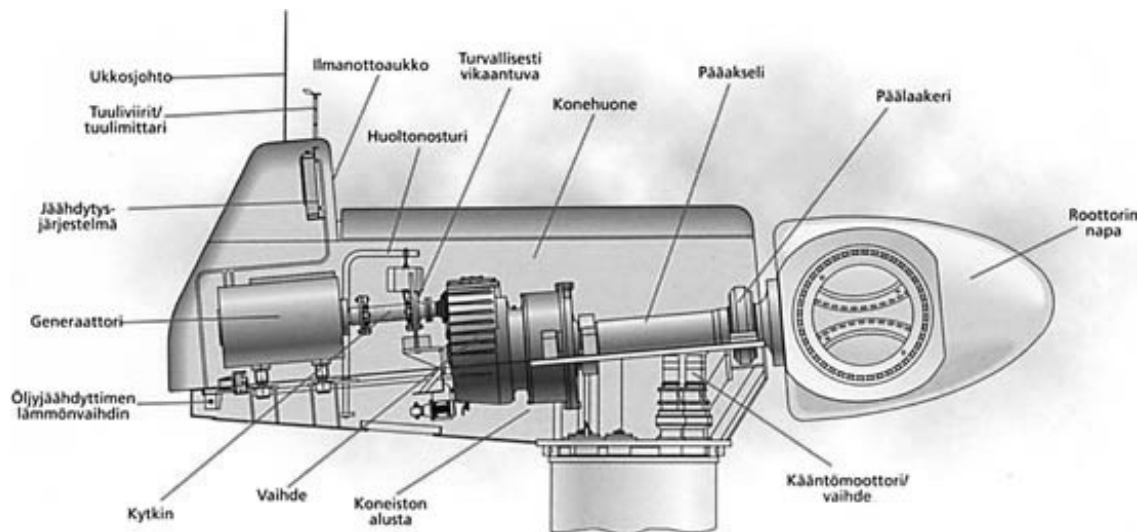
Vaaka-akseliset tuulivoimalat (kuva 3b) ovat tällä hetkellä yleisin sähköntuotannossa käytetty tuulivoimatyyppe. Niissä saadaan hyödynnettyä korkeammalla sijaitsevat suuret tuulennopeudet. Haittapuolena on korkealle sijoittuva koneisto, mikä on huollon kannalta hankala. Tuottaakseen parhaan mahdollisen tehon vaaka-akselisten voimaloiden on oltava kohtisuoraan tuulen suuntaa vastaan. Tuulen suunta voi vaihdella hyvin usein, joten konehuoneen ja maston väliin on laitettava moottori, jolla voidaan säätää tuulivoimalan suuntaa. Vaaka-akselisen tuulivoimalan tuulesta tuottama teho on maksimissaan noin 0,6 kertainen tuulen tehosta, mutta käytännössä luku on noin 0,35-0,5.



*Kuva 3b. Vaaka-akselinen voimala. Kuva: Markus Flinck.*

## 4. TUULIVOIMALAN RAKENNE

Tuulivoimala koostuu perustuksesta, mastosta, konehuoneesta ja lavoista. Konehuoneen pääosia ovat vaihteisto, generaattori ja kääntömoottori. Konehuoneen katolla on tuulianturit, jotka mittaavat tuulen nopeutta ja suuntaa, joiden antaman informaation avulla voimalaa käännetään aina tuulen suuntaan. Yleisimmät generaattorijärjestelmät ovat vakio- tai kaksinopeuksiset oikosulkugeneraattorilla varustetut järjestelmät, ja muuttuvanopeuksiset kestopagneettigeneraattorijärjestelmät.



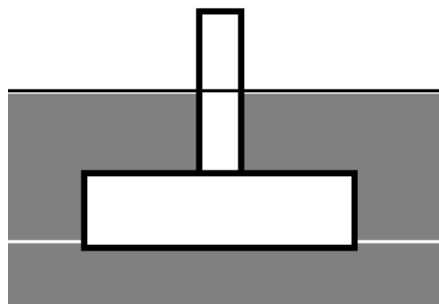
*Kuva 4. Konehuoneen rakenne. [6]*

### 4.1. Perustukset

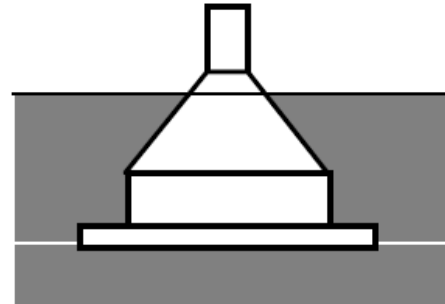
Jos tuulivoimalan perustuspaikan maaperä on pehmeää ja kaukana peruskalliosta, on rakennettava kestävä perustus, jonka päälle voimala voidaan pystyttää. Perustuksille kaivetaan ensin halkaisijaltaan 12-25 metriä oleva kuoppa voimalan koosta riippuen ja valetaan betonilla [7]. Riippuen maan laadusta voi joskus olla tarpeellista myös paaluttaa betonilaatta, jotta perustukselle saadaan riittävä kestävyys. Lähellä peruskalliota perustukset voidaan myös ankkuroida kallioon. Perustukset kiinnitetään kallioon porattuihin reikiin valetuilla terästangoilla. Perustusten tekeminen kallioon on

halvempi verrattuna betoniperustuksiin, koska sen tekemiseen ei tarvitse kaivaa suuria kuoppia. [8]

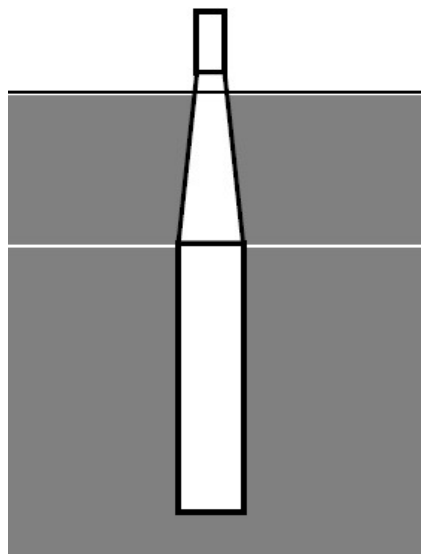
Merelle tehtävien voimaloiden eli off-shore -voimaloiden perustuksia tehtäessä on huomioitava veden syvyys, pohjan kantavuus sekä jään vaikutukset. Merellä voimalan rakenteet joutuvat kovalle rasitukselle aaltojen, jäiden ja korroosion takia. Voimalaan kohdistuviin jää- ja aaltokuormiin voidaan vaikuttaa paljonkin perustuksien muotoilulla. Yksinkertaisin meriperustusmenetelmä on kasuuni (kuva 5). Kasuuni on suuri massakiekko joka asetetaan meren pohjaan. Siitä nousee tornirakenne vedenpinnan yläpuolelle, johon tuulivoimala pystytetään. Kasuuni pysyy suuren massansa avulla voimalan pystyssä ja estää rakenteen liikkumisen pohjaa pitkin. Kasuunista paranneltu malli on helmoilla varusteltu kasuuni, jossa kasuuniin lisätyt helmet tunkeutuvat pohjaan ja pitävät näin rakenteen paremmin paikallaan. Kasuunin läpi voidaan myös laittaa paaluja lisäämään perustuksen tukevuutta. Kasuunista voidaan tehdä myös kartion muotoinen (kuva 6), jossa kartion huippu yltää vedenpinnan yläpuolelle. Kartiomuoto keventää jään aiheuttamaa kuormaa pystysuoraan rakenteeseen verrattuna. Kaltevaa tasoa vasten jää taipuu ja murtuu helpommin kuin murskautuessaan suoraa tasoa vasten. Vaihtoehto kasuunille on paaluperustus. Pohjaan juntattu (kuva 7), kalliokaivoon- (kuva 9) tai kallioon ankkuroitu (kuva 10) paalu. Paaluperustus on kasuunia kevyempi ja joustavampi menetelmä. Myös paaluperustuksiin voidaan kiinnittää kartiokaulus jäiden voimia vastaan.[9]



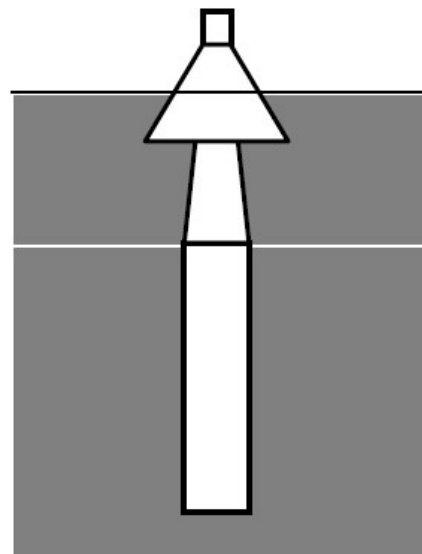
**Kuva 5. Kasuuni. [9]**



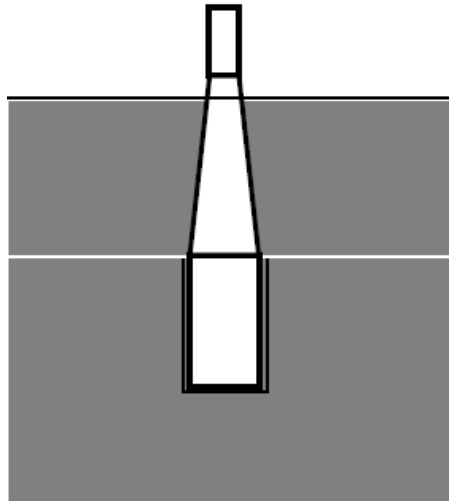
**Kuva 6. Kartiokasuuni. [9]**



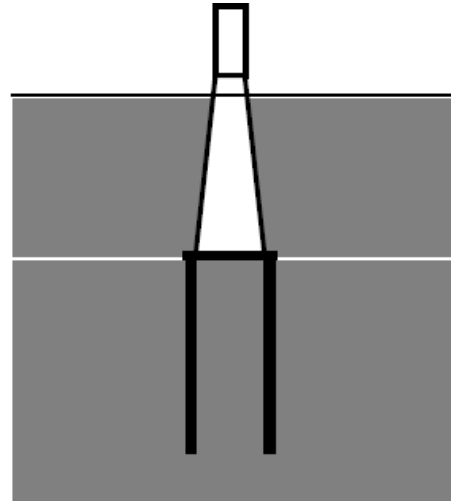
**Kuva 7. Junttapaalu. [9]**



**Kuva 8. Junttapaalu + kartio. [9]**



*Kuva 9. Kalliokaivo. [9]*



*Kuva 10. Kallioankkurointi. [9]*

## 4.2. Tornit

Torni on yksi tuulivoimalan perusosista, sen tehtävänä on kannatella konehuonetta sekä roottoria. Tornin tehtävänä on myös saada roottori mahdollisimman korkealle maanpinnasta, missä tuulennopeudet ovat suuremmat ja häiriöt pienemmät. Koska tuulen teho kasvaa tuulennopeuden kolmanteen potenssiin on hyvin tärkeää saada roottori mahdollisimman korkealle. Mutta mitä korkeampi torni on sitä suuremmat voimat siihen kohdistuvat, joten täytyy löytää sopiva kompromissi tornin korkeudelle. Yleisesti tornin korkeus on roottorin halkaisija, mutta myös hieman korkeampia torneja käytetään nykyään.

Yleensä torni on putkimainen teräsrakenne, mutta myös teräksistä ristikkorakennetta ja betonitorneja on käytetty. Ristikkorakenne on vastaavaa putkirakennetta halvempi, mutta ulkonäöllisesti huomattavasti huonompi, minkä takia umpiputkirakennetta suositaan. Tornin tehtävänä on myös vaimentaa roottorien aiheuttamia rasituksia.

## 4.3. Generaattorit

Generaattori on tuulivoimalan sydän. Se muuttaa lapojen mekaanisen pyörimisen sähköenergiaksi. Kaupallisia tuulivoimaloita on moneen tarpeeseen. Yleisimmät kaupalliset sähköntuotantoon tarkoitetut tuulivoimalat ovat yhdestä kolmeen megawattiin. Suomessa Winwind tarjoaa yhden ja kolmen megawatin voimaloita, ja Hyötytuuli yhden, kahden ja 2,3 megawatin. [10, 11] Pienempiä, kotitalouksien käyttöön soveltuvia, voimaloita on saatavilla aina 20 W:sta 20 kW:iin.

Tuulivoimaloissa käytetään kolmenlaisia generaattoreita: oikosulku-, kestopagneetti- ja liukurengasgeneraattoreita. Oikosulkugeneraattori on epätahtigeneraattori, jossa roottori pyörii nopeammin kuin generaattorin magneetikenttä, joka on rakenteeltaan yksinkertainen, kestävä ja edullinen.

Oikosulkugeneraattoreita käytetään erityisesti vakio-, ja kaksinopeuksisissa voimaloissa.

Liukurengas- ja kestopagneettigeneraattoreita käytetään muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa. Liukurengasgeneraattorikäyttöinen tuulivoimala voi pyöriä eri nopeuksilla siten, että generaattorin roottoriresistanssia muuttamalla säädetään generaattorin jättämää. Liukurengasgeneraattorin säätövara on kuitenkin vain noin 1-10%, joten roottorin pyörimisnopeus ei voi muuttua tätä enempää. Pienestä pyörimisnopeuden vaihtelualueesta huolimatta saadaan vähennettyä tuulennopeuden muutoksien vaikutusta ja tehonvaihtelua.

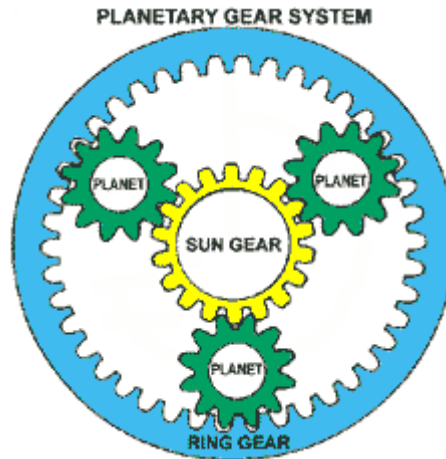
Moninapaiset kestopagneettigeneraattorit mahdollistavat hitaasti pyörivien roottorien suoraan kytkemisen generaattoriin, jolloin raskasta vaihteistoa ei tarvita. [9] Ilman vaihteistoa olevassa järjestelmässä, suoravetojärjestelmässä, generaattorin koko on isompi ja painavampi kuin vaihteellisessa järjestelmässä.

Winwindin voimaloissa on käytössä Multibrid-periaatteeseen perustuva koneisto, jossa on yhdistettynä yksiportainen planeettavaihteisto ja kestopagneettigeneraattori. Multibrid-järjestelmä yhdistää suoravetoisuuden ja vaihteellisen järjestelmän parhaat puolet. Roottorin laakerointi on rakennettu niin, että roottorin aiheuttavat voimat ohjautuvat suoraan runkorakenteeseen, eikä vaihteistoon. [12]

#### **4.4. Vaihteisto**

Tuulivoimalan vaihteisto muuttaa roottorin hitaan pyörimisen generaattorille sopivaksi. Roottorin pyörimisnopeus on noin 20-40 kierrosta minuutissa, mikä ei ole riittävän suuri useimmille generaattoreille. [13] Vaihteisto on hyvin raskas, mikä tuo lisää painoa turbiinille, sekä huonontaa voimalan hyötysuhdetta. Vaihteistoon kohdistuu suuria voimia, mikä tekee siitä hyvin vikaherkän ja sitä on huollettava usein. Vaihteiston käytön etu vaihteettomiin voimaloihin on kuitenkin tarvittavan generaattorin pienempi koko, ja halvempi hinta.

Tuulivoimaloissa käytetään normaalia vaihteistoa tai planeettavaihteistoa. Planeettavaihteisto (kuva 11) koostuu keskellä olevasta aurinkorattaasta, sitä ympäröivistä planeettarattaista sekä näiden ympärillä olevasta kehäpyörästä.



*Kuva 11. Planeettavaihteisto. [14]*

## 4.5. Roottori

Tuulivoimalan roottori muuntaa tuulen liike-energian roottorin pyörimisliikkeeksi, mikä generaattoriin johdettaessa tuottaa sähköä. Tässä muunnoksessa toimivat tuulivoimalan lavat. Ensimmäisissä tuulivoimaloissa lavat olivat vain tasaiset pitkulaiset levyt, jotka asetettiin hieman vinoon tuulen suuntaan nähden. Näin tuuli työnsi lapaa ja aiheutti pyörimisliikkeen. Myöhemmin lavoissa alettiin soveltaa lentokoneen siipiprofiilia. Siipiprofiilin aerodynaamiset ominaisuudet paransivat lapojen pyörimistä ja tuulivoimalan hyöysuhdetta. Nykyisten lapojen profiili ei ole aivan siipienlainen vaan sitä on entisestään paranneltu sopivammaksi tuulivoimaloiden käyttöön.

### 4.5.1. Lapojen määrä

Aikojen saatossa on tuulivoimaloissa kokeiltu erilaisia siipiteknikoita. Yksilapaisia, kaksilapaisia, kolmilapaisia ja useampilapaisia. Yksilapainen järjestelmä on hyvin hankala, koska yksi lapa vaatii raskaan vastapainon tornin heilumisen estämiseksi. Tällaisen voimalan hyötysuhde on huono, koska siinä on vain yksi tuulta keräävä elementti. Samalla vaivalla saadaan vastapainon tilalle toinen lapa, jolloin hyötysuhde paranee ja turhalta lisäpainolta vältytään. Kaksilapaisessa voimalassakin oli ongelmansa. Kaksilapaisuus aiheuttaa suurta räsitusta voimalan rakenteisiin, koska ylhäällä olevaan lapaan tuulee kovempaa kuin alempaan lapaan. Kun lavat olivat pystysuorassa tuuli taivutti ylempää lapaa taaksepäin, jonka johdosta alempi lapa taipui eteenpäin. Lapojen pyöriessä, ne heiluvat edestakaisin ja aiheuttavat kovan räsituksen. Tästä samasta ongelmasta kärsivät kaikki parillisen määrän omaavat voimalat. Täten vakaimpana vaihtoehtona oli että voimalassa oli oltava pariton määrä lapoja. Useampilapaisissa voimaloissa lapoja lisättäessä saadaan pieni parannus hyötysuhteeseen sekä pienempi käynnistyskynnys. Hyötysuhteen lisäys on kuitenkin hyvin pieni verrattuna lisälapojen kustannuksiin, joten parhaimmaksi vaihtoehdoksi tuulienergian tuotannossa on päädytty kolmilapaisiin voimaloihin. Pienemmissä

kotitalouskäyttöön tarkoitetuissa tuulivoimaloissa käytetään useampilapaisia turbiineja, koska niissä lapojen lisäkustannukset pysyvät pieninä.

## **4.6. Säädöt**

Tuulivoimalat voidaan jakaa nopeusrajoitus- ja tehonrajoitusominaisuuksien mukaan. Nopeusrajoitteisia voimaloita ovat vakionopeuksiset ja muuttuvanopeuksiset. Tehorajoitteisia ovat puolestaan sakkaus-, aktiivisakkaus- sekä lapakulmasäätöiset voimalat.

### **4.6.1. Vakio- ja muuttuvanopeuksiset**

Vakionopeuksiset voimalat olivat asennetuista voimaloista yleisimpiä 90-luvun alkupuolella. Vakionopeudella pyörivä tuulivoimala tuottaa lähes vakiotaaajuista sähköä, jonka ansiosta voimala voidaan liittää suoraan verkkoon. Vakionopeuksisessa voimalassa roottorin pyörimisnopeuden määrää verkon taajuus. Vakionopeuksiset tuulivoimalat ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja siksi luotettavia. Huonoina puolina on niihin kohdistuva kova mekaaninen rasitus sekä tuotetun tehon laadunhallinnan vaikeus. Vakionopeuksiset voimalat toimivat parhaalla hyötysuhteella vain tietyllä tuulennopeudella, mikä heikentää niiden kokonaishyötysuhdetta. Tästä syystä usein käytetään kaksinopeuksista voimalaa.

Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat ovat kuitenkin syrjäyttämässä vakionopeuksiset voimalat. Muuttuvan pyörimisnopeuden ansiosta voimalan pyörimisnopeus saadaan aina lähes ideaaliseksi, huolimatta tuulennopeuden vaihteluista. Muuttuvanopeuksiseen voimalaan kohdistuu pienempiä mekaanisia voimia ja sen tehontuotanto on vakionopeuksista parempi. Muuttuvan pyörimisnopeuden takia, kyseiseen voimalaan tarvitaan taajuudenmuunnin, mikä tuo lisäkustannuksia. [15]

### **4.6.2. Passiivisakkaus-, aktiivisakkaus- ja lapakulmasäätö**

Tuulivoimalan sähköntuotanto käynnistyy tuulennopeuden ollessa noin 3 m/s ja tuotettu teho nousee tästä tuulennopeuden kasvaessa. Nimellisteho saavutetaan noin tuulennopeudella 12 m/s. Kun tuulennopeus kasvaa tätä suuremmaksi on voimalan tehoa rajoitettava. Kun tuulennopeus kasvaa liian suureksi, eli yli 20 m/s, voimala pysäytetään. [10] Halvin tapa on tehdä tuulivoimalasta sakkaussäätöinen. Sakkaus tarkoittaa sitä kun siiven jänteen ja tuulen kohtauskulma kasvaa niin suureksi, että siipi ei pysty tuottamaan tarvittavaa nostetta. Sakkaussäätö toteutetaan tekemällä siiven profiilista sellainen, että tuulen nopeuden kasvaessa yli nimellisen, lavan tuottama noste katoaa ja turbiinin pyöriminen hidastuu. Tuulennopeuden noustessa liian suureksi voimala käännetään pois tuulesta.

Lapakulmasäätöisellä voimalalla tehonrajoitus tapahtuu lavan ja tuulen kohtauskulmaa muuttamalla. Lapakulmasäätöisessä voimalassa jokaisella lavalla on juurensa oma moottori, jolla lapaa voidaan kiertää. Tuulennopeuden ollessa alle

nimellisenopeuden lapakulmia säädetään jatkuvasti mahdollisimman optimaalisiksi. Kun tuulennopeus kasvaa yli nimellisen lapakulmaa pienennetään jolloin tuotettu teho pysyy nimellisenä. Liian kovalla tuulella voimala pysäytetään kääntämällä lavat 180 astetta pois tuulesta.

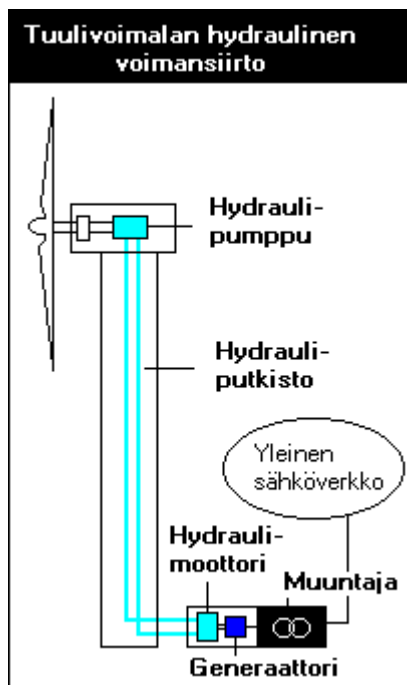
Aktiivisakkaussäätöinen voimala toimii samoin kuin lapakulmasäätöinen, kun tuulennopeus on alle nimellistuulennopeuden. Tällöin saavutetaan passiivisakkaussäätöistä voimalaa hieman parempi hyötysuhde. Kun nimellistuulennopeus ylittyy lapa sakata, mutta sakkauksen määrää voidaan säätää muuttamalla lavan kulmaa.



## 5. TUULIVOIMAN ONGELMAT

Tuulivoimateknologian kehittyessä vaaditaan yhä suurempitehoisia tuulivoimaloita. Suurin ongelma on se, että yksikkökoon kasvaessa, myös generaattorien ja muiden voimalan osien koko kasvaa. Osien kokojen ja massojen kasvu tuo omat haasteensa voimaloiden rakenteille. Rakenteista tarvitsisi tehdä entistä kestävämpiä, mikä nostaa kustannuksia. Tällä hetkellä maailman suurin tuulivoimala on Saksassa sijaitseva, Enerconin 6 MW:nen voimala. Se on 138 metriä korkea ja sen roottorin halkaisija on 126 metriä. [17]

Eräänä ratkaisuna kasvaviin voimalakokoihin on kehitelty hydraulista voimansiirtoa (kuva 12). Tässä ratkaisussa voimalan konehuoneeseen on sijoitettu hydraulipumppu, jota roottori pyörittää. Hydraulipumppu välittää roottorin voiman nesteen kautta tornin juuressa olevalle generaattorille. Näin raskas laitteisto saadaan maan pinnalle, missä voimalan huolto on helpompaa. Nykyään tornikorkeudet ovat kuitenkin niin suuria, että hydraulipumppujärjestelmän hyötysuhde ei ole riittävä. [13] Toinen ratkaisu laitteistojen koon kasvulle voisi tulevaisuudessa olla suprajohdetekniikka, jonka avulla generaattoreistakin saataisiin nykyistä pienempiä ja tehokkaampia.



*Kuva 12. Hydraulinen voimansiirto. [18]*

Suomen Lapissa on huomattavat tuulivoimavarat korkeiden tuntureiden ansiosta, mutta kylmä ilma aiheuttaa ongelmia. Lapoihin muodostuva jää huonontaa lapojen aerodynaamisia ominaisuuksia, ja lavoista tippuvista jääpaloista voi olla vaaraa sivullisille. Ongelmaan on yritetty löytää ratkaisua erilaisia materiaaleja käyttämällä, mutta vielä sopivaa materiaalia ei ole löydetty. Pitkään on kehitetty myös lapojen lämmitysjärjestelmiä, jotka pitävät lavat sulina käytön aikana. Lämmitetyt lavat ovat tällä hetkellä toimivin ratkaisu, ja ne vievätkin vain muutaman prosentin voimalan vuosituotannosta. [19, 20]

**Taulukko 1.** Tuulivoimaloiden koko. [11]

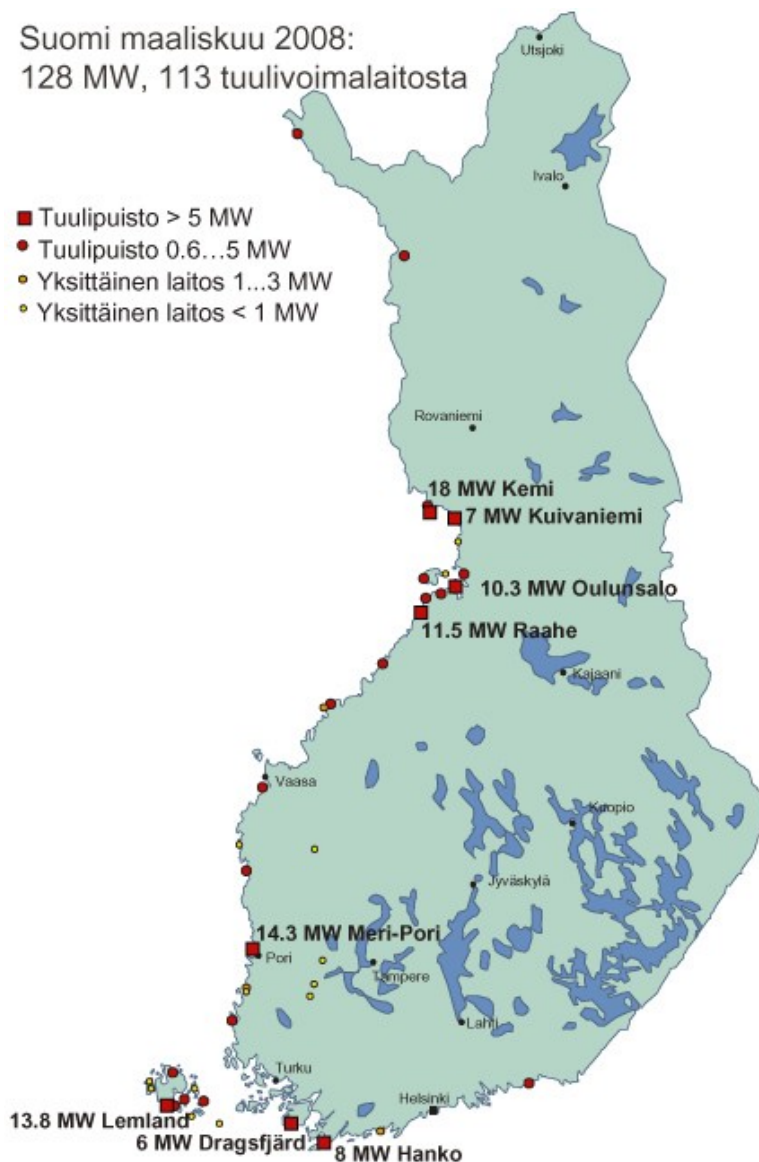
|                     | 1 MW   | 2 MW | 2,3 MW |
|---------------------|--------|------|--------|
| Maston korkeus      | 50-60m | 80m  | 80m    |
| Lavan pituus        | 26m    | 37m  | 40m    |
| Roottorin läpimitta | 54m    | 76m  | 82,4m  |
| Roottorin paino     | 25t    | 52t  | 52t    |
| Konehuoneen paino   | 40t    | 82t  | 82,5t  |

## 6. TUULISOVELLUKSET

Tuulivoimasta saatava sähkö on hyvin epätasaista. Toisinaan tuulee enemmän ja toisinaan taas vähemmän. Tästä syystä tuulivoima pelkästään ei sovellu hyvin sähköntuotantoon, koska tyyninäkin päivinä olisi saatava sähköä. Tuulisina päivinä sähköä voidaan varastoida ja tyyninä päivinä varastossa oleva sähkö voidaan ottaa käyttöön. Sähkö voidaan varastoida suoraan akkuihin, mutta nykyään hyvänä vaihtoehtona on myös varastoida sähkö vetyyn. Tuulivoimalla tuotetulla sähköllä voidaan valmistaa elektrolyysillä vedestä vetyä, joka voidaan varastoida vetytankkeihin. Tuulettomana päivänä voidaan vetyä syöttää polttokennoon, jolla vedystä saadaan tuotettua sähköä.

## 7. TUULIOLOSUHTEET

Tuulivoiman sijoitukseen vaikuttaa merkittävästi alueen tuuliolosuhteet. Kovimmat tuulet ovat yleensä rannikon läheisyydessä tai korkeilla alueilla. Suomeen rakennetuista tuulivoimaloista suurin osa onkin maan länsirannikolla (kuva 13). Suomen merialueilla vuotuinen keskituulennopeus 50 m:n korkeudessa sekä lapin tuntureilla on noin 8 m/s. Sisämaan alueilla keskituulennopeus on noin 4 m/s. [21]



*Kuva 13. Suomen tuulivoimalat. [22]*

Tuulivoimaa on asennettu maailmaan jo lähes 100 000 MW, josta yli puolet, noin 60 000 MW, on asennettu Eurooppaan (kuva 14). Euroopan suurimmat

tuulivoiman rakentajat ovat Espanja ja Saksa. Suomi tuulivoimatilastoissa Euroopassa vasta puolen välin alapuolella.



*Kuva 14. Tuulivoima Euroopassa. [23]*

## LÄHTEET

- [1] Suomen tuulienergia, FWT Oy. Tuulivoimamarkkinoiden historiaa. [WWW]. [Viitattu 5.5.2008]. Saatavissa: <http://www.suomentuulienergia.fi/historia.html>.
- [2] Illustrated history of wind power development. [WWW ]. [Viitattu 26.5.2008]. Saatavissa: <http://www.telosnet.com/wind/20th.html>.
- [3] Earth Policy Institute. [WWW]. [Viitattu 5.5.2008]. Saatavissa: [http://www.earthpolicy.org/Indicators/Wind/2008\\_data.htm](http://www.earthpolicy.org/Indicators/Wind/2008_data.htm).
- [4] Piclist, kuvapalvelin. [WWW]. [Viitattu 5.5.2008]. Saatavissa: <http://www.piclist.com/techref/other/windmills.htm>.
- [5] How stuff works, internet-tietosanakirja. [WWW]. [Viitattu 5.5.2008]. Saatavissa: <http://science.howstuffworks.com/wind-power2.htm>.
- [6] Kuopion energia, energiapalveluyritys. [WWW]. [Viitattu 5.5.2008]. Saatavissa: <http://www.kuopionenergia.fi/sahkonmyynti/tekni1.JPG>.
- [7] Tuulivoiman tuotantoon soveltuvien maa- ja merialueiden kartoitus Itä-Uudenmaan ja Kymenlaakson rannikkoalueilla 2005. [WWW]. [Viitattu 26.3.2008]. Saatavissa: <http://liitto.ita-uusimaa.fi/files/Tiedostot/Tuulivoima.pdf>.
- [8] Motiva Oy, energiansäästön ja uusiutuvien energialähteiden käytön markkinoita aktivoiva palvelukeskus. Tuulivoiman projektiopas. [WWW]. [Viitattu 26.3.2008]. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/fi/julkaisut/uusiutuvatenergialahteet/tuulivoima/tuulivoimanprojektiopas.html>.
- [9] Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, VTT. Offshore-tuulivoima Perämeren jääolosuhteissa. Hanne Holttinen, Seppo Liukkonen & Karl-Johan Furustam, Mauri Määttänen, Erkki Haapanen, Esa Holttinen. [WWW]. [Viitattu 4.5.2008]. Saatavissa: [www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1998/J828.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1998/J828.pdf).
- [10] WinWinD, tuulivoiman tuottaja. [Viitattu 26.3.2008]. Saatavissa: <http://www.winwind.fi>.
- [11] Suomen Hyötytuuli Oy, tuulivoiman tuottaja. [Viitattu 26.3.2008]. Saatavissa: <http://www.hyotytuuli.fi>.
- [12] Wind Energy, Volume 1, Issue 2, p 89-100. Multibrid Technology-A Significant

- Step to Multi-megawatt Wind Turbines. [WWW]. [Viitattu 5.5.2008]. Saatavissa: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/30002544/PDFSTART?CRETRY=1&SRETRY=0>.
- [13] Tampereen Teknillinen Yliopisto, sähkötekniikka ja terveys -laboratorio. [WWW]. [Viitattu 5.5.2008]. Saatavissa: <http://www.e-leeh.org/tuotanto/sivu8.html>.
- [14] The Family Car, web magazine. [WWW]. [Viitattu 5.5.2008]. Saatavissa: [http://www.familycar.com/classroom/Images/Trans\\_Planetary.gif](http://www.familycar.com/classroom/Images/Trans_Planetary.gif).
- [15] Wind Energy, Volume 10, Issue 1 (p 81-97). [WWW]. [Viitattu 30.4.2008]. Saatavissa: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/113454768/PDFSTART>.
- [16] TTY/Sähkövoimatekniikka. Tuulivoimateknologia sähkönjakeluverkoissa. Laaksonen, H., Repo, S. Raportti 1-2003. [WWW]. [Viitattu 26.3.2008]. Saatavissa: <http://www.tut.fi/~repo/Julkaisut/raportti1-2003.pdf>.
- [17] [WWW]. [Viitattu 26.3.2008]. Saatavissa: [http://www.treehugger.com/files/2008/02/enercon\\_e126\\_largest\\_wind\\_turbine.php](http://www.treehugger.com/files/2008/02/enercon_e126_largest_wind_turbine.php).
- [18] [WWW]. [Viitattu 26.5.2008]. Saatavissa: <http://www.saunalahti.fi/~tkdesign/Tuulienergia/>.
- [19] Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, VTT. Arktisen tuulivoimalaitoksen lapalämmitysjärjestelmän suunnittelu, kehitys ja toteutus. Mauri Marjaniemi, Esa Peltola. [WWW]. [Viitattu 26.5.2008]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1998/J830.pdf>.
- [20] Teknillinen Korkeakoulu. Jäätymättömät tuuliroottorit. Suvi Monni. [WWW]. [Viitattu 26.5.2008]. Saatavissa: [http://www.tkk.fi/Units/AES/courses/crspages/Tfy-56.181\\_02/Monni.pdf](http://www.tkk.fi/Units/AES/courses/crspages/Tfy-56.181_02/Monni.pdf).
- [21] Teknillinen korkeakoulu. Laajamittainen tuulivoimatuotanto, Tuulen vaihtelut ja niiden ennustaminen. Hannu Hätönen. [WWW]. [Viitattu 26.5.2008]. Saatavissa: [http://www.tkk.fi/Units/AES/courses/crspages/Tfy-56.174\\_05.pdf](http://www.tkk.fi/Units/AES/courses/crspages/Tfy-56.174_05.pdf).
- [22] Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, VTT. [WWW]. [Viitattu 26.5.2008]. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/palvelut/cluster7/topic7\\_9/Tuulivoiman\\_tuotanto\\_ ja\\_vikatilastot.jsp](http://www.vtt.fi/palvelut/cluster7/topic7_9/Tuulivoiman_tuotanto_ ja_vikatilastot.jsp).

- [23] The European Wind Energy Association, EWEA. [WWW]. [Viitattu 26.5.2008].  
Saatavissa:  
[http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/mailing/windmap-08g.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/mailing/windmap-08g.pdf)