



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# Aurinko- ja tuulisähkön tuotantoprofilit ja aurinkosähkön tuntitason ennustaminen

Jani Vesa

Opinnäytetyö  
Kevät 2016  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

VESA, JANI:

Aurinko- ja tuulisähkön tuotantoprofiilit ja aurinkosähkön tuntitason ennustaminen

Opinnäytetyö 51 sivua  
Huhtikuu 2016

---

Tuulivoima ja aurinkosähkö lisääntyvät Suomessa ja muualla maailmassa kovaa vauhtia. Työssä oli tarkoitus perehtyä siihen, missä tilanteessa Suomessa tällä hetkellä ollaan näiden tuotantomuotojen kohdalla. Sen lisäksi työn tarkoituksena oli esitellä, miten kyseiset tuotantomuodot toimivat. Työn lähtökohtana oli myös luoda ennustemallia aurinkosähkön tuotannolle. Lisäksi työssä haluttiin hieman tutkia ja pohtia, miten tuulivoiman ja aurinkosähkön tuotto vaikuttaa sähkön kulutuksen ja tuotannon väliseen tasapainoon, sekä mitä haasteita tulevaisuudessa näiden yleistymisellä voi olla.

Opinnäytetyössä kuvattiin kuvaajien avulla, miten tuulivoima ja aurinkosähkö sijoittuvat tällä hetkellä Suomen sähköntuotantoon. Näiden tilastojen perusteella todettiin, että tuulivoima on kovasta kasvutahdistaan ja valtion avustuksista huolimatta vielä hyvin pieni osa kokonaistuotannosta. Aurinkovoiman todettiin olevan vielä marginaalisempi tuotantomuoto, sillä verkkoon kytkettyä aurinkopaneelitehoa oli vain hyvin vähän. Työssä kuvattiin myös teoriassa se, miten auringosta saadaan aurinkosähköä, ja miten tuulesta saadaan tuulisähköä. Aurinkosähkön ennustamisesta luotiin ennustemalli, jolla voidaan arvioida aurinkopaneelien tuottoa eri vuodenaikoina ja erilaisina päivinä jopa tunnin tarkkuudella. Työssä kuvattiin myös lyhyesti, miten tuulivoimalan tuotanto jakautuu vuorokauden eri tunneille, ja miten monta tuotantopäivää vuodessa osui mihinkin tuotantoluokkaan energiantuoton perusteella. Opinnäytetyössä esitettiin myös, miten omakotitalon kulutus ja tuotto kohtaavat, ja mitä haasteita lisääntyvä omatuotanto voi luoda teknisesti niin sähköverkolle kuin itse kotitaloudellekin.

Tuotanto-osuuden perusteella voitiin päätellä, etteivät tuulivoima ja aurinkosähkö ole vielä Suomessa iso osa tuotantoa, mutta ne lisääntyvät vauhdilla. Tuotantoennustemallin perusteella voitiin päätellä, että aurinkosähkön tuntitason ennustaminen on vaikeaa nopeasti muuttuvista aurinko-olosuhteista johtuen. Tuulivoiman tuotantoprofiilista pääteltiin, että tuulivoima ei ole niin herkästi muuttuvaa kuin aurinkosähkö. Aurinko- ja tuulisähkön osalta todettiin, että niiden riippuvuus olosuhteista vaikeuttaa sähköverkon taseen pitämistä kunnossa, sillä näiden tuotantomuotojen tuotanto pitää olla korvattavissa silloin, kun ne eivät tuota.

---

Asiasanat: aurinkoenergia, tuulienergia, sähköntuotanto, aurinkopaneelit, tuulivoimalat

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Electrical Engineering  
Electrical Power Engineering

VESA, JANI:

Production profiles of polar and Wind Power and Prediction of Solar Power

Bachelor's thesis 51 pages

April 2016

---

The purpose of this study was to gather information about renewable energy production in Finland. The aim was to introduce how electricity is produced and used in Finland. The main focus was on wind and solar power. Another aim was to produce a prediction model for solar power in which the user of the model could predict the power production of a solar panel system.

The data were collected from an actual solar panel system and from an actual wind turbine. The data from solar panel was gathered within one year in 2007. The data about the solar panel was used to make a prediction for all hours in all four seasons.

On the basis of the solar panel data was made a model which consists an electricity production prediction for every hour on the scale from one to four. For wind power it was briefly shown how production changes during the day in couple of example days.

The conclusion was that solar power and wind power could be used in Finland but prediction of solar power could be very tricky because effect of the weather on power production is huge. Wind power production showed that wind power is more stable and does not change so radically. Growing amount of these production forms is causing some challenges for electricity grid and it has to be considered in the planning of grids in future.

---

Key words: solar power, wind power, solar panel, wind turbine

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	SÄHKÖNTUOTANTO JA KULUTUS SUOMESSA NYKYPÄIVÄNÄ.....	6
2.1	Sähkönkulutus.....	6
2.2	Sähköntuotanto .....	8
2.3	Tuulivoima Suomessa nykypäivänä .....	10
2.3.1	Syöttötariffi .....	12
2.4	Aurinkosähkö Suomessa nykypäivänä .....	13
3	TUULESTA JA AURINGONPAISTEESTA SÄHKÖKSI.....	14
3.1	Aurinkosähkö.....	14
3.2	Tuulivoima.....	22
4	AURINKOVOIMAN TUOTANTO JA KULUTUS .....	28
4.1	Aurinkosähkön tuotanto.....	28
4.1.1	Huipputuotannot.....	28
4.1.2	Heikoimmat tuotannot.....	31
4.1.3	Tuntitason tuotantoennuste .....	32
4.1.4	Tuotantoennusteen käytännön sovellus .....	37
4.2	Aurinkosähkön vaikutus sähköverkkoon.....	39
4.2.1	Saarekekäyttöiset aurinkopaneelit.....	39
4.2.2	Verkkoon kytketyt aurinkopaneelit.....	39
5	TUULIVOIMAN TUOTANTO JA KULUTUS.....	43
5.1	Tuulivoiman tuotantoprofiili.....	43
5.2	Tuulivoiman vaikutus sähköverkossa .....	47
6	POHDINTA.....	49
	LÄHTEET.....	50

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kuvata tuuli- ja aurinkosähkön tuotantoa Suomessa ja muodostaa mitatun aineiston pohjalta tuntitason ennustemalli aurinkosähkön tuotannolle.

Tietoisuus fossiilisten polttoaineiden tuottamista ja muista saasteista on lisääntynyt maailmassa, mikä on johtanut siihen, että uusiutuvien energiamuotojen määrä on lisääntynyt nopeasti, ja vauhti tulee vain kasvamaan tulevaisuudessa, kun sähköä pyritään tuottamaan mahdollisimman puhtaasti. Sama suuntaus on käynnissä myös Suomessa.

Suomessa uusiutuvien energiamuotojen käyttö on vielä lapsen kengissä, mutta tulevaisuudessa niiden käyttö tulee lisääntymään paljon. Nykyisellään tuulisähkön osuus on Suomen kokonaistuotannosta noin prosentin luokkaa ja aurinkosähkön osuus vielä paljon pienempi ollen vain joitain promilleja.

Uusiutuvista sähköntuotantomuodoista erityisen mielenkiintoisia ovat juuri tuuli- ja aurinkosähkö, sillä niiden avulla kyetään luomaan periaatteessa saasteettomasti sähköä ihmisen mittapuulla loputtomasta energianlähteestä. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan hieman tarkemmin, mikä näiden tuotantomuotojen nykytilanne on Suomessa. Työssä luodaan myös pohjaa aurinkopaneelien tuotannon ennustamiselle, joka ei vielä nykypäivänä ole samalla tavalla arkipäivää, kuin se on jo esimerkiksi tuulivoimaloiden kohdalla. Yhtenä suurena lopputuloksena luodaan ennustemalli, jossa aurinkopaneelin tuottoa voidaan arvioida eritasoisina tunteina. Tuulivoimaloiden kohdalla ei ole tarpeen tehdä ennustemallia, mutta yleiskuvan saamiseksi myös tuulivoimalan tuotantoprofiilia tarkastellaan työssä.

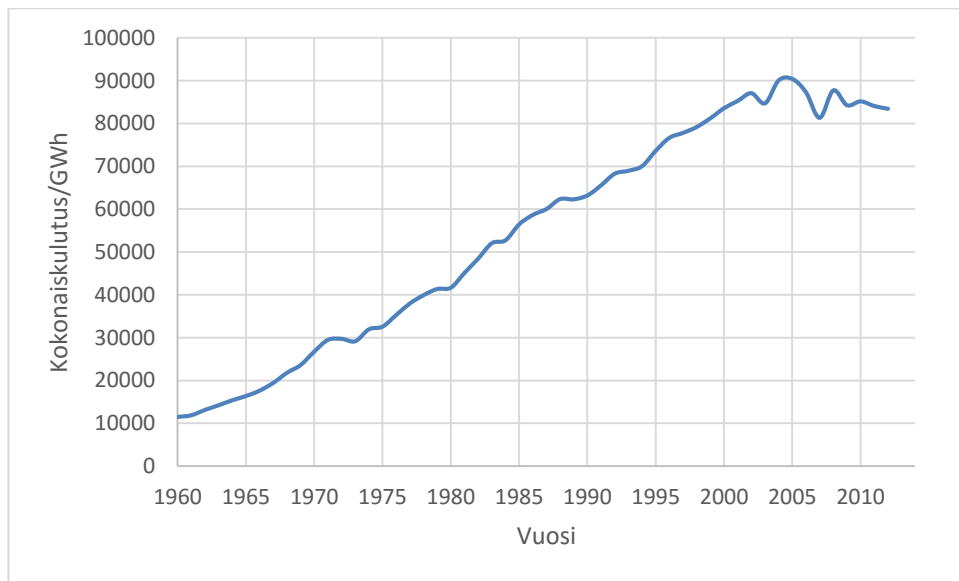
Tuotannon lisäksi tuuli- ja aurinkosähkö luovat haasteita sähköverkolle, joka on perinteisesti rakennettu siten, että sähkö tuotetaan keskitetysti ja jaellaan kuluttajalle. Hajautetun tuotannon lisääntyminen kääntää tämän asetelman pääläelleen, kun sähkön tuottajana voikin olla kuluttaja-asiakas pienen muuntopiirin viimeisessä nurkassa.

## 2 SÄHKÖNTUOTANTO JA KULUTUS SUOMESSA NYKYPÄIVÄNÄ

Tässä luvussa esitellään sähkön tuotantoa ja kulutusta Suomessa nykypäivänä.

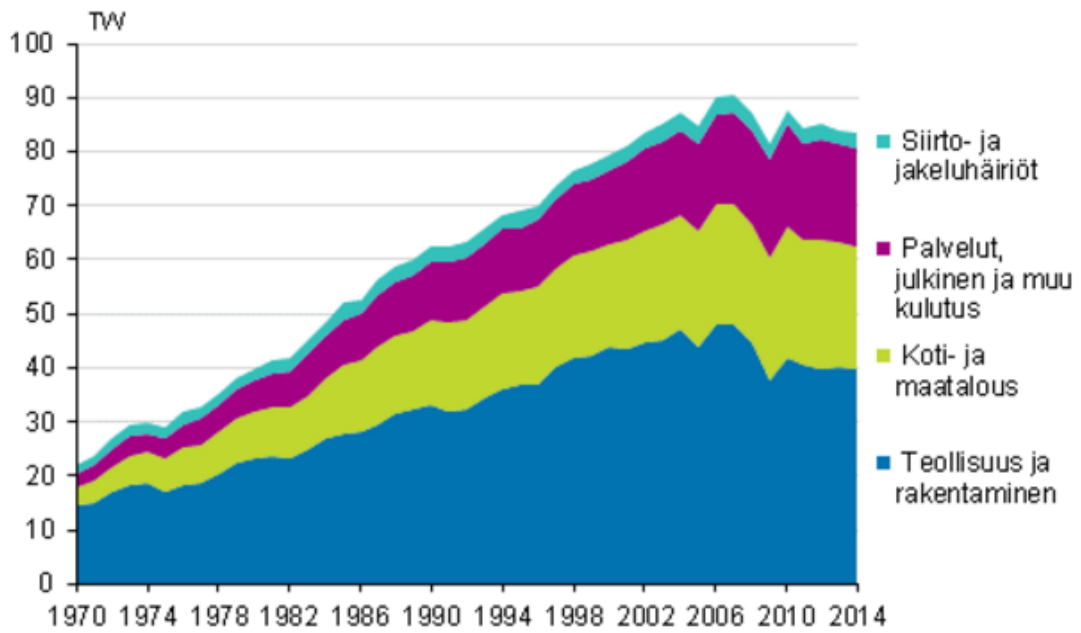
### 2.1 Sähkönkulutus

Sähkönkulutus on ollut Suomessa kasvussa aina 1960-luvun alusta lähtien aina 2000-luvun alkuun asti jolloin kulutus tasaantui (kuvio 1). Viimeisin tilastotieto on vuodelta 2014, jolloin Suomen kokonaiskulutus oli 83,4 TWh.



KUVIO 1. Sähkönkulutus Suomessa 1960-2014

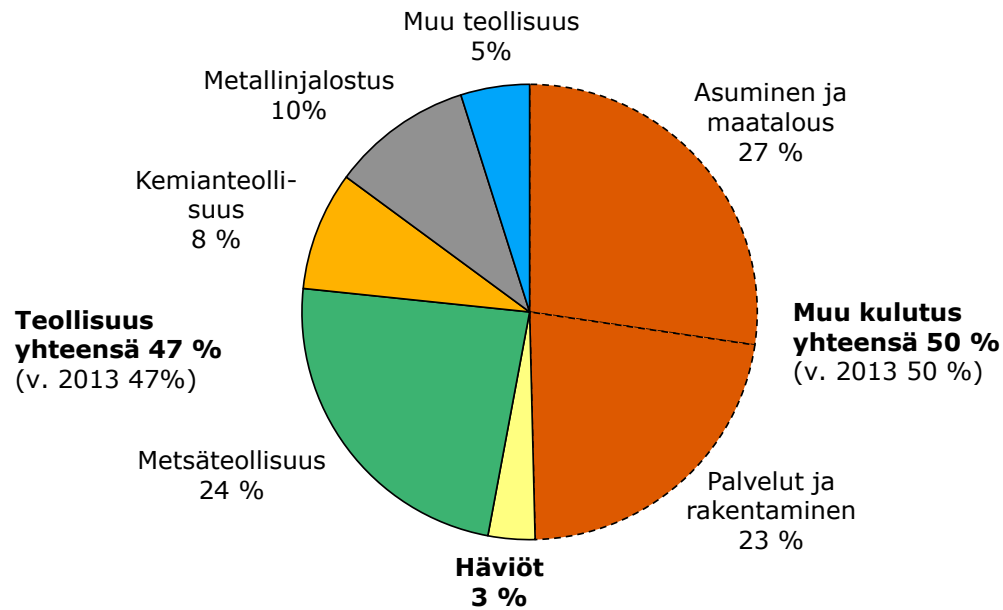
Kulutusta voidaan tarkastella myös sektoreittain, jolloin saadaan parempi kuva siitä, mihin sähkö Suomessa kuluu (kuvio 2).



KUVIO 2. Sähkön kulutus sektoreittain 1970-2014 (Suomen virallinen tilasto 2015)

Tilaston perusteella 1970-luvulta tähän päivään sähkönkuluttajien keskinäiset jakaumat ovat pysyneet melko samoina teollisuutta lukuunottamatta, sillä sen osuus on hieman kasvanut (kuvio 2). Siirto- ja jakeluhäiriöihin jää myös muutaman prosentin osuus kulutuksesta. (Energiavuosi 2014, 5.)

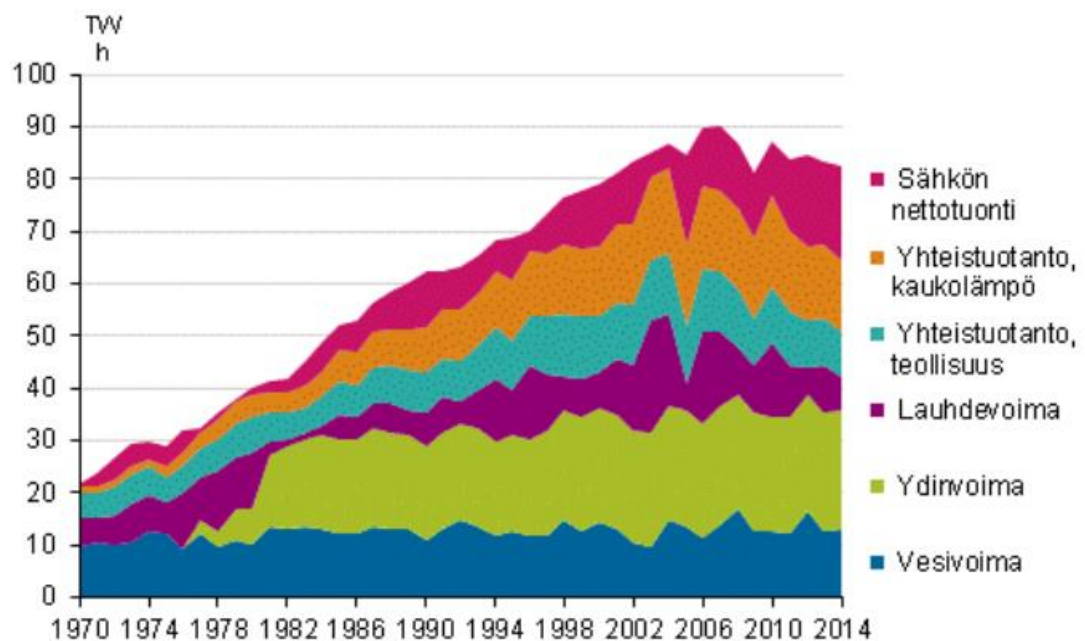
Kun tarkastellaan vuoden 2014 sähkönkäytön jakautumista, tulee selväksi, että teollisuuden osuus on Suomessa huomattavan suuri 47 %. Noin 50 % jakautuu puoliksi asumisen ja maatalouden sekä palveluiden ja rakentamisen kesken. Sähkön siirrosta ja muuntamisesta johtuvat häviöt ovat noin 3 %. (Kuvio 3.)



KUVIO 3. Sähkön käytön jakautuminen 2014 (Energiavuosi 2014, 5)

## 2.2 Sähköntuotanto

Kun tarkastellaan, millä tämä kulutus katetaan, voidaan tilastoista eritellä eri tuotantomuotojen osuudet kokonaistuotannosta (kuvio 4).



KUVIO 4. Sähkön tuotanto Suomessa tuotantomuodoittain 1970-2014 (Energiavuosi 2014, 5)

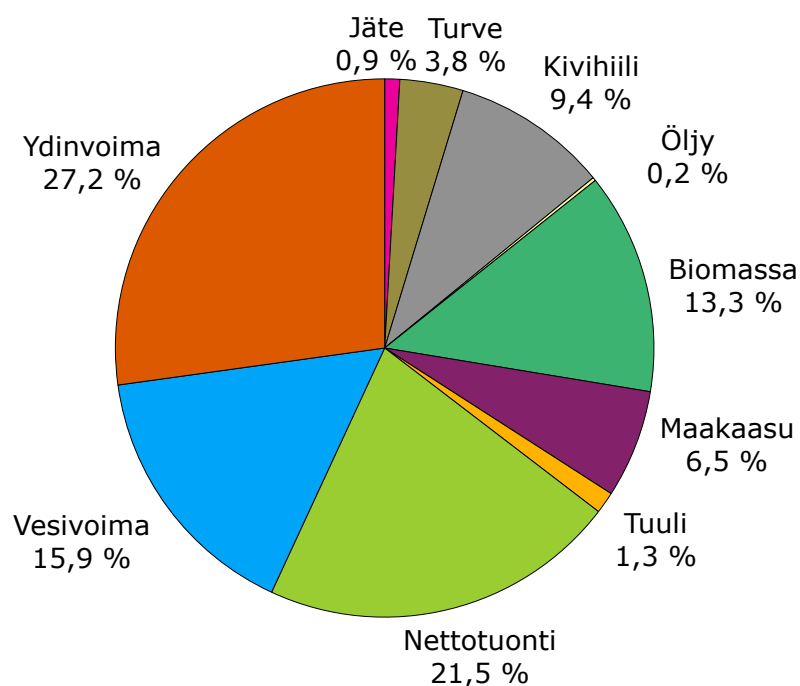
Sähkön tuotanto on vuodesta 1970 tähän päivään niin ikään kulutuksen kasvun perässä ollut nousussa (kuvio 4). Tuotantomuodot ovat pysyneet melko lailla ennallaan, ja

suurimman yksittäisen hyppäyksen on ottanut vain ydinvoima, joka otti 1980-luvun taitteessa melko isonkin osuuden Suomen energiatuotannosta, kun Loviisa 1 ja Loviisa 2 kytkettiin verkkoon vuosina 1977 ja 1980 (Voimalaitoksen toiminta vuonna 2011 2015), sekä Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 vuosina 1978 ja 1980 (OL 1 ja OL 2 2015).

Myös sähkön tuonti on kasvanut hieman, kun siirtoyhteyksiä lähimaihin on avattu. Vuonna 2014 sähkön tuonti on ollut 21,622 TWh, joka on melko merkittävä osuus kokonaiskulutuksesta, joka samana vuonna oli 83,4 TWh. Tuonnista suurin osa tulee Ruotsista (2014 18,1 TWh) (Sähkön tuotanto, tuonti ja vienti 2015).

Ruotsin tuonnin suuri osuus nykyisellään selittyy osin sillä, että yhteispohjoismaisen Nord Pool -sähköpörssin sähkön hinta on halpaa, joten sitä kannattaa tuoda Ruotsista ennemmin kuin tuottaa itse, minkä seurauksena Suomessa on joitain lauhdevoimaloita suljettu (Sähköä riittää jatkossakin 2015).

Tarkasteltaessa tarkemmin viimeisintä tilastotietoa vuodelta 2014 (kuvio KUVIO 5) nähdään, että tuontisähkön osuus on jo 21,5 %, joka on varsin suuri. Tuontisähkön suuri osuus asettaa haasteita poikkeustilanteille. Mikäli siirtoyhteydet ulkomaille vaurioituvat tai syntyy poikkeustilanne, jossa tuontisähköä ulkomailta ei saada, herää kysymys, mistä tarvittava sähkö saadaan, kun omaa kapasiteettia ei ole tarpeeksi nykyisen sähkönkulutuksen ruokkimiseen.



KUVIO 5. Sähkön tuotanto tuotantomuodoittain (Energiavuosi 2014, 9)

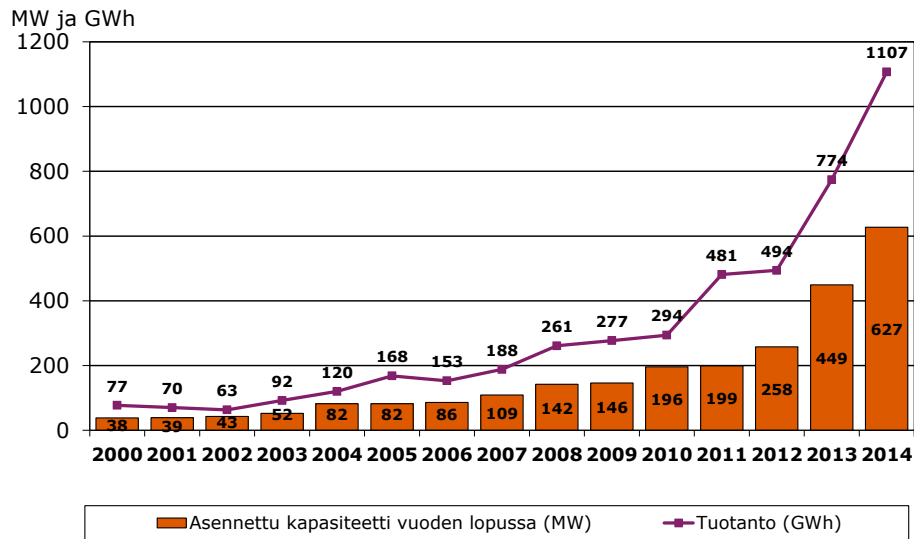
Kuviosta 5 nähdään sekin, että loppu energiantarve katetaan lähinnä ydinvoimalla, vesivoimalla ja yhteistuotannolla, jossa tuotetaan sivuprosessissa sähköä samalla, kun tuotetaan pääprosessissa varsinaista tuotetta. Esimerkiksi kaukolämpövoimalassa päätuote on kaukolämpö, mutta siinä sivussa saadaan tuotettua sähköä. Suomi on yhteistuotannossa maailman ja EU:n edelläkävijöitä. Suomessa yhteistuotannon osuus on lähes kolmannes, kun se EU:ssa yhteensä on vain noin 10 %. (Sähkön ja lämmön yhteistuotanto 2015.)

Tuulivoiman osuus on ollut kasvussa, mutta nykyiselläänkin sen osuus on vasta 1,3 %, joten kokonaistuotannossa se on melko marginaalinen tekijä (kuvio 5).

### **2.3 Tuulivoima Suomessa nykypäivänä**

Suomen ensimmäinen tuulivoimala rakennettiin jo 1986 Inkooseen. Tuolloin voimalan teho oli nykymittapuulla melko vaatimaton 300 kW. Tämän jälkeen voimaloita alettiin rakentaa Suomeen muitakin, mutta kunnolla tuulivoiman rakentaminen alkoi vasta 2000-luvulla. Vuonna 1992 tuulivoimalla on tuotettu 2 GWh, kun se vuonna 2000 oli jo 77 GWh. Tämän jälkeen alkoi todellinen tuotannon kasvu, sillä viidessä vuodessa tuotanto yli tuplaantui ollen vuonna 2005 jo 168 GWh. (Stenberg, 10.)

Tuulivoiman rakennusintoa lisäsi entisestään 2011 voimaan tullut syöttötariffi, jossa tuulivoimalalle annettiin valtion toimesta hintatakuu. Vuonna 2014 tuulivoimaa oli kokonaistuotannosta jo noin 1,3 % eli noin 1,1 TWh (kuvio 6).

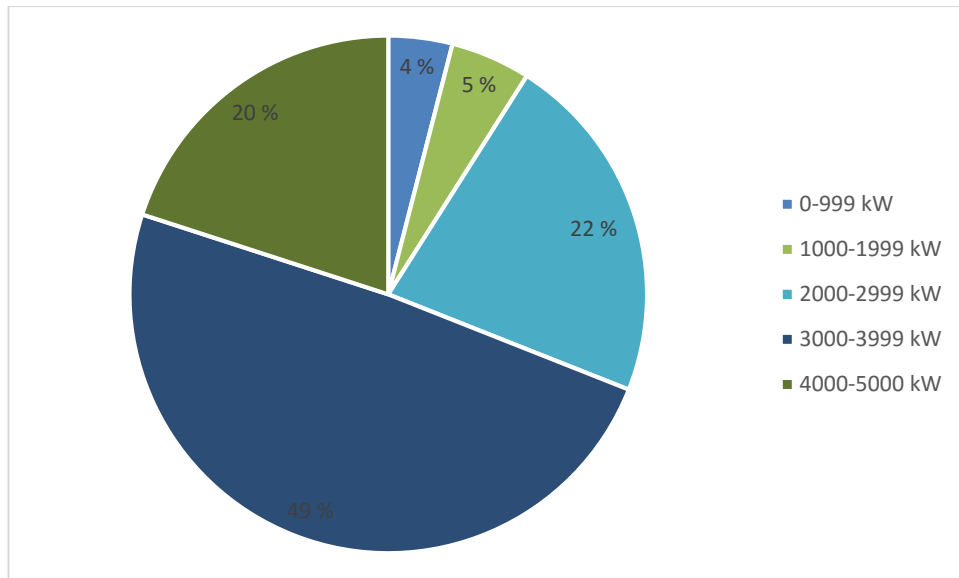


KUVIO 6. Tuulivoiman kapasiteetti ja tuotanto Suomessa vuosina 2000-2014 (Energiavuosi 2014, 15)

Asennettua tuulivoimaa Suomessa oli vuonna 2014 yhteensä 627 MW. Tämä teho on toteutettu 260:llä voimalalla ympäri Suomea (Tietoa tuulivoimasta 2015). Tuulivoiman kasvutahti on kova, sillä vuoden 2015 lopussa päästiin jo yli 1000 MW yhteistehoon (Tiihonen 2016).

Tuulivoimaloiden teho vaihtelee jonkin verran. Vuonna 2014 Suomessa käytössä olleiden turbiineiden keskiteho oli 2,4 MW. Pienimmästä päästä on 75 kW voimala Huittisissa ja suurimmat 5 MW voimalat on vuonna 2014 asennettu Saloon. (VTT Wind energy statistics year report 2014. 2, 8-10.)

Yleisin turbiinikoko Suomessa on 3-4 MW, johon sijoittuu noin puolet kaikista voimaloista (kuvioKUVIO 7) (VTT Wind energy statistics year report 2014, 12).



KUVIO 7. Tuulivoimaloiden koot Suomessa 2014

Alueellisesti tuulivoima sijoittuu tietenkin alueille, joissa tuuliolosuhteet ovat parhaat. Tällaisia alueita ovat meriympäristön lisäksi rannikkoalueet. Lisäksi Lapin tuntureilla puhaltavaa tuulta on alettu hyötykäyttää. Erityisesti länsirannikko on otollista tuulialuetta ja näin Pohjois-Pohjanmaan 29 % ja Satakunnan 17 % osuudet kokonaistuotannosta ovatkin jo miltei puolet kaikesta tuotannosta. Tähän kun lasketaan päälle vielä Lapin 34 %, voidaankin todeta, että muille alueille jää enää melko pieni osuus, vain noin 20 %. Hieman ehkä yllättäenkin Ahvenanmaan 5 % osuus on melko pieni, mutta tämä saattaa johtua siitä, että kulutuskin on Ahvenanmaalla pieni, ja sähkö kannattaa siirtohäviöiden takia lähtökohtaisesti tuottaa siellä, missä sitä käytetään. (VTT Wind energy statistics year report 2014, 19.)

### 2.3.1 Syöttötariffi

Suomessa on otettu käyttöön järjestelmä, jossa tietyille energiantuotantomuodoille on luotu syöttötariffi, jossa valtio maksaa sähkön tuottajalle sähkön markkinahinnan ja tariffin välisen erotuksen. Tuulivoimalle syöttötariffi luotiin vuonna 2011 lailla uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuista (1396/2010).

Vuonna 2010 eduskunta päätti, että tuulivoimalle asetetaan tuotantotuki, jolla kannustetaan uusiutuvien energiamuotojen käyttöä sähköntuotannossa. Laissa sanotaan, että tuotantotuen piiriin pääsee uusi tuulivoimala, joka ei ole jo saanut valtiolta tukea. Lisäksi tuulivoimalan nimellistehon alarajaksi asetettiin 500 kVA. Syöttötariffia pitää

erikseen hakea Energiavirastolta ennen voimalan kaupallista käyttöönottoa. Syöttötariffin tavoitehintaa on päätöksen mukaan 83,5 €/MWh eli sähkön tuottaja saa sähkön tuotantokohteen markkinahinnan kolmen kuukauden keskiarvon ja syöttötariffin tavoitehinnan erotuksen, kuitenkin sillä ehdolla että markkinahinta ei ole alle 30 €/MWh, jolloin tuottajalle maksetaan tavoitehintaa vähennettynä 30 €:lla. Tuulivoimalle on asetettu myös korotettu syöttötariffi 105,30 €/MWh, jota maksetaan 31.12.2015 saakka, kuitenkin enintään kolmelle vuodelle voimalaa kohden. Syöttötariffin piiriin pääseville voimaloille on määritetty ylärajaksi 2500 MVA, eli tariffin piiriin hyväksytään voimaloita niin kauan kunnes tariffin piirissä olevien voimaloiden yhteisteho ylittää 2500 MVA. (Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 1396/2010.)

Kun sähkön markkinahinta pohjoismaisessa sähköpörssi NordPoolissa on 2015 ollut keskimäärin 30 €/MWh, voidaan todeta syöttötariffin olevan erittäin merkittävä tuki tuottajille (NordPool 2015).

## **2.4 Aurinkosähkö Suomessa nykypäivänä**

Aurinkosähkö on vasta alkanut tehdä tuloaan Suomeen. Tuotantomuoto on vielä niin marginaalinen kokonaistuotannon kannalta, että Tilastokeskus ei sitä edes vielä tilastoi. FinSolar-hankkeessa kuitenkin kartoitettiin aurinkosähkön tuotantoa Suomessa ja arvioitiin sen olevan vuonna 2015 noin 20 MWp. Samassa hankkeessa kuitenkin selvitettiin kyselyllä verkkoyhtiöiltä myös se, että verkkoon kytkettyä aurinkosähköä on vain noin 7,9 MW (Sähkön pientuotanto 2015, 5). Kiinteästi asennetulla aurinkopaneelilla voidaan Etelä-Suomessa päästä parhaimmillaan noin 920 h huipunkäyttöaikaan, mutta käytännössä ollaan usein tämän alapuolella (Korpela 2014a, 73). Tällä huipunkäyttäjällä vuosituotannoksi saadaan noin 18400 MWh eli 18,4 GWh, joka olisi vain 0,002 % kokonaistuotannosta. (Aurinkovoimaa Suomessa 2015.)

Kokoluokaltaan aurinkosähkövoimalat ovat Suomessa yleisimmin 5-100 kW, johon välille menee noin 44 % kaikesta asennetusta tehosta (Sähkön pientuotanto 2015, 6). Yli 100 kW tuotantoa on vain noin 10 kohteessa eri puolella Suomea. Vuoden 2015 lopussa suurin on Sanomalehti Kalevan talon katolle asennettu 420 kW yhteisteho. (Aurinkovoimaa Suomessa 2015.)

### 3 TUULESTA JA AURINGONPAISTEESTA SÄHKÖKSI

Aurinko- ja tuulisähkö ovat nykyään muodikkaita ja niistä puhutaan paljon. Kuten muutkin uudet tekniset asiat, myös näiden uusiutuvien energiamuotojen keskustelun kirjo on moninaista osin johtuen siitä, että asioita ei ymmärretä oikein ja siten ei osata puhua niiden oikeilla nimillä. Jotta aurinko- ja tuulisähkön tuotantoon, siirtoon ja kulutukseen saa syvemmän ymmärryksen, on hyvä ymmärtää ilmiöt ja tapahtumat, joilla auringonpaiste tai tuuli muutetaan sähköksi. Tässä luvussa on esitelty asian ymmärtämisen kannalta olennaiset fysikaaliset seikat.

#### 3.1 Aurinkosähkö

Nimensä mukaisesti aurinkosähköä tuotetaan Auringon säteilystä saatavalla energialla. Auringossa on käynnissä jatkuva fuusioreaktio, jossa vetyä muuttuu heliumiksi. Joka sekunti Auringon ytimessä 600 miljoonaa tonnia vetyä muuttuu 596 miljoonaksi tonniksi heliumia. Auringon säteilemän energian kannalta kuitenkin mielenkiintoinen osa tässä yhtälössä on reaktiossa vapautuva teho, jonka suuruus voidaan laskea kaavalla

$$W = mc^2 = 4 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \left(299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 3,60 \cdot 10^{26} \text{ W},$$

jossa  $W$  on fuusioreaktion teho,  $m$  on fuusioreaktiossa tehoksi muuttuva massa ja  $c$  on valonnopeus.

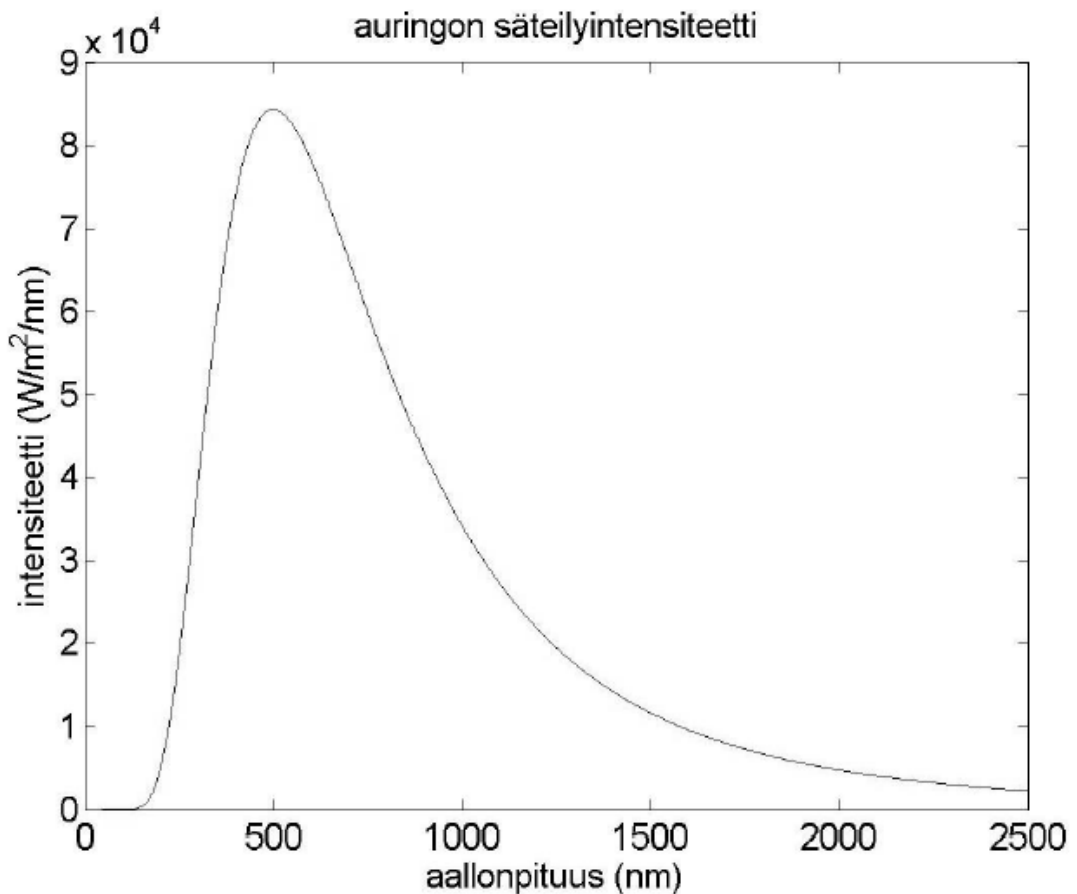
Edellä laskettu valtava teho ei kuitenkaan onneksemme osu sellaisenaan maapallolle, vaan on ainoastaan reaktiossa syntyvä teho. Auringon ytimessä tapahtuva reaktio pitää Auringon ytimen  $15,7 \times 10^6$  celsiusasteessa, mutta pinnassa lämpötila on enää noin 5500 celsiusta (5800 K) (Sun Fact Sheet 2016). Auringon ympärilleen avaruuteen säteilevän energian kannalta mielenkiintoisempi on juuri pinnan lämpötila, joka määrittää sen, paljonko Aurinko energiaa säteilee. (Korpela 2014a, 5-6.)

Auringon säteilyintensiteettiä voidaan riittävällä tarkkuudella mallintaa mustan kappaleen säteilyn tavoin. Musta kappale on kappale, joka absorboi eli imee kaiken siihen kohdistuvan säteilyn kaikilla aallonpituuksilla. Musta kappale on samalla myös ideaalinen säteilyn lähettäjä. Saksalainen fyysikko Planck mallinsi mustan kappaleen säteilyn intensiteettiä aallonpituuden funktiona ja päätyi yhtälöön (kaava 1)

$$g(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)}, \quad (1)$$

jossa  $g$  on säteilyn intensiteetti,  $\lambda$  on säteilyn aallonpituus,  $h$  on Planckin vakio  $6,626 \times 10^{-34}$  Js,  $c$  on valonnopeus,  $k$  on Boltzmannin vakio  $1,381 \times 10^{-23}$  J/K. (Korpela 2014a, 9.)

Kun tiedetään, että Auringon pinnan lämpötila on noin 5800 K, voidaan ylläolevan kaavan perusteella piirtää kuvaaja Auringon säteilyn intensiteetille eri aallonpituuksilla (kuvio 8).



KUVIO 8. Auringon säteilyintensiteetti eri aallonpituuksilla (Korpela 2014a, 10)

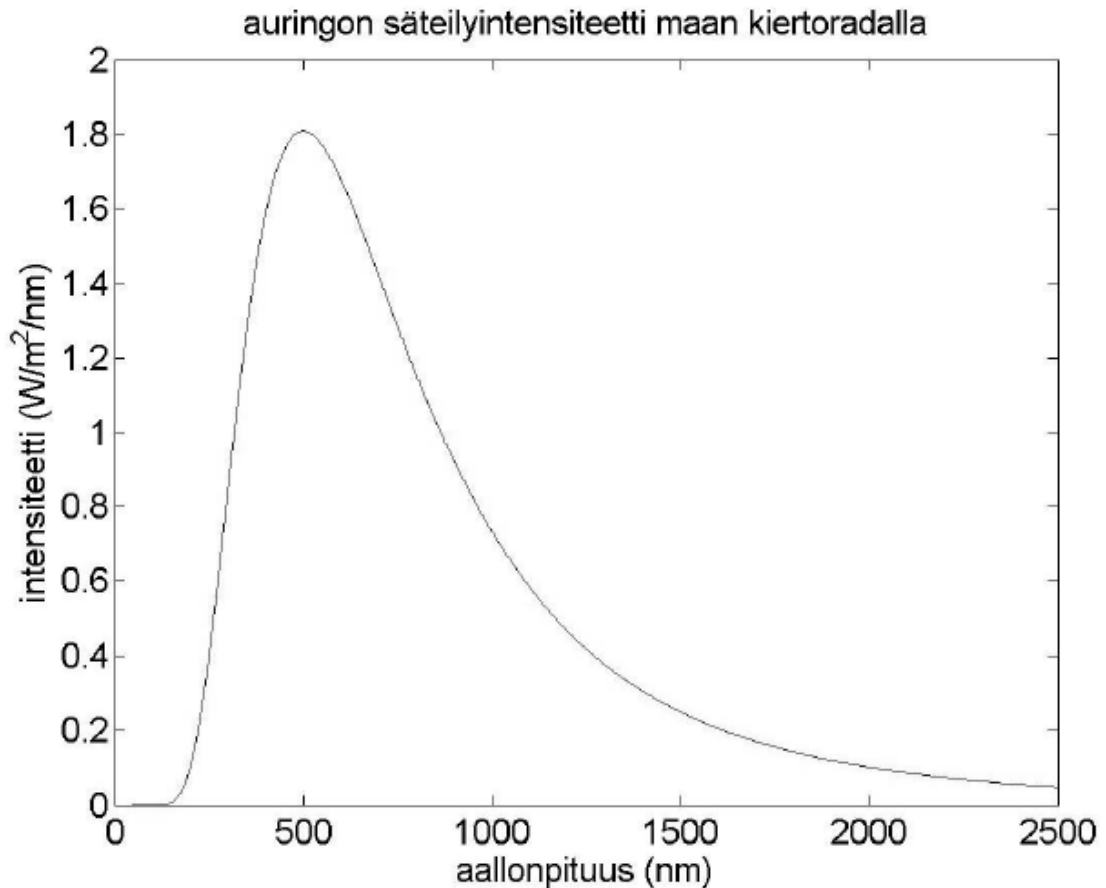
Kuviosta 8 nähdään, että Auringon lähettämä säteily sisältää aallonpituuksia noin 250 nm aina yli 2500 nm asti. Säteilyn suurimmat intensiteettilukemat ovat kuitenkin asteikon alapäässä maksimi-intensiteetin ollessa noin 500 nm aallonpituuden kohdalla, jolloin intensiteetti on jopa  $8,5 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup>.

Tarkasteltavassa tilanteessa ollaan edelleen Auringon pinnan tasolla. Jotta päästään kiinni Maahan kohdistuvaan säteilyyn, tulee vielä ymmärtää, miten säteily vaimenee matkalla Auringosta Maahan. Koska avaruudessa ei ole juurikaan ainetta, joka vaimentaisi Auringon säteilyä, voidaan olettaa, että säteily saavuttaa Maan ilmakehän vaimentumattomana. Auringon ja Maan kokoeron, etäisyyden ja pallomaisen muodon vuoksi kaikki Auringon lähettämä säteily ei osu Maahan, vaan Aurinko säteilee ympäriinsä, ja vain hyvin pieni osa säteilystä osuu Maapalloon. Maahan osuvan säteilyintensiteetin osuus voidaan laskea suoraan kaavalla 2

$$g_m = \frac{A_a}{A_m} g_a, \quad (2)$$

jossa  $g_m$  on maahan osuva intensiteetti,  $g_a$  on Auringon säteilyn kokonaisintensiteetti,  $A_a$  on pinta-ala, miltä Aurinko Maahan säteilee ( $A_a=4\pi r_a^2$ ),  $A_m$  on sellaisen pallon pinta-ala, jonka keskipiste on Auringon ytimessä ja säde Maan etäisyydellä  $d$  Auringosta ( $A_m=4\pi(d+r_a)^2$ ). (Korpela 2014a, 12.)

Edellä esiteltyä kaavaa käyttämällä voidaan piirtää säteilyintensiteetille kuvaaja ilmakehän yläkerroksissa (kuvio 9).



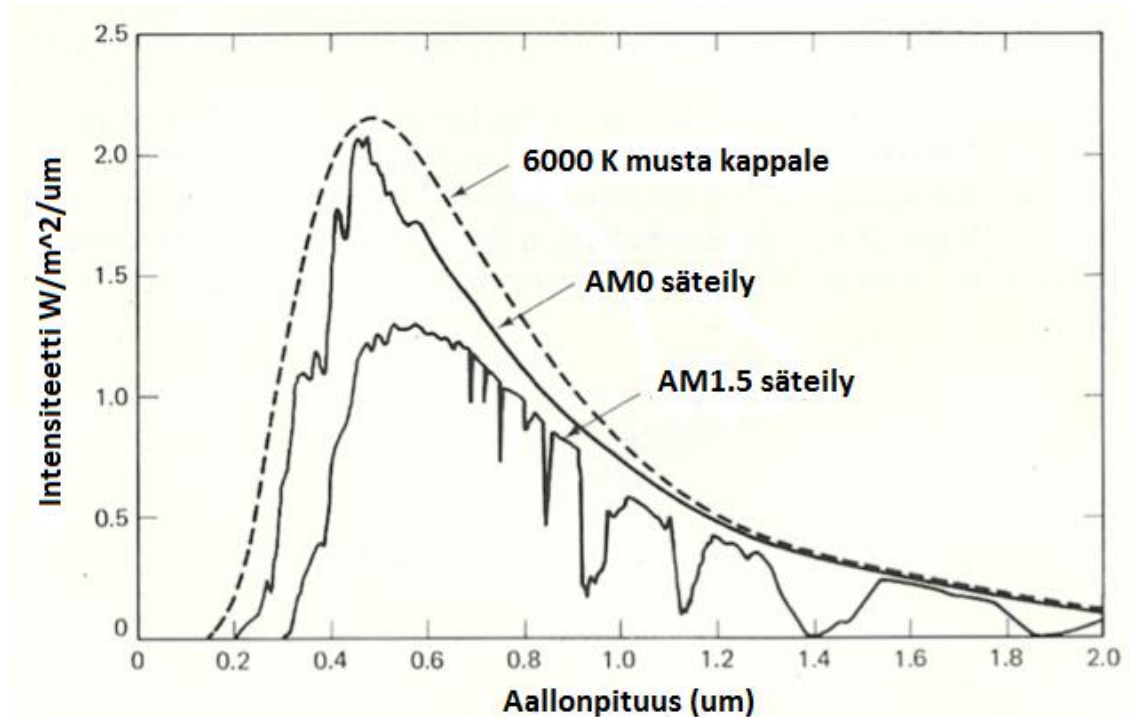
KUVIO 9. Auringon säteilyn intensiteetti ilmakehän yläkerrokseen watteina (Korpela 2014a, 13)

Kuviosta 9 nähdään, että säteilyn intensiteetti on huomattavasti pienempi kuin Auringon pinnalta lähtevän säteilyn intensiteetti johtuen suuresta pinta-alasta, jolle se avaruudessa leviää. Kun kuvion 8 mukaan intensiteetti 500 nm aallonpituudella oli  $8,5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  on se Maapallon saavuttaessaan samalla aallonpituudella enää  $1,8 \text{ W/m}^2$ .

Aurinkosähköstä puhuttaessa käytetään usein termiä aurinkovakio, joka kertoo neliömetrin kokoiselle alueelle osuvan säteilyn tehon. Tämä arvo saadaan integroimalla eli laskemalla kuvion 9 kuvaajan ja akselien väliin jäävän pinta-ala. Kuvion 9 mukaisella aallonpituusjakaumalla aurinkovakion arvoksi tulee noin  $1370 \text{ W/m}^2$ . Nimestään huolimatta aurinkovakio ei ole aina täysin vakio johtuen Maan ja Auringon etäisyyden vaihtelusta ja Auringon pinnan lämpötilan epätasaisuudesta ja siitä, ettei Aurinko ole täydellinen musta kappale, mutta riittävälle tarkkuudelle kuitenkin päästään. Yleisesti aurinkovakion arvona käytetään  $1367 \text{ W/m}^2$ . (Korpela 2014a, 12–13.)

Auringon säteily kulkee avaruudessa noin 149 miljoonaa kilometriä (Maan rata 2016), mutta vaimenemisen kannalta oleellista on vain viimeiset noin 100 km Maan ilmakehässä

(Ilmakehä 2016), jolloin osa säteilystä heijastuu takaisin avaruuteen, ja osa vaimenee kohdatessaan ilmakehän varauksia. Seuraavassa kuvaajassa on esitetty Maan pinnalle osuvaa tehojakaumaa. (Kuvio 10).



KUVIO 10. Maan pinnalle osuva tehojakauma. (Solar Radiation Outside... 2016, muokattu)

Kuviossa 10 katkoviivalla on esitetty Auringon säteilyn intensiteetti 6000 K asteessa mustan kappaleen säteilynä eli ideaalina säteilynä. Keskimmaisella kuvaajalla on esitetty todellinen maahan osuva säteily ilmakehän yläosassa. Tämän säteilyjakauman huomataan olevan hyvin lähellä ideaalia laskennallista säteilyä. Alin kuvaaja esittää maan pinnalle osuvaa säteilyn tehojakaumaa, joka on mallinnettu ilmakehällä 1,5 eli säteily kulkee maan ilmakehässä 1,5 kertaa ilmakehän paksuuden verran. Tällä kuvaajalla säteilyn intensiteetti on osittain huomattavasti pienempi kuin ilmakehän yläosaan osuva säteilyn intensiteetti. Jakauma ei ole myöskään tasainen koko aallonpituusalueella, vaan siinä on syviä kuoppia tietyillä aallonpituuksilla. Suurimmat kuopat selittyvät sillä, että vesi vaimentaa tehokkaasti säteilyä tietyillä aallonpituuksilla, ja vettä on runsaasti ilmakehässä.

Koska ilmakehällä on niin suuri vaikutus vaimenemiseen, täytyy säteilyn kulkema matka ilmakehässä ottaa huomioon. Tätä varten on olemassa suure nimeltä ilmakehän optinen paksuus. Ilmakehän optinen paksuus kertoo suoraan säteilyn kulkeman matkan suhteen ilmakehän paksuuteen.

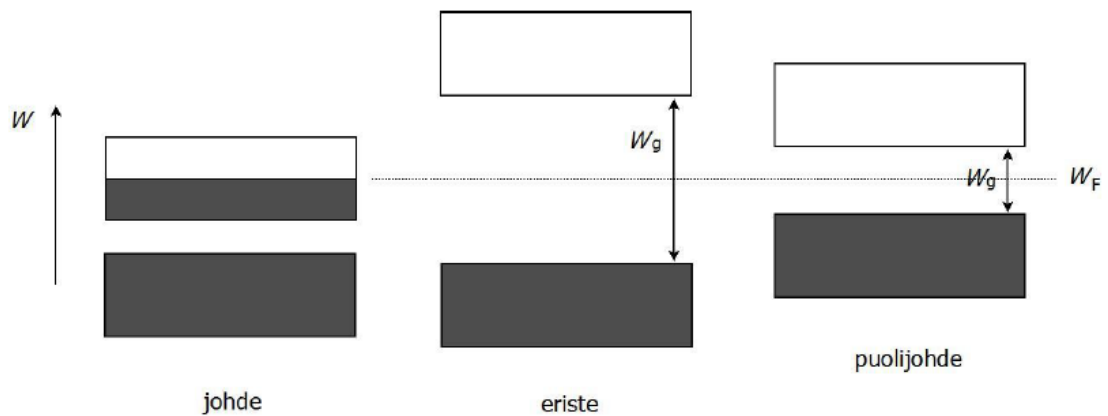
Ilmamassaa merkitään yleisesti AM1, jolloin Aurinko paistaa suoraan ylhäältä ja säteily kulkee ilmakehässä tasan sen paksuuden verran. Aurinkopaneelien standardimittausolosuhde on AM1,5 jolloin säteilyn kulkema matka ilmakehässä on puolet enemmän kuin ilmakehän paksuus. Kulma on tällöin noin 48 astetta pystytasosta eli 42 astetta horisontin yläpuolella. Suomessa arvo on pienimmillään suurinpiirtein AM1.2, mutta talvipäivinä lukema nousee moninkertaiseksi. Jos ilmakehän yläkerroksissa säteilyn teho oli noin  $1367 \text{ W/m}^2$ , voi se AM1 olosuhteissa olla noin  $1000 \text{ W/m}^2$  luokkaa. (Korpela 2014a, 14–18.)

Kun säteily saavuttaa maan tason, voidaan sitä alkaa hyötykäyttää. Säteilyn vaikutuksen ymmärtämisen kannalta on tärkeää ymmärtää hieman eri materiaalien atomitason rakenteista. Atomit koostuvat ytimistä, joissa on protoneita ja neutroneita, sekä ydintä kiertävästä elektroniverhosta. Aurinkopaneelin kannalta kiinnostavaa ovat elektronit ja niiden liike. Elektronit eivät kierrä ydintä sattumanvaraisesti, vaan ne ovat ryhmittyneet energioidensa perusteella eri tasoille. Lähinnä ydintä kiertävällä kehällä elektronien energia on pienin ja vastaavasti kauimmalla kehällä suurin. Elektronit pyrkivät luonnostaan mahdollisimman pieneen energiatasoon, mutta eivät silti aina sijaitse alimmalla elektronikehällä johtuen niin kutsutusta Paulin kielto säännöstä, jonka mukaan samalla energiatilalla voi olla korkeintaan kaksi elektronia, joilla on vastakkaiset spinmomentit. (Korpela 2014a, 23-25.)

Aurinkopaneelin toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa Auringon säteily virittää elektroneita energiavyöltä toiselle. Valosähköisellä ilmiöllä tarkoitetaan sitä, että Auringon säteilyn massattomat hiukkaset eli fotonit saavat energiallaan elektronin siirtymään atomin valenssivyöltä johtavuusvyölle. Eristeissä ja puolijohteissa valenssivyö on täysin miehitetty, eli sillä on täysi määrä elektroneja, eikä se siten voi johtaa sähköä, koska sähköön kulku vaatii aina liikkuvia varauksia. Tässä vaiheessa Auringon säteily astuu kuvaan, sillä mikäli säteilyn fotonin energia on tarpeeksi suuri, se kykenee virittämään valenssivyöllä olevan elektronin johtavuusvyölle, jolloin elektronilla on tarpeeksi energiaa, ja se voi liikkua aineen kiderakenteessa. Samalla viritetyn elektronin paikalle aineen sidosrakenteeseen jää aukko, johon viereisten sidosten elektronit voivat siirtyä ja siten sähkövirta kulkea. (Korpela 2014a, 25-28.)

Sähköön tuottamisen kannalta oleellista on elektronin virittämiseen tarvittavan energian suuruus. Valenssivyöllä oleva elektroni tarvitsee energia-aukon suuruisen ulkopuolisen

energian, jotta se voi siirtyä ylemmälle energiatasolle, johtavuusvyölle. Tämän energia-aukon suuruus on oleellinen siinä, milloin sähköä saadaan tuotettua. Energia-aukon suuruus pitää olla tarpeeksi suuri, koska muutoin auringon säteilyn energialla ei olisi mitään vaikutusta aineen sähkönjohtavuuteen, mutta tarpeeksi pieni, että Auringon säteilyn fotonien energia riittää virittämään elektroneita. Tästä syystä puolijohde ovat aurinkopaneelien toiminnan kannalta tärkeitä. Niiden energia-aukko  $W_g$  on sen suuruinen, että osuessaan fotoni kykenee virittämään elektronin (kuvio 11). (Korpela 2014a, 25-28.)



KUVIO 11. Havainnollistava kuva tarvittavan energian määrästä elektronin viritykseen (Korpela 2014a, 26)

Yleisimmin käytössä olevan puolijohdeen Piin energia-aukko on 1.09 eV. Tästä voidaan laskea maksimiaallonpituus, jolla auringon säteilyllä on riittävästi energiaa virittämään elektroni tuon aukon yli. Säteilyn energia riippuu aallonpituudesta ja suurin aallonpituus, jolla on tarvittava energia elektronin virittämiseen, voidaan laskea kaavalla

$$\lambda \leq \frac{hc}{W_g}, \quad (3)$$

jossa  $\lambda$  on aallonpituus,  $h$  on Planckin vakio  $6,626 \times 10^{-34}$  Js,  $c$  on valonnopeus ja  $W_g$  on energia-aukon suuruus (Korpela 2014a, 29).

$$\lambda \leq \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 1239,8 \text{ nm} \approx 1240 \text{ nm}$$

Laskun perusteella alle 1240 nm aallonpituudella tuleva säteily kykenee virittämään piin valenssivyöllä olevan elektronin.

Elektronin virittäminen ei kuitenkaan yksistään riitä. Puhtaassa piissä fotonien energia kyllä riittää virittämään elektronin valenssivyöltä johtavuusvyölle, mutta koska piatomien ulompien kuorien kaikki neljä elektronia osallistuvat aineen kiderakenteen sidoksiin, ei elektronilla ole mahdollisuutta liikkua kiderakenteessa, vaan elektroni vain palaa takaisin alemmalle energiavyölle luovuttaen energiansa lämpönä. Tätä ilmiötä kutsutaan rekombinaatioksi. (Korpela 2014a, 30.)

Piissä tapahtuu elektronien virittymistä jo huoneen lämmössä, ja sen sähkönjohtavuus kasvaa. Jotta toiminta aurinkopaneelina olisi mahdollista, täytyy puolijohdetta seostaa. Piitä voidaan seostaa kahdella tavalla. Kun piitä seostetaan esimerkiksi fosforilla, jolla on uloimmalla kuorella viisi elektronia piin neljää vastaavasti, jää atomien liittyessä yksi ylimääräinen elektroni. Näin seostamalla on saatu aikaan niin kutsuttu n-tyyppin puolijohde. (Korpela 2014a, 31.)

Vastaavasti p-tyyppin puolijohde saadaan seostamalla piitä aineen kanssa, jolla on ulkokuorella yksi elektroni vähemmän, jolloin aineen sidosrakenteeseen jää tyhjä aukko, johon taas vapaana liikkuvat elektronit voivat siirtyä. Yleinen p-tyyppin puolijohde seostamiseen käytetty aine on boori, jolla on kolme elektronia uloimmalla kuorella piin neljää vastaan. (Korpela 2014a, 31.)

Aiemman lisäksi tarvitaan vielä yksi tekijä, joka selittää aurinkopaneelin toimintaa. Toimiakseen se tarvitsee rakenteen, joka ehkäisee fotonien virittämien johtavuuselektronien rekombinoitumista. Tällainen voima saadaan aikaan pn-liitoksella, jossa p- ja n-tyyppin puolijohdeet liitetään toisiinsa. Kun nämä kahden eri tyyppin puolijohdeet yhdistetään, alkaa niiden liitoksessa rekombinaatio, jossa n-tyyppin aineen ylimääräiset elektronit täyttävät p-tyyppin puolijohdeen tyhjiä aukkoja ja synnyttävät tyhjennysalueen, jossa ei ole enää ylimääräisiä elektroneja eikä aukkoja. Koska n-tyyppin puolijohde puolelta on lähtenyt elektroneja p-tyyppin aukkoihin, tulee siitä positiivisesti varautunut ja vastaavasti p-tyyppin puoli tyhjennysalueesta on vastaanottanut elektroneja, joten siitä tulee negatiivisesti varautunut. Tällöin syntyvän varausten eron vuoksi syntyy sähkökenttä, joka on n-puolelta p-puolelle. Syntyneen sähkökentän ansiosta aiemman mukaisesti fotonien virittämät elektronit eivät rekombinoidu takaisin sidoksiin, vaan siirtyvät sähkökentän voimasta ja luovat sähkövirran tyhjennysalueen eri päiden välille ulkoisen piirin kautta. (Korpela 2014a, 38.)

### 3.2 Tuulivoima

Kuten aurinkosähkö, myös tuulisähkö tarvitsee jonkin ulkoisen tekijän, joka muutetaan sähköksi. Tuulisähkössä tämä tekijä on nimensä mukaisesti tuuli. Jotta voi ymmärtää tuulivoimalan tuotantoa, on hyvä ymmärtää hieman, mitä tuuli on ja mistä sitä syntyy.

Tuuli on ilmamolekyylien liikettä maapallon ilmakehässä. On hyvä kuitenkin huomata, että maapallo pyörii, joten maapallon pinnalla voi huomata vain tuulen, joka poikkeaa maan pyörimissunnasta. (Korpela 2014b, 3.)

Ilmamolekyylien liikkeeseen vaikuttaa ilmanpaine. Pystysuuntainen ilmanpaine-ero johtuu siitä, että maan vetovoima vetää ilmamolekyylejä puoleensa, jolloin merenpinnan tasolla on suurin ilmanpaine, ja vastaavasti mitä ylempäs mennään, sitä pienemmäksi ilmanpaine käy. Tuulen syntymisen ja tuulivoiman kannalta kiinnostavampia ovat kuitenkin vaakasuuntaiset ilmanpaine-erot, jotka saavat ilmamolekyylit liikkumaan vaakasuunnassa ja synnyttämään tuulen, jota voidaan tuulivoimalalla muuttaa sähköksi. Ilmanpaineen eroon vaikuttavat lämpötila, gravitaatio ja ilman molekyylien massa. Ilmamolekyylien massa voi muuttua esimerkiksi kosteuden muuttuessa, koska vesi lasketaan yhdeksi ilmamolekyyleistä. Ilmanpaineeseen lämpötila vaikuttaa siten, että lämpötilan kasvaessa ilmamolekyylien välinen etäisyys kasvaa, minkä vuoksi samalla alueella on vähemmän ilmamolekyylejä, joten myös gravitaatiolla on vähemmän vaikutusta ilmaan, jolloin ilmanpaine laskee. Samoin tapahtuu myös ilman kostuessa, sillä vesimolekyylin massa on pienempi kuin hapen ja typen, joita kosteus eli vesimolekyylit syrjäyttävät. (Korpela 2014b, 4-6.)

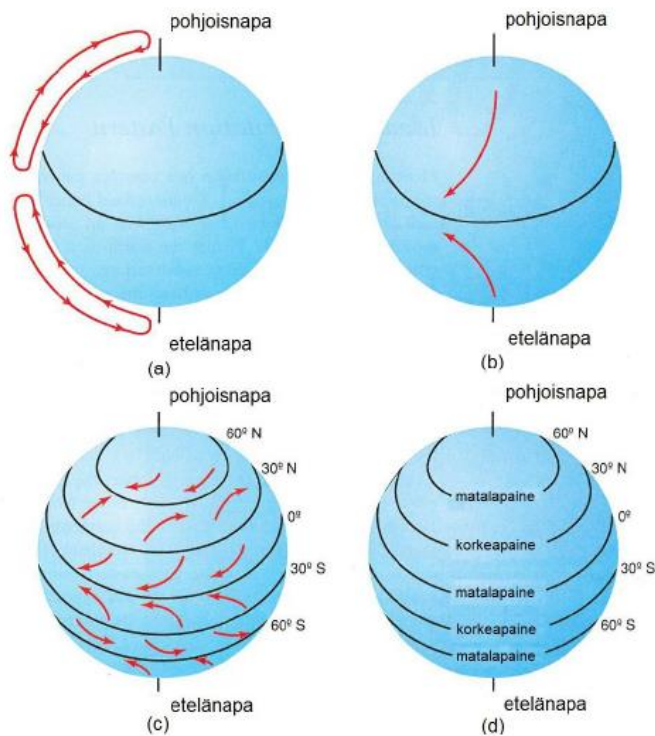
Sääennustekartoissa näkyvät käyrät eli isobarit kertovat merenpinnan tasolla olevista paine-eroista siten, että mitä lähempänä käyrät ovat toisiaan, sitä suurempi on paineen muutos eli painegradientti liikuttaessa vaakasuunnassa. Suuri painegradientti tarkoittaa sitä, että ilmamolekyylit suuntaavat vauhdilla pienemmän paineen suuntaan, jolloin syntyy tuulta. Kun ilma on lähtenyt painegradientin voimasta liikkeelle, siihen vaikuttavat myös coriolis-voima, keskihakuvoima, kitka ja gravitaatio. (Korpela 2014b, 8-9.)

Keskihakuvoima on voima, joka vaikuttaa kaarevalla radalla olevaan kappaleeseen pitäen sen kaarevalla radalla. Ilmavirtaukset ovat harvoin suoria, joten tarvitaan jokin voima pitämään ilmamolekyylit kaarevalla radalla. Ilmavirtausten tapauksessa kyse on muiden voimien epätasapainosta. Coriolis-voima ei ole varsinainen ilmavirtaan vaikuttava voima, vaan kuvaa ainoastaan havainnointieroavaisuutta riippuen siitä, onko havainnoija maapallon pinnalla, vai katseleeko hän maapalloa ulkopuolelta siten, ettei itse pyöri maapallon pyörimisliikkeen mukana. Tämä tarkoittaa sitä, että päiväntasaajalta ammuttu keihäs ei laskeudukaan samalle pituuspiirille pohjoisessa vaan maapallo on ehtinyt pyöriä alta pois ja pituuspiiri vaihtua. Sama ilmiö koskee tuulta, ja sen seurauksena ilmavirtaus kääntyy pohjoisella pallonpuoliskolla kulkusuunnassaan oikealle ja eteläisellä vasemmalle. Kitka puolestaan vaikuttaa tuuleen siten, että lähellä maanpintaa kulkevaan tuuleen tulee esteiden johdosta pyörteitä, jotka aiheuttavat pyörreviskositeettia eli kitkaa tuulen ja maanpinnan välille, jolloin tuulen nopeus hidastuu. Täten yleensä maanpintaa lähempänä ollaan hitaammassa tuulennopeuksissa kuin korkeammalla. (Korpela 2014b, 10-15.)

Geostrofiseksi tuuleksi kutsutaan tuulta, joka syntyy, kun paine-erot saavat aikaan ilmassa liikkuksen kohti pienempää painetta. Kun ilman nopeus kasvaa, alkaa coriolisvoima vaikuttaa siihen ja kääntää virtausta. Kun painegradientit ovat suoria ja coriolisvoima kasvaa yhtä suureksi paine-eron aiheuttavan voiman kanssa, alkaa virtaus kulkea pitkin isobaria. Kun isobari ei ole suora, eivät ilmavirtaukseen vaikuttavat voimat ole enää välttämättä tasapainossa, jolloin ilmavirtaus alkaa kulkea kaarevaa reittiä, jolloin puhutaan gradienttituulesta. Gradienttituulen käsitteen avulla voidaan selvittää, mihin suuntaan virtaukset matala- tai korkeapaineen keskusta kiertävät. Kun saavutaan tarpeeksi lähelle maanpintaa, ilmavirtaukseen vaikuttaa vielä kitkavoima, joka on virtaukselle vastakkainen. Kitkavoiman vaikutuksesta tuuli ei kulje pitkin isobareja vaan kaareutuu niistä. (Korpela 2014b, 18-20).

Maapalloa tarkasteltaessa nähdään, että aurinko lämmittää voimakkaimmin päiväntasaajan aluetta ja vähiten napa-alueita, jolloin päiväntasaajan alueen ilma on harvempaa, jolloin se kevyenä nousee ylös ja vastaavasti napa-alueilla kylmä, tiheä ja siten raskas ilma painuu alas. Tämän seurauksena päiväntasaajalle syntyy matalapaine ja napa-alueille korkea-paine, ja ilma alkaa maan pinnalla liikkua kohti päiväntasaajaa, samalla ylempänä ilmakehässä syntyy vastakkainen ilmavirtaus. (Kuvio 12a). Coriolisvoimasta johtuen navoilta päiväntasaajaa kohti kulkeva virtaus kaareutuu kuvion 12b

mukaisesti. Käytännössä maapallon pyörimissuunnalle vastakkaiset tuulet jarruttaisivat pyörimistä, joten oikeasti tilanne on kuvion 12c mukainen, jolloin maapallolle muodostuu viisi vyötä, jotka jakavat virtaukset tasan siten, että osa on maapallon pyörimissuunnan suuntainen ja osa sille vastakkainen, jolloin ollaan tasapainotilassa. Aiemman kaltaiset tuulet synnyttävät kuvion 12d mukaiset paine-erot maapallolle.



KUVIO 12. Tuulen käyttäytyminen maapallolla (Korpela 2014b, 25)

Kun kuvion 12d mukaiset painevyöt korjataan maapallon mantereiden ja merien aiheuttamalla lämpötila-eroilla, syntyy enemmänkin eri paine-alueita kuin suoria vyöitä. (Korpela 2014b, 23-25.)

Tuulivoimalassa tuulen eli ilmamolekyylien liike-energiaa pyritään muuttamaan mahdollisimman kustannustehokkaasti sähköenergiaksi. Ilmavirtauksen teho voidaan laskea kaavalla

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_0^3, \quad (4)$$

jossa  $\rho$  on ilman tiheys,  $A$  on ilmavirtausta vastaan kohti pinta-ala ja  $v$  on ilmavirtauksen nopeus. Ilmavirtauksen koko tehoa ei kuitenkaan suoraan saada muutettua roottorilla

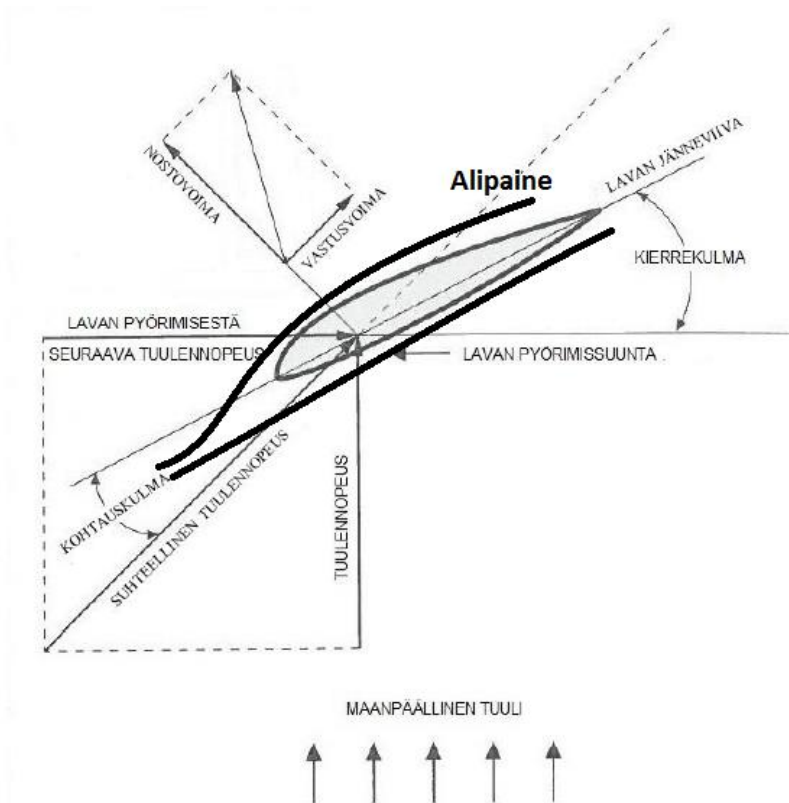
sähköiseksi tehoksi, koska täydellisen tuulivoimalan roottorin pitäisi sisältää ääretön määrä lapoja, lapojen tulisi olla kitkattomia, sen pitäisi olla massaton, tuulen pitäisi vaikuttaa lapaan vain nostavalla voimalla, ja ilmavirta ei saisi aiheuttaa pyörteitä lapojen taakse. Tuuliturpiinin maksimiteho voidaan laskea Betzin lailla, jolloin saadaan tulokseksi, että ideaalisessa turpiinissa tuulen tehosta saadaan käyttöön vain noin 59,3 %. On hyvä kuitenkin huomata, että tämäkin on vain teoreettinen maksimiarvo ja käytännössä jäädyään tämänkin alle, 40 % on jo erittäin hyvä hyötysuhde tuulivoimalalle. (Korpela 2014b, 39, 69). Myöskään tuulen nopeus ei ole vakio vaan muuttuu ajan suhteen. Kaavasta 4 nähdään, että teho muuttuu suhteessa nopeuden kuutioon, joten pienikin tuulennopeuden muutos vaikuttaa saatuun tehoon suuresti. Yleisesti käytetäänkin tuulisuuden arviointiin Weibull-jakaumaa, jolla tutkitaan tuulisuuden eri arvojen todennäköisyyksiä, ja siten kyetään arvioimaan tuulen ja tuulivoimalan tehoa tietyllä paikalla. Tuoton arviointiin voidaan käyttää myös tehokäyrämenetelmää, jolloin pitää tuntea niin tuulivoimalan paikan tuulisuusjakauma, kuin tuulivoimalan tehontuotto eri tuulen nopeuksilla. Tällöin näitä tietoja yhdistämällä saadaan laskettua tehontuotto. Kuten aurinkovoimassakin myös tuulivoimassa huipunkäyttöaika kuvaa sitä aikaa, jolloin voimala on toiminut nimellistehollaan. Tuulivoimalle Suomessa saadaan noin 2400 tunnin huipunkäyttöaikoja, mutta hyvänä tuulivuonna hyvällä paikalla voidaan päästä myös yli 3000 tunnin. (Korpela 2014b, 72, 75.)

Tuulivoimaloita on monenlaisia, mutta yleisin on vaaka-akselinen kolmilapainen voimala. Lisäksi on olemassa pysty-akselisia voimaloita, kuten Savonius-, Windside- ja Darrieusroottorilliset. Koska vaaka-akselinen malli on nykyään yleisin, keskitytään tässä työssä hieman tarkemmin sen toimintaan.

Vaaka-akselisia voimaloita on niin ikään montaa eri mallia. Osassa voimaloista on vaihteisto, jolla hidas pyörimisnopeus saadaan muutettua generaattorille sopivaksi, ja täten saadaan generaattorin hyötysuhde paremmaksi. Vaihteisto on usein kuitenkin vikaherkkä komponentti, jonka korjaaminen on kallista, joten nykyään ovat paljon yleistyneet myös suoravetoiset voimalat, joissa ei ole vaihteistoa vaan roottori pyörittää suoraan generaattoria. Vakionopeuksisissa tuulivoimaloissa käytetään vaihteistoja, koska generaattorina toimivalle epätahtigenaattorille pitää saada koko ajan vakionopeuksinen pyörimisnopeus, joka on tavallisesti minimissään noin 1000-1500 kierrosta minuutissa, jotta hyötysuhde olisi kannattava. Vaihteita käytetään myös nykyisin yleisissä rajoitetusti muuttuvanopeuksisissa DFIG-voimaloissa, jossa generaattorin jättämää kasvattamalla

syntyvä teho siirretään verkkoon suuntaajan kautta. Vaihteettomat eli niin kutsutut suoravetoiset tuulivoimalat ovat kasvattaneet jonkin verran suosiotaan, koska niillä päästään vaihteiston vikaherkkyydestä eroon. Nimensä mukaisesti tuulivoimalan lavat pyörittävät suoraan generaattoria, jolloin sen pitää kyetä toimimaan hyvällä hyötysuhteella alhaisillakin pyörimisnopeuksilla, joka tarkoittaa, että generaattorin napoja on oltava suurempi määrä kuin vaihteellisessa. Suoravetoisissa tuulivoimaloissa käytetään usein kestmagnetoituja tahtigeneraattoreita, jotka pitää useimmiten olla erityisesti tuulivoimakäyttöön suunniteltuja, joka nostaa niiden hintaa. (Korpela 2014b, 64-65.)

Jotta roottori ja sitä myöden generaattori alkaa pyöriä, pitää tuulen sisältämä teho saada muutettua jollain tavalla lapojen pyörimisliikkeeksi ja sitä myöden momentiksi. Tämä saadaan aikaan roottorin lavoilla siten, että tuulen lapoihin aiheuttama nostovoima pyritään saamaan mahdollisimman suureksi ja lapoja taaksepäin työntävä voima eli lapojen vastusvoima mahdollisimman pieneksi. Jotta ehdot toteutuisivat, lapojen muotoilu on tehty hieman pisaraa tai lentokoneen siiven poikkileikkausta muistuttaviksi. Tällöin lapaa kohtaava tuuli aiheuttaa sen yläpuolelle alipaineen, joka vetää lapaa, ja luo lavan alapuolelle ylipaineen, joka työntää lapaa eteenpäin, jolloin lapa pyörii. Lapa ei kuitenkaan kohtaa tuulta suoraan, vaan sen omasta pyörimisliikkeestä johtuen kohtauskulma poikkeaa tuulen suunnasta, jolloin puhutaan suhteellisesta tuulesta. Ilmiö on sama kuin polkupyörällä sivutuuleen poljettaessa, jolloin tuntuu, kuin tuuli puhaltaisi etuviistosta. (Korpela 2014b, 47.)



KUVIO 13. Lavan toiminta (Korpela 2014b, 49, muokattu)

Kuviossa 13 on esitelty tuulivoimalan lavan dynamiikkaa. Kuten aiemmin mainittiin, suhteellinen tuulennopeus on se, joka vaikuttaa tuulen lapaan aiheuttamaan nostovoimaan. Kuviossa 13 paksummalla on esitetty yhden mahdollisen kohtauskulman tuulen reitti lavan ympäri, jolloin lavan yläpuolella menevä virtaus aiheuttaa lavan yläpuolelle alipaineen. Pitää kuitenkin huomata, että alipaine syntyy vain, kun virtaus pysyy lavassa kiinni eli seuraa sen profiilia mahdollisimman pitkälle lavan etureunasta takareunaan. Kohtauskulman kasvu suurentaa alipainetta ja samalla myös lapaa liikuttavaa voimaa. Mikäli kohtauskulma kuitenkin kasvaa liian suureksi, virtaus irtoaa lavan yläreunalta, ja aiheuttaa sakkautumisen.

Tuulivoimalassa sakkautus ei kuitenkaan aina ole huono asia, vaan sitä voidaan käyttää hyödyksi. Voimalan lapa voidaan suunnitella siten, että se joko kokonaan tai osittain sakkautuu tietyllä tuulennopeudella, jolloin esimerkiksi myrskytuulilla voimala saadaan suojattua liian kovilta pyörimisnopeuksilta ja sitä myöden rikkoontumiselta. Tuulivoimaloissa voidaan käyttää myös muuttuvakulmaisista lapoja (lapakulman säätö), jolloin lapoja saadaan käännettyä suhteessa tuuleen ja täten sakkautuspistettä säädettyä. (Korpela 2014b, 49-51.)

## 4 AURINKOVOIMAN TUOTANTO JA KULUTUS

Aurinkosähkön tuotantoa ja kulutusta on tulevaisuudessa kyettävä tarkastelemaan ja ennustamaan hyvinkin tarkasti.

### 4.1 Aurinkosähkön tuotanto

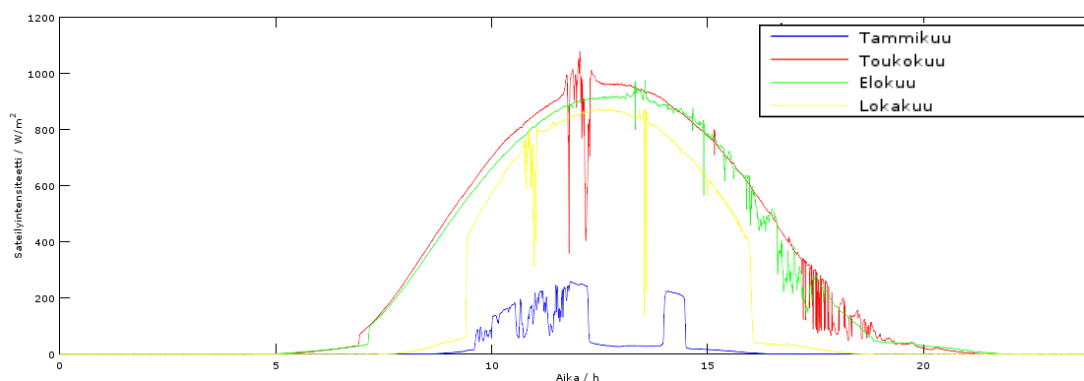
Aurinkosähkön tuotanto on suuresti riippuvaista auringon säteilyn intensiteetistä. Tutkimusaineistona tässä työssä on käytetty Tampereen Teknillisen Yliopiston katolla sijaitsevaa 125 W aurinkopaneelia. Aineisto on kerätty vuoden 2007 aikana vuoden ja vuorokauden ympäri 20 sekunnin välein. Oleellisia arvoja tässä aurinkopaneelin tuotantoprofiilin koostamiseksi ovat säteilyintensiteetti, paneelin huipputeho sekä aika.

Jotta saadaan selville, millaisella profiililla mihinkin aikaan vuodesta aurinkopaneeli sähköä tuottaa, pitää tätä tutkia eri vuodenaikoina. Ilmatieteen laitos käyttää vuodenaikojen jaotteluun kolmen kuukauden jaksoja, joissa talvi on jouluihelmikuu, kevät on maaliskuu-toukokuu, kesä on kesä-elokuu ja syksy syys-marraskuu. Myös tässä työssä käytetään samaa jaottelua, ja valitaan jokaiselle neljälle vuodenaikalle yksi tutkittava kuukausi, joka on keskimääräinen kolmen kuukauden jaksosta, jolloin saadaan riittävällä tarkkuudella kartoitettua koko vuoden vaihtelut tuotannon profiilissa. Talvikuukausista valikoitiin tammikuu, kevätkuukausista maaliskuu jouduttiin vaihtamaan vähäisen datan vuoksi huhtikuuhun, kesäkuukausista niin ikään vähäisen datan vuoksi heinäkuu vaihdettiin elokuuhun, syyskuukausista valittiin keskimääräinen lokakuu.

#### 4.1.1 Huipputuotannot

Suomessa säteilyn intensiteetti vaihtelee voimakkaasti vuodenaikan mukaan. Säteilyn intensiteettiin vaikuttaa myös sää, sillä pilvisenä päivänä auringon säteilyn intensiteetti jää huomattavasti aurinkoisena päivänä vastaavasta. Suomessa voidaan hyvänä aurinkoisena kesäpäivänä päästä lähelle  $1000 \text{ W/m}^2$  lukemaa, mutta suurimman osan vuodesta ollaan tämän alla. Säteilyn intensiteettiin Suomessa vaikuttaa suuresti myös aiemmin käsitelty AM-luku. Kuten aiemmin mainittiin, Suomessa voidaan parhaimmillaan päästä lukemaan AM1.2, joten aurinko ei koskaan paista suoraan ylhäältä paneeliin, vaan kulkee aina ilmakehässä pidemmän matkan, mikä vaimentaa säteilyä.

Auringon säteilyn intensiteettiä on mitattu paneelin yhteydessä ja saaduista mittaustuloksista on koostettu kuvion 14 mukaiset kuvaajat, joissa on esitetty intensiteetin arvoja eri vuodenaikoina vuorokauden jokaisena hetkenä.



KUVIO 14. Säteilyn intensiteetti mittauskohteessa eri vuodenaikoina vuorokauden ajalta

Kuviossa 14 on esitetty neljän päivän säteilyintensiteetin arvot. Päivät ovat määrättyneet tuotetun energian perusteella siten, että nämä päivät ovat olleet vuodenaikansa parhaita päiviä energiantuotannon kannalta. Taulukossa 1 on esitetty kuvion 14 koostamisessa käytettyjen päivien päivämäärät, sekä tuotettu energia asennettua tehoa kohden.

TAULUKKO 1. Päivien energiantuotanto

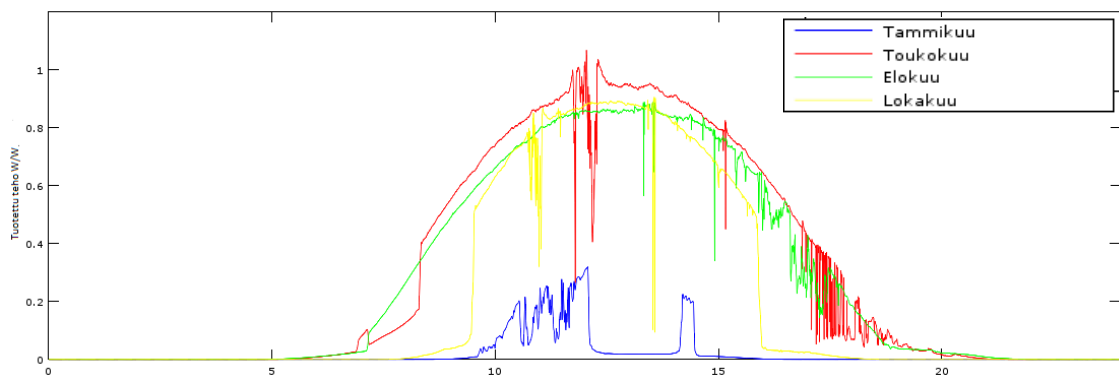
Päivämäärä	Tuotettu energia Wh/W
28.1	0,48
27.4	7,18
8.8	6,74
17.10	4,91

Kuviosta 14 nähdään, että säteilyä on tarjolla Suomessakin melko suuren osan vuodesta. Ainoastaan tammikuun intensiteettikuvaaja on selvästi muiden alapuolella. Toisaalta tammikuun kuvaaja on niin alhainen, että tuotanto jää hyvin olemattomaksi synkimmän talven aikana. Kuviosta nähdään myös, että punaisella piirretty huhtikuun kuvaaja alkaa nousemaan jo seitsemän aikaa aamulla jyrkästi, kun sininen tammikuun kuvaaja alkaa nousta vasta hieman ennen kymmentä. Lokakuussakin on huomattavissa jo päivän pituuden lyhentymisen, sillä intensiteetti on lähtenyt kasvamaan vasta hieman 9 jälkeen ja romahtanut kello 17 maissa. Intensiteetin maksimi on huhtikuun kuvaajalla jo lähes  $1000 \text{ W/m}^2$ , joidenkin sironnasta johtuvien piikkien ollessa jo hieman ylikin. Näillä piikeillä ei tosin ole energiantuotannon kannalta juurikaan merkitystä. Tammikuun

intensiteettimaksimi on samoihin aikoihin kello 12 aikaan, mutta se jää vain noin 200 W/m<sup>2</sup>:iin.

Kuviosta 14 nähdään myös ero pilvisyyksissä. Kun muihin kuukausiin on osunut melko pilvettömiä päiviä, jolloin kuvaaja on noudattanut siististi sinimäistä muotoa, tammikuussa parhaanakin päivänä intensiteettikuvaaja on ollut hyvin pilvisyyden rikkoma. Vaikka pilvisyyttä ei olisikaan ollut, olisi tammikuussa jääty silti kauas seuraavaksi huonoimman eli lokakuun kuvaajasta.

Samaisista päivistä voidaan piirtää kuvaajat myös tehon tuotannon kannalta. Kuvaajat noudattelevat tietenkin intensiteetin kuvaajan muotoja, mutta niistä saa paremman kuvan siitä, paljonko tehoa paneeli tuottaa kyseisenä päivänä. Kuvaajissa tehontuotanto on esitetty suhteellisesti eli tehontuotanto on esitetty asennettua wattia kohden. Tämä tarkoittaa sitä, että parhaimmillaan yhden watin paneelilla voidaan tuottaa 1 W tehoa. Vaihtoehtoisesti tuotannon voi ymmärtää prosentuaalisesti eli arvossa yksi paneeli tuottaa 100 % nimellistehostaan. (Kuvio 15.)



KUVIO 15. Aurinkopaneelin tuottama teho asennettua wattia kohden

Kuviosta 15 nähdään, että ero paneelin tehontuotannon välillä on suuri tammikuun ja huhtikuun välillä. Huhtikuussa tuotantoteho on parhaimmillaan miltei 1 W asennettua wattia kohden, kun tammikuussa sen on suurimmillaankin vain 0,3 W asennettua wattia kohden. Toiselta kantilta ajateltuna talvella pitäisi olla yli kolminkertainen paneelimäärä, mikäli haluttaisiin tuottaa sama teho. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi huhtikuussa 100 W paneeli tuottaa parhaimmillaan miltei 100 W, mutta tammikuussa parhaimmillaankin vain 30 W. Kun tämän yhdistää siihen, että talvella energian tuotantoaika on hyvin lyhyt, voidaan todeta, että aurinkosähkön tuotto Suomessa talvella on vähintäänkin haastavaa ja taloudellisesti lähes mahdotonta.

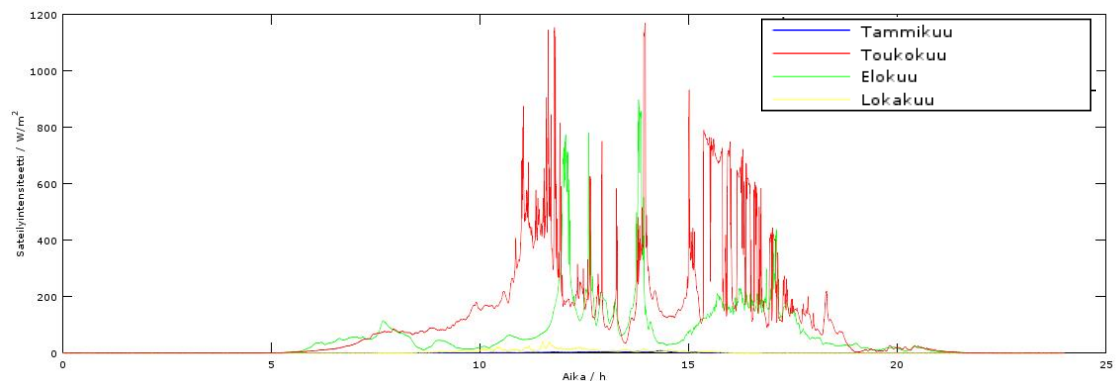
Aurinkopaneelin tuottoon vaikuttaa säteilyintensiteetin lisäksi myös ilman lämpötila. Keväällä ja syksyllä viileinä, mutta aurinkoisina, päivinä voidaan päästä samoihin tuotantoihin, kuin kuumana kesäpäivänä, mikä selittyy osin lämpötilaerolla.

#### 4.1.2 Heikoimmat tuotannot

Edellisessä luvussa esiteltiin vuoden parhaat päivät aurinkosähkön kannalta. Tässä luvussa on puolestaan esitelty vuoden huonoimmat päivät energian tuotannon kannalta (taulukko 2). Suomen ilmasto-olosuhteissa tämä käytännössä tarkoittaa, että näinä päivinä tuotanto on jäänyt hyvin lähelle nollaa. Kuviosta 16 selviää, miten säteilyä on paneelille tullut vuoden huonoimpina päivinä.

TAULUKKO 2. Huonoimmat päivät energiantuotannon kannalta eri vuodenaikoina

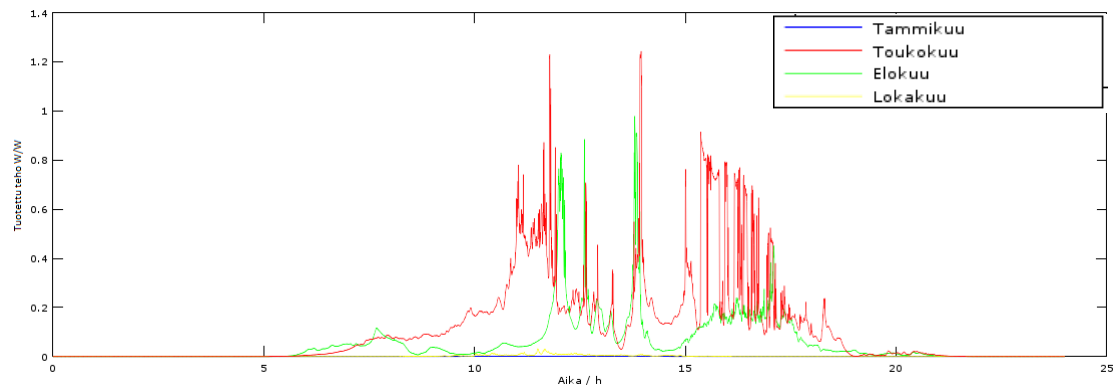
Päivämäärä	Tuotettu energia Wh/W
14.1	0,01
29.4	2,75
12.8	1,31
30.10	0,04



KUVIO 16. Olosuhteiltaan huonoimpien päivien säteilyintensiteetit

Kuvaajien muodosta näkee hyvin, että säteilyn pääsy paneelille on ollut hyvin rikkonaista, mikä johtuu pilvisyydestä. Pilvien liikkeeseen liittyy myös sirontailmiö, joka luo suuria piikkejä säteilyn intensiteettiin, mutta kuten aikaisemminkin mainittiin, ne eivät ole merkityksellisiä energiantuotannon kannalta. Tammikuun ja lokakuun kuvaajat ovat miltei nollassa koko päivän ja huhti- sekä elokuun kuvaajissakaan ei ole jälkeäkään hyvien päivien puhtaasta sinimuodosta. Huhtikuun piikit nousevat aina  $1200 \text{ W/m}^2$ :iin, mutta pysyvästi intensiteetti ei nouse juurikaan yli  $500 \text{ W/m}^2$ :n. (Kuvio 16.)

Vastaavasti voidaan piirtää kuvaajat myös tuotetulle teholle (kuvio 17).



KUVIO 17. Olosuhteiltaan huonoimpien päivien tehot

Kuvio 17 vahvistaa säteilyintensiteetin perusteella tehdyn arvion siitä, että tehontuotanto on kyseisinä päivinä ollut hyvin pientä. Tammikuun ja lokakuun kuvaajat ovat nollan tasossa ja punaisella huhtikuun, sekä vihreällä elokuun kuvaajallakin tuotettu teho jää vain noin 0,4 W:iin. Vertailun vuoksi tammikuun paras päivä oli tätä luokkaa.

#### 4.1.3 Tuntitason tuotantoennuste

Parasta ja huonointa päivää tutkimalla saadaan kuva siitä, mitkä ovat rajat aurinkosähkön tuotannolle Suomessa, mutta ne eivät anna tarpeeksi tietoa, jotta kyettäisiin tekemään luotettavia arvioita eri vuodenaikojen tuotannoista, sillä yksittäiset minimi- ja maksimit voivat poiketa suurestikin aidoista suurimman osan aikaa vallitsevista olosuhteista.

Paremmän kuvan saamiseksi kuukausittaisesta tuotantoennusteesta, tarkastellaan seuraavaksi hieman tarkemmin esimerkkikuukausia. Taulukossa 3 on esitetty näiden neljän kuukauden päivittäin tuotetun energian keskiarvot asennettua wattia kohden.

TAULUKKO 3. Päivässä tuotetun energian keskiarvo asennettua wattia kohden kuukausittain

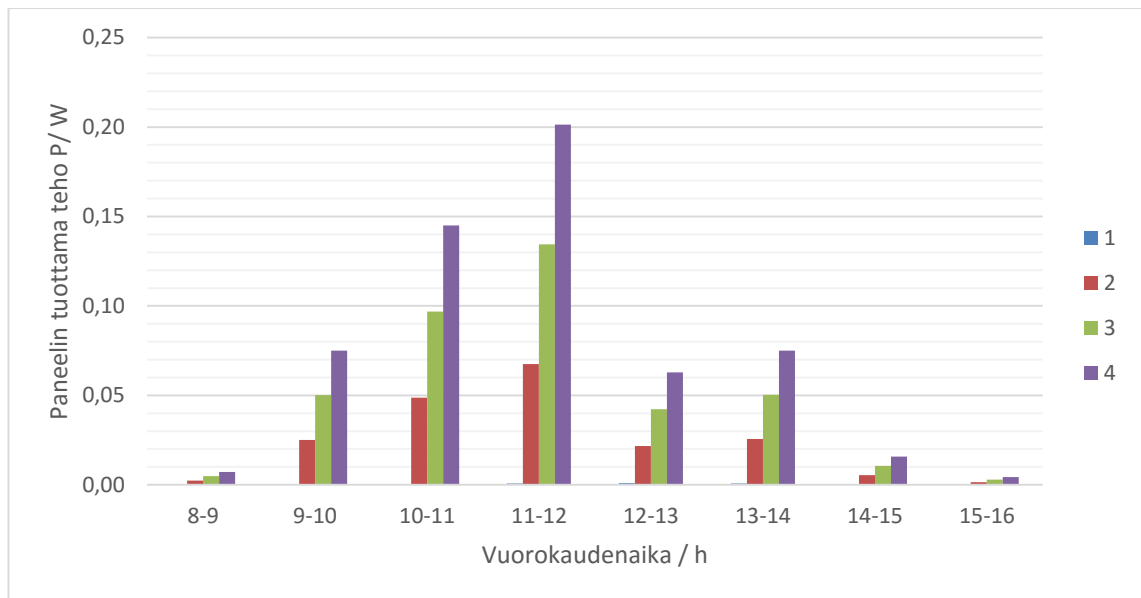
Kuukausi	Tuotettu energia ka Wh/W
Tammikuu	0,12
Huhtikuu	4,92
Elokuu	4,41
Lokakuu	1,04

Taulukosta 3 näkee, että kesän tuotanto poikkeaa suuresti talven vastaavasta. Samoin voidaan todeta, että kuukausien maksimista jäädään jokaisen kuukauden kohdalla, mutta myös huonoimman päivän tuotanto jää kauas keskiarvosta.

Edelleen jäädään kuitenkin melko yleiselle tasolle tarkastelussa. Sähköntuotantoa on hyvä nykyään tarkastella jopa tuntitasolla, sillä tuotetusta sähköstä saatu tuotto saattaa olla sidottu pohjoismaisen NordicPool-sähköpörssin SPOT-tuntihintaan. Varsinkin kun sähkön hinta on alhaalla, ei tuottajalla ole varaa suuripiirteisyyteen, vaan kaikki hyöty on kyettävä ottamaan irti. SPOT-kaupankäynti seuraavalle päivälle loppuu kuluvan päivän puoleen päivään mennessä, joten sähkön myyjälle on ensiarvoisen tärkeää, että kyettäisiin mahdollisimman tarkkaan ennustamaan seuraavan päivän sähköntuotto tunti tunnilta. Tulevaisuudessa aurinkosähkön tuotannon yhteismäärän kasvaessa on tuotantoa kyettävä ennustamaan myös energiataseen takia, jotta riittävä sähköntuotanto Suomessa voidaan taata jokaisena hetkenä.

Tuntitasolla ennustettavuuteen aurinkosähkössä liittyy paljon epävarmuustekijöitä, sillä sää on usein varsinkin Suomen olosuhteissa erittäin haastava ennustettava, varsinkin jos ennuste pitää tehdä tunnin tarkkuudella. Aurinkopaneelin tuottaman tehon suuruuteen vaikuttavat voimakkaasti pilvisyyden vaihtelut, joiden tuntitason ennustaminen esimerkiksi puolipilvisenä päivänä on erittäin vaikeaa. Myös sumu ja ilmansaasteet vaikuttavat jonkin verran tehontuotantoon. Aiemminkin käsitellystä aineistosta voidaan kuitenkin poimia jokaisen kuukauden jokainen tunti ja tarkastella, millainen tehontuotanto on ollut. Tämän perusteella voidaan tehdä arviot siitä, millainen tehontuotanto saattaisi erilaisina päivinä eri tunteina olla.

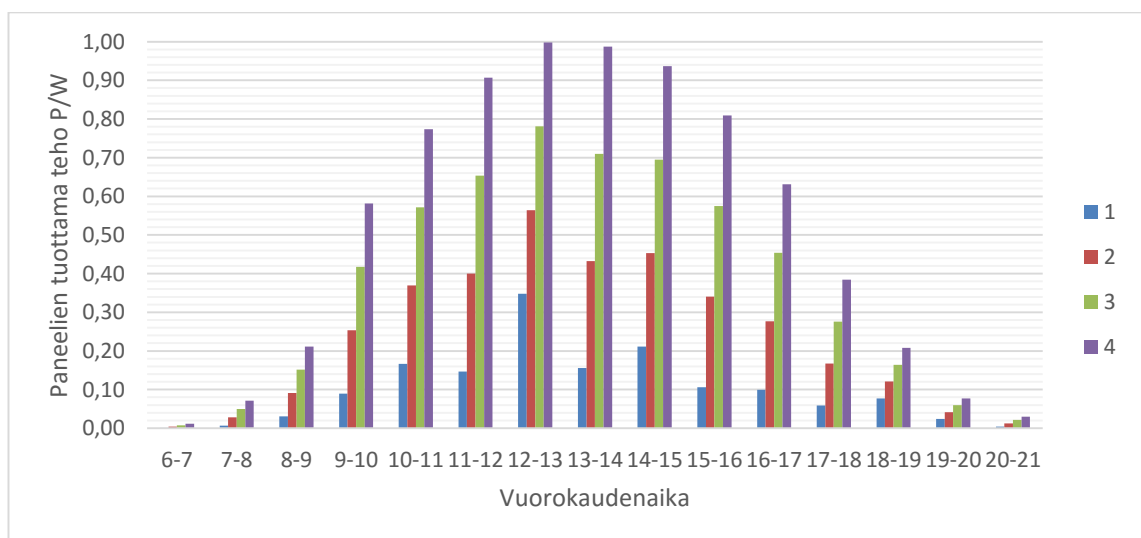
Jotta saadaan hieman haarukoitua erilaisia tunteja, on tunnit jaoteltu aiemman (paras ja huonoin päivä) sijaan neljään eri luokkaan tuotetun tehon kannalta siten, että arvon 1 tunti on kuukauden tunneista huonoin ja vastaavasti arvon 4 tunti on kuukauden tunneista paras. Arvojen kaksi ja kolme tunnint ovat tältä väliltä tasavälein valitut eli arvon kaksi tunti on hieman alle puolivälin ja arvon kolme tunti hieman yli puolen välin. Kuvioissa 18-21 on esitetty täten jokaiselta neljältä kuukaudelta tunnint jaoteltuna edellä mainitulle asteikolle.



KUVIO 18. Tammikuun eritasoisten tuntien tuotannot

Tammikuussa auringon säteily tuottaa nolasta poikkeavaa tehoa noin välillä 8-16 (kuvio 18), joten tarkasteltaviksi tunneiksi valitaan nämä tunnit. Tammikuussa eli talvikuukausien verrokkikuukaudessa auringon tuottama teho jää pieneksi, mutta selkeitä eroja syntyy silti tuntien välille. Parhaana päivänä kello 11-12 on tammikuussakin päästy noin 0,2 W tuotantotehon per asennettu watti, kun huonoimpana päivänä samalla aikavälillä tuotanto on ollut noin nolla. (Kuvio 18.)

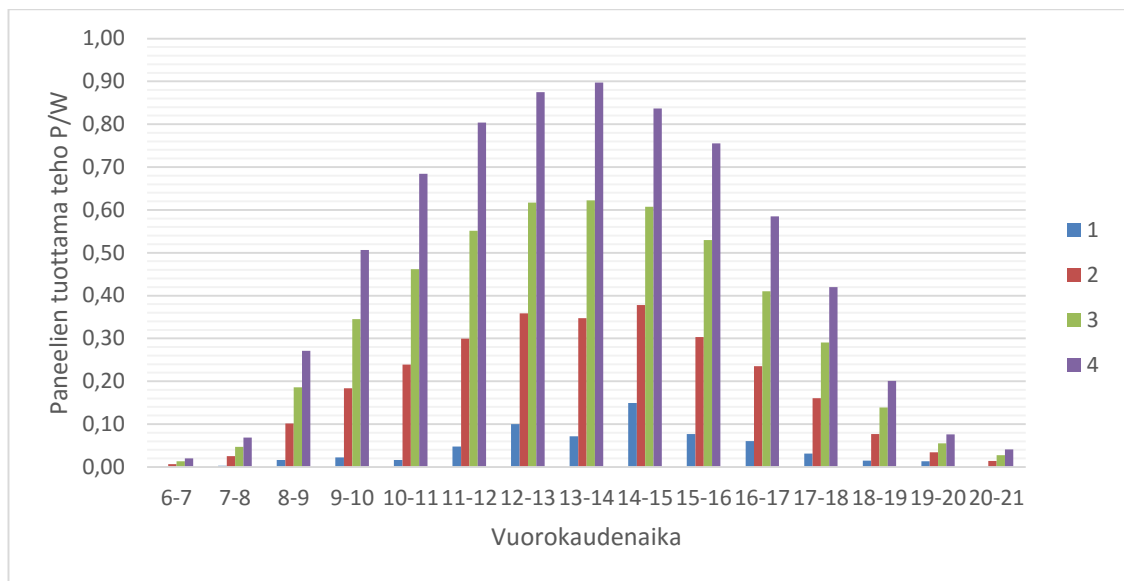
Kevätkuukausien verrokkikuukauden eli huhtikuun tunnit on esitelty kuviossa 19.



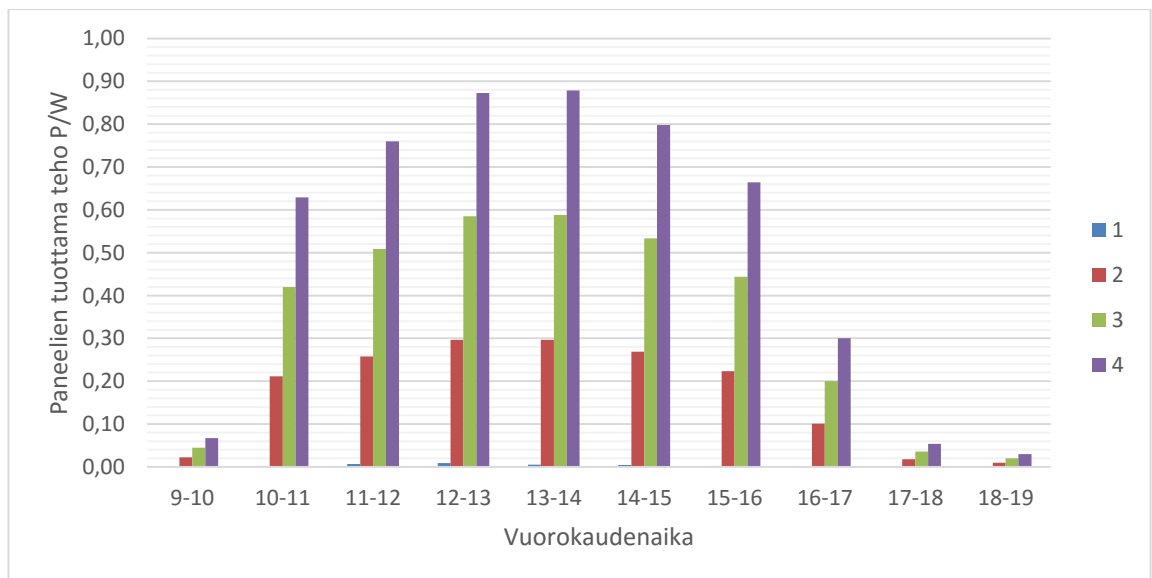
KUVIO 19. Huhtikuun eritasoisten tuntien tuotannot

Huhtikuussa kuvion 19 mukaan tehontuotanto sijoittuu aikavälille 6-21, joten diagrammiin on valittu tämän aikavälin tunnit. Huhtikuun tunteja vertailtaessa nähdään, että kuukauden parhaana päivänä on päästy kello 12-13 jo paneelin nimellistehoa vastaavaan 1 W lukemaan, mutta vastaavasti huonoimman päivän saman aikavälin tuotanto on jäänyt 0,35 W lukemaan.

Samanlaiset diagrammit voidaan piirtää vielä kahdelle jäljellä olevalle kuukaudelle (kuviot 20-21).



KUVIO 20. Elokuun eritasoisten tuntien tuotannot



KUVIO 21. Lokakuun eritasoisten tuntien tuotannot

Elokuun (kuvio 20) ja lokakuun (kuvio 21) diagrammeista nähdään, että myös näiden kuukausien parhaat tunnit ovat lähellä nimellistehoa eli 1 W. Kuvioista näkee erojen

hyvien ja huonojen tuntien välillä olevan suuret, kuten aiemmissakin kuvioissa. Esimerkiksi lokakuussa päästään parhaimmillaan noin 0,9 W lukemiin, mutta mikäli tunti sattuu olemaan huono eli joko 1 tai 2 arvoinen, voi tuotanto olla reippaasti alle puolet siitä, mitä se parhaana tuntina olisi.

Kuvioista 19-21 nähdään yksittäisten tuntien tuotantoarvioiden lisäksi myös se, että mikäli hyvä tuotantotunti sattuu mihin tahansa kuukauteen tammikuuta lukuun ottamatta, voi tuotantoteho olla lähes sama. Toisaalta voidaan todeta, että mikäli huonohkoja tunteja sattuu esimerkiksi muutoin hyvän tuotantokuukauden tärkeille keskipäivän tunneille, se pudottaa päivän kokonaistuotantoa huomattavasti ja voi olla jopa alle huonomman kuukauden keskivertopäivän.

Yleisesti diagrammeja lukiessa tulee pitää mielessä, että pohjadata on vain yhdeltä vuodelta, joten jokin poikkeuksellinen sääilmiö tai pidempi epätavallinen sääjakso on voinut vaikuttaa suurestikin arvioiden paikkansapitävyyteen. Lisäksi luokittelu on tehty siten, että lukijan pitää hieman tuntea aurinkopaneelin toimintaa, jotta pystyy tekemään arvioita eri tuntien paremmuudesta sääennusteen perusteella. Käytännössä arvio syntyy, kun lukija arvottaa tunnin sääennusteen ja oman kokemuksensa perusteella johonkin neljästä luokasta. Toisaalta pohjadata on kuitenkin todellista mittausdataa, joten kaikki esitetyt tehot ovat aitoja ja mittausvuonna 2007 kyseisen arvoiset tunnit ovat oikeasti tuottaneet esitellyt tehot. Aineistoa tulkitessa on hyvä huomata myös se, että paneelin on oletettu toimivan koko ajan maksimitehopisteessään, eikä minkäänlaisia elektroniikkahäviöitä ole otettu huomioon. Todellisia energiantuotantoja arvioitaessa tulokset on hyvä kertoa 0,95:llä, jolloin häviöt tulevat otettua huomioon, eikä malli anna ylioptimistista lopputulosta.

Mallin uskotaan siis toimivan hyvin tuotannon arviointiin, mutta jo sääennusteen epäluotettavuus vaikuttaa suuresti siihen, pystytäänkö seuraavan päivän tai saatikka pidemmän aikavälin tuotantoa ennustamaan kovinkaan tarkasti.

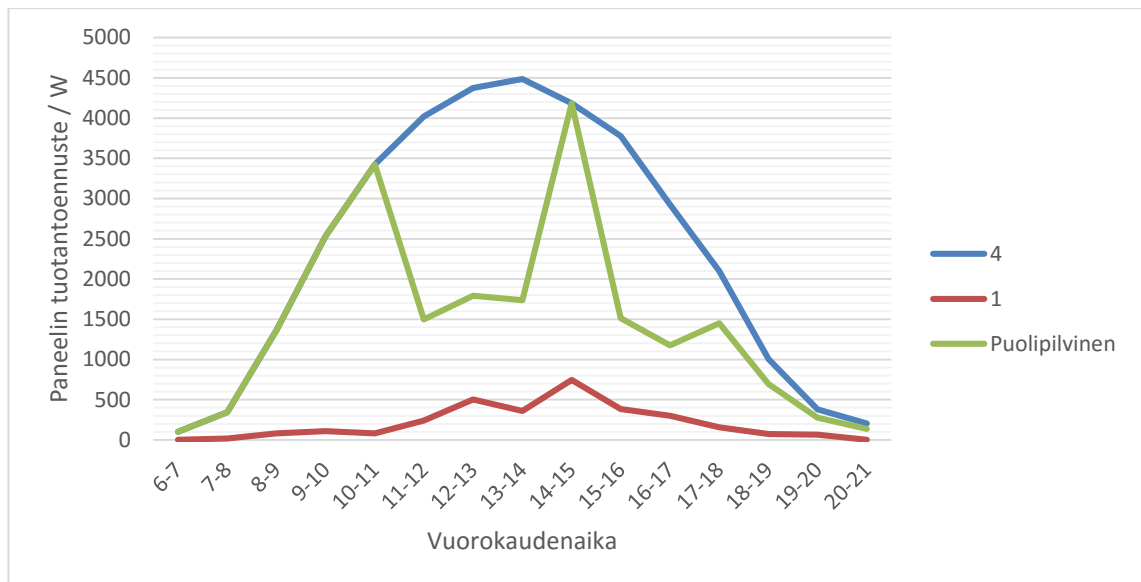
#### 4.1.4 Tuotantoennusteen käytännön sovellus

Edellisessä luvussa luotiin aurinkosähkölle tuotantoennustemalli, jonka käyttöä tässä luvussa esitellään muutaman esimerkin avulla. Esimerkkitapauksessa lasketaan tuotantoennustetta 5 kW aurinkosähköljärjestelmälle.

Mallissa asteikko on yhdestä neljään, jolloin ääripäät on helppo poimia. Yhden arvoiset tunnit ovat siten olosuhteiltaan huonoimpia, eli yleensä täysin pilvisiä. Neljän arvoiset tunnit taas ovat olosuhteiltaan parhaita, eli yleensä täysin aurinkoisia. Kun käytetään mallia, ja luodaan ennuste kyseiselle 5 kW järjestelmälle kesäpäivälle (esimerkkisääennuste kuviossa 22) (aineistokuukautena elokuu), päädytään kuvion 23 mukaisiin tuotantotehoihin.



KUVIO 22. Esimerkkipäivän sääennuste (Tuntiennuste Tampere 2016, muokattu)



KUVIO 23. Tuotantoennusteet eri tason tunteina 5 kW aurinkosähköjärjestelmälle

Kuviossa 23 on esitetty järjestelmän tuottama teho, joka on ennustettu elokuun aineiston perusteella tunti tunnilta siten, että aikavälillä 6-11 on ennustettu pilvetön taivas. Aikavälillä 11-17 ennustetaan sääennusteen ja kokemuksen perusteella, että taivaalle tulee pilvimassa, joka pudottaa tuotannon kahden arvoiseksi eli hieman ajankohdan keskivertoa huonommaksi. Välillä 14-15 on esimerkin vuoksi esitetty, että pilvimassassa oleva rako voi hyvinkin nostaa tunnin taas neljän arvoiseksi, jolloin tuotanto nousee reippaasti. Aikavälillä 17-21 ennustetaan, että tummimmat sadepilvet ovat jo ohittaneet alueen, ja kevyempi pilvisuus pudottaa tuotannon kolmen arvoiseksi. Kuviossa on esitetty myös täysin aurinkoisen päivän, ja täysin pilvisen päivän tuotantoennusteet mallin perusteella.

Kuvion 23 perusteella nähdään, että ennuste on melko helppo tehdä täysin pilviselle tai täysin aurinkoiselle päivälle, mutta puolipilvisien päivien kohdalla hajonta voi olla suurta. Aikavälillä 14-15 oleva esimerkitunti esittää sen, että mikäli pilvisuus pudottaa tunnin kahden arvoiseksi, voi kuitenkin pilvien raosta esiin paistava aurinko nostaakin tunnin nelosen arvoiseksi. Tällöin esimerkin kaltaisella 5 kW:n aurinkosähköjärjestelmällä tuotantoennuste voi heittää jopa 2,3 kWh:a, mikäli kahden arvoinen tunti muuttuukin neljän arvoiseksi pilvisyyden rakoilun vuoksi.

Kuten luvussa 4.1.3 mainittiin, tulee todellisessa ennusteessa huomioida vielä käytössä olevan laitteiston häviöt, jotta voidaan ennustaa todellinen tuotanto.

## **4.2 Aurinkosähkön vaikutus sähköverkkoon**

Aurinkopaneeleita asennettaessa tulee miettiä, halutaanko paneeleilla tuottaa sähköä vain oman talouden käyttöön, vai onko tarkoitus myydä mahdollinen ylijäävä energia verkkoon. Tässä luvussa käsitellään näiden kahden kytkentämuodon yleisimpiä käyttötapoja ja mahdollisia tulevaisuudenkuvia.

### **4.2.1 Saarekekäyttöiset aurinkopaneelit**

Nykyisin vielä hyvin yleinen tapa on asentaa aurinkopaneeli siten, että sillä tuotetaan vain omaan käyttöön sähköä. Tällöin paneelin laitteisto voidaan kytkeä vain johonkin yhteen tiettyyn laitteeseen, tai sillä voidaan syöttää koko talouden sähköntarve. Jälkimmäinen malli tulee kyseeseen lähinnä kohteissa, joissa ei ole yhteyttä valtakunnanverkkoon. Tällainen voisi olla esimerkiksi kesämökki saarella. Useasti tällaiset kesämökeille asennetut verkosta erillään olevat laitteistot ovat suurimmillaan vain muutaman kilowatin luokkaa, ja niiden yhteyteen on asennettu jokin energiavarasto, tavallisimmin akku (Grip 2014. 12-13).

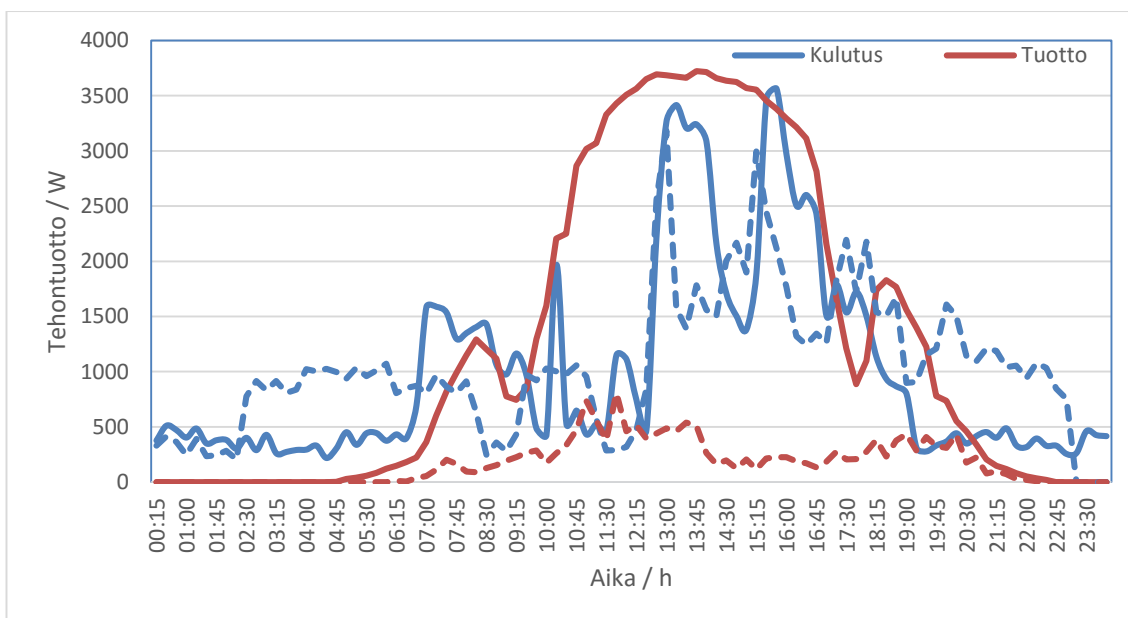
### **4.2.2 Verkkoon kytketyt aurinkopaneelit**

Verkon kannalta mielenkiintoisempi ja nykyään yleistävä tapa on kytkeä aurinkopaneeli suoraan talouden samaan verkkoon, jossa myös jakeluverkko on, jolloin ne toimivat rinnakkain. Tällöinkin voidaan valita, halutaanko paneelien tuottamaa sähköenergiaa käyttää vain oman talouden syöttämiseen vai halutaanko mahdollisesti myydä ylijäävää energiaa jakeluverkkoon. Kummassakin tapauksessa kytkentä on jakeluverkon kannalta merkityksellinen, sillä vaikei jakeluverkkoon yhteydessä olevan talouden aurinkopaneelisto syöttäisikään verkkoa, vaikuttaa se verkon kuormituksiin pienentävänä sellaisina hetkinä, kun Aurinko paistaa.

Kun kiinteistöön asennetaan aurinkopaneelit, muuttuu sen kulutus verkon suunnasta merkittävästi silloin, kun paneelit tuottavat runsaasti energiaa. Aurinkopaneelit voidaan asentaa joko yksivaiheisesti tai vaihtosuuntaaja voi olla kolmivaiheinen. Nykyään hyvänä ohjeena pidetään noin neljän kilowatin rajaa, jota suuremmat paneelijärjestelmät tulisi kytkeä kolmivaiheisesti. Syitä valita kolmivaiheinen järjestelmä voi olla myös

kolmivaiheisen kuormituksen olemassaolo. Mikäli esimerkiksi kolmivaiheista lämminvesivaraajaa halutaan syöttää aurinkopaneelijärjestelmällä, on järkevää hankkia kolmivaiheinen vaihtosuuntaaja. Kaikilla verkkoyhtiöillä ei myöskään ole vaihenetotusta, eli mikäli paneeli on kytketty yksivaiheisesti ja kyseisen vaiheen kulutus ei taloudessa ylitä paneelien tuottoa, voi syntyä tilanne, jossa paneelien vaiheelta myydään sähköä halvalla verkkoon ja kahdelta muulta vaiheelta ostetaan kalliimpaa sähköä verkosta (Aurinkosähkön valintaohje).

Esimerkkitaloudessa on 300 litran lämminvesivaraaja, jossa on kolme vastusta, joiden yhteisteho on 3 kW. Vettä on aiemmin lämmitetty aikatariffilla, joten lämmitys on ajastettu yölle, jolloin sähkö on ollut halvimmillaan. Talouteen on hankittu 5 kW aurinkosähköjärjestelmä, jolla on tarkoitus tuottaa sähköenergiaa oman talouden käyttöön, mutta järjestelmässä on myös mahdollisuus myydä sitä verkkoon. Paneelin asentamisen jälkeen käyttöveden lämmitys on ajastettu keskipäivän aikaan, jolloin aurinkopaneelien tuotto on oletetusti suurimmillaan. Kuviossa 24 on esitetty kyseisen talouden kulutus ja aurinkopaneelin tuotto 15.7. yhtenäisellä viivalla ja 26.7. katkoviivalla.



KUVIO 24. Aurinkopaneelin tuotto ja talouden kulutus 15.7. ja 26.7.

Kuviosta 24 näkee, että paneelin tuotto on noussut 15.7. heti aamuyhdeksän jälkeen suuremmaksi kuin talouden kulutus, ja pysynyt suurempana aina kello 17 asti. Paneelin tuottokuvaajassa on kaksi notkاهدusta aamulla ja illalla. Nämä johtuvat puiden varjostuksesta, jolloin kyseisellä paneelilla on ollut varjo edessä läheisistä puista.

Tarkastelun kannalta mielenkiintoinen on hetki, jolloin 3 kW lämminvesivaraaja menee päälle, eli noin kello 12:30, jossa näkyy suuri piikki kulutuksessa. Aurinkopaneelisto tuottaa parhaimmillaan noin 3750 W, jolla katetaan kokonaan talon peruskuorma, joka on noin 300-400 W, sekä koko lämminvesivaraajan tehontarve.

Sähköverkon kannalta mielenkiintoista kuviossa 24 on ero hyvän ja huonon aurinkopäivän välillä. Kuviosta näkee, että kulutuksessa näkyy saman suuruinen piikki lämminvesivaraajan kytkeytyessä päälle huolimatta siitä, onko paneelin tuotto riittävä vai ei. Hyvänä päivänä järjestelmä syöttää keskipäivällä vielä ylijäämäsähköä verkkoon noin 300 W verran, kun taas huonona päivänä lämminvesivaraajan mennessä päälle verkosta otetaan noin 3 kW. Tämä aiheuttaa sen, että siirtoverkko on joka tapauksessa mitoitettava siten, että se kykenee siirtämään koko talouden tarvitseman sähkötehon, vaikka kesällä voi olla monta päivää, jolloin huipputehoa ei lainkaan tarvita aurinkosähköjärjestelmän vuoksi.

Toinen verkon suunnittelun kannalta vaikeuksia aiheuttava tapahtuma ilmenee silloin, jos muuntopiirissä on monia talouksia, joissa on aurinkopaneeleja. Esimerkiksi nopeasti nouseva ukkoskuuro voi pudottaa hyvinkin lyhyessä ajassa muuntopiirin alueen aurinkopaneelien tuoton lähelle nolaa.

Esimerkiksi voidaan ottaa muuntopiiri, jossa on 10 taloutta, joissa kaikissa on aurinkopaneelit. Hyvänä päivänä ne kykenevät tuottamaan koko talouden sähköntarpeen keskipäivällä, jolloin myös lämminvesivaraajat ovat ajastettu kytkeytymään päälle. Aiemmin lämminvesivaraajat ovat menneet yön tunteina porrastetusti päälle kellon kanssa, mutta aurinkopaneelien asennuksen jälkeen ne ovat asennettu kytkeytymään päälle keskipäivällä. Hyvänä päivänä paneelit tuottavatkin mallikkaasti kaiken tarvittavan tehon, jolloin muuntopiirin kuormitus on erittäin pieni. Tilanne voi kuitenkin muuttua nopeasti ukkosrintaman noustessa ja pahimmillaan aurinkopaneelien tuoton pudotessa nopeasti, siirtyä kuormitus nopeasti aurinkopaneelilta jakeluverkolle. Jos jokaisessa 10 taloudessa on kuvion 24 esimerkkitalouden mukaisesti lähes 3,5 kW kuormitus keskipäivällä, äkillisesti päälle kytkeytyvän kuorman määrä on 35 kW.

Ongelman ratkaisemiseksi voidaan kehittää älykkäitä järjestelmiä, jotka osaavat sovittaa kulutusta tuottoon siten, että järjestelmä osaa esimerkiksi lisätä lämminvesivaraajan tehoa aurinkopaneeliston tuoton lisääntyessä ja vastaavasti pienentää sitä tai kytkeä kokonaan

pois, mikäli aurinkopaneelin tuotto ei riitä kulutusta kattamaan. Omakotitalouden kannalta olisi myös hyödyllistä, mikäli sähkön varastointiin keksittäisiin kannattava laitteisto, jolloin keskipäivällä tuotettua energiaa voitaisiin käyttää illalla, kun kulutuskin on suurempaa. Esimerkkitaloudessa parhaina heinäkuun päivinä oli tuotettu yli 30 kWh. Keskiarvokulutus kuun aikana oli 23,3 kWh eli sähköä on tuotettu välillä jopa enemmän kuin sitä on kulutettu. Mutta kuten kuviosta 24 nähdään, tuotto ja kulutus eivät aina kohtaa, jolloin sähköä myydään päivällä verkkoon ja illalla sitä ostetaan takaisin.

## 5 TUULIVOIMAN TUOTANTO JA KULUTUS

Tuulisähkön tuotanto on Suomessa huomattavasti pidemmällä kuin aurinkosähkön, jolloin tuulisähköä myös tuotetaan paljon enemmän. Kuten aurinkosähkössä, niin tuulisähkönkin tuotannossa on kyettävä hyvällä tarkkuudella arvioimaan seuraavan päivän tuotantoa jo edellisenä päivänä.

Tuulisähkössä nimensä mukaisesti kyse on tuulen muuttamisesta sähköksi, jolloin ennusteiden kannalta erityisen mielenkiintoinen suure on tuulisuus. Tuulisuutta on kuitenkin ennustettu pitkään jo esimerkiksi merenkulun kannalta, ja siitä on saatavilla laajasti materiaalia vapaassakin jakelussa. Tuulisuuden ennustamiseen on myös erikoistunut joitain yrityksiä, ja esimerkiksi Ilmatieteen laitos toimittaa räätälöityjä tuulisuusennusteita ja tuotantoennusteita tuulivoimatoimijoille (Tuulivoiman tuotantoennusteet 2016).

Koska tuulisuutta on ennustettu tarkasti jo pitkään ja alalla on monia toimijoita, joille tuulisuusennusteiden tekeminen on jokapäiväistä toimintaa, ei tässä työssä koeta tarpeelliseksi lähteä tekemään tuulisuudelle samanlaista ennustemallia kuin aurinkosähkölle.

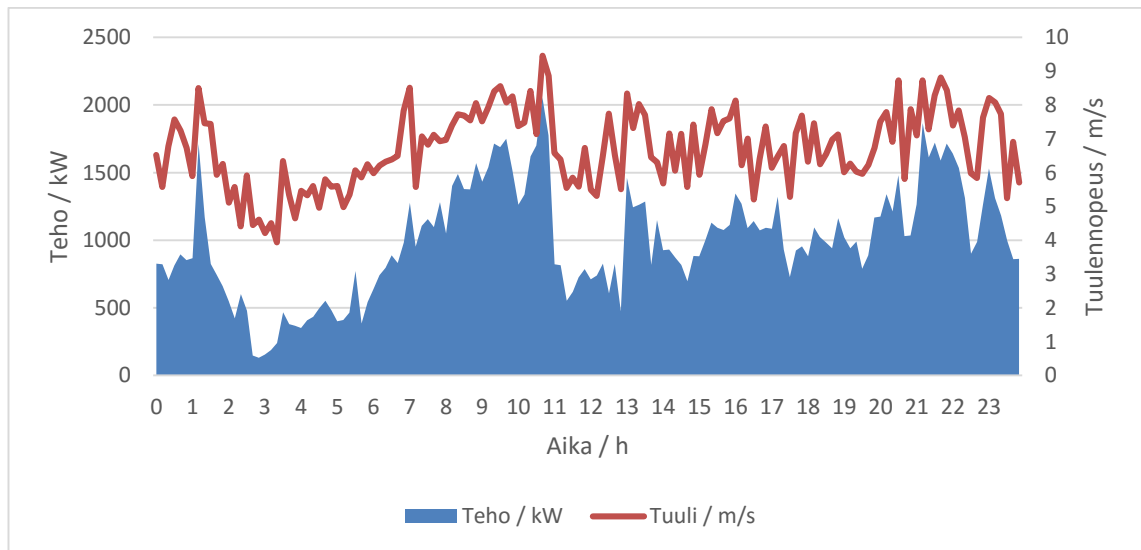
### 5.1 Tuulivoiman tuotantoprofiili

Uusiutuvien energiamuotojen eli tässä työssä lähinnä aurinko- ja tuulisähkön ymmärtämisen kannalta on kuitenkin mielekästä tarkastella hieman, miten erilaiset tuuliolosuhteet ja vuodenaika vaikuttavat suuren kokoluokan tuulivoimalan sähköntuotantoon.

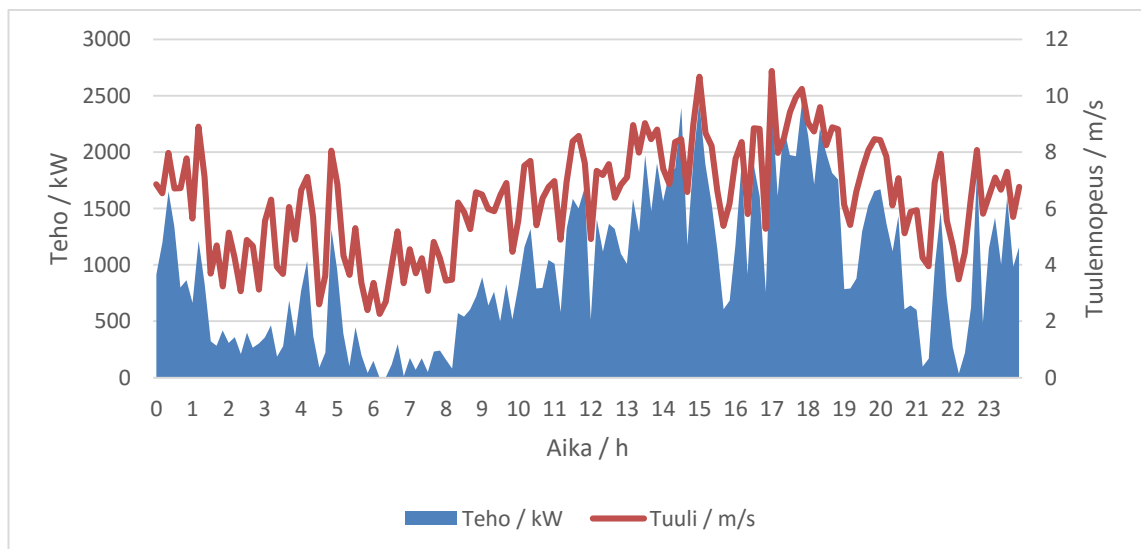
Esimerkkituulivoimalan aineisto on erään 2,4 MW tuulivoimalan todellista aineistoa. Tuulivoimalan tornin korkeus on 120 metriä ja roottorin halkaisija 117 m. Tuulivoimadata on kerätty vuoden 2015 ajalta.

Kyseisen voimalan tuotto on ollut keskimäärin noin 23 MWh kuukaudessa ja koko vuonna tästä tulee noin 8400 MWh sähköenergiantuotanto. Huipunkäyttöajaksi tulee Suomessa sijaitsevalle voimalalle erittäin hyvä, jopa 3500 tuntia.

Esimerkinomaisesti voidaan poimia joitain päiviä eri kuukausilta, jotta nähdään, eroako tuulivoimalan tuotanto eri vuodenaikoina. Samoista kuvaajista voidaan myös tulkita, miten tuulen muutokset vaikuttavat voimalan tuotantoon. Kuvioissa 25 ja 26 on esitetty kahden energiantuotannon suuruuden kannalta samanlaisen päivän voimalan tehontuotantokuvaaja ja tuulienopeuden kuvaaja, ensimmäinen päiväistä on talvikuukausilta eli tammikuulta ja toinen kesäkuukausilta eli kesäkuulta. Kummankin kuvion esittämänä päivänä on vuorokauden energiantuotanto ollut noin 23 000 kWh.



KUVIO 25. Tuulienopeus ja tuulivoimalan teho 4.1.2015



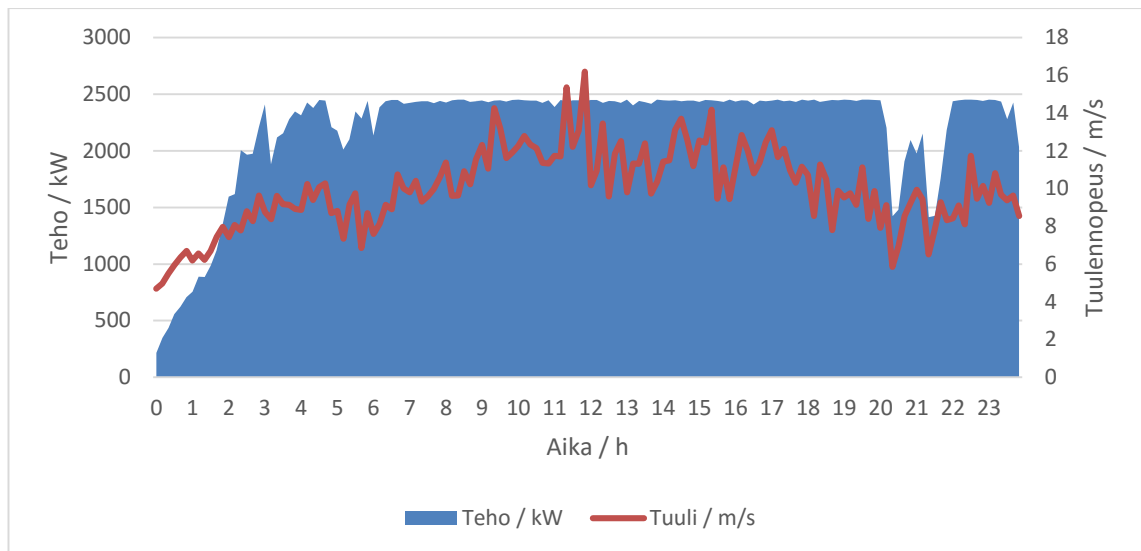
KUVIO 26. Tuulienopeus ja tuulivoimalan teho 12.6.2015

Kuvioita 25 ja 26 vertailemalla näkee, että tuulivoimalan tehontuotanto seuraa tuulienopeuden muutoksia hyvin tarkkaan reaaliaikaisesti. Kun tuulienopeus saa suurimman arvonsa, myös tehontuotanto on samalla suurimmassa arvossaan. Varsinkin

kuvioista 25 näkee hyvin, että tehontuotanto on pienimmillään alle 100 kW luokkaa, kun tuulennopeus on alle kolme metriä sekunnissa. Aineisto tarkemmin tutkimalla kuviossa 25 näkyvä kello 6 ja 7 välillä oleva kuoppa tehontuotannossa on tullut siitä, että tuulen nopeus on kahtena peräkkäisenä mittauskertana ollut reilusti alle 3 m/s, jolloin tuulivoimalan tehontuotanto on noin 10 minuutin ajan ollut täysin nolla. Yleisesti ison kokoluokan voimalat kykenevät toimimaan pienimmillään noin 3 m/s tuulella, joten automatiikka on varmasti ajanut voimalan hetkeksi pysähdyksiin. Tuulennopeuden ollessa 10 m/s luokkaa, päästään hyvin lähelle tuulivoimalan nimellistehoa eli 2400 kW. Aineiston tarkemmalla tutkiskelulla selviää, että tuulennopeuden ylittäessä 10 m/s päästään tehontuotannossa jo täyteen 2400 kW tehoon. Esimerkiksi 9 m/s tuulella ollaan vasta 2000 kW tehossa. Kuvioita tulkittaessa on hyvä kuitenkin huomata, että tuulennopeus on 10 minuutin välein otettu arvo, kuten tehontuotantokin.

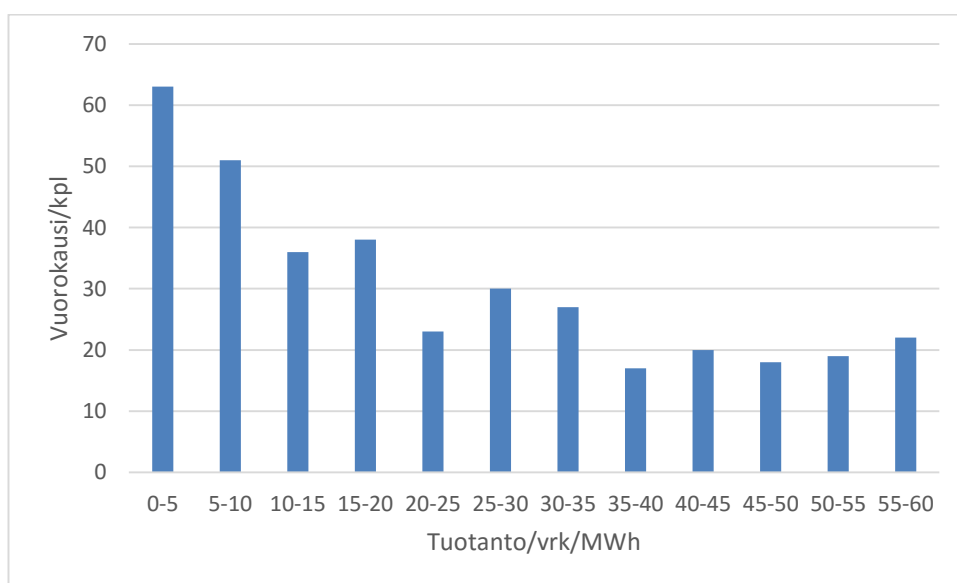
Kuvioista 25 ja 26 näyttäisi siltä, ettei tuulivoimalan tuotannolla ole juurikaan merkittävää eroa siinä, onko kyseessä talvi- vai kesäkuukausi, mikäli tuulennopeus on sama. Talvella kuitenkin yleensä ilma on kylmempää, mikä tarkoittaa, että ilmantiheys on suurempi, jolloin samalla tuulella saadaan enemmän tehoa tuotettua (Tuulivoimayhdistys, 2016). Aineiston tarkemmalla tarkastelulla voidaan huomata, että kesäkuukautena samoilla tuulennopeuksilla tehon suuruusluokka on järjestäen hieman pienempi kuin talvikuukausina, mikä saattaa selittyä ilmantiheyden kasvulla.

Kuviot 25 ja 26 esittävät päiviä, jolloin energiantuotanto on ollut noin 23 000 kWh eli hieman alle puolet siitä energiasta, jonka tuulivoimalan voitaisiin laskea tuottavan, jos se toimisi koko vuorokauden nimellistehollaan. Kuviossa 26 on esitetty vuorokausi, jossa on päästy energiantuotannossa hyvin lähelle maksimia. Kyseisenä päivänä 6.4. on energiantuotanto ollut noin 54 000 kWh eli voimala ei ole jäänyt kauaksi 57 000 kWh laskennallisesta maksimistaan.



KUVIO 27. Tuulennopeus ja tehontuotanto 6.4.2015

Kuviosta 27 nähdään, että tuulennopeus on ollut lähes koko vuorokauden ajan yli 8 m/s ja suuren osan päivästä jopa 10-12 m/s jolloin tuulivoimalla on toiminut nimellistehollaan tasaisesti jokaisena tuntina. Mikäli tuuli olisi heti keskiyön jälkeen noussut samoihin lukemiin kuin se miltei koko vuorokauden ajan oli, olisi tuulivoimalla varmasti yltänyt energiantuotannossa hyvin lähelle 57 000 kWh maksimia. Kuvioiden 25-27 perusteella voidaan myös todeta, ettei tuulivoimalla esiinny aurinkovoiman kaltaista vuorokaudenaikariippuvuutta. Tuulivoimaa on saatavilla ympäri vuorokauden, ympäri vuoden mikäli vain muutoin säätila sattuu suotuisaksi. Kuviossa 28 on energiantuotannon perusteella jaotellen päivien lukumäärät vuoden aikana.



KUVIO 28. Vuoden päivät jaettuna tasaisin välein energiantuoton perusteella

Kuvion 28 perusteella hyvätuottoisia päiviä on hieman vähemmän kuin huonotuottoisia, mutta ero kokonaismäärissä on kuitenkin melko pieni. Mikäli tuotot haluttaisiin jakaa puolesta välistä poikki, olisi päiviä, jolloin on tuotettu alle puolet maksimienergiasta, lukumäärällisesti hieman enemmän, mutta kuten hyvästä huipunkäyttöajastakin (3500 h) käy ilmi, on tuulivoimalan kokonaisenergiantuotto silti ollut hyvällä tasolla. Voidaan siis päätellä, että toimiakseen tuulivoimalan ei tarvitse joka päivä tuottaa täyttä tehoa koko vuorokautta, vaan hyvään energiantuottoon päästään, vaikka vaihtelevuutta on paljonkin. Vaikka määrällisesti esimerkiksi 5-10 MWh/vrk päiviä onkin enemmän, niin yhtenä 50 MWh/vrk päivänä tuotetaan jo 5-10-kertainen määrä sähköä huonompaan päivään verrattuna. Täten hyvien tuottopäivien merkitys korostuu.

## 5.2 Tuulivoiman vaikutus sähköverkossa

Tuulivoima eroaa aurinkovoimasta sen kytkeytymisen kannalta. Aurinkopaneelit ovat yleensä kytkettyinä pienjänniteverkkoon, kun taas tuulivoimalat yleisesti keskijännitteeseen. Täten tuulivoimalan toiminnalla ei ole niin suurta välitöntä vaikutusta yksittäisen talouden kulutuksen kannalta.

Jakeluverkolle tuulivoimalan asentaminen aiheuttaa kuitenkin joissain tapauksissa ongelmia. Avojohtoverkossa, jossa on pitkiä johtolähtöjä, suunnittelua rajaava tekijä on usein jännitteenalenema. Tilanne kääntyy kuitenkin pääläelleen, mikäli tällaiseen pitkään johtolähtöön asennetaan kauas sähköasemasta jännitetasoon nähden suuri tuulivoimala. Tilanteissa, joissa johtolähdön kulutus on pieni, mutta voimalan tuotanto suuri, voi tuulivoimala nostaa jännitettä johtolähdön loppupäässä. Ongelma on sikäli oleellinen, että usein tuulivoimaa asennetaan seuduille, jotka sijaitsevat hieman kauempana asutuksesta, ja siten niiden liittäminen verkkoon pitää tehdä käyttäen tällaisia pitkiä avojohtoverkkoja. Maakaapeliverkot ovat usein lyhempiä kaupunkiverkkoja, joten niiden kohdalla ongelmaa ei aiheuta niinkään jännitteen nousu, vaan ongelmaksi muodostuu komponenttien mitoitus, koska verkon oikosulkuvirrat kasvavat. Ongelmia kummassakin verkkotyypissä syntyy myös vikatilanteissa, sillä vaikka yhteys sähköasemalle olisi vian takia katki, voi voimala syöttää verkkoon vikavirtaa. (Järventausta, Laaksonen, Mäkinen & Repo. 2003, 4-5.)

Sähköasemalla jännitettä säädetään päämuuntajan käämikytkimellä, mutta ongelmaksi muodostuu jännitteen säädön mittaustavan myötä se, että päämuuntajan käämikytkimen

säätö vaikuttaa koko kiskon jännitteeseen. Normaali säätö, jossa mitataan sähköaseman kiskojännitettä, ei sotke säätöä, mutta mikäli jännitettä säädetään kompondisäädöllä, jossa huomioidaan johtolähtöjen kuormitus, voi tuulivoimalan johtolähdön kuormitusvirta näyttää todellista pienemmältä tuotannon takia. Tällöin kompondisäätö laskee jännitettä koko kiskostossa, jolloin muiden lähtöjen jännite voi laskea liian matalalle. Ongelmaa voidaan kuitenkin korjata korjaamalla tuotannollisen johtolähdön kuormitusta mittauksessa, mikäli tuulivoimalan tuotannosta on reaaliaikaista mittausaineistoa saatavilla. (Järventausta ym. 2003. 6.)

Tuulivoimala voi heikossa verkossa aiheuttaa myös nopeampia jännitevaihteluita ja jopa välkyntää. Tällaisia ongelmia aiheuttavat puuskittainen tuuli, tuulivoimalan pystysuuntainen gradientti, tornin varjo ja voimalan kytkeytyminen päälle ja pois. (Järventausta ym. 2003, 7.)

## 6 POHDINTA

Työn lähtökohtana oli perehtyä tuulivoiman ja aurinkosähkön tuotantoon ja kulutukseen. Työn toisessa luvussa käydään tilastokatsauksenomaisesti läpi Suomen sähkönkulutus ja tuotanto, jotta on helpompi hahmottaa, minkä kokoisesta alasta tällä hetkellä on kyse. Aurinkosähköä ja tuulivoimaa käsittelevissä teorialuvuissa käydään melko tarkkaa läpi myös fysikaalisia ilmiöitä tuotantomuotojen taustalla. Tarvittava ymmärrys tuotantomuotojen fysiikasta olisi ehkä saatu hieman suppeammallakin katsauksella, mutta oma mielenkiinto fysiikkaa kohtaan teki mielekkääksi tuoda syvyyttä myös teoriaan.

Aurinkosähkön ennustemallia tehdessä piti tehdä monia kompromisseja, sillä aurinkosähkön tuotantoon vaikuttaa hyvin moni tekijä, joista ei vähäisimpänä on säätila, jonka ennustaminen on täysin oma tieteenalansa. Ennustemallia tehdessä lähdettiinkin siitä oletuksesta, että mallin käyttäjä tuntee hieman alueen ilmastoa ja osaa arvioida päivien ja tuntien hyvyttä suhteessa vuodenaikaan ja osaa siten arvioida tunnin hyvyden asteikolle yhdestä neljään. Samoin kuin ennustemallia tehdessä, myös käyttäjä tulee kohtaamaan ongelmia, että tunnin tasolla auringon säteilyä on erittäin vaikea ennustaa, mikäli päivä ei ole joko täysin pilvinen tai täysin aurinkoinen. Tämä johtuu siitä, että pienenkin pilven osuessa auringon ja paneelin väliin, saa se aikaan suuren pudotuksen paneelin tuotossa. Lisäksi esimerkiksi sumua on usein vaikea ennustaa edes ammattilaisen toimesta. Ennustemallia voisi kehittää tutkimalla sen osumaprosenttia esimerkiksi ennustamalla mallin avulla tuotantoa ja sitten tutkimalla toteutuneita lukemia. Nykyisellään mallille ei ole antaa osumaprosenttia. Toiseksi mallin asteikon yhdestä neljään voisi pyrkiä liittämään säähän siten, että tietyn tyyppinen säätila olisi suoraan sidottu asteikkoon sen sijaan, että nyt mallin käyttäjä joutuu vain suhteuttamaan kokemuksensa mukaan tunnit asteikolle.

Tuulivoiman ja aurinkosähkön vaikutuksia sähkönjakeluverkkoon on myös pintapuolisesti esitelty työn loppupuolella, mutta niitä olisi ollut mielenkiintoista tutkia enemmänkin, mikäli aika olisi sen mahdollistanut. Toisaalta työn pääteema oli luoda aurinkosähkön ennustemalli, joten aihe ei olisi osunut teemaankaan kovin luontevasti suuremmissa laajuudessa. On kuitenkin tärkeää ymmärtää, että perinteisesti kuluttajan puolella verkkoa voi tulevaisuudessa olla myös tuotantoa, mikä vaikuttaa oleellisesti verkon suunnitteluun ja käyttöön muun muassa suojausten kannalta.

## LÄHTEET

Aurinkosähkön valintaohje. Oulun Rakennusvalvonta. Luettu 8.4.2016.

<http://www.ouka.fi/documents/486338/7c128e09-09c2-4436-a18f-79e10dee424c>

Aurinkovoimaa Suomessa. Luettu 19.12.2015.

<http://www.aurinkoenergia.fi/Info/184/aurinkovoimaa-suomessa>

Grip, Kaisa. 2014. Pienasiakkaan kysynnän jouston ja oman tuotannon vaikutukset kuormitusmalleihin. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Diplomityö.

Energiavuosi 2014. 2015. Energiateollisuus. Kalvosarja. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Tuntiennuste Tampere. Foreca. Sääennuste. Luettu 18.4.2016.

<http://www.foreca.fi/Finland/Tampere/>

Ilmakehä. Ilmatieteen laitos. Luettu 25.1.2016.

<http://www.geo.fmi.fi/oppimateriaali/envisat/tutkimus/ilmakeha.html>

Tuulivoiman tuotantoennusteet. Ilmatieteen laitos. Luettu 18.4.2016.

<http://ilmatieteenlaitos.fi/tuulivoiman-tuotantoennusteet>

Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 30.12.2010/1396.

Järventausta, Laakso, Mäkinen & Repo. 2003. Hajautetun tuotannon huomioiminen sähkönjakeluverkon suunnittelussa. Raportti. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto.

Korpela, Aki. 2014a. Aurinkosähkön perusteet. Tampere.

Korpela, Aki. 2014b. Tuulivoiman perusteet. Tampere.

Maan rata. UTU. Luettu 25.1.2016. <http://www.astro.utu.fi/zubi/earth/orbit.htm>

Nordpool. 2015. Market data. Tilasto. Luettu 10.4.2016.

<http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/FI/Yearly/?view=table>

OL 1 ja OL 2. TVO. Luettu 30.11.2015. <http://www.tvo.fi/OL1%20ja%20OL2>

Solar Radiation Outside The Earth's Atmosphere. University of California. Luettu 25.1.2016. [http://solarwiki.ucdavis.edu/The\\_Science\\_of\\_Solar/Solar\\_Basics/B.\\_Basics\\_of\\_the\\_Sun/III.\\_Solar\\_Radiation\\_Outside\\_the\\_Earth's\\_Atmosphere](http://solarwiki.ucdavis.edu/The_Science_of_Solar/Solar_Basics/B._Basics_of_the_Sun/III._Solar_Radiation_Outside_the_Earth's_Atmosphere)

Stenberg, Anders. 2010. Analys av vindkraftsstatistik i Finland. Fakulteten för elektronik, kommunikation och automation. Aalto-yliopisto. Diplomityö.

Sun Fact Sheet. 2015. NASA. Luettu 23.1.2016.  
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>

Suomen virallinen tilasto. 2015. Tilastokeskus. Luettu 12.4.2016.  
[http://www.stat.fi/til/ehk/2014/ehk\\_2014\\_2015-12-14\\_kuv\\_006\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehk/2014/ehk_2014_2015-12-14_kuv_006_fi.html)

Sähkö riittää jatkossakin. 25.11.2014. Fingrid. Luettu 30.11.2015.  
<http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/tiedotteet/Sivut%2FS%C3%A4hk%C3%B6%C3%A4-riitt%C3%A4%C3%A4-Suomessa-ensi-talvenakin.aspx>

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto. Energiateollisuus. Luettu 30.11.2015.  
<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/sahkon-ja-lammon-yhteistuotanto>.

Sähkön pientuotanto 2015. 2015. Kalvosarja. Helsinki: Energiavirasto.

Sähkön tuotanto, tuonti ja vienti. Energiateollisuus. Luettu 30.11.2015.  
<http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/sahkotilastot/sahkontuotanto/sahkon-tuotanto-tuonti-ja-vienti>

Tietoa tuulivoimasta. Tuulivoimayhdistys. Luettu 18.12.2015.  
<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta>

Tiihonen, A. 2016. Tuulivoimavuosi 2015 tuplasi tuotannon ja toi jätti-investoinnit Suomeen. Tuulivoima 01/2016, 42.

Tuuleeko talvella?. Tuulivoimayhdistys. Luettu 29.3.2016.  
<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/tuotannon-vaihteluvuus/tuuleeko-talvella>.

Voimalaitoksen toiminta vuonna 2011. 2011. Fortum. Luettu 30.11.2015.  
[https://www.fortum.fi/fi/energiantuotanto/ydinvoima/Loviisan\\_voimalaitos/vl-toiminta/Sivut/default.aspx](https://www.fortum.fi/fi/energiantuotanto/ydinvoima/Loviisan_voimalaitos/vl-toiminta/Sivut/default.aspx).

VTT Wind energy statistics year report 2014. 2015. Raportti. Helsinki: VTT.