

Samuli Lillman

AURINKO- JA TUULIVOIMAN YHTEIS- KÄYTTÖ

Opinnäytetyö
Energiatekniikka

2017



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Samuli Lillman	Insinööri (AMK)	Kesäkuu 2017
Opinnäytetyön nimi		
Tuuli- ja aurinkovoiman yhteiskäyttö		68 sivua
Toimeksiantaja		
Kalle Suoniemi, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu		
Ohjaaja		
Merja Mäkelä, yliopettaja		
Tiivistelmä		
<p>Opinnäytetyössä tutkitaan Mäkelänkankaan tuuli- ja aurinkovoimaloiden sopivuutta yhteen, koska molempien ongelmana on niiden epätasainen tuotanto. Tämä johtuu säiden vaihtelusta, sillä molemmat tarvitsevat otolliset säät tuottaakseen sähköä.</p> <p>Tarkasteluun käytettiin Mäkelänkankaan tuuli- ja aurinkopuiston tuotantotietoja neljältä kuukaudelta. Tuotantotiedot tulivat Empowerilta, joka toimii myös puistojen operaattorina. Tarkastelun pohjaksi selvitettiin sekä tuulivoimaloiden, että aurinkopaneeleiden toimintaperiaatteet ja rakenteet. Tuotantotietojen tarkastelu sijoittui vuoden 2017 tammikuusta huhtikuuhun asti, jolta ajalta seurattiin tuuli- ja aurinkotuotannon muutoksia ja kuinka niiden tuotanto sopii hyvin yhteen. Tuotantotietojen tarkastelussa käytettiin hyväksi Matlab-ohjelmistoa, jonka avulla saatiin laskettua huhti- ja toukokuulle korrelaatiokertoimet näiden kahden energiantuotantotavan välille. Tämä auttaa selittämään, miten hyvin voimaloiden tuotanto on sijoittunut toisiinsa nähden.</p> <p>Tuotantotietojen perusteella ja korrelaatiokertoimia tarkastelemalla voidaan todeta, että voimalaitokset tuottavat sähköä enimmäkseen eri aikoihin. Tuulivoimala tuottaa enemmän sähköä auringonlaskun ja nousun välissä, kun taas aurinkovoimala alkaa tuottaa päivisin. Täsmällisten tulosten saaminen vaatisi pidempiaikaista seurantaa. Myös vuodenajalla on väliä tuotannossa. Tuulivoimalayksikön annetun tehokäyrän todettiin vastavan käytännön mittauksia.</p>		
Asiasanat		
Tuulivoima, aurinkovoima, yhteiskäyttö		

Author (authors)	Degree	Time
Samuli Lillman	Bachelor of Energy Technology	June 2017
Thesis Title		
Hybrid Usage of Solar and Wind Power		68 pages
Commissioned by		
Kalle Suoniemi, Kaakkois-Suomi University of Applied Sciences		
Supervisor		
Merja Mäkelä, Principal Lecturer		
Abstract		
<p>In this Bachelors Thesis purpose was to study consistence of the wind power and the solar power in Mäkelänkangas wind park. The main problem for both is their dependence on the weather. This affects their reliability of production of electricity.</p> <p>To make this evaluation there was production intel from Mäkelänkangas wind and solar park, granted by Empower which is also operator of this site. For better understanding the basics of the working principal and the structure for wind turbine and the solar panels were also introduced. Analysis consisted four months from the January to the April of the year 2017. From these months changes in production and times of production were analyzed. After this, consistency of both wind and solar production times were examined. To help this examination, correlations were calculated with Matlab software for two months, April and May. This helped to see if there was any consistency between these energy production methods.</p> <p>After production intel analyses and correlation calculations it could be seen that wind and solar plants produce electricity at different time. The wind power produces more electricity during the nights and comparably the solar power produces during the day. Seasons also have impact on the production, since during the winter wind power produces energy and solar power cannot get enough sun radiation to start the production. On the other hand, during the summer there is almost the same amount of sun radiation for the solar panels as in Northern Germany.</p>		
Keywords		
wind power, solar power, hybrid		

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	6
2	TUULIVOIMAN HYÖDYNTÄMINEN	8
2.1	Betzin laki	8
2.2	Rakenne	11
2.2.1	Generaattori	12
2.2.2	Vaihteisto	13
2.2.3	Roottori ja siivet.....	14
2.2.4	Torni ja perustukset.....	15
2.3	Toiminta	17
2.4	Ohjaus	18
3	AURINKOVOIMAN HYÖDYNTÄMINEN	22
3.1	Aurinkopaneeli	22
3.2	Toimintaperiaate	23
3.3	Aurinkokennojen materiaali	25
3.4	Omaiskäyrä aurinkopaneelille.....	26
4	AURINKO- JA TUULIVOIMAN KÄYTTÖ	29
4.1	Auringon säteily ja tuulen synty	29
4.1.1	Tuulen mittaaminen.....	33
4.1.2	Tuuliatlas.....	35
4.2	Tuuli- ja aurinkovoiman käyttöä maailmalla	37
5	MÄKELÄNKANKAAN TUULI- JA AURINKOPUISTO	39
5.1	Aurinkopuisto	39
5.2	Tuulipuisto	39
6	TUOTANTOTIETOJEN KERUU JA ANALYSOINTI	43
6.1	Kuukausittainen tarkastelu.....	46
6.2	Tarkastelu päivän tarkkuudella	50
6.3	Tuuli- ja aurinkovoiman korrelaatio	58
7	YHTEENVETO	62

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia, kuinka aurinko- ja tuulivoimalat toimivat yhdessä sähköntuottajina. Sekä aurinko- että tuulivoimassa on aina ongelmana niiden sääriippuvuus sähköntuottajina. Niiden sähköntuotantoa ei voi ennustaa, jonka takia niitä ei ole vielä pidetty varteenotettavina vaihtoehtoina sähköntuotantoon. Molemmat näistä voimaloista vaativat hyvät olosuhteet tuotantoon, aurinkovoimala tuottaa paremmin kirkkaana säänä kuin pilvisellä ja tuulivoimalat tarvitsevat tarpeeksi tuulta, jotta lavat alkavat pyörimään ja tuottaa sähköä.

Opinnäytteen tärkeimpänä osa-alueena on mittaustulosten tarkastelu ja analysointi. Tutkittava data saadaan Empowerilta, joka toimii puiston operaattorina. Mittaustuloksista tarkastellaan, milloin tuulivoimalat pyörivät ja tuottavat sähköä ja vastaavasti, miten ja milloin aurinkovoimalat tuottavat sähköä sekä niiden toimintaa yhtä aikaa. Työssä tarkastellaan voimaloiden yhteiskäyttöä energian tuottajina. Tarkastelun kohteena on Mäkelänkankaan aurinko- ja tuulipuisto. Ensimmäisenä otettiin käyttöön neljä tuulivoimalaa, joiden valmistusvuosi oli 2012 ja aurinkopuisto vihittiin käyttöön 2016.

Tuuli- ja aurinkopuistoilla on kummallakin omat automaatiojärjestelmänsä ja molemmissa puistoissa operaattorina toimii Empower, jonka valvomo sijaitsee Helsingissä. Empowerin tehtävä on valvoa ja kerätä tuotantotietoja, joita apuna käyttäen voidaan tutkia puistojen yhteiskäyttöä ja tuottavuutta. Dataa kerätään neljältä kuukaudelta, vuoden 2017 tammikuusta huhtikuuhun. Tältä ajalta tutkitaan, millainen on voimaloiden tuottavuus. Työssä on tarkoitus myös tutkia, onko muualla maailmassa tehty vastaavaa tutkimusta ja verrata tuloksia keskenään. Tutkimus tehdään yhdessä Mäkelänkankaan tuulipuiston kanssa.

Mäkelänkankaan tuulipuisto sijaitsee Haminassa Mäkelänkankaan teollisuusalueella. Kuvan 1 mukaisesti alueella on neljä 2 MW:n tuuliturbiinia, jotka on valmistanut Hyundai Heavy Industries. Turbiinien teho on 8 MW ja vuodessa puisto tuottaa noin 20 GWh. Tuuliturbiinien napakorkeus on 100 metriä ja roottorien kiinnitettyjen siipien kärkiväli on 93 m. Sähköntuotanto käynnistyy, kun tuulennopeus kasvaa yli 3,4 m/s. Puisto vihittiin käyttöön 2012, ja tuulivoimaloiden pystyttämistä vastasi Empower. (Suomenvoima, B)



Kuva 1. Mäkelänkankaan tuulipuisto. (Suomenvoima, 2016)

Tuulipuiston yhteyteen on rakennettu myös aurinkovoimala, joka koostuu 2774 aurinkopaneelista. Kuvassa 2 näkee, että paneelit on rakennettu hyvin lähelle tuuliturbiineita. Yhteisteho paneeleilla on noin 745 kW ja vuotuinen tuotanto on noin 680 000 kWh. Paneelit on valmistanut Hyundai Heavy Industries ja kokonaistoimituksen Etelä-Savon Energia Oy. Sekä tuuli- ja aurinkopuiston ohjaamisesta ja valvonnasta vastaa Empower. Valvonta tapahtuu etänä. (Suomenvoima, B)



Kuva 2. Mäkelänkankaan aurinkopaneelit. (Suomenvoima, 2016)

2 TUULIVOIMAN HYÖDYNTÄMINEN

Tuulivoima on yksi puhtaimmista tavoista tuottaa sähköä, koska siinä ei tuotannon aikana synny mitään päästöjä ilmaan, maahan tai veteen. Tuulivoiman energia on peräisin auringon säteilyenergiasta, joka luo maapallolle lämmön avulla paine-eroja, joka puolestaan synnyttää tuulia. Tästä johtuu, että tuuli on täysin uusiutuvaa ja loputonta energiaa. Tuulivoimala toimii siten, että tuulen kineettinen energia pyörittää tuuliturbiinin lapoja osuessaan niihin, joka puolestaan alkaa pyörittää akselia ja siten myös generaattoria tuottaen sähköä. Tuulivoimalaa kuvataan tarkemmin kappaleessa 3.

Jotta tuulen energiaa pystyttäisiin hyödyntämään paremmin, rakennetaan yleensä enemmän kuin yksi tuulivoimala. Monen tuulivoimalan yhdistelmää kutsutaan tuulipuistoksi. Tuulipuiston koko vaihtelee muutaman tuulivoimalan puistosta suuriksi monen sadan tuulivoimalan puistoiksi. Turbiinit pyritään sijoittamaan 4 - 10 roottorin pyörimishalkaisijan päähän toisistaan. Tämä johtuu siitä, että tuuleen tulee häiriöitä ja pyörteitä aiheuttaen tehohäviöitä seuraavaan tuuliturbiiniin. Näin varmistetaan, että jokainen turbiini tuottaa mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella sähköä. Etäisyydellä pyritään myös ehkäisemään suuret vahingot, jos yksi turbiini syystä tai toisesta hajoaa. Tuulipuiston yksittäiset voimalat yhdistetään toisiinsa voimansiirtojärjestelmällä.

Tuulivoimaloita pystytään mitoittamaan alueelle tuulen määrän mukaan. On esimerkiksi turhaa rakentaa suurta voimalaa pientuuliselle alueelle ja vastavasti liian pieni voimala ei kestäisi suurta tuulen nopeutta. Jotta tuulivoimalalle saa rakennusluvan, on tutkittava alueen tuulisuutta nähdäkseen, millainen tuottavuus mahdollisesti alueella olisi. Tuulivoimaloita pystytään sijoittamaan maan lisäksi myös merelle. Tämä luo lisää mahdollisuuksia tuottaa sähköä, koska merellä tuulee keskimäärin enemmän kuin maalla. Tämä vaatii kuitenkin aallokon huomioon ottamisen tuuliturbiinin rakenteessa, jotta se kestäisi aallokon rasituksen.

2.1 Betzin laki

Betzin lailla tarkoitetaan teoreettista maksimia sille tehon hyötysuhteelle, jonka roottori voi ilmamäärän liike-energiasta muuntaa pyörimisenergiaksi ja näin ollen sähköksi. Tässä roottorilla viitataan voimalan lavoista sekä navasta koos-

tuvaa kokonaisuutta, joka ”kerää” tuulen liike-energiaa. Betzin laki asettaa teoreettisen ylärajan 59,3 %:n, joka on myös turbiinin teoreettinen hyötysuhde sille, minkä se pystyy hyödyntämään tuulen energiasta. (Korpela 2016.)

Luku 59,6 % saadaan Albert Betz esittämästä teoreettisesta esityksestä. Teoreettisesti ajateltuna ilmapirran täytyy hidastua sen osuessa turbiiniin. Tuulen virtaus on kovempi ennen kuin jälkeen turbiinin. Olkoon siis v_1 virtauksen nopeus ennen turbiinia ja v_2 virtauksen nopeus sen jälkeen. Turbiinin kohdalla virtaus näiden kahden arvon keskiarvo, joka on merkitty k :lla. Tämä on esitetty kaavassa 1.

$$k = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{Kaava 1})$$

v_1 tuulen virtaus ennen turbiinia

v_2 virtaus turbiinin jälkeen

Turbiinin läpi menevä ilmamäärä on esitetty kaavassa 2.

$$\frac{dm}{dt} = A\rho \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{Kaava 2})$$

dm/dt massan ja ajan derivaatta

A tuulivoimalan siipien pyyhkäisy pinta-ala

ρ ilman tiheys

Tästä ilmamäärästä saatava teho P on esitetty kaavassa 3.

$$P = \frac{1}{2} (v_1^2 - v_2^2) \frac{dm}{dt} \quad (\text{Kaava 3})$$

P teho

Kun nämä kaavat 2 ja 3 yhdistetään, saadaan se alhaalla kaavan 4 mukaiseen muotoon.

$$P = \frac{\rho}{4} A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (\text{Kaava 4})$$

Jos oletetaan, ettei turbiini ottaisi virtauksesta ollenkaan tehoa, olisi tehon P_0 muoto kaavan 5 näköinen:

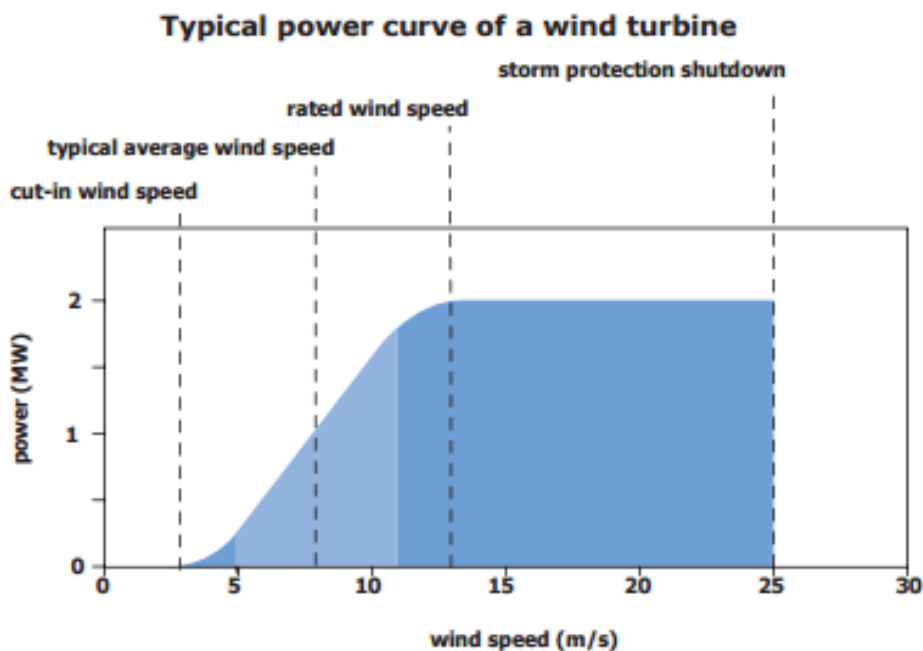
$$P_0 = \frac{\rho}{2} A v_1^3 \quad (\text{Kaava 5})$$

Näistä kahdesta tehon kaavasta saadaan laskettua tehokerroin c_P , joka esitetty kaavassa 6. Tehokerroin tarkoittaa tuulivoimaloiden niin sanottua hyötysuhdetta, eli tuulivoimalan teho jaetaan tuulen teholla.

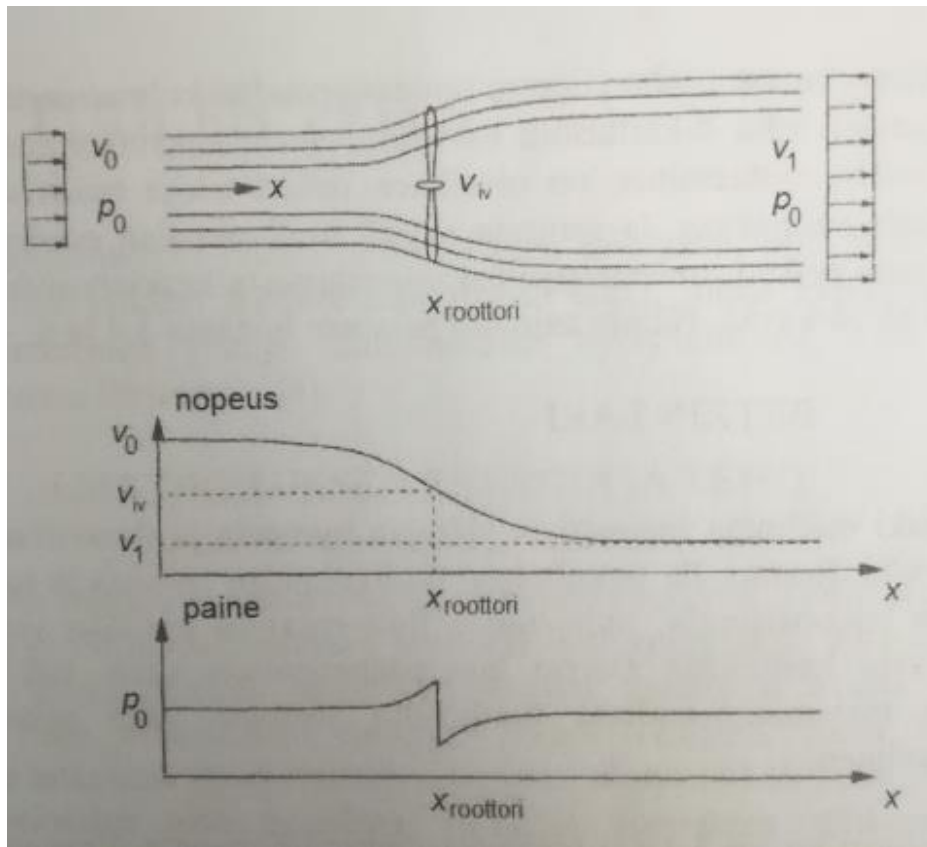
$$c_P = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right] \quad (\text{Kaava 6})$$

Näin voidaan osoittaa, että tehokertoimella c_P on maksimiarvo eli $c_P \leq 16/27 \approx 0.59$. (tut.fi 2008.)

Betzin laissa turbiini oletetaan ideaaliseksi. Turbiinin lavat ovat ilmaa läpäisevä kiekko, joka sisältää äärettömän määrän lapoja. Turbiinin toiminta on täysin kitkatonta, jolla tarkoitetaan kitkattomuutta laakereissa ja muissa mekaanisissa laitteissa. Kitkaa ei ole eikä myöskään lapojen ja ilmanvirtauksen välillä. Ilman lapojen ja ilmanvirtauksen välistä kitkaa, ei synny lämpöhäviöitäkään. Tuuliturbiini todetaan massattomaksi, jolloin tuulen osuessa lapoihin, reagoi turbiini välittömästi. Tämä tarkoittaa viiveetöntä reagointia tuulen nopeuksiin. Myös ilmanvirtaus todetaan pyörteettömäksi, jolloin ilmanvirtaus ei häiriinny sen osuessa lapoihin. Kuvassa 3 on tyypillisen 2 MW:n tuulivoimalan tehokäyrä, jossa ilmenee, kuinka hyvin tuulivoimala saa tietystä tuulennopeudesta tehoa irti. (Korpela 2016, 37 - 42.)



Kuva 3. Tyypillinen tehokäyrä (nottingham.ac.uk, 2005)



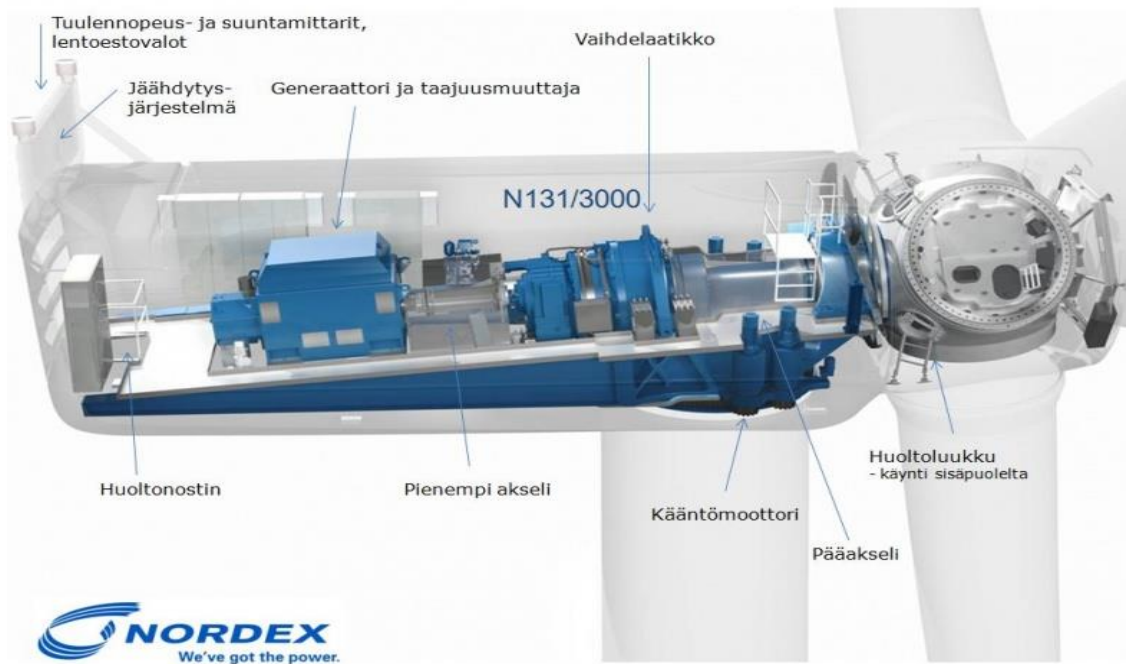
Kuva 4. Tuuliturbiinin ihanteellinen virtaus ylempänä ja alempana tuulennopeuden ja paineen todellinen käyttäytyminen (Korpela 2016, 38.)

Kuvan 4 ylemmässä kuvassa on ihanteellinen tilanne, jossa tuulen osuttua lapoihin, säilyy sen ilmanpaine sekä tiheys vakioina. Samaisessa kuvassa alemmassa kuvassa näkyy, miten tuuli todellisuudessa käyttäytyy. Tuulen paine kasvaa hetkellisesti sen useassa lapoihin ja heti lapojen jälkeen paine on matalampi kuin normaalista. Myös tuulennopeus putoaa sen osuttua lapoihin (Korpela 2016, 37- 42.)

2.2 Rakenne

Tuulivoimala koostuu pääosin konehuoneesta, tai toisella nimellä nasellista, lavoista, tornista ja tornin perustuksesta. Konehuone pitää sisällään generaattorin, vaihteiston, jarrun, kääntömoottorin sekä akselin, joka kulkee näiden välillä. Konehuoneen päällä on myös mittauslaitteisto, jolla mitataan tuulen nopeutta ja suuntaa, joiden mittaaman informaation mukaa pystytään kääntömoottorilla kääntämään tuulivoimala oikeaan suuntaan. Kuvassa 5 on rakenne

kuva tuulivoimalan konehuoneesta.



Kuva 5. Tuulivoimalan konehuone (Tuulivoimalayhdistys)

2.2.1 Generaattori

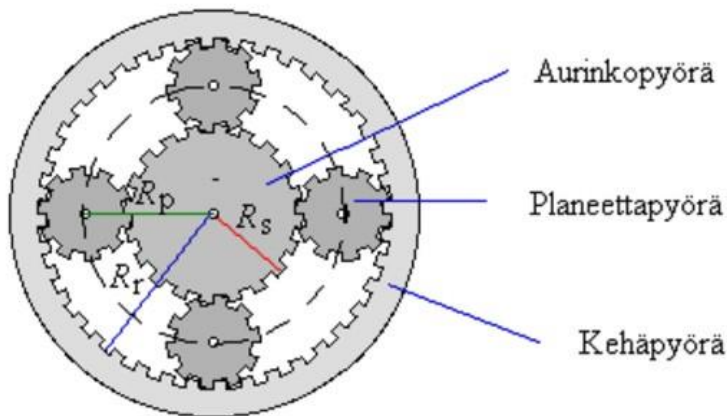
Generaattori on tuulivoimalan osa, jolla tuulen liike-energia muutetaan sähköksi. Tuulivoimaloissa käytetään yleisesti ottaen kolmea erilaista generaattorityyppiä. Näitä ovat kestopagneetti-, oikosulku- ja liukurengasgeneraattorit. Yksinkertaisin näistä on oikosulkugeneraattori. Se on epätahtigeneraattori, jonka idea perustuu siihen, että roottori pyörii nopeammin kuin generaattorissa oleva magneetikenttä. Oikosulkugeneraattori on yleisesti käytössä erityisesti vakio- ja kaksinopeuksissa voimaloissa. Tällainen rakenne on myös kestävä ja edullinen vaihtoehto. (Flinck 2008, 12.)

Silloin kun halutaan muuttuvanopeuksinen tuulivoimala, ovat liukurengas- ja kestopagneettigeneraattorit hyviä vaihtoehtoja. Tuulivoimalassa, jossa käytetään liukurengasgeneraattoria, pyörintänopeus voi muuttua siten, että generaattorin roottoriresistanssia muuttamalla voidaan säätää generaattorin jättämää. Tällä tyylillä säätövara on kuitenkin huomattavan pieni, vain 1 - 10 %. Vaikkakin säätövara on pieni, saadaan sen avulla pienennettyä tuulenoisuuden muutosten aiheuttamaa tehonvaihtelua ja vaikutusta. (Flinck 2008, 12.)

Toinen vaihtoehto on moninapainen kestmagneettigeneraattori. Tällainen generaattori mahdollistaa hitaasti pyörivän roottorin kytkemisen suoraan generaattoriin, jolloin voidaan jättää vaihteisto kokonaan asentamatta. Suoraan asennettuna, niin kutsutussa suoravetojärjestelmässä, generaattorin koko on järeämpi. Vaihteiston pois jättäminen helpottaa myös huoltokustannuksissa, sillä vaihteisto aiheuttaa suurimman osan kaikista huolloista. (Flinck 2008, 12.)

2.2.2 Vaihteisto

Voimalan vaihteiston tehtävänä on muuttaa roottorin pyörimisen generaattorille sopivaksi, sillä roottori pyörii liian hitaasti tuottaakseen sähköä. Ilman vaihteistoa pyörimisnopeus on noin 20-40 kierrosta minuutissa. Vaihteistona käytetään yleensä normaalia vaihteistoa tai planeettavaihteistoa. Planeettavaihteisto koostuu ulkokehästä, jonka sisällä on useampi kooltaan pienempi rattaita. Suurin ratas on keskellä ja pienemmät rattaat ovat ulkokehän ja keskusrattaan välissä. Kuvassa 6 näkyy kuinka rattaat ja kehä asettuvat. (Flinck, 2008. Sivu 13.)



Kuva 6. Planeettavaihte (Vem motors Finland, 2010)

Vaihteisella vaihtoehdolla on omat negatiiviset puolensa. Vaihteisto on iso ja raskas, joka tuo lisäpainoa myös turbiinille. Se myös heikentää voimalan hyötysuhdetta verrattuna suoravetojärjestelmään. Huonona puolena on myös sen vikaherkkyys, sillä siihen kohdistuu suuria voimia muuntaessa hidasta pyörimisnopeusta generaattorille sopivaksi. Tämän takia vaihteisto on suurin huoltojen aiheuttaja. Hyvänä puolena vaihteisella vaihtoehdolla on kuitenkin sen hinta ja vaadittavan generaattorin koko, sillä se on halvempi kuin suoravetojärjestelmä ja se ei vaadi niin suurta generaattoria. (Flinck 2008, 13.)

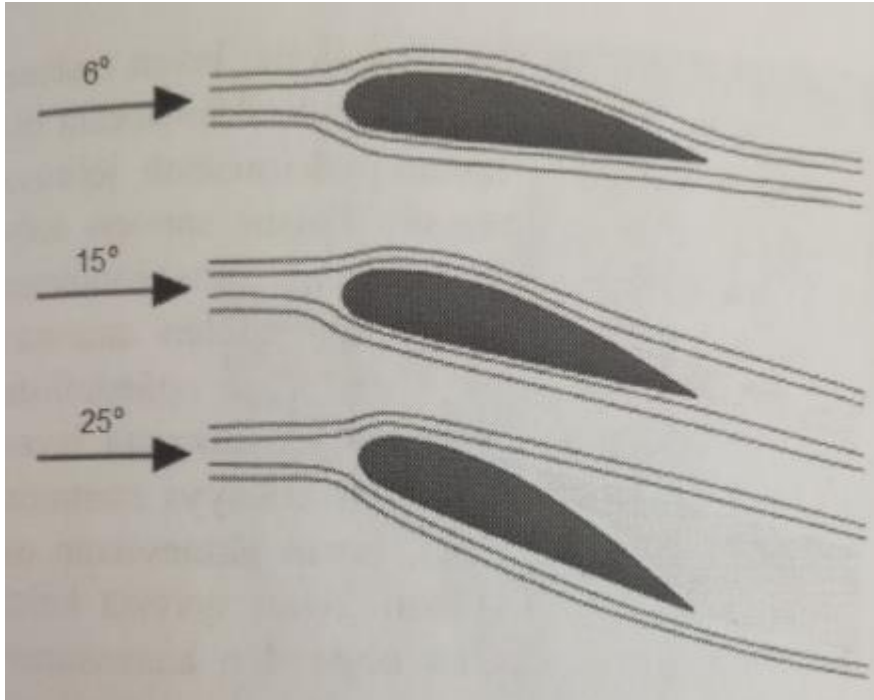
2.2.3 Roottori ja siivet

Roottori on tuulivoimalan osa, joka muuttaa tuulen liike-energian pyörimisenergiaksi, joka akselin ja generaattorin avulla muunnetaan lopulta sähköksi. Roottoriin on kiinnitetty tuulivoimalan lavat, joihin tuuli osuu ja saa ne pyörimään. Nykyaikaisissa lavoissa on hyödynnetty pitkään lentokoneissa käytettyä siipien aerodynamiikkaa ja näin parannettu tuulivoimaloiden hyötysuhdetta.

Siipien suunnittelussa on huomioitava ilmavirtauksista johtuvat nosto- ja vastusvoimat. Tuulivoimaloiden siipien profiloinnissa pyritään saamaan nostovoima mahdollisimman suureksi, sillä se on voima, joka saa roottorin pyörimään. Vastusvoima pyritään puolestaan minimoimaan mahdollisimman pieneksi, sillä se aiheuttaa tuulivoimaloiden siipiin voiman, joka taivuttaa niitä taaksepäin aiheuttaen mekaanista räsitusta. Siipien poikkileikkaus näyttää vesipisaralta, sillä tällä muotoilulla räsitusta aiheuttava vastusvoima on pienimmillään. (Korpela. 2016, 56-64.)

Koska nostovoima on tuuliturbiinille sähköntuotannollisesti erittäin tärkeä, pyritään se siipiprofiilin avulla saada mahdollisimman suureksi. Nostovoima on suurin juuri ennen sakkaamista. Sakkaamisella tarkoitetaan tilannetta, jossa tuulen kohtauskulma siipeen verrattuna kasvaa liian suureksi, ja ilmavirta irttoa siiven yläreunasta. Tämä on esimerkiksi matkustajakoneilla tuhoisa seuraus, sillä silloin nostovoima katoaa, jolloin kone putoaa. Kuvassa 7 nähdään esimerkkitapaus, missä nähdään kohtauskulman vaikutus ja myös, milloin se kasvaa liian isoksi ja mitä ilmavirran irtoaminen tarkoittaa. Tuulivoimaloissa pyritäänkin saavuttamaan mahdollisimman suuri kohtauskulma, jotta nostovoima on mahdollisimman suuri. Tällöin, kun kohtauskulma on jo maksimissa, tuulen noustessa liian korkeaksi, jolloin se aiheuttaisi mekaanista räsitusta siipiin, saadaan kohtauskulmaa vähän muuttamalla nostovoima romahtamaan,

jolloin tuulivoimala hidastuu. (Korpela. 2016, 56-64.)



Kuva 7. Alimassa tapauksessa kohtauskulma on liian suuri, jolloin siipi sakkaa, ja ilmapirta irtoaa siivestä. Keskellä on ihanteellinen tilanne, jolloin nostovoima on suurin. (Korpela 2016.)

Siipien muodossa pitää myös ottaa huomioon siiven pituudesta johtuva nopeuserot sen eri kohdissa. Tuulennopeus verrattuna siiven kärkeen on erilainen, sillä kärjen nopeus on nopeampi verrattuna siiven alkuun, jolloin jos siipi olisi kauttaaltaan saman muotoinen, syntyisi sakkausta siiven kärkeen. Tämä ei ole toivottu tilanne, vaan täytyy siiven profiilia muuttaa kärkeen päin mentäessä. Ongelma pyritään korjaamaan siiven myötäpäiväisellä kierteellä sen pituusakselin mukaisesti, jossa siiven tyven kierre on suurimmillaan ja pienenee kärkeen mentäessä. (Korpela 2016, 56-64.)

2.2.4 Tornit ja perustukset

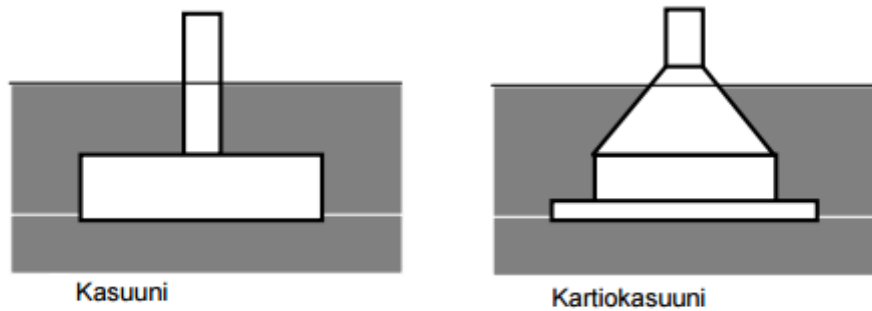
Tornin avulla pyritään saamaan tuuliturbiinin konehuone ja roottori mahdollisimman korkealle, jotta se keräisi tuulen paremmin. Korkeammalla tuulet ovat vakituisempia eikä tuulen tiellä ole mitään esteitä, kuten esimerkiksi puita. Korkeammalla myös tuulen nopeus on suurempi. Kun tuulen nopeus kasvaa, sitä vastaava teho kasvaa tuulennopeuden kolmanteen potenssiin. Mitä korkeampi torni on, sitä suuremmat voimat kohdistuvat siihen. Tämän takia pyritään

parhaimpaan ratkaisuun tornin korkeuden suhteen. Tornit ovat putkimaisia rakenteita, jotka ovat yleensä tehty teräksestä, vaikkakin on myös käytetty betonivalmisteisia torneja. (VTT 1998, 74-77.)

Perustuksia tehtäessä on huomioitava ympäröivä maaperä tarkasti. Korkea ja raskas tuulivoimala tarvitsee tukevan alustan, jotta se ei pääse liikkumaan ja sitä myöten vahingoittumaan. Ihanteellinen paikka perustukselle olisi peruskallio, sillä silloin ei tarvitse tehdä suurta kuoppaa perustuksille. Pehmeään maaperään tehtävään perustukseen joudutaan kaivamaan yleensä halkaisijaltaan noin 10 - 30 metriä oleva kuoppa, riippuen voimalan koosta. Tämän jälkeen siihen valetaan betonilaatta, joka voidaan tarvittaessa paaluttaa. Kalliossa perustukset kiinnitetään kallioon poratuilla terästangoilla. (VTT 1998, 74-77.)

Offshore-voimaloita merelle rakennettaessa pitää perustuksia ja tornia rakentaessa ottaa huomioon veden syvyys, minkälainen meren tai järven pohja on ja mahdollisen jään vaikutukset torniin. Lisäksi tulee ottaa huomioon kovat meriolosuhteet, kuten esimerkiksi jään, kovan aallokon ja meren suolaisuuden aiheuttama korroosio. Yksinkertaisin meriperustus on kasuuni, joka on suuri kiekonmuotoinen ja suurimassainen perustus, joka asennetaan meren pohjaan. Tornirakennelma pystytetään suoraan kiekon keskeltä meren pinnan yläpuolelle, jonne tuulivoimala rakennetaan. Kasuunin pitää pohjassa sen suuri massa, joka myös estää sen liikkumisen pohjaa pitkin. Kuva kasuunista näkyy Kuvassa 8 vasemmalla. (VTT 1998, 74 - 77.)

Kartiokasuuni on suunniteltu jäisiin olosuhteisiin ja sillä pyritäänkin estämään jään vaurioittamasta tornirakennelmaa. Kartion yläpuoli nousee jäänpintaa korkeammalle, jolloin jään pinta halkeaa helpommin, kun se alkaa kaartumaa kartion reunaa pitkin ylöspäin. Kartiokasuuni on kuvassa 5 oikealla. Kasuuniin on myös suunniteltu niin sanottu helmarakenne, jossa perustuksista lähtee helmet maan alle, jolloin varmistetaan kasuunin pysyminen paikoillaan. Näin varmistetaan varsinkin meriolosuhteissa kasuunin pysyminen paikoillaan. (VTT 1998, 74 - 77.)



Kuva 8. Kasuuni ja kartiokasuuni (VTT 1998, 75).

2.3 Toiminta

Tuuliturbiini saa energiansa sähköntuotantoon tuulen kineettisestä energiasta. Energia hyödynnetään siipien avulla, joita pystytään säätämään tuulen nopeuden perusteella. Siipien muoto aiheuttaa siipiin nostovoiman, jonka aiheuttaa tuulen virtaus siipien ohi. Tämä aiheuttaa siipien pyörimisen tuttuun tapaan. Siipiä pystytään myös kääntämään tuulen nopeuden mukaan. Näin pystytään kasvattamaan turbiinin toimintaa eri tuulen nopeuksissa ja myös turvaamaan liian kovissa tuulissa, ettei turbiini hajoa. Esimerkiksi matalalla tuulennopeudella lavat käännetään siten, että tuuli törmää suurempaan pinta-alaan ja suurilla tuulen nopeuksilla lavat käännetään siten, että pienempi ala osuu tuuleen. Kuvassa 9 on yksinkertaistettu kuva tuulivoimalan toiminnasta.



Kuva 9. Tuulivoimalan toimintaperiaate (Darvin.clara, 2016).

Koska turbiinin lavat eivät pyöri suurella nopeudella, pelkästään kytkemällä akseli suoraan generaattoriin ei riitä tuottamaan sähköä. Tämän takia väliin

kytketään vaihdelaatikko, joka muuntaa nopeuden sopivaksi generaattorille. Tavallisesti kyseessä on planeettavaihdelaatikko, jossa lapojen pieni pyörimisnopeus saadaan muutettua suurempaan nopeuteen. Vaihdelaatikon jälkeen tulee turbiinin jarrujärjestelmä. Jarruilla pyritään estämään lapojen liiallinen pyöriminen, mikä saattaisi tuhota tai vahingoittaa turbiinin osia. Liian kova vauhti voi tuhota vaihteiston tai generaattorin. Pahimmissa tapauksissa kova vauhti aiheuttaa sen, että lavat taipuvat ja osuvat turbiinin torniin, jolloin koko turbiini hajoaa. Generaattorissa kestopagneettien avulla tuotettu sähkö johdetaan kaapeleilla tornia pitkin ensin taajuusmuuntajaan, joka sijaitsee tavallisesti tornin alaosassa. Muuntajissa sähkö muutetaan haluttuun muotoon, jotta se voidaan jakaa eteenpäin.

Jotta tuulesta saadaan maksimaallinen hyöty irti, täytyy turbiinin olla suoraan tuulta kohden. On myös tärkeätä turbiinin kunnon kannalta, sillä sivuttaistuuli saattaa haitata sen toimintaa tai jopa vaurioittaa laitteita. Tämän takia tuuliturbiinissa on sensorit tuulen suunnan ja nopeuden määrittämiseen. Nämä sensorit sijaitsevat yleensä nasellin perässä. Naselliksi kutsutaan suojakuorta, joka suojaa turbiinin konestoa säältä. Mittausjärjestelmä lähettää viestin suunnasta ohjausjärjestelmään, joka kääntää turbiinin suoraan kohti tuulta. Turbiini saadaan kääntymään hammasratasten avulla, joka on tornin ja nasellin välissä.

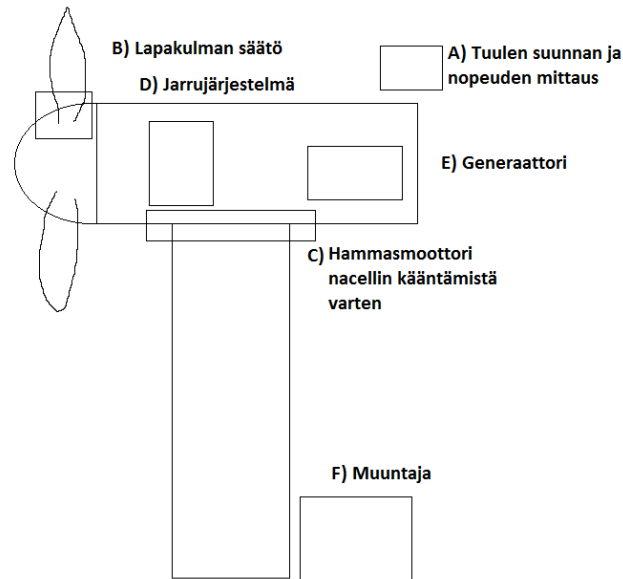
2.4 Ohjaus

Jotta tuulivoimala toimisi mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella, pitää roottorin olla täysin kohtisuoraan tuulta vasten sekä lapojen kulman olla oikeassa kulmassa tuulen nopeuteen nähden. Tämä toteutetaan voimalan ohjausjärjestelmän avulla. Ohjausjärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, joka pyrkii ohjaamaan voimalaa itsenäisesti mittauslaitteiden avulla. Sensoreiden mittaaman informaation perusteella, voimaloiden järjestelmät saavat tiedon, jonka avulla ne pyrkivät toimimaan. Tuulivoimaloita seurataan etäkäyttöisesti, mikä tarkoittaa, että voimalalla ei ole pysyvää henkilökuntaa paikalla. Ohjausjärjestelmä myös kerää tietoa voimalan toiminnasta ja kunnosta, jotta tarpeelliset kunnossapitotoimenpiteet pystytään tehdä ajoissa.

Konehuoneen päällä on tuulen suuntaa mittaava sensori. Sen mittaaman mitaustietojen avulla ohjataan hammasrattaistoa, joka pyörittää konehuonetta

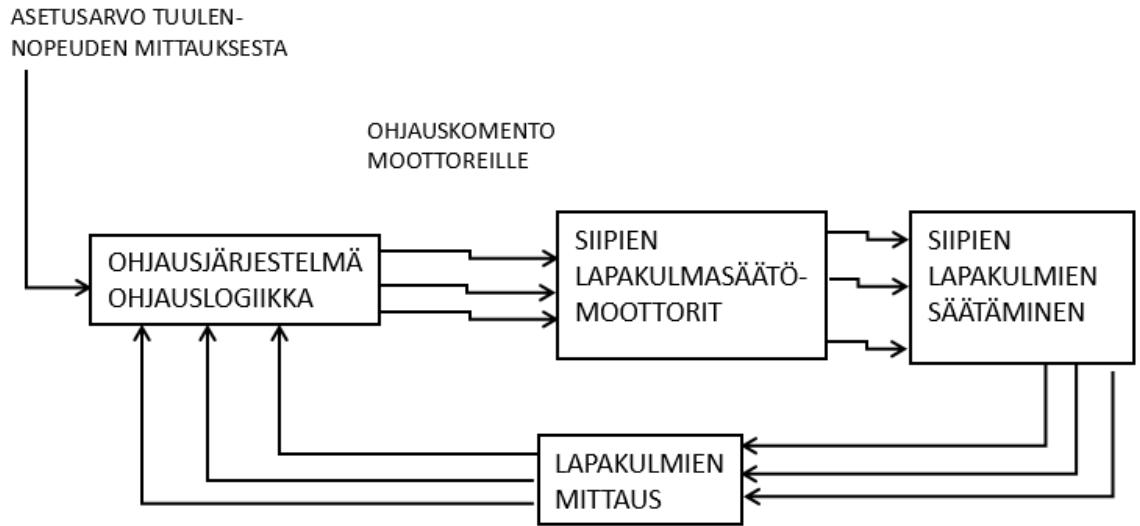
siten, että roottori osoittaa kohtisuoraan tuulta vasten. Lapojen kulmaa mitataan ja säädetään, jotta lapojen pinta-ala suhteessa tuuleen on oikea. Lapakulmaa säädetään siipikohtaisilla toimilaitteilla. Lisäksi myös ohjataan sitä, ettei roottori pyöri liian kovaa, mutta tarvittaessa jarrut alkavat jarruttamaa pyörimisnopeutta. Hammasrattaiston ja lapojen säätömoottoreissa on maksimiarvot, joka pyrkii estämään liikakääntämisen. Tämä on sitä varten, jotta ei tapahtuisi ylikääntymistä, mikä saattaisi katkaista kaapelit.

Kuvassa 10 on esitetty tuulivoimalan mittaus- ja säätöjärjestelmä. Tuulen suunnan ja nopeuden mittalaitteet sijaitsevat nasellin päällä (A). Saaduista tiedoista järjestelmä siirtää tiedon hammasmoottorille (C), joka kääntää roottorin kohtisuoraksi kohti tuulta. Tuulen nopeuden perusteella ohjausjärjestelmä muuntaa roottorin lapojen lapakulmaa lapojen hammasmoottoreilla (B) siten, että tuuleen osuva pinta-ala on oikea. Jos tuulen nopeus ylittää 3,5 metriä sekunnissa, järjestelmä saa käskyn kytkeä generaattorin (E) kiinni akseliin, jolloin se alkaa tuottaa sähköä. Tuotettu energia ohjataan tornia pitkin kaapeleilla yleensä tornin juuressa sijaitsevaan taajuusmuuntajaan (F), jossa sähkö muunnetaan vaihtovirtamuotoon ja tarvittavalle jännitetasolle, jotta se on yhteensopiva kytkettävän verkon kanssa. Tuulen nopeuden ollessa noin 15 – 24 metriä sekunnissa, järjestelmä alkaa passiivisesti rajoittamaan pyörimisnopeutta, joka tapahtuu lapakulmia säätämällä (B). Säättämällä pyritään siihen, että tuuleen osuva pinta-ala olisi mahdollisimman pieni, jolloin vauhti ei nouse liikaa. Tuulen nopeuden ylittäessä 25 metriä sekunnissa, järjestelmä pyrkii pysäyttämään tuulivoimalan kokonaan, jotta ei syntyisi laitevaurioita. Pysäytys tapahtuu jarrujärjestelmän avulla (D), joka sijaitsee joko vaihteiston edessä tai sen jälkeen.

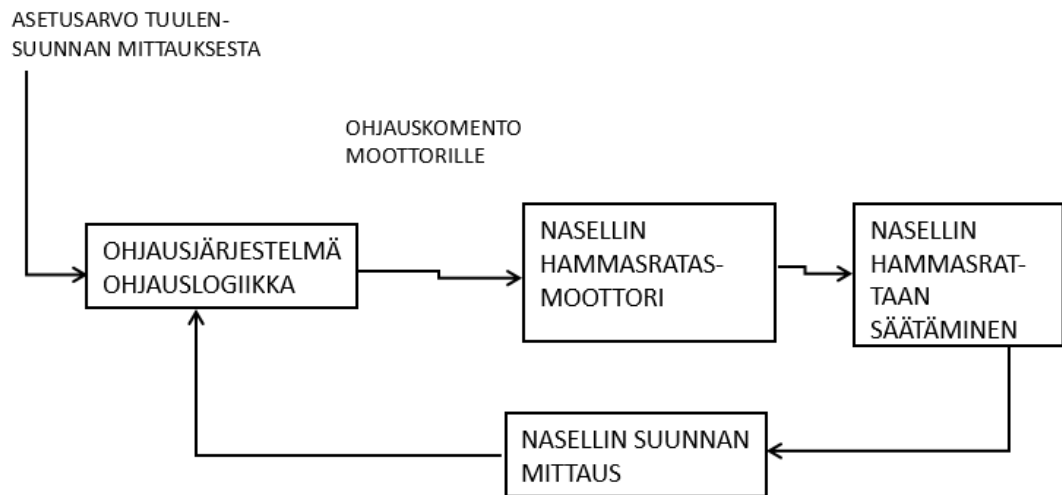


Kuva 10. Tuulivoimalan mittaus- ja säätöjärjestelmä.

Lisäksi alla kuvissa 11 ja 12 on esitetty yksinkertaiset lohko-kaaviot lapakulmien säätämisestä tuulen nopeuden ja nasellin suuntaamisesta tuulen suunnan mukaan. Sensorit mittaavat tuulen nopeuden ja suunnan ja antavat asetusarvon voimalan ohjausjärjestelmälle. Järjestelmä lähettää ohjauskomennon moottorille, joka säätää annettuun asetusarvoon. Tämän jälkeen järjestelmä mittaa ovatko naselli oikeassa kulmassa tuulen suuntaan nähden ja lapakulmat oikeat tuulennopeuteen nähden. Tämän jälkeen tiedot asennoista lähetetään takaisin ohjausjärjestelmään. Kuvassa 11 on lapakulman säädölle lohko-kaavio. Siinä kolme nuolta tarkoittaa omaa komentoa voimalan jokaiselle siiven omalle lapakulmamoottorille. Kuvassa 12 puolestaan nasellin suuntaukselle. Siinä lähtee vain yksi nuoli, koska hammasratasmootteireita on vain yksi, joka pyörittää koko nasellia.



Kuva 11. Lapakulman säätö



Kuva 12. Nasellin suuntaaminen

3 AURINKOVOIMAN HYÖDYNTÄMINEN

Aurinkopaneelit saavat energiansa suoraan auringon säteistä. Tämä tapahtuu siten, että auringon paistaessa säteiden osuessa paneelin pintaan, alkavat elektronit liikkua ja tuottamaan sähköä. Auringosta saatava sähkö on pitkälti kiinni maahan suuntautuneen säteilyn intensiteetistä, johon vaikuttaa säteilyn hajonta ja absorptio. Nämä tekijät heikentävät säteilyn tehoa, joka vaikuttaa suoraan siitä saatavaan energiaan ja näin ollen sähköntuotantoon.

Maahan saapuvasta säteilystä noin 30 % heijastuu takaisin avaruuteen ja pilviin ja ilmankehän molekyyliin absorboituu noin 20 % säteilystä. Tämä tarkoittaa sitä, että maahan saapuvasta säteilystä puolet saavuttaa vain maanpinnan. Vaikka säteilystä katoaa puolet ennen maanpintaa ja kaikkea maahan saapunuttakaan säteilyä ei pystytä hyödyntämään, riittää energiaa silti kosolti. Suomen eteläisissä osissa auringonsäteilyn määrä on samaa luokkaa kuin Saksan pohjoisissa osissa. Jokainen neliömetri vaakatasossa mitattuna vastaanottaa noin 1000 kilowattituntia auringonsäteilyä vuodessa. Keski-Eurooppaan verrattuna määrä on viidenneksen pienempi. Tämä vaihtelee vuoden-aikojen välillä, sillä talvella auringonsäteilyä ei juuri ole. Myös päivittäin on paljon vaihtelua, sillä sää vaikuttaa paljon saatavaan määrään. Esimerkiksi pilvisellä säällä säteilyä ei saada kuin maasta sekä pilvien heijastamaa säteilyä.

Auringonsäteily kerätään aurinkopaneeleilla, joka koostuu sarjaan kytketyistä kennoista. Kennoissa säteilyn sisältämä energia saa aikaiseksi valosähköisen ilmiön. Valosähköinen ilmiö tarkoittaa ilmiötä, jossa sähkömagneettinen säteily irrottaa metallin pinnasta elektroneja eli saa aikaan sähkövarauksen. Auringon säteily tuottaa paneelissa jatkuvaa tasavirtaa, joka pystytään muuntajien avulla muuntamaan vaihtovirraksi. (Motiva 2016, 3,9.)

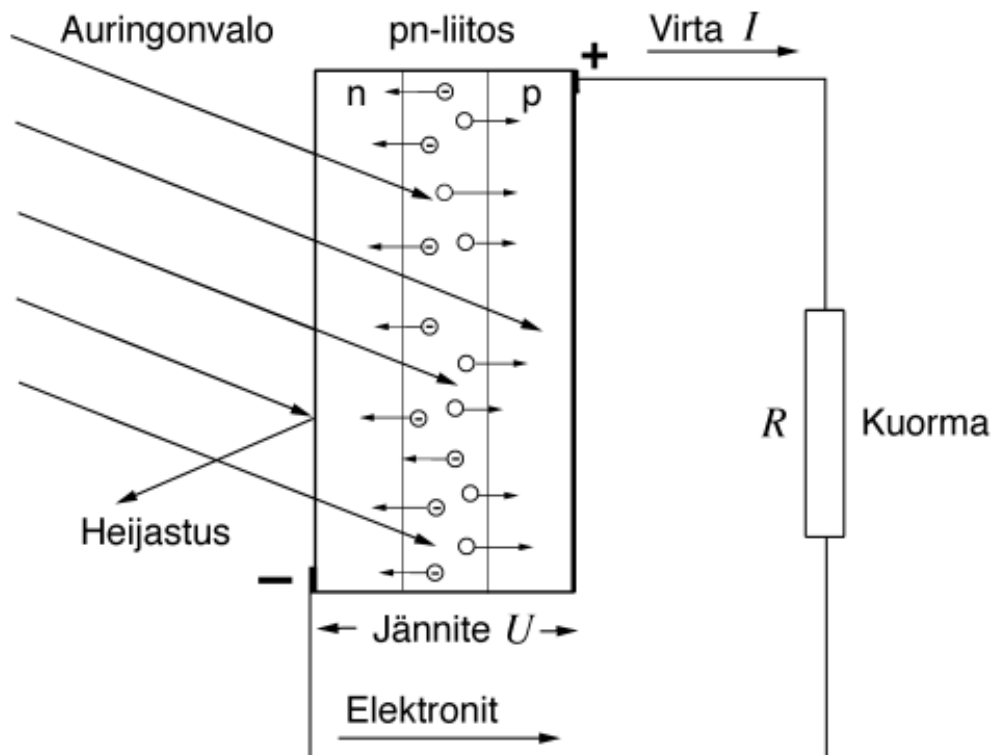
3.1 Aurinkopaneeli

Aurinkopaneeleilla tuotetaan sähköä suoraan auringon säteilystä. Paneelien tehokkuuteen vaikuttaa alueen säteilyintensiteetti eli alueen keskimääräinen sähkömagneettinen kokonaismäärä, mutta myös auringon säteilyn saapumiskulma ja lämpötila. Aurinkopaneeleilla tuotettu sähkö on aina tasavirtaa, jolloin tarvitaan muuntaja, jolla tasavirta muunnetaan vaihtovirtaan.

Aurinkopaneelit koostuvat aurinkokennoista, jotka valmistetaan puolijohdemateriaaleista. Nämä kennot koostuvat kahdesta kerroksesta, joilla on eroavat ominaisuudet. Auringon säteilyn fotonien energian osuessa kennon puolijohdemateriaaliin, irrottaa se siitä elektroneja. Elektronit kulkeutuvat kerrosten välisen rajapinnan läpi toiselle puolelle. Tämä on ns. valosähköinen ilmiö, joka aiheuttaa kennon sisäisen sähkökentän sen kerrosten yli. Kennot yksistään tuottavat hyvin pienen tehon, jonka takia ne yleensä kytketäänkin sarjaan. Monen kennon yhdistelmää kutsutaan aurinkopaneeliksi, jolloin niiden nimellistehoksi saadaankin tavallisesti 50 – 100 wattia. Paneelien hyötysuhteella tarkoitetaan niiden kykyä muuttamaan auringon, tai muun vastaavan, säteilyintensiteetistä sähköenergiaa. (Käpylehto 2016, 57-64.)

Aurinkopaneelien hyötysuhde ei ole niin tärkeä kuin monella muulla sähköntuotantotavalla. Aurinkopaneelissa oleellisempi tarkastelu tapa on tuotantohinta, eli millä hinnalla tuotettua sähköä voidaan myydä. Tuotannossa nykyisin saatetaankin käyttää mieluummin monikidepaneelia, vaikkakin sillä on alempi hyötysuhde. Tämä johtuu siitä, että sen kokonaistaloudellisuus on parempi, sillä se tuottaa varmemmin sähköä verrattuna esimerkiksi yksikiteiseen. (Käpylehto 2016, 57-64.)

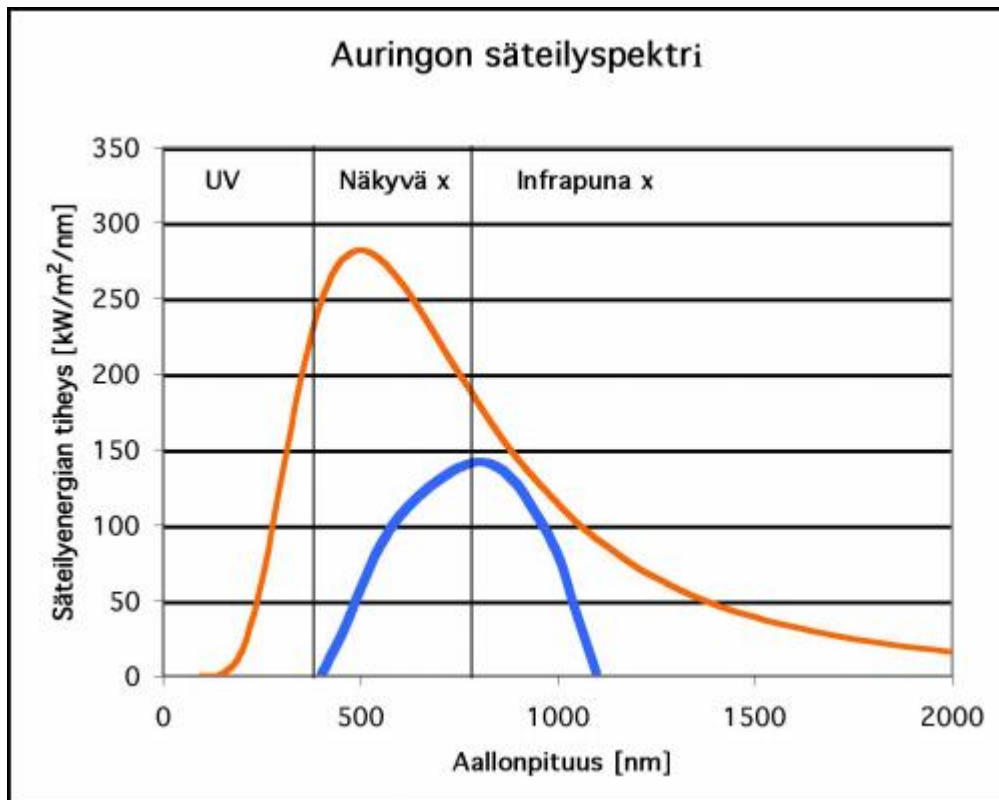
3.2 Toimintaperiaate



Kuva 13. Aurinkopaneeli (Suntekno 2010).

Aurinkopaneelin toimintaperiaate on esitelty kuvassa 13. Kuvassa p ja n merkinnät tarkoittavat puolijohdemateriaaleja, joka muodostaa fotodiodin. Valon osuessa kennoon, hiukkaset (fotonit) läpäisevät ohuen pintakerroksen ja pn-liitokseen muodostaen elektroni-aukkopareja. Liitoksessa muodostuvista pareista aukot kulkeutuvat positiiviselle p-puolelle ja elektronit puolestaan negatiiviselle n-puolelle. Aukoilla tarkoitetaan puolijohhteessa virtaa kuljettavilla virtuaalihiukkasia. Sähkökenttä, joka muodostuu rajapinnalle, estää elektronien kulkeutumasta väärään suuntaan, jolloin niiden on kulkeuduttava ulkoisen johdinten kautta p-typin puolijohhteeseen. Puolijohhteeseen, tässä tapauksessa piihin, lisätään erilaisia seosaineita, jotta saadaan sen ominaisuudet muuttumaan. N-typin puolijohde saadaan aikaiseksi lisäämällä arseenia, kun taas P-typin saadaan boorin avulla. Näin saadaan aikaiseksi varauksenkuljettajia. Päästyään p-puolijohde puolelle elektronit voivat yhtyä takaisin aukkoihin. Aurinkopaneelin paistaessa kennoon on liitoksen eri puolilla jatkuvasti vastakkaismerkkiset varauksenkuljettajat. (Suntekno 2010, 1-3.)

Jotta fotoni saisi aikaiseksi piissä elektroni- aukkoparin, ei aallonpituus saa ylittää 1150 nanometriä (nm), joka on 1,15 mikrometriä (μm). Tätä aallonpituutta vastaava valo on lyhytaaltoista infrapunasäteilyä, joka on hyvin lähellä myös näkyvän valon aallonpituuden rajaa. Jos säteilyn aallonpituus ylittää 1,15 millimetriä (mm), aurinkopaneeli ei pysty tuottamaan sähkövirtaa, jolloin se vain kuumenee. Aallonpituuden kasvaessa sen sisältämä energia pienee. Kuvassa 14 nähdään piikennon absorptioalue, jolla se pystyy tuottamaan sähköä. (Suntekno 2010, 2.)



Kuva 14. Sininen käytä kuvaa piikennon absorptioaluetta ja keltainen viiva auringon säteily spektriä (Suntekno 2010).

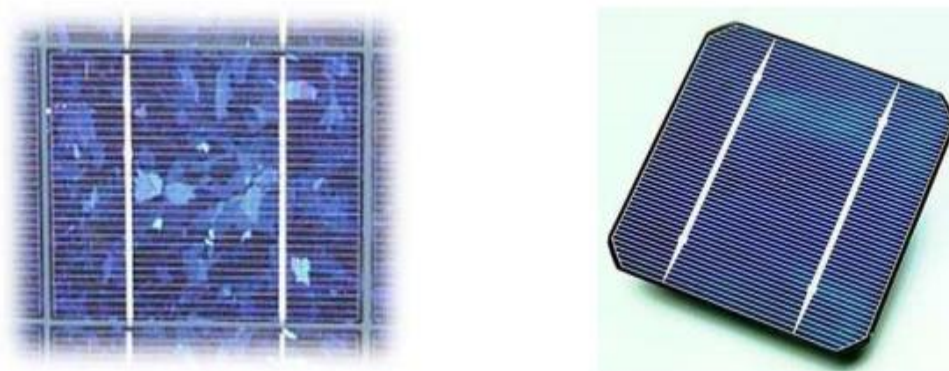
3.3 Aurinkokennojen materiaali

Yksi- ja monikiteisissä aurinkokennoissa materiaalina käytetään yleensä piitä. Kiteiset piikennot ovat kooltaan hyvin pieniä, sillä niiden paksuus on 0,2 - 0,3 millimetriä ja koostaan riippuen pinta-alaltaan 90 mm - 160 mm x 120 mm - 160 mm. Yksikiteiset kennot sahataan yhtenäisistä piiympyröistä, joiden halkaisija on 10 - 16 cm. Yksikiteisen piikennon rakenne on kuvassa 15 oikealla. Raaka-aineen hinnasta johtuen pyöreitä kiekkoja ei leikata neliskulmaisiksi, vaan jätetään muotoonsa. Tästä johtuen, kun kennot kytetään yhteen paneeliksi, jää jokaisen kennon kulmaan aukko. Hinta kilowattia kohden yksikidepaneelille on hieman korkeampi kuin monikiteisessä. Hyötysuhde on yksikiteisellä hieman parempi sen yhtenäisen rakenteen johdosta, jos paneeli on optimaalisessa kulmassa kohti aurinkoa. Hyötysuhde tosin pienenee huomattavasti, jos paneelille osuu vähänkin varjostusta. (Käpylehto 2016, 57-60.)

Monikiteisissä piikennoissa tätä ongelmaa ei ole, vaan ne voidaan tehdä neliskulmaisista aihioista, jolloin se on helpompi muotoilla haluttuun kokoon ja muotoon, sekä täyttämään aurinkopaneelin koko pinta-ala monikiteisellä kennolla. Tällä tavalla pystytään myös säästämään raaka-ainetta. Hyötysuhde

monikiteisessä kennossa on yksikiteistä matalampi, sillä sen rakenne ei ole niin yhtenäinen. Toisaalta se ei ole niin säteilyn suunnasta riippuvainen, eikä varjostukset ole niin suuri haitta kuin yksikiteiselle, joka korvaa menetettyä hyötysuhdetta. Monikiteisen piikennon rakenne on nähtävissä kuvassa 15 vasemmalla. Käyttöiltään yksi- ja monikiteiset eivät juuri eroa keskenään. (Käpylehto 2016, 57-60.)

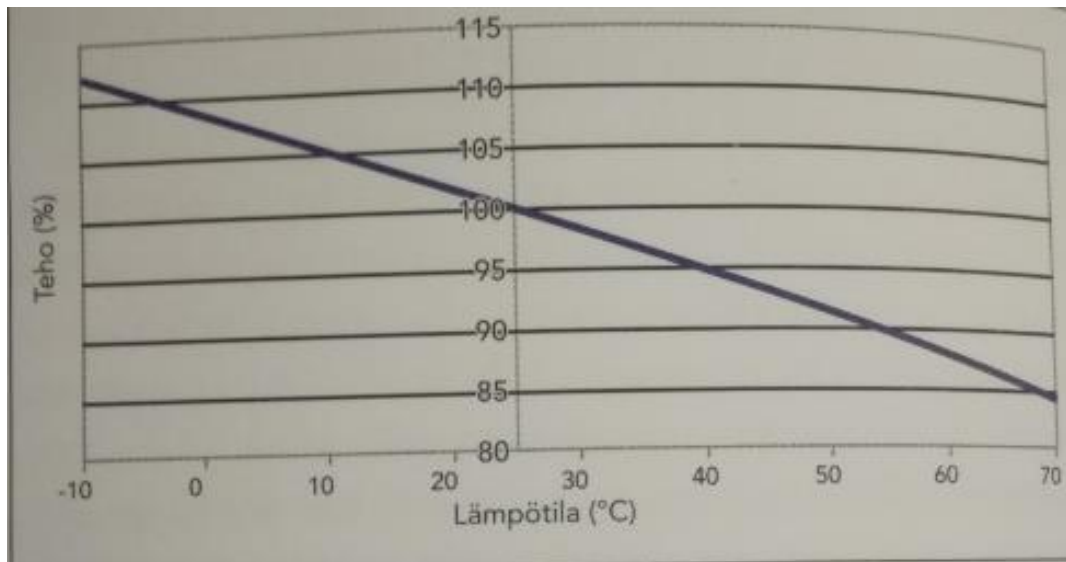
Kennoja voidaan tehdä myös amorfisesta piistä, joka muista poiketen ei ole kidemuotoinen. Tästä johtuen kennot ovat taipuisia ja valmistuskustannukset ovat alhaisemmat, jolloin niitä voidaan soveltaa esimerkiksi vaatteissa. Huonona puolena amorfisessa on niiden heikompi hyötysuhde ja lyhyempi käyttöikä. (Suntekno 2010, 2.)



Kuva 15. Monikiteinen ja yksikiteinen kenno (Suntekno 2010, 2).

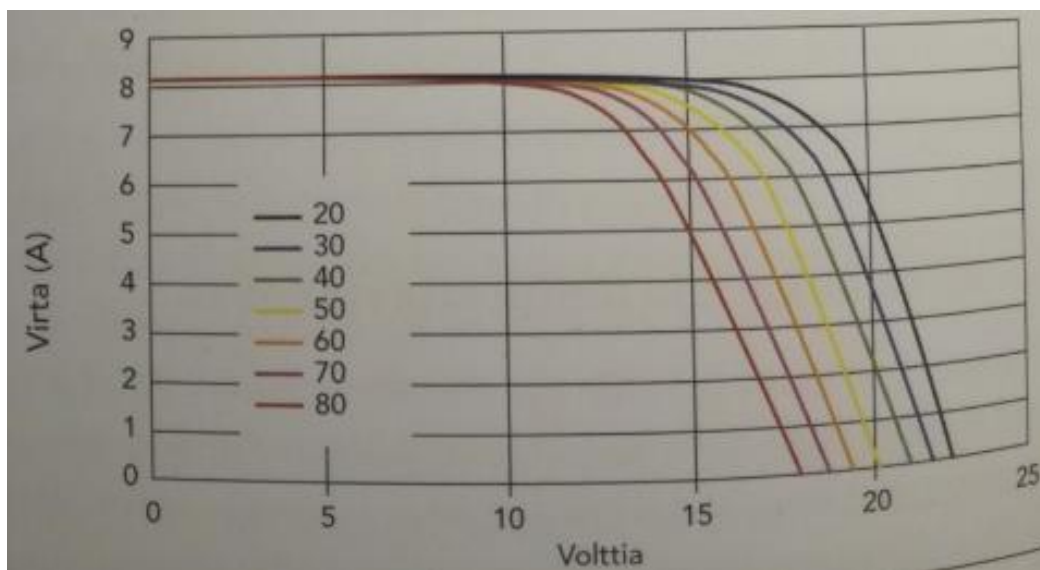
3.4 Omaiskäyrä aurinkopaneelille

Aurinkopaneelin tuotantoon vaikuttaa hyvin paljon paneelin lämpötila. Puoli-johtemateriaalista johtuen kylmä paneeli tuottaa enemmän sähköä kuin kuuma. Tästä syystä paneeleita kiinnittäessä kiinnitettävän tason ja paneelin väliin jätetään ilma rako, jotta kuumalla kesäsäällä ilma pääsee vapaasti liikkumaan ja näin ollen viilentämään paneelia. 50 asteen lämpötilan muutos vaikuttaa paneelin tuotantotehoon noin viidenneksellä, vaikka pieniä eroja on tyyppin ja paneelin iän mukaan on. Kuvassa 16 on esimerkkipaneelin tehon muutos lämpötilan mukaan.



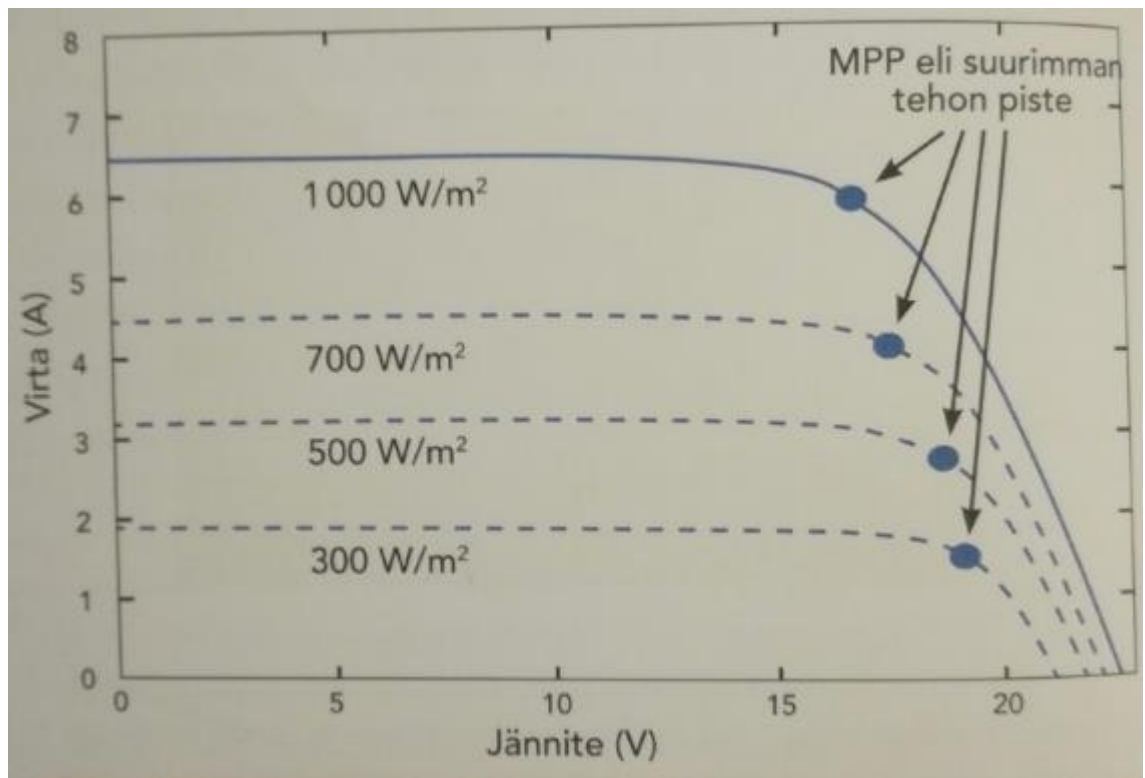
Kuva 16. Esimerkkipaneelin tehon muutos lämpötilan muuttuessa (Käpylehto 2016).

Ominaiskäyrällä tarkoitetaan, millä virran (A) ja millä jännitteen (V) suhteella aurinkopaneeli pystyy kuormittamaan saaden siitä irti suurimman mahdollisen tehon. Aurinkokennoille on normaalia, että ominaiskäyrä muuttuu lämpötilan muuttuessa. Tämä on myös tyypillistä muille puolijohteille. Lämpötila on tärkeää ottaa huomioon varsinkin silloin, kun kennot kytketään sarjaan, jolloin jännitteen muutoksen tarkastelu on tärkeää. Kuvassa 17 on nähtävissä esimerkkipaneelille lämpötilasta johtuvan ominaiskäyrän muutos. (Käpylehto 2016, 62.)



Kuva 17. Esimerkkipaneelin ominaiskäyrän muutos lämpötilan mukaan (Käpylehto 2016).

Koska aurinkopaneelit tuottavat sähköä auringon säteilystä ja sen intensiteetistä, joka ei pysy vakiona pitkiä aikoja. Säteilyn vaihtelusta johtuu myös virran ja jännitteen suhteen muutos, joka vaatii paneelin jatkuvaa optimointia. Kuvassa 18 on nähtävissä ominaiskäyrä eri auringon säteilyintensiteeteille. Kuviiin on myös osoitettu piste, josta paneeli saa suurimman tehon. (Käpylehto 2016, 62.)



Kuva 18. Ominaiskäyrä säteilyintensiteetin mukaan (Käpylehto 2016).

4 AURINKO- JA TUULIVOIMAN KÄYTTÖ

Uusiutuvan energian käyttöön on herätty ympäri maailmaa. Tämä johtuu lisääntyneestä tietoudesta koskien saasteita ja fossiilisten polttoaineiden hupe-
nemisen takia. Tällä hetkellä suurimmat odotukset sysätään tuuli- ja aurinko-
voimaan, joiden on ajateltu olevan ehtymättömiä ja saastevapaita tapoja tuot-
taa energiaa.

Sekä tuuli- että aurinkovoimalla on ongelmana niiden kausiluonteisuus ja nii-
den tuottoa on vaikea ennustaa. Tuulivoimalat eivät tuota sähköä kuin tietyillä
tuulennopeuksilla ja aurinkopaneelit eivät tuota sähköä kuin auringonpais-
teessa. Tämä aiheuttaa hankaluuksia kapasiteetin kasvattamiseen, sillä mo-
lempien voimaloiden rakentamiseen tarvitaan tarkat suunnitelmat, jotta voima-
lat tuottaisivat sähköä.

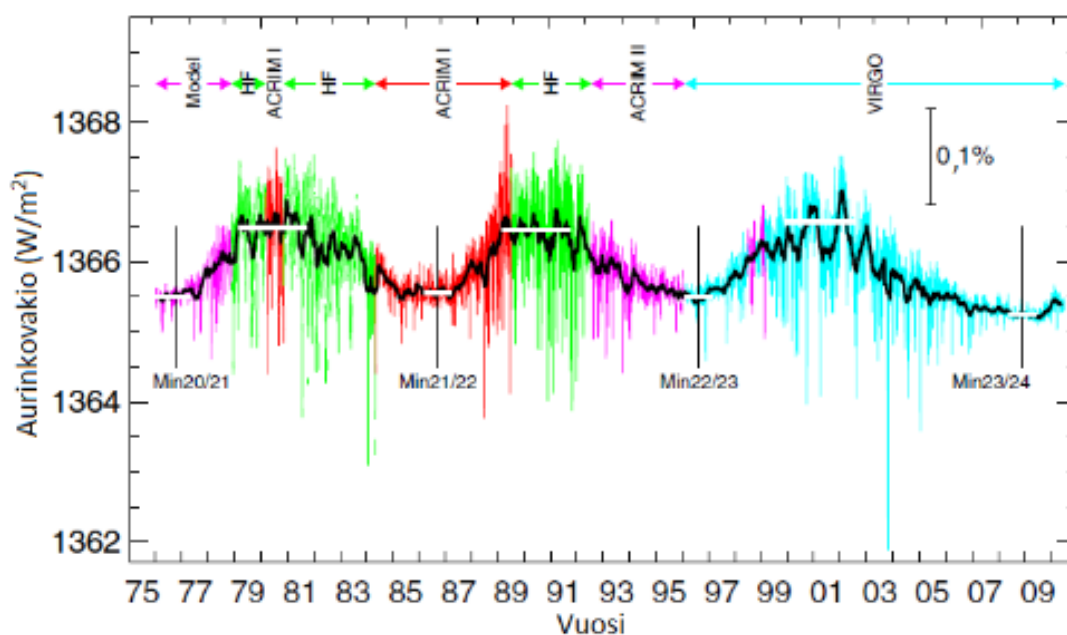
Yksi vaihtoehto kausiluonteiseen tuotantoon on tuuli- ja aurinkovoiman yhteis-
käyttö. Tämä malli on maailmallakin vielä harvinainen, mutta erittäin potentiaa-
linen vaihtoehto. Yhteiskäytöllä tarkoitetaan tuuli- sekä aurinkovoimaloiden
kytkemistä samaan sähköntuotantojärjestelmään. Tällä pyritään pienentä-
mään aikakausia, jolloin voimalat eivät tuota sähköä ollenkaan, sillä esimer-
kiksi päivällä aurinkopaneelit tuottavat sähköä, mutta yöllä niiden tuotanto lop-
puu. Tällöin kuitenkin tuulivoimalat voivat tuottaa sähköä, jolloin sähkön tuo-
tantoon ei tule niin pitkää katkoa. Tämä pätee myös eri vuodenaikoina, sillä
talvisin pohjoisessa aurinko ei paista niin kirkkaasti, mutta on puolestaan kes-
kimäärin enemmän tuulta. Vastaavasti kesällä aurinkopaneelit tuottavat enem-
män sähköä kuin tuulivoimalat.

4.1 Auringon säteily ja tuulen synty

Sekä tuulivoima että aurinkovoima perustuu vahvasti auringon tuottamaan
energiaan. Aurinkovoimalat tuottavat aurinkosähköä auringon valosta ja tuuli-
voimalat auringon säteilyn aiheuttamasta lämpötilavaihteluista. Pääosin au-
rinko säteilee ympärilleen tuottamansa energian nähtävänä valona sekä läm-
pösäteilynä eli infrapunasäteilynä. Auringon sähkömagneettinen säteily on tu-
los Auringon sisällä jatkuvasti tapahtuvasta lämpöydinfuusioreaktiosta. Reak-
tiossa vetyatomit yhdistyvät helium-atomeihin, jossa vapautuu erittäin paljon
energiaa. Tämä sitten lähettää säteilyä ympäristöönsä.

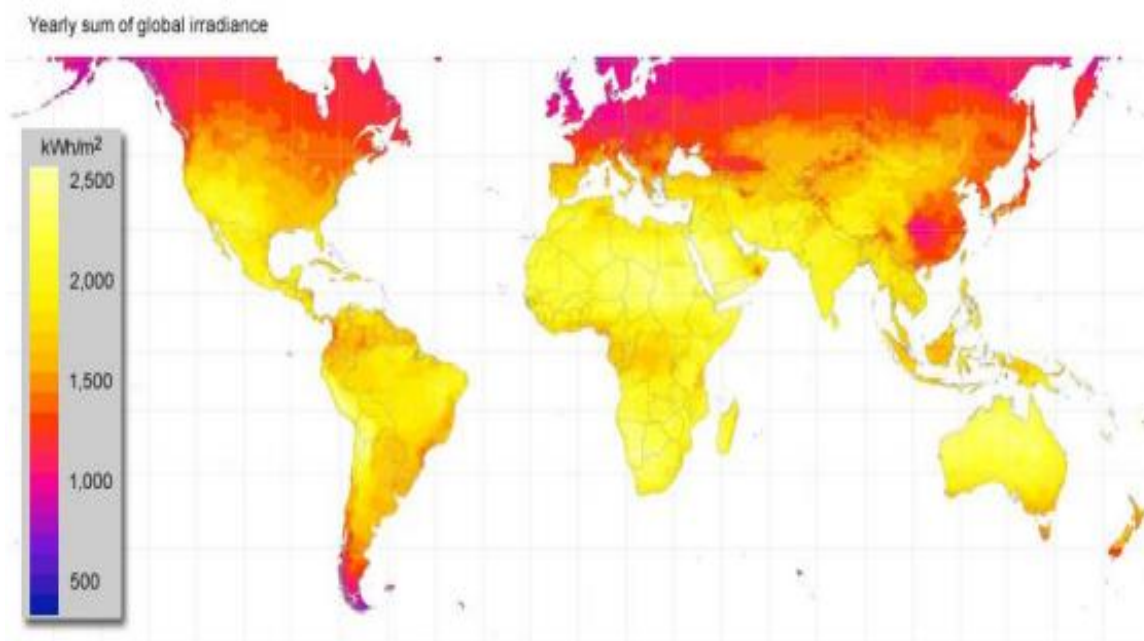
Auringon säteilyn teho, eli auringon säteilyn vuontiheys, maan etäisyydellä on keskimäärin noin 1366 wattia neliömetrille. Tätä arvoa kutsutaan aurinkovakioksi, sillä se vaihtelee hyvin vähän. Vaihtelua tapahtuu silloin, kun auringon pinnalla näkyy auringonpilkkuja. Auringonpilkkut ovat muuta pintaa viileämpiä kohtia, jonka takia ne näkyvät tummempina läiskinä auringon pinnalla. Tästä johtuen, jos auringon pinnalla on runsaasti pilkkuja, on aurinkovakio normaalia matalampi. Auringon vuontiheys vaihtelee mitattavan esineen ja auringon etäisyyden muuttuessa. Mitä lähemmäs mennään aurinkoa, sitä suurempaa on säteily. Vastaavasti etäisyyden kasvaessa säteily pienenee. (Ilmatieteenlaitos.)

Auringon säteilyä on pystytty mittaamaan vasta hyvin lyhyen ajan, sillä varmuudella säteilyn määrä saadaan vain satelliitista käsin mittaamalla. Maan ilmakehä absorboi osan säteilystä. Vasta 1970-luvun lopulla on pystytty mittaamaan tarkasti säteilytehoa. Kuvassa 19 on nähtävissä vuodesta 1975 lähtien aurinkovakio aina vuoteen 2009 asti. Kuten edellä todettiin, aurinkovakio ei ole täysin vakio, vaan se muuttuu, kuitenkin hyvin pienen määrän. Vaihtelu tapahtuu aurinkopilkkujen aikaan saaman häiriön vuoksi. Runsaat pilkkut laskevat aurinkovakiota. Toisaalta aurinkopilkkut ovat merkki auringon aktiivisuudesta, jolloin pilkkujen ulkopuolinen osa säteilee enemmän. Kuvassa 19 eriväriset kohdat ovat eri satelliittien mittausjaksoja. Vakion muutos on hyvin pieni, vain 1 watin muutos. Laskennallisesti tämä muutos vaikuttaa maan keskilämpötilaan vain 0,1 asteen verran. (Ilmatieteenlaitos.)



Kuva 19. Aurinkovakion muutosjakso (Ilmatieteenlaitos).

Koska maapallo on muodoltaan pyöreä, ei säteilyteho ole saman tehoista kaikkialla maapallolla. Tämä johtuu siitä, että kohtisuoraan aurinkoa vasten olevan säteilyn vuontiheys on suurempi kuin säteily, joka kohtaa kaltevan pinnan. Tästä johtuen päiväntasaajalla on suurempi vuontiheys. Siten myös säteilystä saatava teho harvenee, kun mennään napoja kohden. Kuvassa 20 on nähtävissä vuosittainen auringonsäteilyn tehomäärä eri puolilla maapalloa. Teho ilmoitetaan tässä kilowattitunteina neliömetreille (kWh/m²) vuosimäärinä. Päiväntasaajalla päästään 2 500 kilowattituntiin, kun taas pohjoisemmissa maanosissa noin 1 000 kilowattituntiin. (Ilmatieteenlaitos.)



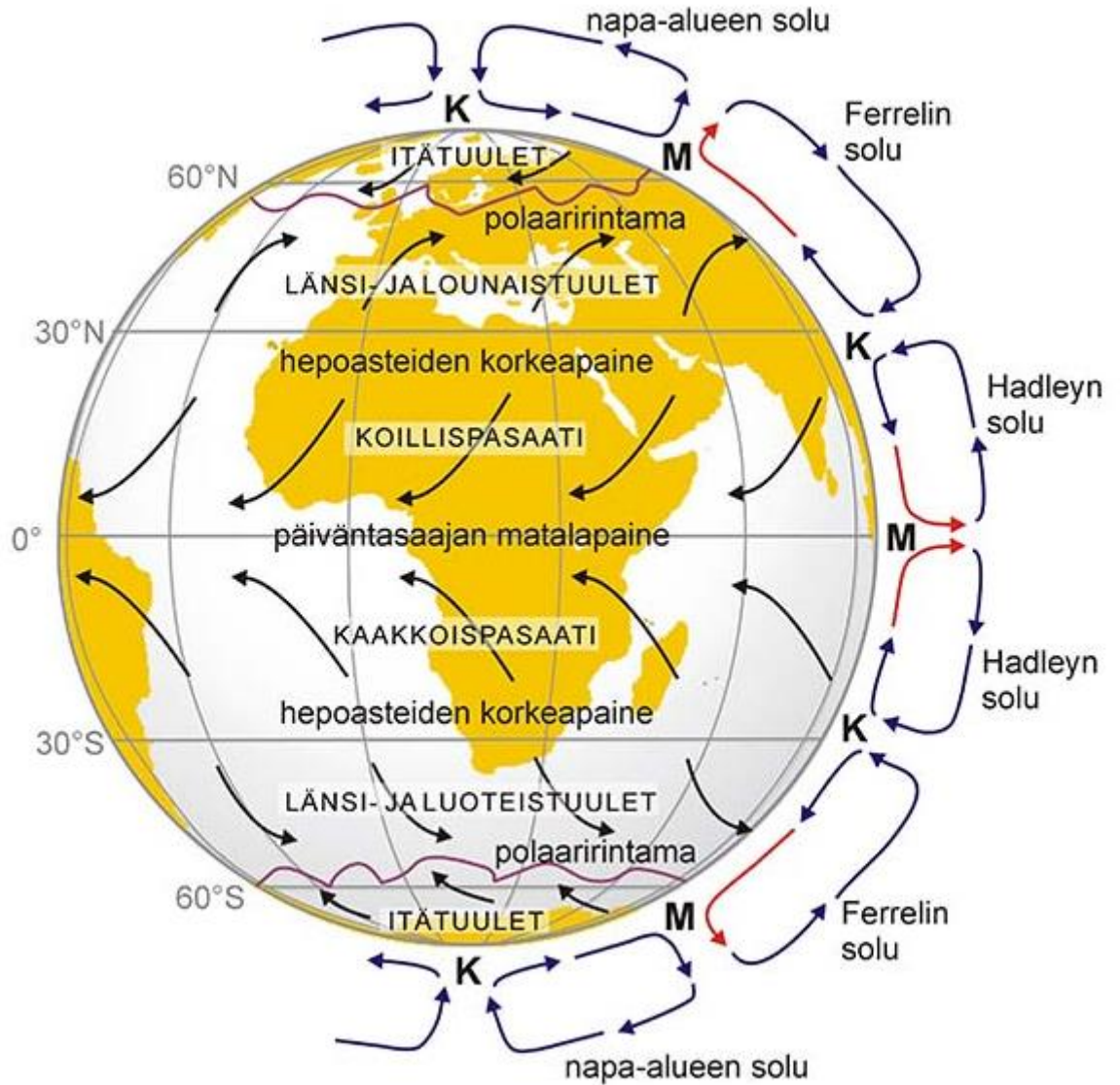
Kuva 20. Vuosittainen valosäteilykartta (GreenRhinoEnergy 2013).

Tuuleksi kutsutaan maapallon ilmakehässä maanpinnan suuntaisia ilmavirtauksia. Koska aurinko ei lämmitä maapalloa tasaisesti, syntyy maapallolle lämpötilaeroja, jotka puolestaan aiheuttavat paine-eroja maapallolle. Paineerot puolestaan synnyttää tuulen, jotta paine-erot tasaantuvat. Tarkemmin sanottuna, kylmä ilma on lämmintä painavampaa, jolloin kylmillä alueilla on suurempi ilmanpaine. Auringon lämmittäessä tiettyä aluetta lämmin ilma kohoaa ja laajenee, jolloin ilmanpaine laskee. Koska lämpimille alueille syntyy niin sanottu tyhjiö, alkaa sinne siirtyä korkeapaineisimmilta alueilta ilmaa. Mitä suurempi paine-ero kahden alueen välillä on, sitä voimakkaampia tuulet ovat. Tuulen suunta on aina korkeampi paineisesta matalapaineiseen alueeseen. (Otavan opisto 2015.)

Edellisessä kappaleessa kerrottiin, kuinka auringon säteilyteho on suurin päiväntasaajalla, jolloin myös päiväntasaajan alue lämpiää enemmän kuin pohjoisemmat alueet. Aurinko lämmittää mantereita huomattavasti nopeammin, kuin meriä, jonka takia merituulet ovat huomattavasti yleisempiä ja myös voimakkaampia. Myös vuorokaudenvaihtelut vaikuttavat paine-eroihin, sillä maapallon pyöriessä alueet, joissa on päivä, lämpenee ja missä on yöt, nii ilma viilenee, ja paine kasvaa. (Otavan opisto 2015.)

Kuvassa 21 on nähtävissä maapallon planetaaristen tuulten tavalliset suunnat sekä myös ilmanpainealueet. Kuvassa aurinko paistaa kohtisuorasti päiväntasaajalle, jolloin maa lämpenee. Tämä saa lämpimän ilman kohomaan synnyttäen päiväntasaajalle matalapainealueen. Lämmin ilma kohoaa aina troposfääriin yläosiin asti, jolloin se alkaa virrata kohti napoja, jossa se alkaa viilentyä. Viilentyessään ilma alkaa painua alaspäin 30 asteen kohdilla, hepoasteiden, kohdilla. Laskeutuessaan ilma alkaa jälleen lämmitä, ja hepoasteiden korkeapainealueelta ilma alkaa virrata kohti päiväntasaajan matalapainealuetta. Näitä tuulia kutsutaan pasaatituuliksi. (Otavan opisto 2015.)

Kuvassa 21 on myös nähtävissä tuuline kiertoa, joka syntyy niin sanotusta Coriolis-ilmiöstä. Se kiertää tuulia pohjoisessa oikealle ja etelässä vasemmalle, ja se syntyy maapallon pyörimisen ja tuulen kitkasta maata vasten. Napa-alueilla on pysyvä korkeapaine, sillä aurinko ei lämmitä ilmaa tarpeeksi, jotta se kohoaisi. Kuten kuvassa näkyy, ilmavirtaukset ovat aina laskevia navoillemmentäessä, ja pohjoisen korkeapainealueilta ilma pyrkii virtaamaan kohti etelän matalapaine alueita kohti. Nämä virtaukset kääntyvät itätuuliksi Coriolis-ilmiön johdosta. Kuvassa nähtävä polaaririntama on alue, jossa pohjoisen kylmät tuulet kohtaavat hepoasteilta tulevan lämpimän ilman rintaman. Polaaririntamalla on tästä johtuen sykloneita, joilla tarkoitetaan liikkuvia matalapainealueita. (Otavan opisto 2015.)



Kuva 21. Maapallon planetaariset tuulet ja ilmapainealueet (Otavan opisto 2015).

4.1.1 Tuulen mittaaminen

Tuulivoiman hyödyntämisessä oleellinen osa on tuulen mittaaminen ja tuulisen paikan löytäminen. Tuulivoimala tarvitsee tuottaakseen jatkuvia ja tarpeeksi kovia, mutta ei liikaa myrskyisiä, tuulia. Ilmavirtauksesta saatava teho riippuu kuutiollisesti sen vauhdista ja vauhti onkin ratkaiseva asia voimalan energiantuotannosta. Vauhdin lisäksi myös tuulensuunta ja esimerkiksi turbulenttisuus ovat tärkeitä asioita.

Luotettavin tapa on käyttää mittausmastoa, sillä masto asennetaan paikkaan, jonne voimala asennettaisiin ja siitä tehdään yhtä korkea kuin voimala olisi.

Näin voidaan mitata jopa 100 metrin korkeudessa olevia tuulia. Vaikka mitausmasto on erittäin luotettava tapa mitata, se on hyvin kallis menetelmä. Tämä johtuu maston korkeudesta ja siihen tulevista laitteista. Tämän takia pyritään hyödyntämään valmiina olevia mastoja, kuten esimerkiksi tietoliikennemastoja tuulen mittaamiseen. (Hynynen 2015.)

Vaihtoehtoisia menetelmiä on myös LIDAR- ja SODAR-mittaustavat, joissa tuulta mitataan maanpinnalta käsin. DAR-pääte tulee sanoista detection and ranging ja LI sanasta light ja SO sonar sanasta. LIDAR-menetelmällä hyödynnetään valoa ja SODAR- menetelmässä hyödynnetään ääniaaltoja. Molemmissa hyödynnetään Doppler-ilmiötä, jossa maan pinnalta lähetetyn aallon ja valon taajuus vaihtelee ilmassan liikumisen muuttaessa takaisin säteilevän taajuutta. Tuulipuiston suunnittelussa käytetään yleensä useaa mittaustapaa yhtä aikaa, paikallista tuulta mittaa mitausmasto ja ympäristöä mitataan SODAR- tai LIDAR-mittausta hyödyntäen. (Hynynen 2015.)

LIDAR-mittauksessa hyödynnetään valoa tuulen nopeuden mittaamisessa. Laserpulssi "ammutaan" ilmaan ja sen jälkeen mitataan aikaa, joka kuluu pulssein takaisin tulemiseksi. Ilmassassa olevat hiukkaset, kuten vesipisarot, heijastavat osan laserista takaisin. Kun nämä hiukkaset liikkuvat, lähettävät ne eri taajuisia säteilyä takaisin. LIDAR-menetelmän hyvänä puolena on se, että sen mittaama korkeutta voidaan muuttaa. Näin ollen voidaan helposti mitata tuulen keskiarvo eri korkeuksissa. Mittaus myös huomioi horisontaalisen ja vertikaalisen tuulen. Toistaiseksi LIDAR-mittausta ei lasketa luotettavaksi tavaksi mitata, vaan vaaditaan myös mastomittausta. Kuvassa 22 on nähtävissä LIDAR-mittauslaite. Laite itsessään on huomattavasti pienempi, mutta kuvassa näkee periaatteen, miten laite lähettää laserpulssia ilmaan. (Hynynen 2015.)



Kuva 22. LIDAR-mittaustapa vasemmalla, oikealla LIDAR oikea koko (Hynynen 2012).

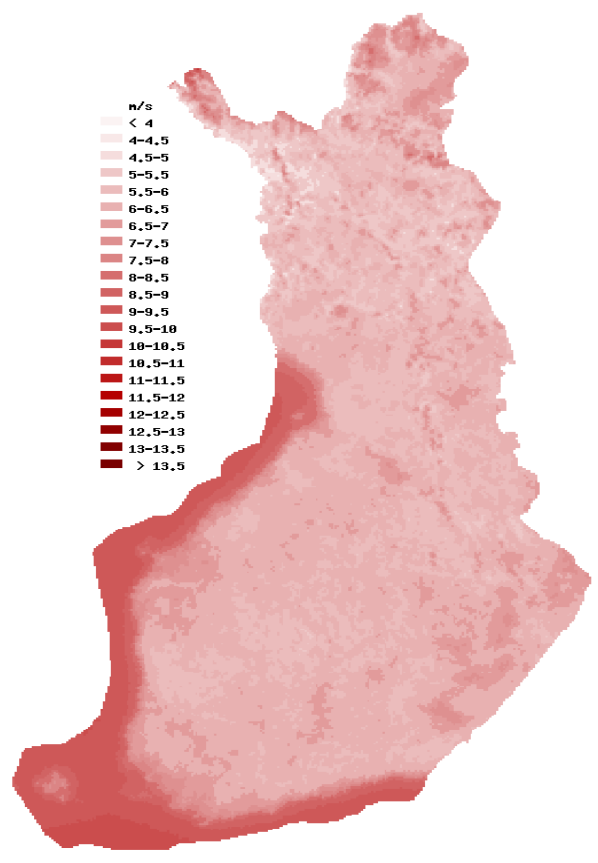
SODAR-menetelmä puolestaan toimii muutoin samalla tavalla, paitsi laserpulssein sijaan se lähettää äänipulssein. Se mittaa samalla tavalla aikaa ja taajuutta, mikä heijastuu takaisin ilmasta. Sen tarkkuus on heikompi kuin LIDAR-menetelmän ja ulkoiset äänet, kuten esimerkiksi lentokoneet tai moottoritiet aiheuttavat poikkeamia sen mittaukseen. (Hynynen 2015.)

4.1.2 Tuuliatlas

Jotta tuulta voitaisiin hyödyntää paremmin, tarvitsee tutkia enemmän tuulisia sijainteja, mutta mittaustason ja muiden laitteiden käyttäminen on kallista, ja se vaatii pitkän ajan seurannan. Suomessa käytetään Suomen Tuuliatlas -ohjelma, joka on simulaatiomalli. Se perustuu tanskalaiseen WAsP-tuuliatlassovellukseen sekä Ilmatieteen laitoksen numeeriseen AROME-sääennustemalliin. Suomen tuuliatlas -ohjelman avulla voidaan arvioida alueiden mahdollisuuksia tuottaa tuulella sähköä. Suomen tuuliatlas -sivusto pitää sisällään staattisia karttoja, joista näkee tuuliolosuhteet ja myös eri tehoisten tuulivoimaloiden tuotantotietoja. Tämän lisäksi siellä pystyy tarkastella dynaamisella kartalla tietyn alueen tuulisuustietoja. (Suomen Tuuliatlas.)

Tuuliatlaksen mallinnukset on tehty simuloimalla 72:n jo kuluneen kuukauden todelliset säätilanteet. Nämä simuloitut kuukaudet on valittu tarkastelemalla

Suomen säätilastoja 50 vuoden ajan. Vuodesta 1989 vuoteen 2007 sääolosuhteet ovat pysyneet suhteellisen tasaisina ja kuukaudet on valittu tästä ajanjaksosta. Tuuliatlas vastaakin hyvin näiden vuosien tuuliosuhteiden keskiarvoa. Säämalliin simuloituista 48 kuukaudesta on laskettu tuulet 2,5 x 2,5 neliökilometrisille hilaruuduille. Näistä hilaruuduista on myös mallinnettu 250 x 250 neliökilometrisiä hilaruutuja. Lisäksi valittiin yksittäiset 24 kuukautta, jotka eroavat huomattavasti normaalista sääolosta. Ajanjakso pitää sisällään 12 kuukautta kovatuulisia vuosia ja 12 kuukautta heikkotuulisia vuosia. Nämä kuukaudet eivät lukeudu tuuliatlakseen, vaan ne ovat erillisinä arvoina 2,5 x 2,5 kokoisessa dynaamisessa kartassa. Tuulisuustietoja saa 50 metristä aina 400 metriin asti. Kuvassa 23 on nähtävissä Suomen tuulisuus olosuhteita 100 metrin korkeudelta. (Suomen Tuuliatlas.)



Kuva 23. Suomen Tuuliatlas -mallin tuulen keskinopeudet (m/s) 100 metrin korkeudessa tarkkuudella 2,5 x 2,5 neliökilometriä (Suomen tuuliatlas).

4.2 Tuuli- ja aurinkovoiman käyttöä maailmalla

Yhteiskäyttöä on myös tarkasteltu muuallakin. Yhdysvaltojen Teksasissa on tehty teoreettinen tutkimus tuuli- ja aurinkovoiman yhteiskäytöstä vuonna 2012 Texas Tech Universityn toimesta. Heillä oli käytössä 200 metrin korkuinen masto, jolla pystyttiin mittaamaan ilman tiheyttä ja tuulen nopeutta haluttuna aikana. Heillä oli käytössään alueen tuuli- sekä aurinkotiedot, jonka avulla laskettiin tuulen ja auringolla saatava teoreettinen tuotanto.

Tutkimusta edelsi vuonna 2009 tehty kuuden kuukauden vastaava teoreettinen kokeilu. Tuolloin tarkasteltiin kuinka välit, jolloin sähköä ei saatu tuotettua, muuttuu, kun molemmat voimalaitokset kytkettäisiin samaan sähkönkeruujärjestelmään. Siinä oli eritelty erimittaiset pysäytykset ja vertailtu näin tuloksia keskenään ennen ja jälkeen yhteen kytkennän. Tuloksista selvisi, kuinka pysäytysten määrä väheni kaikissa pituuksissa. Huomattava ero oli pitkien aikojen määrässä. Ennen yhteiskytkentää oli tarkasteltu kummankin, aurinko- ja tuulivoimaloiden, pysäytysten määriä noin kuuden kuukauden aikana. Tuulivoimassa esiintyi 640 viidestä minuutista tuntiin kestävästä tapausta, jossa tuuli liian vähän tai ei ollenkaan sähköntuotantoa varten, 40 tunnista kahteen tuntia, 17 kahdesta kolmeen tuntia, 11 kolmesta neljään tuntia, 19 enemmän kuin neljä tuntia. Aurinkoenergiassa puolestaan tuotannon kato rajoittui lähinnä auringon laskusta auringon nousuun, joka kesti noin yhdeksästä 14 tuntiin. (Pattison 2010.)

Tämän jälkeen, kun voimalat olisivat kytketty yhteen, yhteistuotannon vaikutus oli suhteellisen selvä, sillä välit, jolloin ei tuotettu yhtään sähköä auringon tai tuulen avulla putosi yli 50 prosenttia tai jopa enemmän. Viidestä minuutista yhteen tuntiin oli vain 300 tapausta, tunnista kahteen tuntiin 18, kahdesta kolmeen 10 ja enemmän kuin kolme tuntia kestäviä taukoja oli vain 13. Sähkön- tuotannon lisäyksen lisäksi yhteiskäytöllä on myös muita positiivisia vaikutuksia. Aurinkopaneelit ja tuuliturbiini voidaan kytkeä samaan muuntajaan ja sähkönkeruujärjestelmään, jos vain nämä ovat lähellä toisiaan. Tämä auttaa säästämään kuluissa, koska tällöin ei tarvitse molemmille omia laitteistoja. Tutkimuksessa käytettiin yhden megawatin tuulivoimalaa ja yhden megawatin edestä aurinkopaneeleita. Tutkimuksen aikana tapahtui satunnaisia yli yhden megawatin yhteistuotantoa, jolloin toisen tuotantoa piti rajoittaa, jotta laitteistot eivät kärsisi. Ylituotetun sähkön talteen saamiseksi pitäisi hankkia suurempi

muuntaja, mutta tällöin tulisi suurempia häviöitä, kun tuotanto on pienempi kuin 50 prosenttia muuntajan kapasiteetista. Tästä olisi tutkimuksen mukaan tullut suurempia häviöitä kuin tuotannon rajoittamisesta. (Pattison 2010.)

Vuoden 2012 tutkimuksessa oli tarkoitus tutkia sähköntuotannollista ja taloudellista vaikutusta, kun yhdistetään aurinko- ja tuulituotanto. Tutkimuksessa tarkisteltiin myös mahdollisuutta yksi- ja kaksinivel aurinkopaneeleille, joilla pystyttiin kääntämään paneeleita kohti aurinkoa. Vertailukohtina tutkimukselle oli myös tarkasteltu pelkästään aurinkovoimalan ja tuulivoimalan tuotantoa. Myös vuoden 2009 tulokset olivat uudessa tutkimuksessa mukana, ja myös käytetty laitteisto oli sama. (Pattison 2011.)

5 MÄKELÄNKANKAAN TUULI- JA AURINKOPUISTO

Mäkelänkankaan tuuli- ja aurinkopuiston omistaa Suomen Voima Oy ja puistot sijaitsevat Haminassa. Puisto pitää sisällään neljä tuulivoimalaa, jotka on toimitannut Hyundai Heavy Industries. Tuulivoimaloiden yhteisteho on 8 MW, ja jokainen on yksistään 2 MW:n tehoinen. Aurinkopaneeleita on puolestaan 2774 kappaletta, joiden yhteisteho on noin 720 kW ja vuodessa energiantuotanto on noin 680 000 kWh. Kokonaisuudessaan paneelit peittävät 4537-neliömetrisen alueen tuulivoimaloiden läheisyydestä. Paneelit on valmistanut Hyundai Heavy Industries. Tuulivoimaloiden perustukset valmisti Empower, joka vastasi myös voimaloiden asennuksesta sekä käyttöönotosta. Aurinkopaneelit kokosi puolestaan Etelä-Savon Energia Oy. Tuulivoimalat otettiin käyttöön jo vuonna 2012, mutta aurinkopaneelit saatiin käyttöön vasta 2016. (Suomen Voima Oy 2016.)

5.1 Aurinkopuisto

Haminassa sijaitseva Mäkelänkankaan aurinkopuisto pitää sisällään 2774 aurinkopaneelia, jotka peittävät 4537 neliometriä sisältävän alueen. Paneelit ovat kiinnitetty toisiinsa FS-G-kiinnitystelineeseen ja telineet ovat kiinnitetty maahan kierrätettyihin ratapölkkyihin. Aurinkovoimalan teho on 720 kilowattia ja sähköä se pystyy tuottamaan vuodessa yli 680 000 kWh. Puisto otettiin käyttöön vuoden 2016 keväällä ja avattiin syksyllä saman vuonna. Puisto on tällä hetkellä Suomen suurin maa-asenteinen aurinkovoimala. Sen tuotanto vastaa yli 300 kerrostaloasunnon vuosittaista sähkönkulutusta. (Suomen Voima Oy 2016.)

5.2 Tuulipuisto

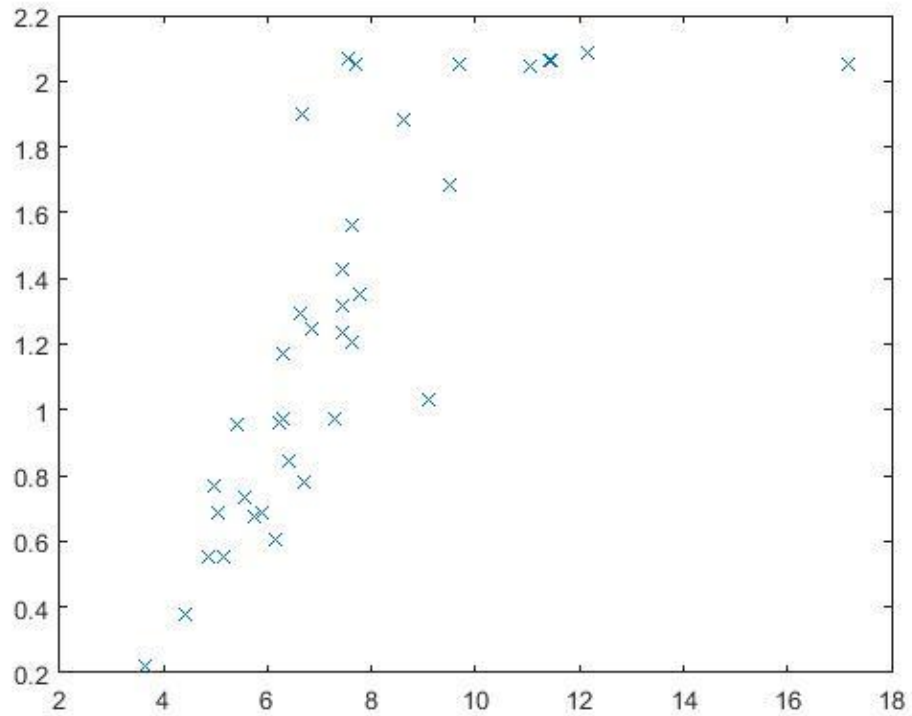
Mäkelänkankaan tuulipuisto sijaitsee Haminassa aurinkopuiston yhteydessä, ja puistoon kuuluu neljä tuulivoimalaa. Jokainen tuulivoimala on 2 MW tehoinen ja yhteiskapasiteetti voimalailla on 8 MW. Voimalat ovat mallia HQ2000-WT93. Vuodessa voimaloiden energiantuotanto on noin 20 gigawattituntia. Hyundai valmistamat tuulivoimalat on suunniteltu pieniin tuulennopeuksiin ja niiden sähköntuotanto alkaakin, kun tuulennopeus ylittää 3,5 metriä sekunnissa. Korkeutta voimaloilla on 100 metriä ja siipien kärkiväli on 93 metriä. Yk-

sittäisen voimalan siipien pyyhkäisypinta-ala on 6973 m². Voimalat ovat samalla alueella ja ihanteellisella paikalla meren äärellä, kuten kuvassa 24 näkyy.

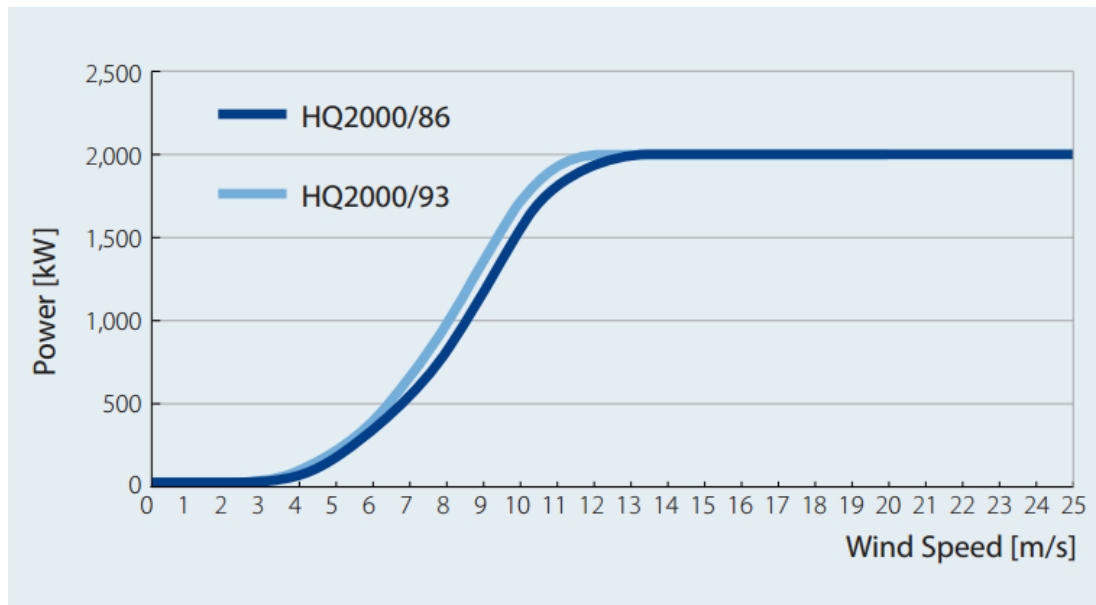


Kuva 24. Mäkelänkankaan tuulipuisto (Suomen Voima 2016).

Tuulivoimalan tehoa on tapana kuvata tuulen nopeuden funktiona. Kuvassa 25 on Mäkelänkankaan tuulivoimalan tuulennopeudet ja niiden mukaiset tehot ilmoitettuna tehokäyränä. Kuvassa tuulennopeudessa on hajontaa, koska se on kerran tunnissa otettu hetkellisinäyte. Näistä saadaan muodostettua kuva, kuinka nopeuden kasvaessa myös tuotettu teho kasvaa. Tuulennopeuden 11 - 12 m/s teho ei enää kasva, vaan pysyy samassa tasossa. Kuvassa 26 on puolestaan Hyundain Heavy Industries:n ilmoittama tehokäyrä kyseessä olevalle tuulivoimalalle. Kuvia vertailemalla nähdään, että mittauspisteet vastaavat ilmoitettua tehokäyrää.



Kuva 25. Mäkelänkankaan tuulivoimalan mittaustiedot 27.-28.3 väliseltä ajalta. Y- akselilla on teho (MW) ja X-akselilla on tuulennopeus (m/s).



Kuva 26. HQ2000/93 ja HQ2000/86 tehokäyrä (Hyundai Wind Turbine System, 5).

Voimaloiden perustuksesta, kokoamisesta sekä käyttöönotosta vastasi Empower, joka myös valvoo voimaloiden toimintaa. Valvonta tapahtuu Empowerin valvomosta Helsingistä käsin. Valvonta pitää sisällään tiedonkeruun tuotannosta ja voimaloiden käymisestä. Alun perin tuulivoimaloiden käyttämisessä

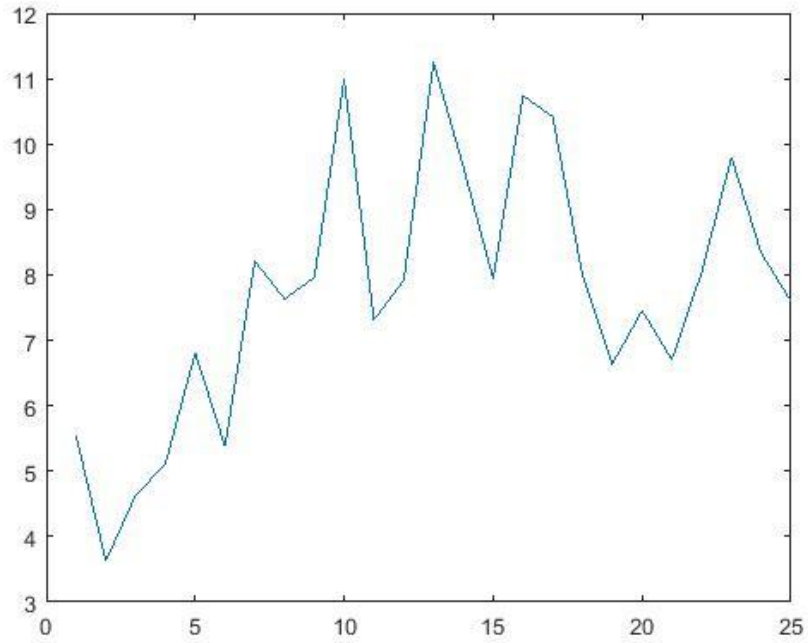
ilmeni ongelmia niiden pitämän kovan äänen takia. 1 ja 2 voimalaa voitiin käyttää rajoittamattomasti, mutta 3 ja 4 voimaloiden käyttöä rajoitettiin siten, että niitä sai käyttää vain arkisin 07 - 22 välisenä aikana. Tämä vika korjattiin vaihtamalla vaihdelaatikot molempiin voimalaan, jolloin äänen tasot alentuivat sallittuihin rajoihin. (Suomenvoima 2013.)

6 TUOTANTOTIETOJEN KERUU JA ANALYSOINTI

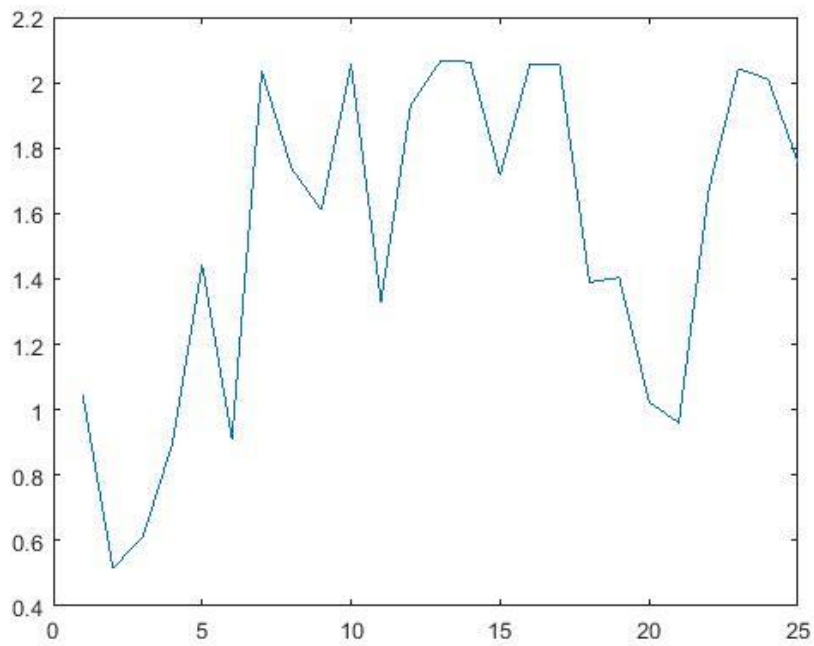
Betzin laissa oletettiin, että tuulivoimalan tuottama teho on riippuvainen tuulen nopeudesta. Kaavassa oletettiin, että turbiini ei ottaisi virtauksesta energiaa pois. Tarkasteluun on valittu Mäkelänkankaan tuulivoimala 1:n tuotannosta yksi päivä. Valittu päivä on perjantai 17.03.2017. Matlab-ohjelman avulla tarkistettiin Betzin lain toteutuminen näihin tuloksiin. Tuotantotiedoissa arvot ovat tehdyin työn muodossa megawattituntia (MWh), joten ne pitää ensin muuttaa tehon muotoon, joka tapahtuu yksinkertaisesti ottamalla ajan määreen (h) pois.

Koska teho on suoraan riippuvainen tuulennopeuden kolmannesta potenssista ja tuuliturbiinin siipien pyyhkäisyalasta. Tuulennopeudella ja siipien pituudella on hyvin suuri merkitys tuulesta saatavaan tehoon. Pienelläkin tuulennopeuden muutoksella on hyvin suuri vaikutus. Näin ollen pyritäänkin tuulivoimaloita rakentamaan tuulisille alueille ja niiden pinta-alaa kasvattamalla pyritään hyödyntämään mahdollisimman paljon tuulesta.

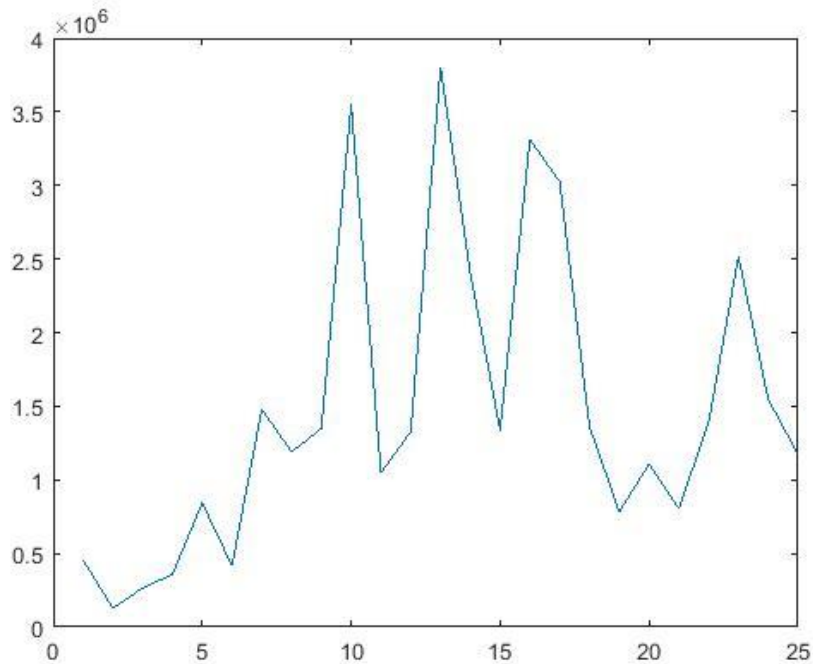
Kuvaajassa 1 on tuulivoimala 1:n kyseisen 17.3.2017 päivän tuulennopeudet ilmoitettu kuvaajamuodossa. Kuvaajassa y-akselilla, eli pystyakselilla, on ilmoitettuna tuulennopeudet (m/s) ja x-akselilla, eli vaaka-akselilla, on ilmoitettu aika tunneittain (h). X-akselilla kuvaaja alkaa ajasta 00.20 ja päättyy 18.3 aikaan 00.20. Kuvaajassa 2 on puolestaan samalla ajanjaksolla ilmoitettu tuulivoimalan sen hetkinen teho, josta hyvin huomaa, kuinka kuvaaja seuraa suurin piirtein tuulennopeuden liikkeitä. Kuvaajassa 3 on hyvin pelkistetty malli Betzin lain vaikutuksesta. Siinä näkee huippuarvon olevan korkeammalla, sillä siinä on korkein teoreettinen hyötysuhde, jota ei nykytekniikalla voida saavuttaa. Joidenkin arvojen kohdalla käyrä käy normaalia matalammalla, sillä tuotantotiedoissa tuulennopeus on hetkellinen mittausta. Näin se ei vastaa tehoa, sillä teho on keskiarvo tunnin ajalta. Kuvaajassa on nähtävissä hyvin kuitenkin tuulennopeuden vaikutukset, sillä tuulen laskiessa, teho laskee hyvin paljon.



Kuvaaja 1. Tuulennopeus 17.03.2017, Mäkelänkankaan tuulipuisto, tuulivoimala 1. X-akselilla on aika (h) ja Y-akselilla on tuulen nopeus (m/s).



Kuvaaja 2. Tuulivoimala 1 teho 17.03.2017. X-akselilla on aika (h) ja Y-akselilla on mitattu teho (MW).



Kuvaaja 3. Betzin lain mukaiset tehot päivälle 17.03.2017. X-akselilla on aika (h) ja Y-akselilla on Betzin lain mukainen teoreettinen maksimi (W).

Hyötysuhteen laskiessa pitää huomioida, että tuulennopeudet ovat vain hetkellisiä mittauksia, eli ne eivät ole tuntikeskiarvoina. Tehot ovat puolestaan tuntikeskiarvoina. Tuulivoimaloissa hyötysuhde laskettiin tuulivoimalan teho jaettuna ilmantiheydellä, siipien pyyhkäisyypinta-alalla, sen hetkistä tehoa vastaavalla tuulennopeuden kolmannella potenssilla ja jakaja kerrottiin vielä puolella seuraavasti:

$$\eta = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (\text{Kaava 7})$$

η	hyötysuhde
P	voimalan teho
v	tuulennopeus
A	pyyhkäisyypinta-ala
ρ	ilmantiheys.

Laskettiin hyötysuhde noin kello 10 kohdilta, joissa teho oli noin 1,4 megawattia, joka piti muuttaa 1 800 000 watiksi, ilmantiheydeksi oletettiin 1,29 kg/m³, pyyhkäisyypinta-ala oli 6973 m³, ja tuulennopeus oli 10 m/s.

$$\eta = \frac{1\,800\,000\text{ W}}{\frac{1}{2} * 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 6973 \text{m}^2 * \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3} = 0,40 \quad (\text{Kaava 8})$$

Hyötysuhde oli noin 40%. Laskuissa on huomattava, että teho on tunnin keskiarvolla ja tuuli on hetkellinen mittausta, jonka takia joissain kohdissa hyötysuhde saattaa olla huomattavankin suuri.

Mäkelänkankaalla käytettävät aurinkopaneelit ovat Hyndain valmistamia ja ovat mallia HiS-M 260 RG. Yhden paneelin nimellisteho on 260 wattia ja maksimiarvo on 267,8 W, nimellisvirta on 8,4 A ja nimellisjännite 31,1 V. Paneelin pituus on 1 640 mm, leveys 998 mm ja paksuus 35 mm. (Solardesigntool.)

Aurinkopaneelin hyötysuhde voidaan laskea kaavan 7 mukaan:

$$\eta = \frac{P}{E * A} \quad (\text{Kaava 9})$$

P aurinkopaneelin nimellisteho

E säteilyintensiteetti

A aurinkopaneelin pinta-ala.

Aurinkopaneelin pinta-alan saa kaavasta 8:

$$A = \text{leveys} * \text{pituus} \quad (\text{Kaava 10})$$

$$A = 0,998\text{m} * 1,640\text{m} = 1,637\text{m}^2 .$$

Suomessa keskimäärin auringon säteilyenergia on 1000 W/m². Hyötysuhde saadaan kaavan 7 mukaisesti, kun sijoitetaan saadut tiedot:

$$\eta = \frac{260\text{W}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 1,637\text{m}^2} = 0,1588 * 100\% = 15,88 \%$$

Mäkelänkankaan aurinkopuiston paneelien hyötysuhde on noin 16 %.

6.1 Kuukausittainen tarkastelu

Koska sekä tuulivoimala että aurinkovoimala ovat molemmat erittäin olosuhtealttiita sekä myös vuorokauden ja vuoden eri ajat vaikuttavat niiden tuotantoon. Siksi olisi järkevää yrittää tuoda rinnalle jokin varmistava energiantuottaja. Tähän asti voimalat ovat kytketty yleensä dieselkoneeseen. Jos olosuh-

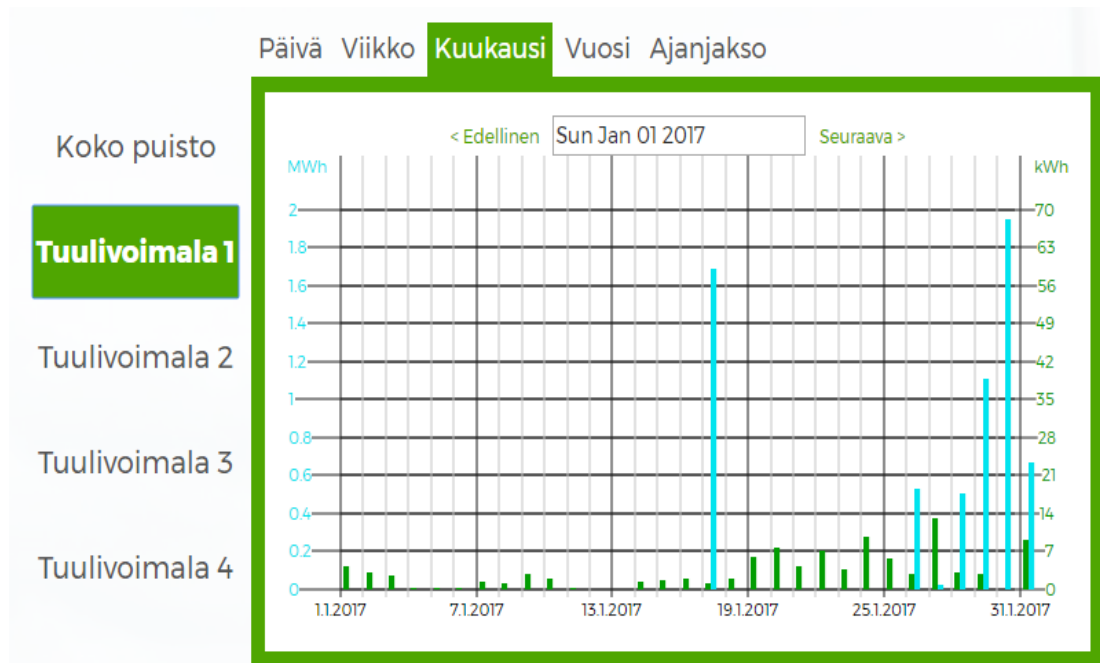
teet eivät ole otolliset, joudutaan käynnistämään dieselkone sähkön tuottamisen varmistamiseksi. Tämä on puolestaan hyvin ympäristöä saastuttava tapa tuottaa sähköä. Tämän takia aurinko- ja tuulivoimalan yhteiskäyttö olisi hyödyllistä. Molemmat näistä ovat erittäin luontoystävällisiä, eivätkä ne tuotantotilassa tuota yhtään ympäristöä haittaavia päästöjä.

Tuotantotiedot ovat Mäkelänkankaan tuuli- ja aurinkopuistosta, joita Empower operoi. Tiedot saadaan puiston omasta tietojärjestelmästä. Tuotantotiedot on linkitetty Xamk:n Tuuli- ja aurinkovoima koulutus- ja tutkimuskeskittymä nettisivulle oppilastyönä (Kytönummi, Metsälä 2017). Näistä tuotantotiedoista analysoitiin, kuinka tuulivoimaloiden tuotanto ja sen ajankohdat vaihtelevat. Jos tuulivoimalan ja aurinkopaneeleiden yhteen yhdistämällä samaan energiankeruu järjestelmään vähentää aikoja, jolloin tuotantoa ei synny. Analysoinnissa otettiin huomioon aurinkopuisto ja yksi tuulipuiston voimala, sillä tuulivoimaloiden yhteistuotanto on paljon suurempi kuin aurinkopuiston.

Kuukausittainen tarkastelu alkaa tammikuusta 2017 ja päättyy huhtikuulle 2017. Tarkasteltaessa kuukauden ajanjaksolta tuotantotieto esitetään päiväkohtaisesti, kun taas päiväkohtaisesti tuotantotieto esitetään tuntikeskiarvona. Alempana on listattu tuotantotiedot jokaiselta kuukaudelta tammikuulta huhtikuuhun asti. Kuvissa sininen väri kuvastaa tuulivoimalla tuotettua sähköenergiaa ja vihreä kuvastaa aurinkovoimalalla tuotettua sähköenergiaa. Kuvissa olevat palkit kuvaavat päivittäistä keskiarvoa, joka on laskettu tuntikeskiarvoista.

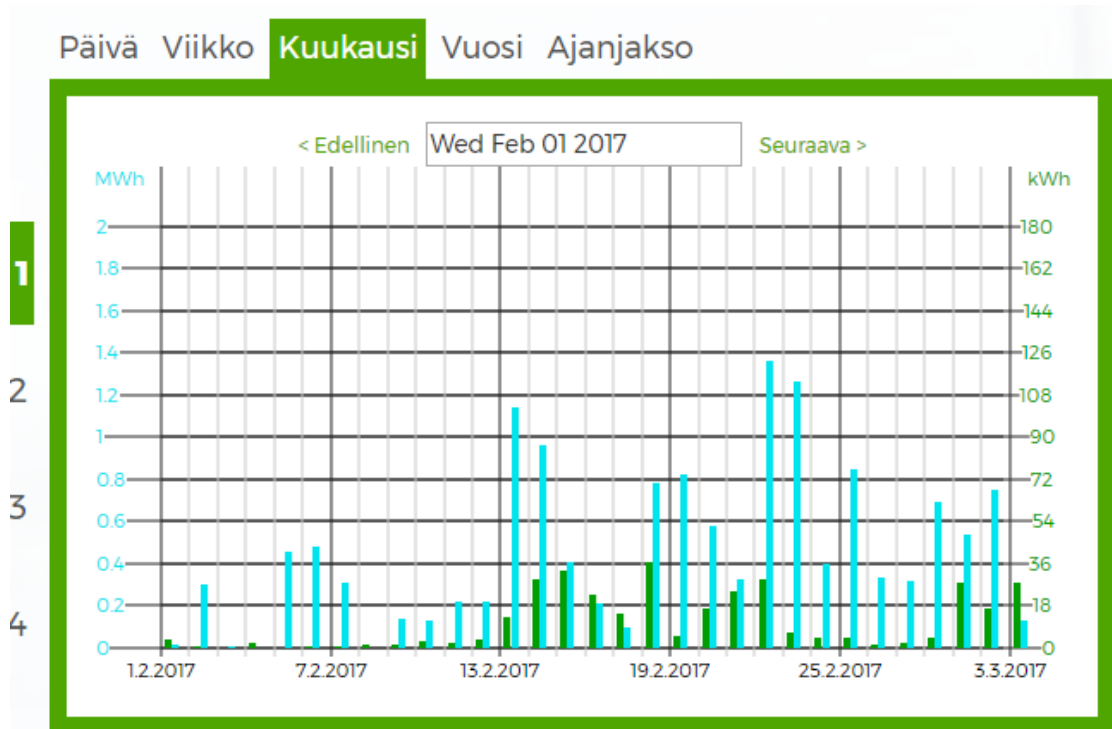
Kuvista 25 - 28 on nähtävissä, että pääpaino on selvästi tuulivoimalla, sillä keskikokoiset 2 megawatin tuulivoimalat tuottavat enemmän sähköä kuin 720 kilowatin aurinkovoimala. Vaikka aurinkovoima tuottaa melkein joka päivä sähköä, on sen määrä hyvin alhainen tammi- ja helmikuun ajan, koska auringon säteiden säteilyintensiteetti on alhainen. Tämä johtuu siitä, että pohjoinen pallonpuolisko on hyvin kaltevassa kulmassa auringon säteilyyn nähden, joten säteitä tulee maan pinnalle harvempana. Tuotettu sähköenergia pysyttelee aurinkoenergialla alle 50 kWh joka päivä tammi- ja helmikuun ajan. Tuulivoimaloiden osalta taas huomataan, että ne tuottavat hyvin vuoden ajoista huolimatta, sillä ajon aikana yksi tuulivoimala tuottaa noin 1 MWh edestä sähköenergiaa.

Kuvassa 27 nähdään tammikuun molempien voimaloiden tuotto. Aurinkovoimalla ei vielä päästä hyviin tuotantotuloksiin, mutta tuulivoimalla nousee hyvinkin korkealle. Tammikuun kuvassa on tuulivoimalalla ollut kuun alusta katkoa, jonka takia tuotantoa ei näy.



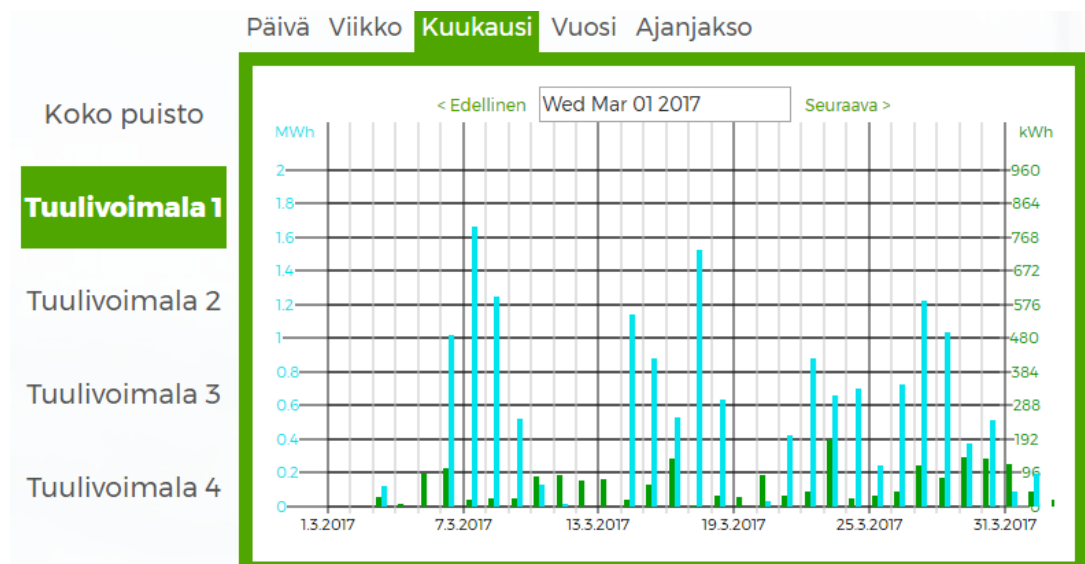
Kuva 27. Tammikuun tuotanto aurinkopuistolla ja tuulivoimala 1:llä.

Helmikuussa on jo auringon säteet alkaneet lämmittää, sillä tuotanto on kaksinkertaistunut tammikuisista tuloksista. Siltikään ei saada 50 kilowattituntia keskimäärin. Kuvassa 28 tuulivoimalla helmikuun alussa on myös tuotettu heikosti, keskimäärin 0,16 megawattituntia, joka vastaa 160 kilowattituntia. Heikon alkujakson jälkeen on nähtävissä selvä ero, kun tuotanto nousee parhaimmillaan vajaaseen 640 kilowattituntiin.



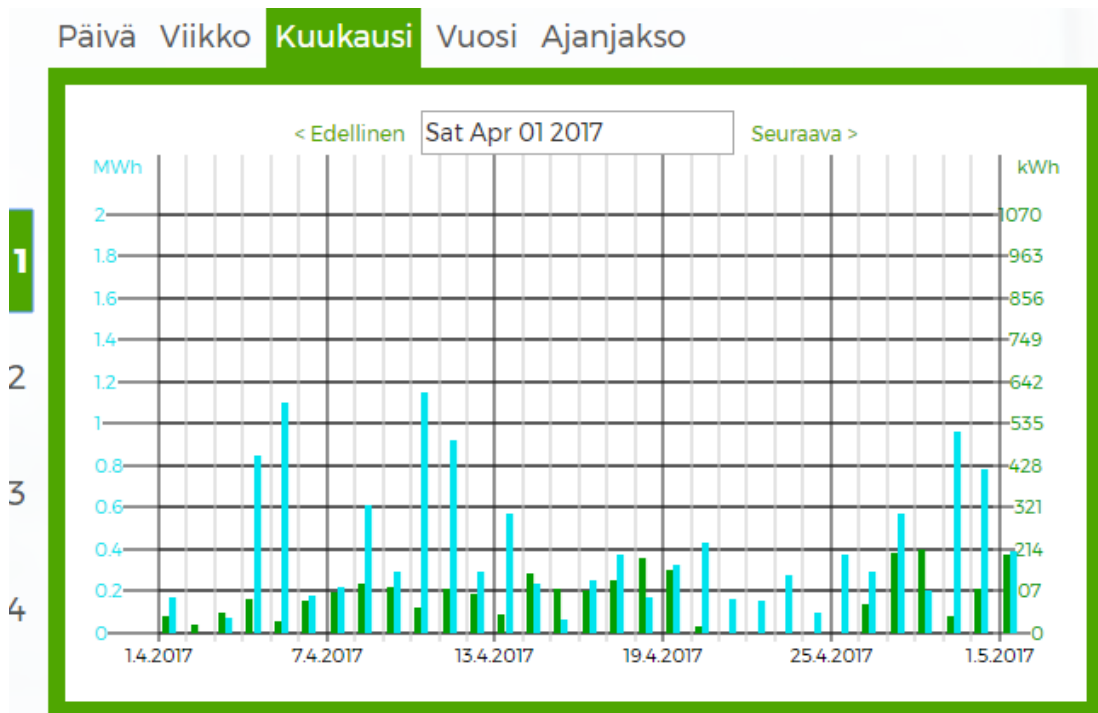
Kuva 28. Helmikuun tuotanto aurinkopuistolla ja tuulivoimala 1:llä.

Kuvassa 29 on maaliskuun tuotanto, joissa on nähtävissä selvä nousu sekä tuuli- että aurinkovoimaloiden tuotannossa. Auringolla saadaan jo yli 100 kilowattitunnin edestä sähköenergiaa ja tuulivoimallakin päästään parhaimmillaan 1,6 megawattituntiin, joka vastaa 1600 kilowattituntia. Aurinkovoimaloiden tuoton kasvun selittää säteilyintensiteetin kasvu. Pohjoinen pallonpuolisko alkaa kääntyä kohtisuorempaan kulmaan aurinkoa vasten, jolloin samalle alueelle tulee tiheämmin auringonsäteilyä.



Kuva 29. Maaliskuun tuotanto aurinkopuistolla ja tuulivoimala 1:llä.

Kuvassa 30 esitetty huhtikuu ei ole tuulienergiassa ollut niin suurtuotannollista kuin aikaisemmat kuukaudet. Tuotanto käy vain muutaman kerran lähellä yhden megawattitunnin keskiarvoa. Aurinkovoimalat puolestaan ovat tuottaneet kesää kohti mentäessä joka kuukausi enemmän kuin edellisenä kuukautena. Tuotanto oli tasaisesti yli 100 kilowattituntia päivässä. Tuulivoiman lasku johtuu siitä, että talvisin on enemmän suuria tuulennopeuksia sisältäviä tuulia kuin kesällä.



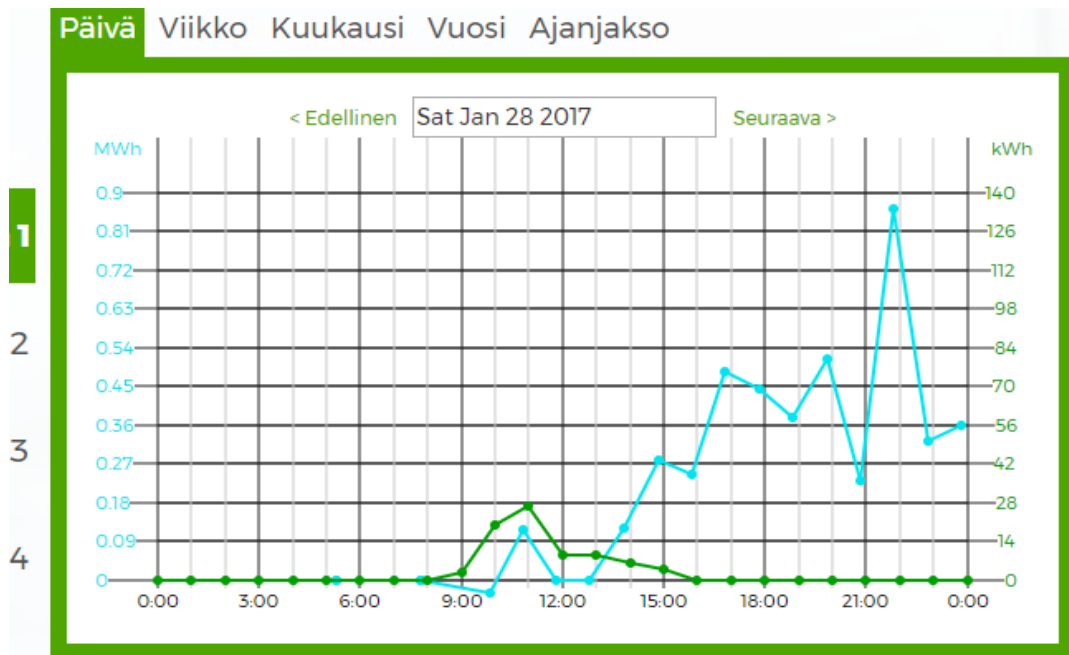
Kuva 30. Huhtikuun tuotanto aurinkopuistolla ja tuulivoimala 1:llä.

6.2 Tarkastelu päivän tarkkuudella

Päiväkohtaisesti tarkasteltaessa nähdään viivoilla yhdistetty kuvaaja, jolloin nähdään kellon mukaan tuotantoajankohdat. Tämä auttaa tulkitsemaan, koska tuulivoimala ja aurinkovoimalat tuottavat sähköä. Samalla saadaan selville, ovatko ne hyvä yhdistää samaan sähkönkeruujärjestelmään. Tuotantotietojen lisäksi löytyy olosuhdetietoja tuotannon rinnalle tuotannon vaihtelevuuden tueksi. Näin näkee, kuinka esimerkiksi tuulennopeuden muutokset vaikuttavat tuottoon sekä paljon tietyn alueen säteilyteho nostaa aurinkovoimaloiden tuottoa.

Kuvassa 31 on 28.9.2017 päivän tuotanto kuvaajana, jossa hyvin huomataan miten ja milloin voimalat tuottivat. Koska oli vielä tammikuu, aurinko paistoi

vain hetken, joten pääpaino oli tuulivoimalla. Aurinkopaneelit tuottivat vain kuuden tunnin ajan sähköä, kun tuulivoimalat tuottivat suuren osan päivästä. Päivä keskiarvona jokainen piste kuvaa yhden tunnin tuotettua energiaa keskiarvona. Kuvassa pitää huomata, että voimaloiden tuotto on eri muodossa, tuulivoima megawattitunteina ja aurinkovoima kilowattitunteina. Kuvassa nähdään hyvin haluttu tilanne, jossa toinen voimalatyyppi tuottaa silloin, kun toinen ei tuota. Tässä tapauksessa talvella tuulivoimala pyörii ja tuottaa sähköenergiaa, kun aurinkovoimala ei pysty sitä tekemään.

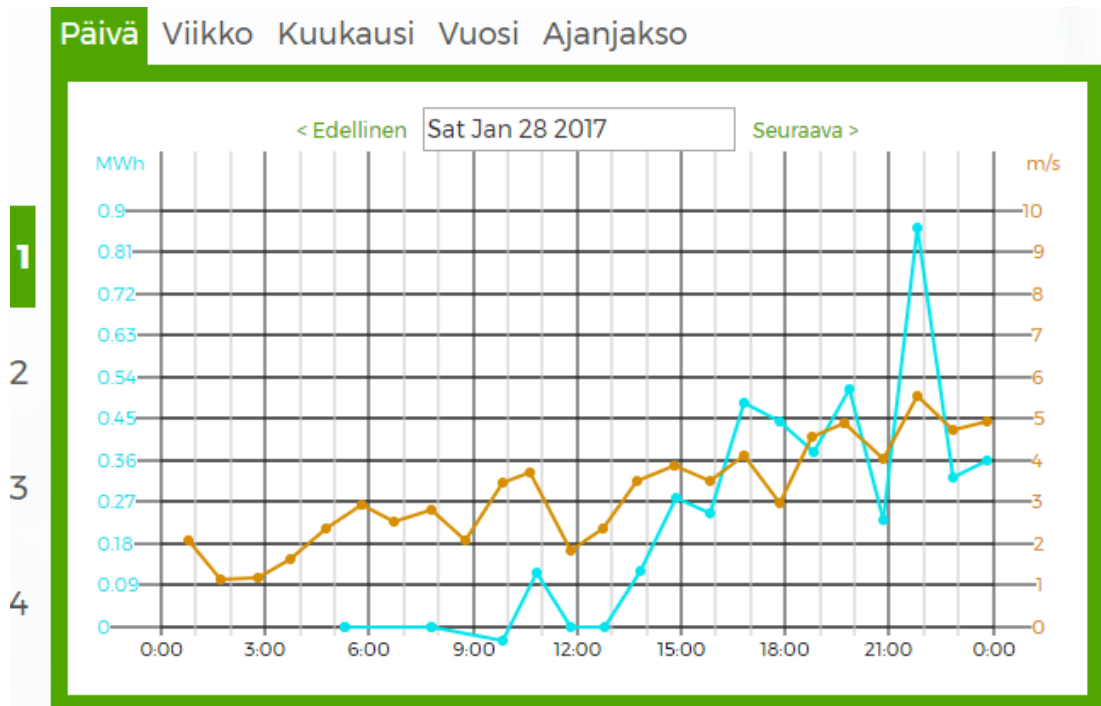


Kuva 31. 28.1.2017 aurinkopuiston ja tuulivoimala 1 tuotantokäyrä.

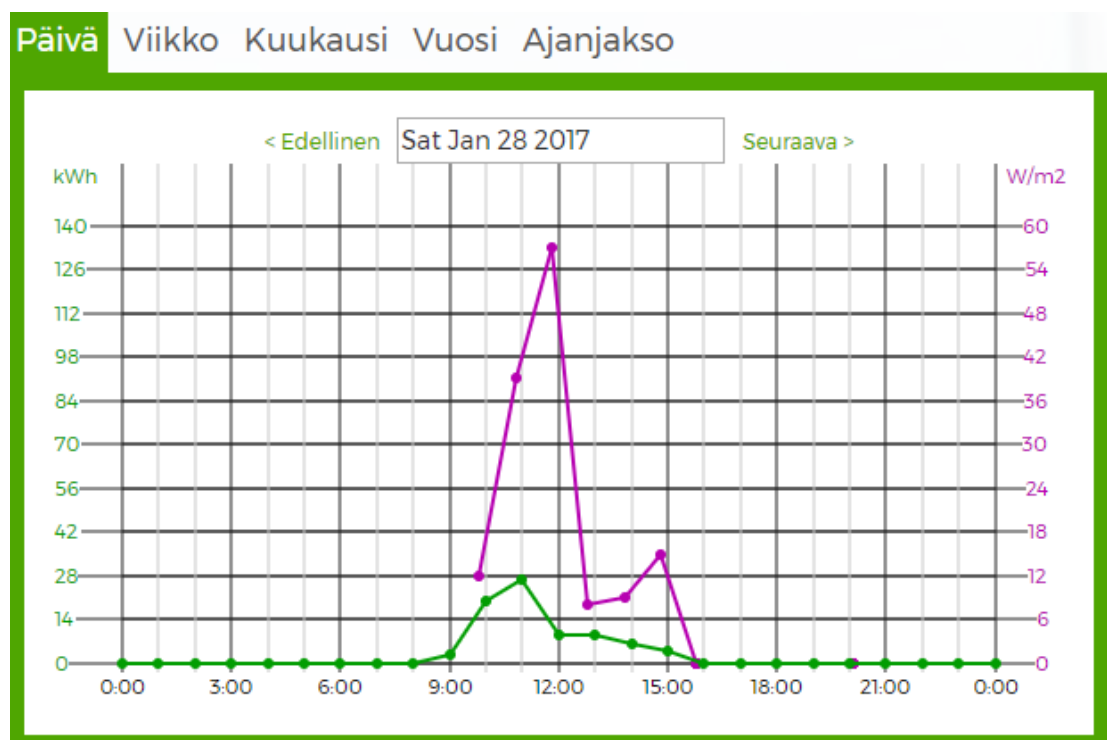
Kuvassa 32 on kuvattu tuulennopeuden ja tuotannon muutosta. Siinä nähdään, kuinka pienetkin muutokset vaikuttavat suoraan tuotantoon. Tuulen nopeuden muuttuessa on pieni viive, ennen kuin teho muuttuu. Tämä johtuu mekaanisista asioista. Esimerkiksi, jos tuulen nopeus nousee, kestää hetken ennen kuin tuulivoimala pääsee mukaan tähän. Kuvasta myös nähdään, koska tuulennopeus on tarpeeksi suuri, jotta tuulivoimala pystyy käynnistämään tuotannon. Mäkelänkankaan tuulivoimalat vaativat käynnistyäkseen tuulennopeuden, joka on vähintään 3,4 metriä sekunnissa.

Kuvassa 33 on puolestaan Mäkelänkankaan aurinkopuistossa mitattu aurion säteilyteho. Koska säteilyteho on hyvin alhainen, ei aurinkovoimala pysty tuottamaan paljoa sähköenergiaa. Muita päiviä vertailemalla on hyvin nähtä-

vissä, kuinka säteilyteho kasvaa joka kuukausi ja näin ollen myös aurinkovoimaloiden tuotto kasvaa. Tämä johtuu siitä, että voimalat saavat enemmän tuottoon tarvittavaa auringonsäteilyä.

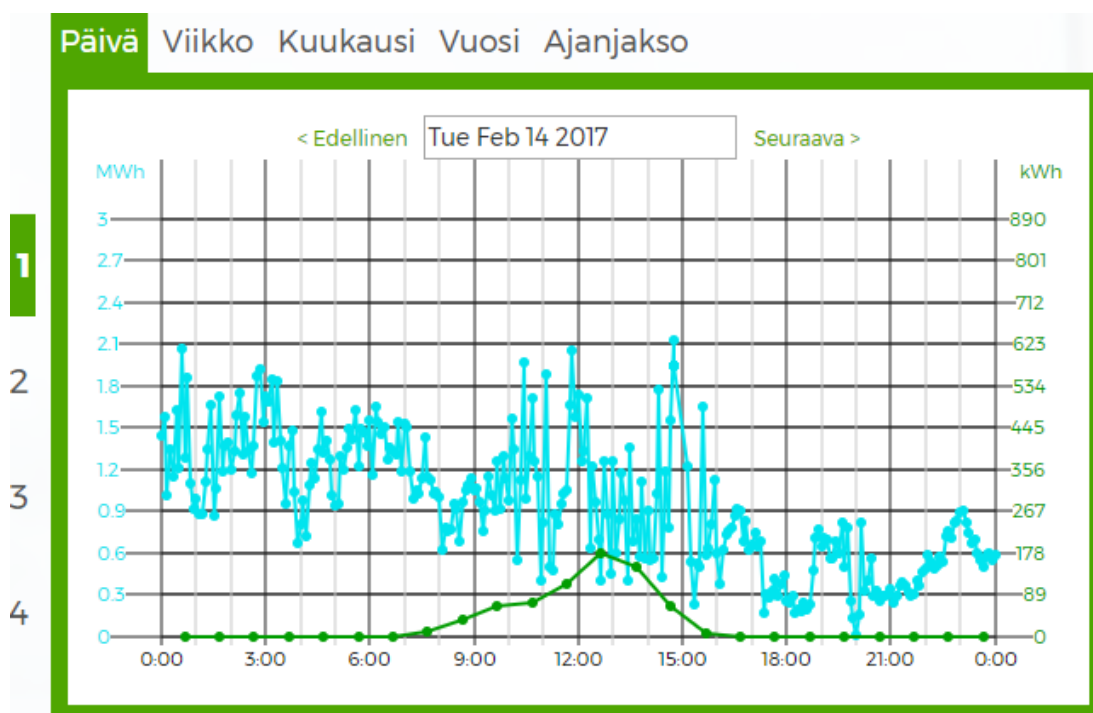


Kuva 32. Tuulen vaikuttaminen tuottoon.



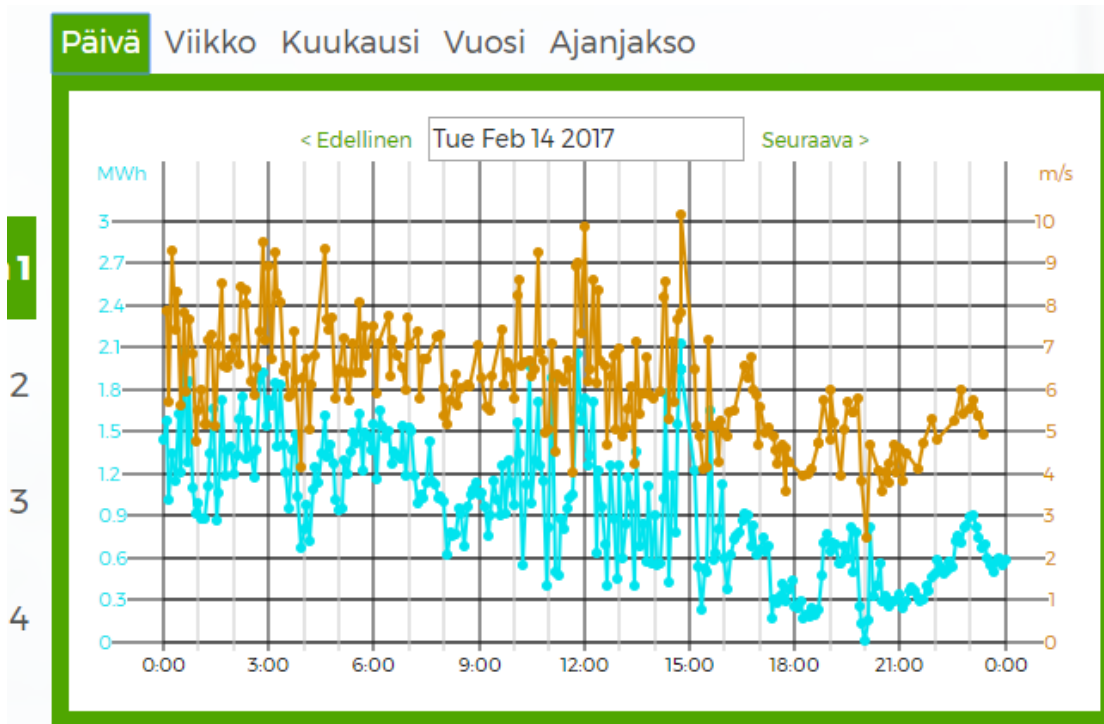
Kuva 33. Säteilytehon vertaaminen tehoon.

Kuvassa 34 ovat tuulivoimalan tuotantotiedot tallentuneet viiden minuutin välein ja aurinkotiedot tuntikeskiarvona 14.2.2017. Tuulivoimalan tuoton sahaus selittää tuulennopeuden jatkuva muutos. Kuten aikaisemmin todettiin Betzin lain yhteydessä, tuulivoimalan teho on suoraan verrannollinen tuulennopeuden kolmanteen potenssiin. Tästä johtuu, että pieninkin muutos tuulen nopeuteen, vaikuttaa saman tien myös tuulivoimalan tuottamaan sähköenergian määrään. Aurinko paistaa vielä helmikuussakin heikolla intensiteetillä ja hyvin lyhyen ajan päivästä. Tämä vaikuttaa suoraan aurinkopaneelien tuottoon.

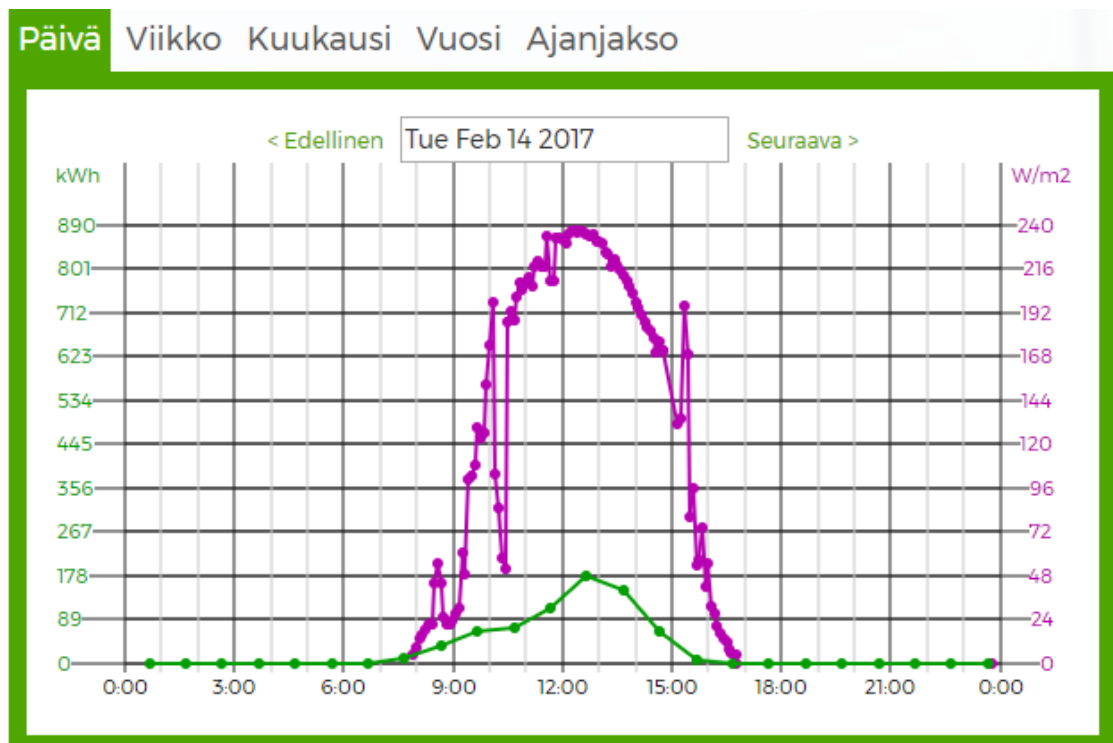


Kuva 34. 14.2.2017 aurinkopuiston ja tuulivoimala 1 tuotantokäyrä

Kuvassa 35 on helmikuun päivän tuulisuus ja tuotanto samassa kuvaajassa. Siinä on huomattavissa, kuinka paljon tuulisuus heilahtelee, eikä oikeastaan ole ollenkaan stabiilia. Tuulivoimalan tuotanto vaihtelee samalla tavalla kuin tuulisuuskin. Kyseisenä päivänä tuulennopeus on jatkuvasti ollut tarpeeksi korkea, jotta voimala on pystynyt pyörimään ja näin ollen tuottanut sähköä. Kuvassa 36 on puolestaan helmikuun 14. päivän sähköteho ja tuotanto samassa kuvaajassa. Säteilytehoa tulee maahan jo huomattavasti enemmän kuin edellisenä kuukautena ja näin ollen sähköäkin saadaan tuotettua enemmän. Kun verrataan tammikuun ja helmikuun päivien säteilytehon kasvun määrää, huomataan, että se on moninkertaistunut ja sama on myös tapahtunut tuotannolle.



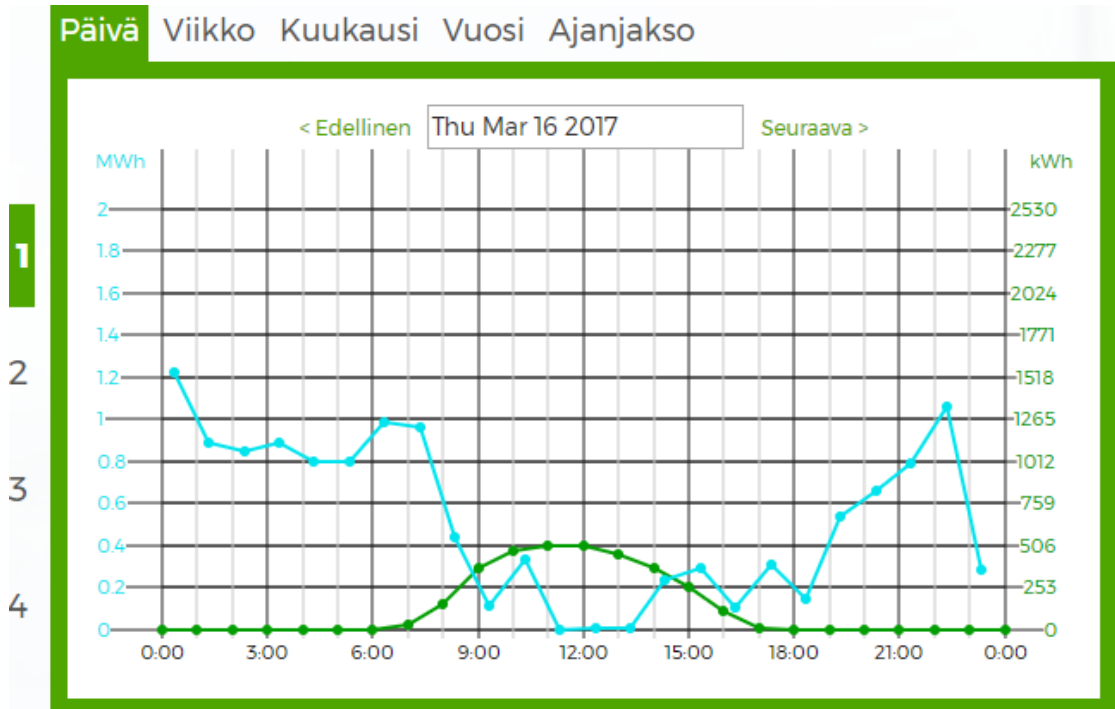
Kuva 35. Tuulen vaikuttaminen tuottoon.



Kuva 36. Säteilytehon vertaaminen tehoon.

Maaliskuussa on jo huomattava nousu aurinkopuiston tuotannossa. Verrattuna helmikuun tuotantoon (kuva 34) maaliskuun tuotanto oli edellisiä korkeampi. Kuvassa 37 on nähtävissä yksi maaliskuun päivä, josta on nähtävissä

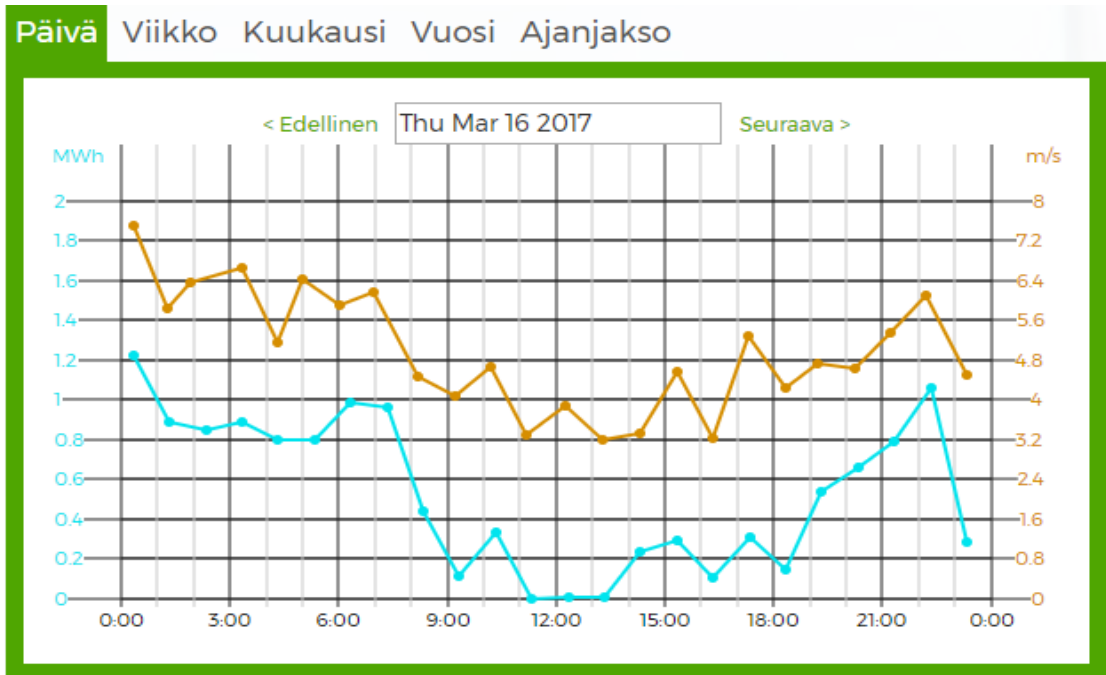
selkeä nousu tuotannossa. Aikaisemmin tuotanto on ollut sadan kilowattituntin tuntumassa, mutta nyt keskipäivällä se tuottaa hetken tasaisesti 500 kilowattituntia. Ajallisesti tuotanto sijoittuu tuulivoimalalla ja aurinkopuistolla eri ajankohtiin. Tuulivoimala tuottaa aamulla ennen kahdeksaa ja iltakuuden jälkeen, kun puolestaan aurinkopuisto tuottaa juuri kahdeksan ja iltakuuden välissä hyvin. Tämän päivän osalta toteutuu hyvin idea siitä, että nämä kaksi uusiutuvan energian tuotantotapaa kompensoisivat toisiaan.



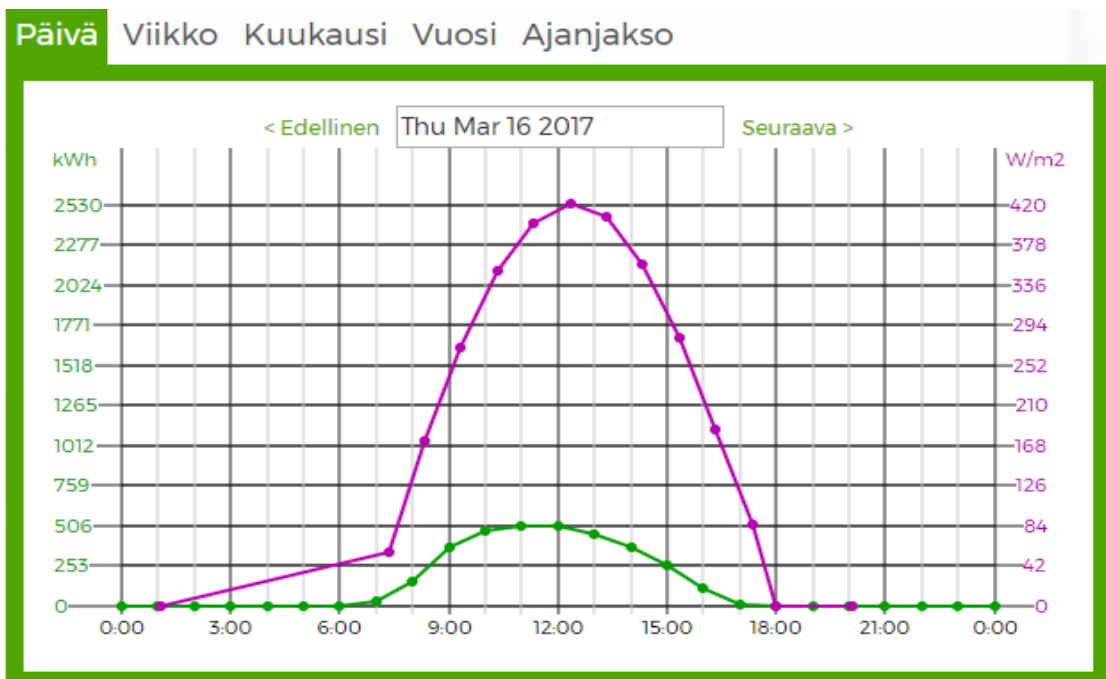
Kuva 37. 16.3.2017 aurinkopuiston ja tuulivoimala 1 tuotantokäyrä.

Kuvissa 38 ja 39 on maaliskuun 16. päivän tuulisuus ja säteilytehot. Ensimmäisenä on tuulisuus, jossa huomataan, että keskipäivällä tuulennopeus puutoaa 3,4 metriin sekunnissa, jolloin voimala on käynnistymisen rajalla. Vaikka tuulennopeus nousee hetkellisesti neljään metriin sekunnissa, ei voimala käynnisty. Se johtuu ohjausjärjestelmästä, sillä se ottaa huomioon, oliko tuuli hetkittäinen puuska vai jatkuuko se pidempään. Järjestelmä on todennut, että se oli hetkellinen puuska, jolloin se ei vapauta jarrujärjestelmää. Heti, kun tuulennopeus ylittää pitkäkestoisesti vaaditun rajan, jarrut vapautuvat ja voimalan siivet pääsevät pyörimään. Jälkimmäisessä kuvassa on puolestaan samaisen päivän säteilyteho. Jälleen on nähtävissä, kuinka paljon enemmän säteilyä neliömetrille tulee verrattuna aikaisempiin kuukausiin. Helmikuussa huippuarvo oli noin 240 wattia neliömetrille, kun maaliskuussa puolestaan käydään 420

wattia neliömetrissä. Määrä melkein kaksinkertaistuu ja tämä näkyy myös suoraan tuotetussa tehossa.



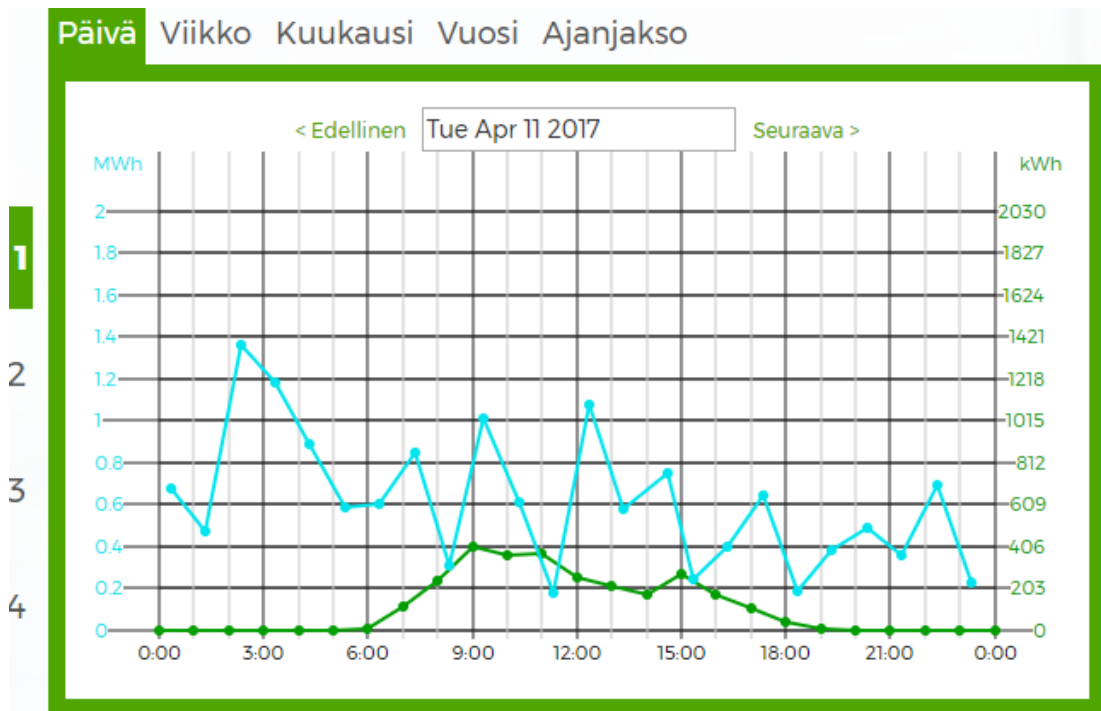
Kuva 38. Tuulen vaikuttaminen tuottoon.



Kuva 39. Säteilätehon vertaaminen tehoon.

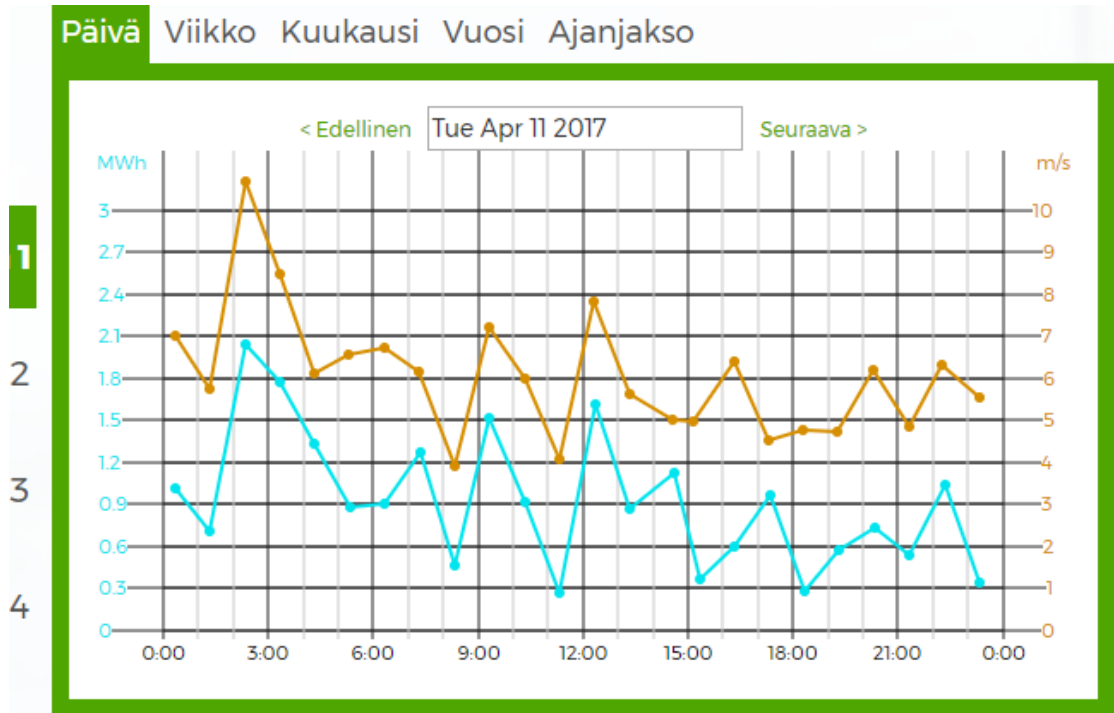
Huhtikuussa auringon osuus on hyvin samankaltainen kuin edellisen kuukauden, paitsi, että tuotanto alkaa hieman aikaisemmin ja jatkuu hieman pidemmälle. Huhtikuun päiväksi on valittu 11.4.2017, joka on kuvattu kuvassa 40. Tuotanto ei nouse vielä huhtikuussakaan 500 kilowattituntia korkeammalle

johtuen vielä auringon säteilyn intensiteetin alhaisuudesta. Tässä tilanteessa alkavat tulla aurinkopuiston kapasiteetin rajat vastaan. Hiukan korkeammalle päästään, kun kesällä aurinko paistaa huomattavasti korkeammalta, kun säteitä tulee tiheämmin. Tuulivoimalan toiminnasta näkee hyvin sen tuoton sahaaminen. Sahaaminen johtuu tuulen epätasaisuudesta, sillä hyvin harvoin tuulen nopeus on stabiili. Lisäksi tuulivoimalan tuottama sähköteho on sidoksissa vahvasti tuulen nopeuteen. Tästä johtuen pienetkin tuulen nopeuden muutokset vaikuttavat merkittävästi tuotettuun tehoon.

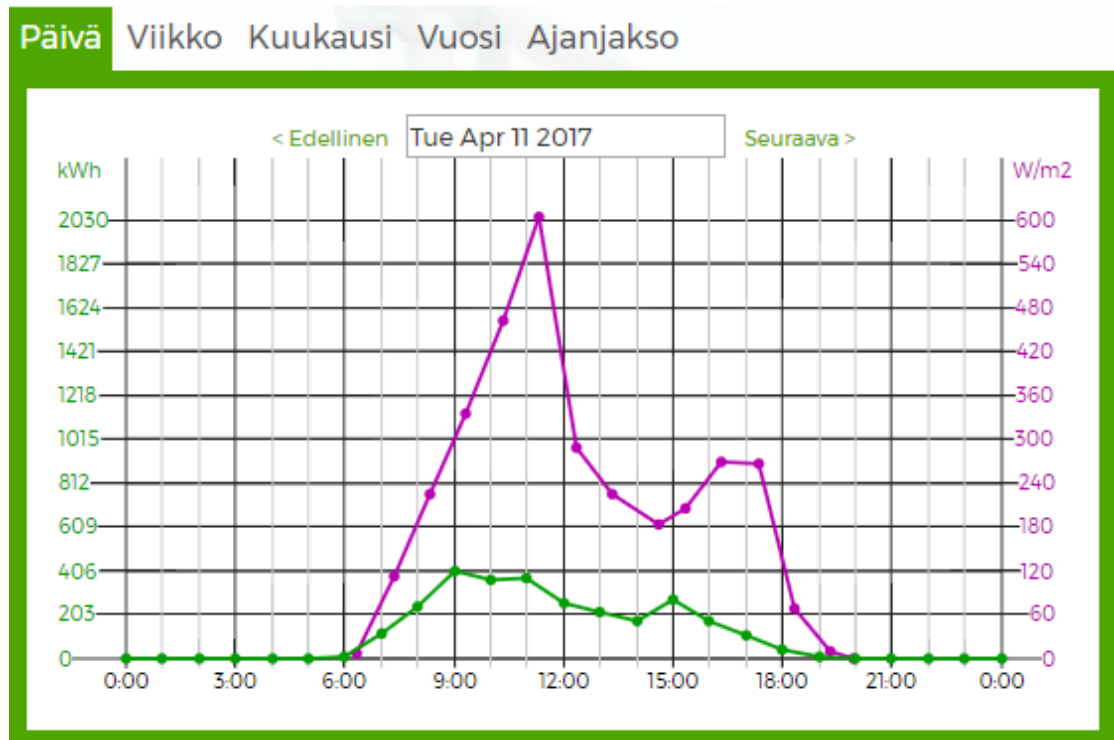


Kuva 40. 11.4.2017 aurinkopuiston ja tuulivoimala 1 tuotantokäyrä.

Kuvissa 41 ja 42 on ilmoitettu huhtikuun 11. päivän aurinkopuiston ja tuulivoimala 1:sen tuotannot sekä tuulisuuden ja säteilytehon. Kyseinen päivä on ollut hyvin tuulinen, josta johtuvat korkeat tuotantolukemat tuulivoimalalla. Kuten aikaisemminkin on todettu, tuotanto seuraa jatkuvasti tuulennopeuden vaihtelua. Tässä on yksi syy, miksi tuulivoimaloiden vaihteisto on jatkuvasti kovassa rasituksessa. Kuvassa 42 nähdään, että hetkellisesti säteilyteho nousee hyvinkin korkeaksi, mutta putoaa nopeasti alas. Tämä hetkellinen kasvu ei kerkeä luomaan aurinkopuistolle kovaa tuotantoa, vaan se pysyy 400 kilowattitunnin tuntumassa. Kun verrataan alkuvuoden ja maaliskuun säteilyä, huomataan, kuinka paljon Suomessa vuoden ajat vaikuttavat tuotantoon.



Kuva 41. Tuulen vaikuttaminen tuottoon.



Kuva 42. Säteilätehon vertaaminen tehoon.

6.3 Tuuli- ja aurinkovoiman korrelaatio

Tarkastellaan vielä huhtikuun ja toukokuun aurinko- ja tuulituoton korrelaatiota Matlab-ohjelmiston avulla. Tämän avulla on mahdollista laskea korrelaatiokerroimia. Niiden avulla on helpompi varmistaa tarkasti, miten tuotanto sijoittuu.

Tarkoituksena oli vahvistaa niin sanottua mututuntumaa siitä, milloin ja kumpi näistä kahdesta tuottaa.

Korrelaatio antaa luvun 1 ja -1 välillä. 1 ja -1 tarkoittavat täyttä korrelaatiota, jossa miinus merkki tarkoittaa vain täysin vastakohtaista korrelaatiota. Tässä tapauksessa miinus merkki tarkoittaa, että toinen, kun ei tuota, toinen tuottaa sähköä. Jos taas merkki on positiivinen, tuottavat molemmat samaan aikaan. Jos luku on lähellä nollaa, ei tuotantotietojen välillä ole korrelaatiota. Olen listannut huhtikuun ja toukokuun päiviltä korrelaatiokertoimet, joissa ilmenee, kuinka hyvin tuotantokäyrät korreloivat toisiaan. Taulukoista puuttuu joitakin päiviä, koska osassa oli puutteelliset tuotantotiedot. Tällöin korrelaatio ei ole luotettava. Korrelaatio ei kerro, kumpi energiantuottotapa on tuottanut energiaa ja kuinka paljon. Se vain vertaa syntyneitä kuvaajia toisiinsa. Pitää myös huomata, että näin lyhyeltä ajalta, kaksi kuukautta, ei saada vielä täyttä kuvaa, kuinka hyvin nämä kaksi korreloivat toisiaan.

Taulussa 1 on nähtävissä huhtikuun korrelaatiokertoimet ja lyhyet selitteet, miten tuotanto sijoittuu päivän aikana. Monet päivät ovat saaneet negatiivisia korrelaatiokertoimia, jolloin se tarkoittaa, että tuuli- ja aurinkotuotanto korreloivat vastakohtaisesti toisiaan. Tällä tarkoitetaan, että toisen ollessa kykenemätön tuottamaan sähköä, toinen on tuotantotilassa. Taulukossa kohta "NaN" tarkoittaa tilannetta, jossa toista energiantuotantotapaa ei ole ollut ollenkaan, jolloin korrelaatiokerrointa ei voida laskea.

Päivä	Korrelaatio	Selite
1.huhti	-0.4698	Tuulta 03:00 - 08:00 , aurinkotuotantoa 07:00 - 15:00
4.huhti	-0.0485	Tuulta koko päivän, aurinkoa klo klo 08:00 - 18:00
5.huhti	0.3356	Tuulituotantoa koko päivän, aurinkoa kello 06:00 - 20:00
6.huhti	-0.4820	Tuulta 00:00 - 08:00 ja 18:00 - 21:00, aurinkoa 07:00 - 19:00
7.huhti	-0.5133	Epätasaisesti tuulta koko päivän ajan, aurinkoa 06:00 - 19:00
8.huhti	-0.0502	Matalaa tuulituotantoa 21:00 asti, aurinkoa 06:00 - 20:00.
9.huhti	-0.4504	Tuulituotantoa ennen kello 09:00 ja 15:00-20:00. Aurinkotuotantoa 06:00 - 19:00
11.huhti	-0.0863	Epätasaista tuulituotantoa kokopäivän, aurinkotuotantoa 06:00 - 19:00
12.huhti	-0.4967	Tuulituotantoa 00:00 - 11:00, aurinkotuotantoa 07:00- 19:00
13.huhti	0.6481	Tuulituotantoa kokoä päivän, aurinkotuotantoa 06:00 - 19:00
14.huhti	-0.2008	Tuulituotantoa kello 00:00 - 09:00 ja 13:00-21:00, aurinkotuotantoa 06:00- 19:00
15.huhti	-0.2645	Tuulituotantoa kello 00:00 - 11:00 ja aurinkotuotantoa 06:00 - 19:00
16.huhti	0.3530	Tuulituotantoa koko päivän, aurinkoa kello 06:00 - 20:00
17.huhti	-0.2002	Tuulituotantoa koko päivän, aurinkoa kello 06:00 - 19:00
18.huhti	-0.2619	Tuulituotantoa koko päivän, aurinkoa kello 06:00 -19:00
19.huhti	0.1332	Tuulituotantoa koko päivän, aurinkoa kello 06:00 -19:00
20.huhti	-0.5855	Tasaista tuulituotantoa koko päivän, aurinkoa vain 06:00 - 09:00
21.huhti	NaN	Tuulituotantoa koko päivän, ei ollenkaan aurinkotuotantoa
27.huhti	-0.0382	Tuulta kello 03:00 - 07:00 ja 15:00 - 00:00, aurinkoa 06:00 - 19:00
28.huhti	-0.6824	Tuulta kello 00:00 - 07:00 ja 17:00 - 00:00, aurinkoa 06:00 - 19:00
29.huhti	-0.4304	Tuulituotantoa koko päivän, aurinkotuotantoa 06:00 - 18:00
30.huhti	0.5845	Tuulituotantoa koko päivän, aurinkotuotantoa 06:00 - 18:00

Taulukko 1. Korrelaatiokertoimet tuulen ja auringon tuottamasta energiasta vuoden 2017 huhtikuun ajalta.

Päivä	Korrelaatio	Selite
1.touko	-0.4089	Tuulta 00:00 - 12:00 ja 19:00 - 00:00, aurinkoa 06:00 - 20:00
2.touko	0.0914	Tuulta koko päivän, aurinkoa 05:00 - 19:00
3.touko	-0.2296	Vaihtelevaa tuulta koko päivän, aurinkoa 05:00 - 19:00
4.touko	-0.6607	Tuulta 00:00 - 09:00 ja 21:00 - 00, aurinkoa 06:00 - 19:00
5.touko	-0.3436	Kovempia tuulia 00:00 - 09:00 ja vähäisempiä 09:00 - 21:00. Aurinkoa 06:00 - 19:00
6.touko	-0.5098	Tuulta 12:00 asti, aurinkoa 06:00 - 19:00
8.touko	0.2497	Epätasaista tuulta koko päivän, aurinkoa 06:00 - 20:00
12.touko	0.1458	Tuulta 03:00 - 20:00, aurinkoa 06:00 - 19:00
13.touko	0.1570	Tuulta 14:00 - 23:00, aurinkoa 06:00 - 20:00
14.touko	0.3984	Tuulta 03:00 - 00:00, aurinkoa 06:00 - 20:00
15.touko	0.1618	Vähäisiä tuulia koko päivän, aurinkoa 07:00 - 19:00
16.touko	-0.3340	Tuulta 00:00 - 12:00 ja vähäisiä tuulia loppupäivän, aurinkoa 06:00 - 19:00
17.touko	0.3250	Suuria tuulenvaihteluita koko päivän, aurinkoa 05:00 - 19:00
19.touko	0.0253	Vähäistä tuulta 00:00 - 09:00, kovempia tuulia 11:00 - 00:00, aurinkoa 06:00 - 19:00
20.touko	-0.2447	Suuria tuulenvaihteluita koko päivän, aurinkoa 05:00 - 20:00
22.touko	-0.0028	Vähäistä tuulta 00:00 - 03:00, suurempia 11:00 - 00:00, aurinkoa 06:00 - 20:00
23.touko	-0.1127	Vähäistä tuulta 00:00 - 08:00 ja 15:00 - 22:00, aurinkoa 06:00 - 20:00
25.touko	0.3368	Vähäistä tuulta koko päivän, aurinkoa 06:00 - 20:00
26.touko	-0.0827	Vähäistä tuulta 00:00 - 12:00 ja kovempia tuulia 13:00 - 00:00, aurinkoa normaalisti
27.touko	-0.6900	Tuulta 00:00 - 06:00, aurinkoa normaalisti
28.touko	0.6312	Tuulta ja aurinkoa 06:00 - 18:00, lisäksi tuulta 21:00 - 00:00
29.touko	0.3356	Tuulista koko päivän, aurinkoa normaalisti
31.touko	-0.5110	Tuulista 00:00 - 07:00, 09:00 - 18:00 ja 22:00 - 00:00. Aurinkoa normaalisti

Taulukko 2. Vuoden 2017 toukokuun korrelaatit sekä tuuli- ja aurinkovoiman yhteistuotanto.

Taulukossa 2 on toukokuun korrelaatiokertoimet sekä selite. Siinä huomataan, että negatiivisissa tuloksissa korrelaatio sijaitsee -0.5 paikkeilla, jolloin tuotanto sijoittuu eriaikoihin. Positiiviset tulokset ovat syntyneet siitä, että päivän aikana on ollut sekä tuuli- että aurinkotuotantoa samaan aikaan.

Jotta saataisiin riittävän tarkka selvitys tuuli- ja aurinkotuotannon samanaikaisuudesta, pitäisi niitä tarkkailla vähintään vuosi, mieluummin pari. Tällä tavalla saadaan selville myös kausivaihtelut huomioiduksi ja satunnaiset ilmiöt rajattua pois.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella Mäkelänkankaalla sijaitsevan aurinkopuiston sekä tuulipuiston yhteistuottavuutta, eli kuinka ne sopisivat yhteen hyvin erilaisina energiantuottajina. Empowerilta välitetyiltä tuotantotiedoista oli tarkoitus analysoida molempien tuotantotapojen tuottavuutta neljältä kuukaudelta, tammikuusta huhtikuuhun 2017. Näistä tuotantotiedoista oli nähtävissä päivän ja tunnin tarkkuudella tuotettu teho, auringon säteilyteho, tuulennopeus ja suunta ja lämpötila. Näin pystyttiin tarkastelemaan, kuinka tuulennopeus vaikuttaa tuulivoimalla tuotettuun tehon nousuun tai laskuun.

Tuotantotietojen päätarkastelun lisäksi tutkittiin, miten tuulesta ja auringosta saadaan sähköä. Perehdyttiin, kuinka tuulet syntyvät ja miten se muutetaan voimalassa sähköksi. Lisäksi selvitettiin, miten auringonsäteily muuttuu paneelissa sähköksi. Lisäksi molempia tuotantomuotoa sitovat ympäröivät olosuhteet hyvin vahvasti, sillä molemmat vaativat itselleen otolliset olosuhteet tuottaakseen sähköä. Tuulivoima tarvitsee vähintään 3,5 m/s tuulennopeudeksi, mutta se ei saa ylittää 25 m/s, jotta vältyttäisiin vahingoilta. Aurinkovoimassa puolestaan tarvitaan auringonsäteilyä vähintään sellaisella säteilyintensiteetillä, jossa fotonin energia on riittävän suuri synnyttääkseen elektroni-aukopareja.

Laskentaosuudessa voitiin todeta yhden päivän tuotantotietojen perusteella, että Mäkelänkankaan tuulivoimaloiden tuotantoteho noudattaa likimain Betzin lakia. Tehokäyrä, tuotettu teho tuulennopeuden funktiona, laskettiin kahden päivän tuotantotiedoista tuulivoimala 1:lle ja lukemia verrattiin Hyundain ilmoittamiin tehokäyrätietoihin. Voitiin todeta, että tuulivoimalasta mitatut tiedot täsmäsivät likimain valmistajan antamaan tehokäyrään. Lisäksi laskettiin aurinkopuiston ja tuulivoimalan hetkelliset hyötysuhteet.

Analysoidessa tuuli- ja aurinkopuiston yhteistuotantoa voidaan todeta, että tuotantomuodot kävivät hyvin yhteen. Tammikuusta toukokuulle 2017 ulottuvalla tarkkailujaksolla oli vain harvoin hetkiä, kun kumpikaan energianmuoto ei tuottanut sähköä. Analysoinnissa vertailtiin vain yhtä tuulivoimalaa ja koko aurinkopuistoa, koska tuulipuiston kokonaisteho on paljon suurempi kuin aurinkopuiston. Tuuli- ja aurinkopuiston yhteistuotannon toteamiseksi laskettiin Matlab-ohjelmaa hyväksi käyttäen korrelaatiokertoimet aurinkopuiston ja tuulivoimala 1:n päivittäisten tuotantotietojen välille huhtikuulle ja toukokuulle 2017.

Korrelaatiokertoimien taulukoista voitiin todeta, että tuuli- ja aurinkotuotantojen vastakkainen korrelointi on usein päivinä kohtalaista. Korrelaatiokertoimia voidaan hyödyntää tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon yhteensopivuuden tarkastelussa. Jotta saataisiin tarpeeksi luotettava selvitys tuuli- ja aurinkotuotannon sopivuudesta yhteen, pitäisi tarkastelua jatkaa vielä pidempään.

LÄHTEET

- Flinck, M. 2008. Tuulivoimalan rakenne 1960-2008. Saatavilla: https://www.tut.fi/msg/tp/kandidaatintyot/kevat2008/markus_flinck.pdf [viitattu 3.1.2017]
- Holtinen, H. 1998. Offshore-tuulivoima Perämeren jääolosuhteissa. PDF-dokumentti. Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1998/J828.pdf> [viitattu 5.1.2017]
- Hynynen, K. 2015. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. Tuuli- ja aurinkoenergiateknologia ja -liiketoiminta. Saatavilla: https://moodle.xamk.fi/pluqinfile.php/522576/mod_resource/content/5/Lecture2_2015_KH.pdf [Viitattu 1.4.2017]
- Ilmatieteenlaitos. Auringon säteily ja kirkkausvaihtelut. Saatavilla <http://ilmatieteenlaitos.fi/sateily-ja-kirkkausvaihtelut> [Viitattu 24.3.2017]
- Korpela, A. 2016. Tuulivoiman perusteet, Amk-Kustannus Oy. [viitattu 21.3.2017]
- Kuusela, A. 2016. Suomen Voima Oy Mäkelänkankaan aurinkoenergiahanke; lyhyt tekninen yhteenveto. Saatavilla: <https://staff.xamk.fi/tilat/rajoitetut/Aurinko-ja-tuulivoiman-koulutus-ja-tutkimuskeskittyma/Projektin%20materiaalit/Esittelymateriaalit/Hamina%20M%C3%A4kel%C3%A4nkangas%20-%20lyhyt%20tekninen%20yhteenveto%2014.6.2016.pdf> [viitattu 21.5.2017]
- Kytönummi, O., Metsälä, J. 2017. Tuuli- ja aurinkopuiston tuotantotiedot. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Saatavilla: <https://webseuranta.xamk.fi/etusivu/> [viitattu 20.5.2017]
- Käpylehto, J. 2016. Aurinkogosta sähköä kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Into kustannus. [viitattu 25.3.2017]
- Motiva. 2016. Auringosta lämpöä ja sähköä. Saatavilla: http://www.motiva.fi/files/12322/Auringosta_lampoa_ja_sahkoa_2016.pdf [viitattu 15.2.2017]
- Otavan opisto. 3.1 Planetaariste tuulet ja ilmanpainealueet. Saatavilla: http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/ge/ge/1/3_tuulet/01?C:D=2067074&m:selres=2067074 [Viitattu 1.4.2017]

Pattison, C. 2010. Solar Support for Wind Energy. Saatavilla: <http://www.wind-systemsmag.com/article/detail/98/solar-support-for-wind-energy> [viitattu 12.12.2016]

Pattison, C. 2011. Firming Wind Energy with Solar Photovoltaics. PDF- dokumentti. Saatavilla: <https://ttu-ir.tdl.org/ttu-ir/handle/2346/ETD-TTU-2011-08-1842>, [viitattu 12.12.2016]

Suntekno. 2010. Aurinkopaneelin Toimintaperiaate. Saatavilla: <http://sun-tekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki//paneelit.pdf> [Viitattu 19.2.17]

Suomen Tuuliatlas. Tuuliatlas – tuulitiedot Suomen kartalla. Saatavilla: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html> [viitattu 23.3.2017]

Suomen Voima Oy, A. Mäkelänkankaan tuulipuisto. Saatavilla: <http://www.suomenvoima.fi/fi/tuotanto/makelankankaantuulipuisto> [viitattu 10.12.2016]

Suomen Voima Oy, B. Mäkelänkankaan aurinkopuisto. Saatavilla <http://www.suomenvoima.fi/fi/tuotanto/aurinkovoimala> [viitattu 10.12.2016]

Suomen Voima Oy, 2013. Mäkelänkankaan tuulivoimalat jatkuvaan käyttöön 12.8.2013 alkaen. Saatavilla: <http://www.suomenvoima.fi/fi/ajankoh-taista/body0=1046> [viitattu 20.1.2017]

SolarDesingTool. Hyundai His-M260RG (260W) Solar Panel. Saatavilla: <http://www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/Hyundai/2586/HiS-M260RG/specification-data-sheet.html> [viitattu 21.5.2017]

Tampereen teknillinen yliopisto. 2008. SMG-4300 Aurinkosähköä ja tuulivoimaa. PDF- luentotiedosto. Saatavilla: https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4300/luennot/tuuli_luentokalvot_2008.pdf [viitattu 21.3.17]

Vattenfall. Tuulivoima- Toimintaperiaate. Päivitetty. 2016-08-16. Saatavilla: <https://corporate.vattenfall.fi/tietoa-energiasta/sahkon-jalammontuotanto/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-toimintaperiaate/> [viitattu 20.1.2017]

Kuva 1. Mäkelänkankaan tuulipuisto. Suomen Voima Oy, Saatavilla:

<http://www.suomenvoima.fi/fi/tuotanto/aurinkovoimala>

Kuva 2. Mäkelänkankaan aurinkopuisto. Suomen Voima Oy. Saatavilla:

<http://www.suomenvoima.fi/fi/tuotanto/aurinkovoimala>

Kuva 3. Tyypillinen tehokäyrä 2 MW:lle tuuliturbiinille. The British Wind Energy Association, 2005. BWEA Briefing Sheet Wind Turbine Technology. Saa-

tavilla: <https://www.nottingham.ac.uk/renewableenergyproject/documents/windturbine-technology.pdf> [viitattu 30.4.2017]

Kuva 4. Tuuliturbiinin ihanteellinen virtaus. Korpela, A. 2016. Tuulivoiman perusteet, Amk-Kustannus Oy. [viitattu 21.3.2017]

Kuva 5. Tuulivoimaloiden rakenne. Tuulivoimalayhdistys. Saatavilla:

<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne> [viitattu 5.1.2017]

Kuva 6. Planeettavaihdin. Vem Motors Finland, 2010. Saatavilla:

<http://www.vem.fi/uutiset/uutiset/planeettavaihde-on-energiatehokas-ratkaisu-vaikeisiin-kayttoolosuhteisiin-ja-ahtaisiin-tiloihin> [viitattu 20.1.2017]

Kuva 7. Tuuliturbiinin lapojen kohtauskulmat. Tuuliturbiinin ihanteellinen virtaus. Korpela, A. 2016. Tuulivoiman perusteet, Amk-Kustannus Oy. [viitattu 21.3.2017]

Kuva 8. Kasuuni ja kartiokasuuni. Holttinen, H. 1998. Offshore-tuulivoima Perämeren jääolosuhteissa. PDF-dokumentti. Saatavilla:

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1998/J828.pdf> [viitattu 5.1.2017]

Kuva 9. Tuulivoimalan toimintaperiaate. Darwin.clara, Energy Resources:

Wind Power. Saatavilla: <http://www.darvill.clara.net/altenerg/wind.htm> [viitattu 5.1.2017]

Kuva 13. Aurinkopaneeli. Suntekno, 2010 Saatavilla: <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf> [viitattu 19.2.2017]

Kuva 14. Auringon säteilyspektri. Suntekno, 2010 Saatavilla: <http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf> [viitattu 19.2.2017]

Kuva 15. Monikiteinen ja yksikiteinen kenno. Suntekno, 2010 Saatavilla:

<http://suntekno.bonsait.fi/resources/public/tietopankki/paneelit.pdf> [viitattu 19.2.2017]

Kuva 16. Esimerkkipaneelin tehon muutos. Käpylehto, J. 2016. Aurinkogosta sähköä kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Into kustannus. [viitattu 25.3.2017]

Kuva 17. Esimerkkipaneelin ominaiskäyrän muutos lämpötilan mukaan. Käpylehto, J. 2016. Aurinkogosta sähköä kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Into kustannus. [viitattu 25.3.2017]

Kuva 18. Esimerkkipaneelin omaiskäyrän muutos säteilyintensiteetin mukaan. Käpylehto, J. 2016. Aurinkogosta sähköä kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Into kustannus. [viitattu 25.3.2017]

Kuva 19. Aurinkovakion muutosjakso. Ilmatieteen laitos, Auringon säteily ja kirkkausvaihtelut. Saatavilla: <http://ilmatieteenlaitos.fi/sateily-ja-kirkkausvaihtelut> [viitattu 26.3.2017]

Kuva 20. Vuosittainen valosäteilykartta. Green Rhino Energy. 2013. Annual Solar Irradiance, Intermittency and Annual Variations. Saatavilla: <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/empiricalevidence.php> [viitattu 27.3.2017]

Kuva 21. Planetaariset tuulet. Planetaariste tuulet ja ilmanpainealueet. Saatavilla: http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/ge/ge1/3_tuulet/01?C:D=2067074&m:selres=2067074 [Viitattu 1.4.2017]

Kuva 22 vasemmalla. LIDAR. Hynynen, K. 2012. LIDAR [viitattu 20.3.2017]

Kuva 22 oikealla. LIDAR. Hynynen, K. 2012. Wind resources assessment. Saatavilla: https://moodle.xamk.fi/pluginfile.php/522576/mod_resource/content/5/Lecture2_2015_KH.pdf [viitattu 20.3.2017]

Kuva 23. Suomen tuuliatlas. Suomen Tuuliatlas. Tuuliatlas – tuulitiedot Suomen kartalla. Saatavilla: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html> [viitattu 23.3.2017]

Kuva 24. Mäkelänkankaan tuulipuisto. Suomen Voima Oy. Saatavilla: <http://www.suomenvoima.fi/fi/tuotanto/aurinkovoimala> [viitattu]

Kuva 26. Tehokäyrä. Hyundai Wind Turbine System, 2012. PDF- tiedosto.
Saatavilla: http://www.hhi-green.com/green/download?file=/common/green/downloads/catalog/wind/en/wind_all_en.pdf [viitattu 7.6.2017]