



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Samuli Laine

AURINKOENERGIAN ENNUSTAMISMENETELMÄT

Tekniikka
2021

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Samuli Laine
Opinnäytetyön nimi	Aurinkoenergian ennustamismenetelmät
Vuosi	2021
Kieli	suomi
Sivumäärä	50
Ohjaaja	Jukka Hautala

Tulevaisuudessa uusiutuvien energialähteiden ja samalla myös aurinkovoiman tuotantokapasiteetti lisääntyy huomattavasti. Aurinkovoiman tuotantoa ei käytännössä pysty säätämään, joten tehotasapainon ja tasehallinnan kannalta auringon säteilyn mahdollisimman tarkka ennustaminen on merkittävässä asemassa. Mahdollisimman tarkalla tuotannon ennustamisella tasevastaava voi saada suuria taloudellisia säästöjä.

Opinnäytetyön tarkoituksena on ensin käydä läpi teoriaa auringonsäteilystä sekä aurinkosähkön tuotantotavoista. Lopuksi selvitetään millä eri sääennustemenetelmillä voisi rakentaa parhaan mahdollisen aurinkosähkön tuotannon ennusteen teollisen mittakaavan aurinkopuistoon. Työssä keskitytään ennusteisiin, jotka ulottuvat parin vuorokauden päästä aina käyttötuntiin saakka. Apuna on EPV Energia Oy:n Alavuden mittauslaitokselta saadut kokemukset.

Työssä saatiin tutkittua mitkä ilmiöt ilmakehässä vaikuttavat säteilyn määrään maanpinnalla, mitä menetelmiä auringonsäteilyn ennustamiseen on olemassa ja mitkä niistä sopisivat tuotantoennusteiden tekoon päivä- ja tuntitasolla.

ABSTRACT

Author	Samuli Laine
Title	Solar Energy Forecasting Methods
Year	2021
Language	Finnish
Pages	50
Name of Supervisor	Jukka Hautala

In the future, the production capacity of renewable energy sources and solar power will increase considerably. The production of solar power cannot be regulated, so from the point of view of power balance, the most accurate possible forecasting of solar irradiance plays an important role. Forecasting production as accurately as possible, the balance responsible party can obtain large financial savings.

The purpose of the thesis was to go through the theory of solar radiation and the methods of solar electricity production. It was also investigated which weather forecasting methods could be used to build the best possible solar electricity production forecast for an industrial scale solar park. The thesis focuses on forecasts that range from a couple of days to operation hours. The experience received from EPV Energia Oy measuring solar plant will help.

The thesis researched which phenomena in the atmosphere affect the amount of irradiance on the ground, which methods exist for predicting solar irradiance and which of them would be suitable for making production forecasts on a daily and hourly basis.

Keywords Solar energy, solar irradiance, weather forecasting, production forecasting and electricity balancing

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	6
2	SÄHKÖMARKKINAT JA TASEHALLINTA	9
	2.1 Nord Pool Elspot.....	11
	2.2 Nord Pool Elbas	12
	2.3 Säättösähkömarkkinat	12
	2.4 Taseselvitys ja tasesähkö	13
	2.5 Varttitase ja yksitasemalli	15
3	AURINKOENERGIA	17
	3.1 Aurinkokennot	21
	3.2 Aurinkosähkön tuotanto.....	24
4	AURINGONSÄTEILYN ENNUSTAMINEN	28
	4.1 Numeeriset sääennustemallit	29
	4.2 Satelliitit.....	32
	4.3 Säteilymittarit.....	33
	4.4 Ceilometri	34
	4.5 Total sky imagers -kamerat.....	34
5	VUORENNEVAN MITTAUSLAITOS	36
6	TUOTANNON ENNUSTAMINEN	39
	6.1 Spot-vuorokauden ennustaminen.....	41
	6.2 Vuorokaudensisäinen ennustaminen.....	42
7	YHTEENVETO	44
	LÄHTEET	46

KUVALUETTELO

Kuva 1. Sähkön markkinahinnan muodostuminen. (Vattenfall 2020).....	9
Kuva 2. Elspot-aluehinnat 16.4.2021. Systeemihinta 47,35 €. (Nord Pool 2021) 10	
Kuva 3. Sähkömarkkinoiden rakenne. (Fingrid 2021 a)	11
Kuva 4. Kahden taseen malli. (Fingrid 2021 d)	15
Kuva 5. Tasesähkön hintaesimerkki. (Fingrid 2021 e, muokattu)	15
Kuva 6. Maan kierto suhteessa Aurinkoon. (Roper 2016)	17
Kuva 7. Auringonsäteiden ja maan välisiä kulmia. (Electropaedia 2021)	19
Kuva 8. Auringon suora säteily ja hajasäteily. (Mallon et al. 2017)	20
Kuva 9. Vuotuisia säteilymääriä Suomessa. (Motiva 2020 a).....	21
Kuva 10. Aurinkokennon toimintaperiaate. (Motiva 2021)	22
Kuva 11. Yksi- ja monikidekennot sekä ohutkalvokenno. (GreenMatch 2021; The Renewable Energy Website 2021)	23
Kuva 12. Aurinkopaneelijärjestelmien hinnan lasku. (IRENA 2021).....	26
Kuva 13. Aurinkoenergian tuotantomäärän kehitys. (IEA 2021).....	26
Kuva 14. Numeerisissa sääennustemalleissa maapalloa ympäröivä ilmakehä on jaettu kolmiulotteiseen hilaruudukkoon. (Indivisual/Ilmatieteen laitos 2021)	30
Kuva 15. Pyranometri. (HandWiki 2021)	33
Kuva 16. Puolipallokameralla otettu taivaskuva ja vastaava tietokoneella prosessoitu kuva. (Marquez et al. 2013)	34
Kuva 17. Ilmakuvaa Vuorennivan mittauslaitokselta.....	36
Kuva 18. Tracker-järjestelmät seuraavat auringonsäteitä itä-länsi suunnassa.	37
Kuva 19. Aurinkopaneelirivit, invertteriasema ja varjostusseinä.....	38
Kuva 20. Esimerkki anturiverkostosta. (Lonij et al. 2013)	43

1 JOHDANTO

Fossiiliset polttoaineet hallitsivat energiamarkkinoita vuosikymmeniä, kunnes huoli ilmastonmuutoksesta pakotti myös energia-alan muutoksiin. Viimeistään Pariisin ilmastopöimur vuonna 2015 aloitti kiihtyvät toimet ilmastonmuutoksen hillintään ja lämpötilan nousun pysäyttämiseksi. Tavoitteena oli pitää maapallon keskilämpötilan nousu alle kahdessa asteessa ja pyrkiä aktiivisesti toimiin, joilla lämpeneminen saataisiin rajattua alle 1,5 asteen. (Ympäristöministeriö 2021)

Pariisin sopimus tarkoitti energiamarkkinoille uusia tuulia ja nopeutti myös huomattavasti alan siirtymistä kohti puhtaampaa ja päästöttömämpää tuotantopalettia. Energiamarkkinoita oli ohjattu jo ennen Pariisin ilmastopöimurusta vähäpäästöisempään suuntaan muun muassa päästökaupan ja uusiutuvan energian tuotantotukien avulla. Nämä toimet ovat ajaneet viime vuosina perinteiset fossiiliset säätökykyiset voimalaitokset ahtaalle ja hiljalleen myös pois markkinoilta. Niiden avulla sähkön tuotantoa on vuosikymmenet säädetty kulutuksen tarpeiden mukaan, jotta tuotanto ja kulutus on saatu tuntitasolla tasapainoon ja tätä kautta pidettyä sähkön taajuus ja laatu riittävän hyvänä sekä näin ollen myös sähköjärjestelmä tasapainossa.

Tulevina vuosina tämä energia-alan murros tulee kiihtymään entisestään ja lisäämään uusiutuvien energiantuotantomuotojen eli tuulivoiman ja tulevaisuudessa myös aurinkovoiman osuutta kokonaisuudesta. Ne kuitenkin toimivat täysin luonnonvoimien armoilla, joten niiden säätömahdollisuudet ovat käytännössä olemattomat. Jatkossa säätökyvyttömän tuotantokapasiteetin osuuden kasvaessa kulutusta voi joutua sopeuttamaan tuotannon vaihtelujen mukaan. Säästä riippuvan tuotannon ennustaminen tuleekin olemaan jatkossa entistä merkittävämmässä roolissa.

Energiantuottajan ja tasevastaavan kannalta tuotannon jatkuva ja mahdollisimman tarkka ennustaminen on avainasemassa taloudelliselta kannalta. Ero tuotantoennusteissa ja toteutuneessa tuotannossa aiheuttaa tasevastaavan sähkötaseeseen tasepoikkeamaa, joka aiheuttaa riskejä ja voi merkitä suuriakin tasesähkökustannuksia. Ennusteiden tarkkuuden parantaminen tuottaa siis yhtiöille merkittäviä rahallisia säästöjä.

Työssä käydään aluksi läpi Suomen sähkömarkkinoiden ja Nord Pool-markkinoiden toimintaa, jotta lukija saa käsityksen miksi uusiutuvan energiantuotannon ennustaminen eri vaiheissa on niin tärkeää. Seuraavaksi käsitellään aurinkoenergiaa yleisesti sekä tehdään yleiskatsaus EPV Energia Oy:n mittauslaitoksena toimivaan Alavuden Vuorenevan testipuistoon. Lopuksi tutkitaan erilaisia olemassa olevia aurinkoenergian ennustemenetelmiä ja pohditaan mitkä ratkaisut olisivat toimivia sekä 1–2 vuorokauden että tuntitason ennustamiseen tulevaisuudessa mahdollisesti rakenteilla olevaan teollisen mittakaavan aurinkovoimapuistoon.

EPV Energia Oy on kotimainen energiayhtiö, joka panostaa voimakkaasti uusiutuvaan ja päästöttömään energiantuotantoon. Sen tehtävänä on tuottaa ja hankkia sähköä ja lämpöä osakkailleen kustannustehokkaaseen hintaan. EPV Energia tuottaa ja hankkii noin viisi prosenttia kaikesta Suomessa tuotettavasta sähköstä. Yhtiö toimii erityisesti energia-alalla käytössä olevalla Mankala-periaatteella. (EPV Energia 2020 a) Mankala-periaate on toimintatapa, jossa voimalaitosyhtiöiden omistajat eli osakkaat vastaavat toiminnan kustannuksista ja saavat vastineeksi sähköä omakustannehintaan suhteessa omistuosuutensa. Se mahdollistaa suuretkin energiahankkeet ja alhaiset tuotantokustannukset. (Nordic Law 2015)

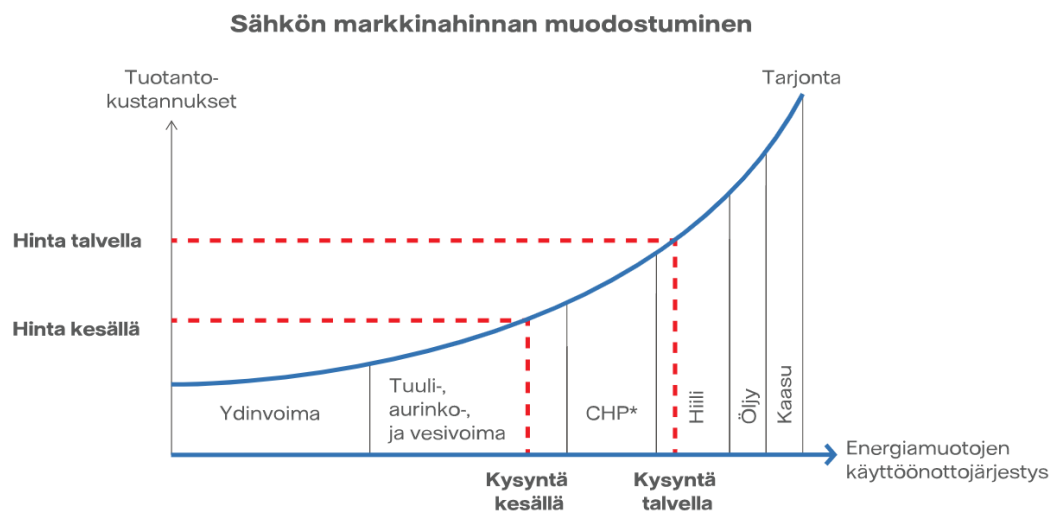
EPV Energia-konserni on jaettu neljään eri liiketoiminta-alueeseen. EPV Voima tuottaa teollisen mittakaavan päästötöntä vesi- ja ydinvoimasähköä. EPV Lämpö tuottaa sähköä ja lämpöä Vaasan, Seinäjoen, Tornion ja Raahen yhteistuotantolaitoksissa. EPV Tuuli investoi voimakkaasti tuulivoimatuotantoon, jolla lisätään konsernin päästöttömän energiantuotannon osuutta. EPV Infraan kuuluu sähköverkko-liiketoimintaa sekä energianhallintapalvelut. EPV Infra tuottaa pääasiassa palveluja konsernin yhtiöille, ja siihen kuuluu myös tasepalveluja tuottava EPV Tase Oy. (EPV Energia 2020 b)

EPV on ollut pitkään edelläkävijä uusiutuvan ja päästöttömän energiantuotannon saralla. Vaskiluodon voimalaitokselle rakennettiin vuonna 2013 kivihiilivoimalan yhteyteen maailman suurin ja ensimmäinen biomassan kaasutuslaitos. (Vaskiluodon Voima 2021) Vuonna 2020 Vaskiluodossa otettiin käyttöön valmistuessaan Suomen suurin lämpöenergiavarasto, jonka avulla saadaan edelleen vähennettyä

kivihiilen käyttöä lämmöntuotannossa. Yhtiöllä on PVO:n, TVO:n ja Voimapihan kautta omistusosuuksia ydinvoimasta sekä vesivoimasta, joilla tuotetaan teollisen mittakaavan perus- sekä säätövoimaa. (EPV Energia 2020 b) Teollisen mittakaavan tuulivoimapuistoja on toiminnassa neljä. Viides ja ensimmäinen täysin ilman yhteiskunnan tukea rakennettava tuulipuisto valmistuu Teuvalle vuoden 2022 aikana. Tulevaisuudessa teknologian edelleen kehittyessä ja sitä kautta kustannusten las-
kiessa suunnitteilla on myös teollisen mittakaavan aurinkopuisto. Lisäksi kehitteillä on yhteystyökumppaneiden kanssa edistyksellinen vetyhanke uusiutuvilla energia-
lähteillä tuotetun sähkön varastoimiseksi.

2 SÄHKÖMARKKINAT JA TASEHALLINTA

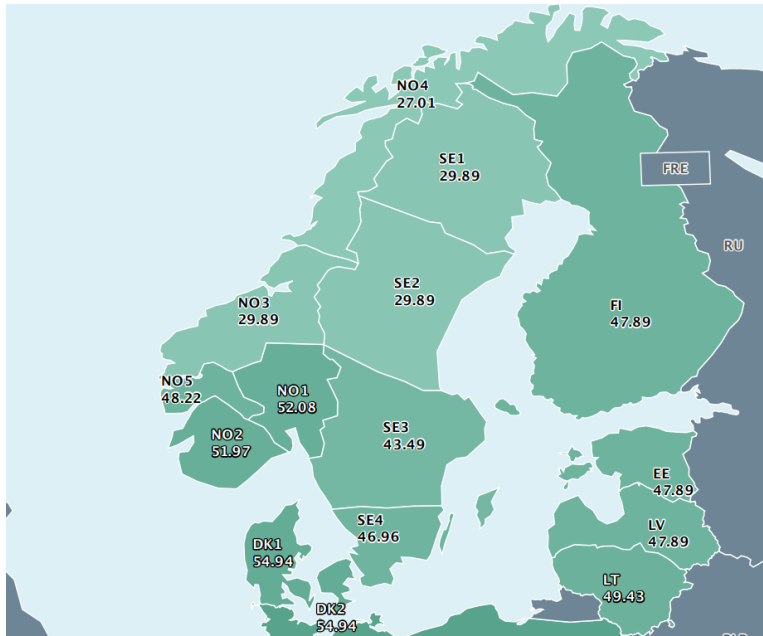
Nykyisellä tekniikalla ei sähköä voida varastoida taloudellisesti kannattavasti, minkä johdosta tuotannon ja kulutuksen on oltava jatkuvasti tasapainossa. Tasapainoa saadaan ylläpidettyä toimivien sähkömarkkinoiden avulla. Suomi on osana Pohjoismaista sähköjärjestelmää ja pohjoiseurooppalaisia tukkusähkömarkkinoita. Tukkusähkömarkkinoilla sähkön tuottajat ja kuluttajat kohtaavat ja sähkön markkinahinta muodostuu kuvan 1 mukaisesti vuoden jokaisen päivän jokaiselle tunnille kysynnän ja tarjonnan mukaan. Tuotantotarjoukset asetetaan hinnan mukaan nousevaan järjestykseen edullisimmasta kalleimpaan, jolloin tuotanto ja kulutus kohtaavat aina halvimpaan mahdolliseen hintaan. (Partanen et al. 2014)



Kuva 1. Sähkön markkinahinnan muodostuminen. (Vattenfall 2020)

Koko Pohjoismaiden ja Baltian maiden markkina-alueelle muodostuu ensin yhteinen systeemihinta vuorokauden jokaiselle tunnille. Systeemihinta kuvaa kaikkein kalleinta tuotantotapaa, jolla kysyntä saadaan katettua ja toisaalta se on hinta, joka sähköenergiasta ollaan valmiita maksamaan. Lisäksi pienempiä alueita on jaettu fyysisten siirtokapasiteettien perusteella omiksi hinta-alueikseen, joiden sisällä sähkön hinta on aina yhtenäinen. Hinta-alueiden välillä sähkön hinta poikkeaa kuvan 2 mukaisesti aina silloin kun siirtokapasiteetti rajoittaa alueiden välillä siirrettävän

sähköenergian määrää. Hinta on aina halvempi sieltä mistä siirretään ja kalliimpi siellä mihin sähköä siirretään. Esimerkiksi Norjassa on 5 aluetta, Ruotsissa 4 aluetta, Tanskassa 2 aluetta ja Suomi sekä Baltian maat toimivat yksinä omina hinta-alueinaan.



Kuva 2. Elspot-aluehinnat 16.4.2021. Systeemihinta 47,35 €. (Nord Pool 2021)

Sähkön toimitus- ja käyttötunnin lähestyessä toimivat lisäksi pohjoismaiset säätösähkömarkkinat. Suomen sisällä niistä vastaa järjestelmävastaava eli Fingrid Oyj. Koska osapuolet eivät käytännössä pysty täysin tarkasti ylläpitämään tuotannon ja kulutuksen välistä tehotasapainoa niin Fingrid hoitaa sitä erilaisilla taajuusohjatuilla reserveilla sekä manuaalisesti aktivoitavilla säädöillä. Säätomarkkinoiden tarkoituksena on saada sähkön tuotanto ja kulutus tasapainoon käyttötunnin aikana ja siten ylläpitää sähköjärjestelmän taajuus 50 Hz tuntumassa, tarkemmin välillä 49,9 Hz ja 50,1 Hz, ja näin ollen tuotetun sähkön laatu riittävän hyvänä. Taajuusohjatut reservit aktivoituvat automaattisesti, kun taajuus muuttuu liiaksi. Mikäli käytettävissä olevat reservit eivät riitä pitämään taajuutta sallituissa rajoissa, joudutaan aktivoimaan ylös- tai alassäätöjä säätösähkömarkkinoilta.

Käyttötunnin päätyttyä alkaa Fingridin tekemä taseselvitys ja sen seurauksena tasevastaavat käyvät Fingridin kanssa omien tasevirheidensä verran tasesähkökauppaa. Näitä kaikkia tuotannon ja kulutuksen tasapainoa varmistavia toimenpiteitä kutsutaan yhdessä tasehallinnaksi. Tasehallinnan tärkein tehtävä on ylläpitää sähköjärjestelmän taajuutta. Kuvassa 3 on esitetty sähkömarkkinan rakenne ajallisesti.



Kuva 3. Sähkömarkkinoiden rakenne. (Fingrid 2021 a)

2.1 Nord Pool Elspot

Nord Pool Elspot vuorokausimarkkinoilla käydään joka päivä kauppaa seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. Osapuolet arvioivat sääennusteiden, tuotantolaitosten tilanteiden sekä kulutusennusteiden perusteella seuraavan päivän tilannetta ja jättävät tarjouksensa seuraavan vuorokauden tuotannosta ja kulutuksesta ennen klo 13.00 Suomen aikaa. Kauppaa voi käydä pienimmillään 0,1 MWh/h kokoisesta toimituksesta. Kaupankäynti tapahtuu suljettuna huutokauppana, jolloin markkinoiden osapuolilla ei ole tietoa toistensa tarjouksista. Elspot -markkinalla muodostuu osto- ja myyntitarjousten sekä fyysisten siirtokapasiteettien perusteella systeemi-hinta seuraavan päivän jokaiselle tunnille niin että tuotannon ja hankinnan leikkauspisteeseen muodostuu kyseisen tunnin systeemi-hinta. Mikäli siirtokapasiteetti rajoittaa alueiden välistä sähkön siirtoa, muodostuu eri alueille oma hintansa suhteessa siirtorajoituksen suuruuteen. Suomi toimii spot -markkinalla yhtenä, omana hinta- ja tarjousalueenaan. Toteutuneissa spot -hinnoissa nähdään tiettyä jaksottaisuutta esimerkiksi viikonpäivien ja vuorokauden tuntien välillä. Usein viikonloput

ja arkipäivien yön tunnit toteutuvat halvempina hintoina koska silloin myös kulutus on pienintä. Arkipäivien aamu- ja iltatuntien hinnat tapaavat toteutua korkeimpina.

2.2 Nord Pool Elbas

Nord Poolin päivänsisäiset Elbas -markkinat toimivat Elspot -markkinoiden jälki-markkinana. Sähkön käyttötunnin lähestyessä, esimerkiksi sääennusteiden muutos, vikaantunut tuotantolaitos tai halu muuttaa tuotantosuunnitelmaa, voivat aiheuttaa tasepoikkeamaa ja sitä kautta tarpeen kaupankäynnille, jotta kulutus ja tuotanto saadaan tasapainoon ennen sähkön toimitushetkeä. Sähkön fyysisen toimitusvuorokauden Elbas -markkinat avautuvat edellisenä päivänä spot-markkinan tulosten jälkeen noin klo 15.00. Kauppaa käydään tuntitasolla jatkuvan kaupankäynnin periaatteella avoimena huutokauppana, jossa muiden osapuolten tarjoukset ovat näkyvillä. Kauppa tapahtuu, kun osto- ja myyntitarjousten hinnat kohtaavat. Kuten spot-markkinalla, pienimillään kauppaa voi käydä 0,1 MWh/h toimituksesta Tällä hetkellä kaupankäynti on mahdollista muualle Eurooppaan tunti ennen käyttötuntia, Viron ja Suomen välillä 30 minuuttia ennen käyttötuntia ja Suomen sisäisillä markkinoilla aina käyttötunnin alkuun saakka. Elbas -kaupankäynnin tarve tulee tulevaisuudessa todennäköisesti kasvamaan, johtuen tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon määrän jatkuvasta kasvusta. Säästä riippuvainen tuotanto sisältää runsaasti ennuste-epävarmuutta ja sen tarkka ennustaminen vuorokautta aiemmin käytäville Elspot -markkinoille on hankalaa. Ennuste tulee päivittymään ja tarkentumaan jatkuvasti mentäessä kohti toimituspäivää ja lopulta toimitustuntia. Tästä aiheutuva tuotannon ennuste-ero alkuperäisen Elspot -ennusteen, ja päivänsisäisen tarkentuneen ennusteen välillä on mahdollista tasata Elbas -markkinalla ja näin pienentää tasepoikkeamaa.

2.3 Säätosähkömarkkinat

Pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt ylläpitävät yhteisiä säätosähkömarkkinoita. Suomessa toimijana on Fingrid Oyj. Kaikki säätykykyistä kapasiteettia hallitsevat osapuolet voivat osallistua Suomessa säätosähkömarkkinoille. Fingrid pitää huolen siitä, että sillä on jokaiselle tunnille tarjolla riittävä määrä säätykykyistä kapasiteettia riittävän tehotasapainon ylläpitämiseksi. Säädetävän tuotannon tai kuorman haltijat jättävät säätotarjouksensa viimeistään 45 minuuttia ennen käyttötunnin

alkua. Säädetävän resurssin on pystyttävä 10 MW (5 MW jos elektroninen aktiivointi on käytössä) tehonmuutokseen 15 minuutin kuluessa säädön tilauksesta. Fingrid voi aktivoida säädön joko käyttötunnin alusta tai sen aikana.

Jos tuotanto on liian pientä tai kulutus suurta Fingrid aktivoi kyseiselle tunnille jätettyjä ylössäätötarjouksia halvimmasta tarjouksesta alkaen ja kyseisen tunnin hinnaksi tulee kalleimman käytetyn ylössäätötarjouksen hinta. Jos taas tuotanto on liian suurta tai kulutus pientä aktivoidaan alassäätöjä kalleimmasta tarjouksesta alkaen ja hinnaksi muodostuu lopulta halvimman käytetyn tarjouksen hinta. Säädön toteuttavat osapuolet saavat korvauksen toteutuneen säätöhinnan (€/MWh) ja säädetyt energiamäärän (MWh) mukaan. (Fingrid 2021 b)

2.4 Taseselvitys ja tasesähkö

Jokaisen sähkömarkkinoilla toimivan osapuolen tulisi jatkuvasti huolehtia omasta sähkötaseestaan eli tuotannon/hankinnan ja kulutuksen/myynnin välisestä tasapainosta. Koska se ei käytännössä täysin onnistu niin jokaisella markkinatoimijalla on oltava avoin toimittaja, joka tasapainottaa osapuolen sähkötaseen. Katkeamaton avointen toimitusten ketju päättyy järjestelmävastaavaan, joka Suomessa on Fingrid. Osapuolta, jonka avoin toimittaja on Fingrid, kutsutaan tasevastaavaksi. (Fingrid 2021 c)

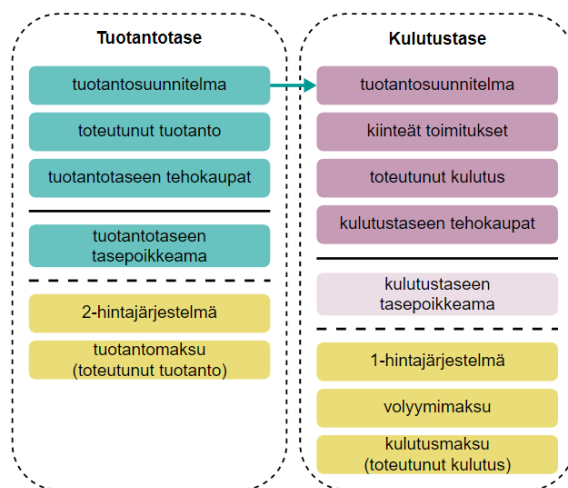
Sähkön toimitus- ja käyttötunnin jälkeen edetään sähkömarkkinoilla taseselvitys vaiheeseen. Kaikkien sähkömarkkinoilla toimivien tasevastaavien sähkötaseet selvitetään. Fingridin tekemässä taseselvityksessä tasevastaavan mahdolliset tasepoikkeamat lasketaan jokaiselle tunnille. Poikkeaman määrän, suunnan ja tasesähköhinnan perusteella käydään tasesähkökauppaa. Näin ollen sähköjärjestelmän tasapainotuksen kustannukset jakautuvat osapuolille, jotka ovat aiheuttaneet tarpeen tasapainotukselle.

Pohjoismaissa on vuodesta 2009 alkaen ollut käytössä kahden taseen malli, jossa tuotanto- ja kulutustaseet käsitellään omissa taseissaan. Tuotantopuoli käsitellään yhdessä taseessa ja sähkön ostot ja myynnit sekä kulutus toisessa taseessa.

Tuotantosuunnitelmia on mahdollista muokata 45 minuuttia ennen käyttötunnin alkua. (Fingrid 2021 d)

Tuotantotaseessa käsitellään tuotantosuunnitelma, toteutunut tuotanto ja tehokaupat kuvan 4 mukaisesti. Tasepoikkeama syntyy tuotantosuunnitelman ja toteutuneen tuotannon erotuksesta. Mikäli tasevastaavan toteutunut tuotanto on suurempi kuin ilmoitetussa suunnitemassa, syntyy taseeseen ylijäämää ja tasevastaava myy tasesähköä Fingridille. Mikäli tase on alijäämäinen tasevastaava ostaa tasesähköä Fingridiltä. Tuotantotaseessa käytetään kaksihintajärjestelmää, eli tasesähkön ostaja ja myyntihinnalle on oma hinta. Ylijäämätilanteessa tasevastaavalle tunnin myyntihinnaksi tulee kyseisen tunnin alassäättöhintaa. Jos alassäättöä ei tehdä, tulee tunnin hinnaksi kyseisen tunnin Suomen Elspot-aluehintaa. Alijäämätilanteessa tasevastaavan tasesähkön ostohinnaksi tulee kyseisen tunnin ylössäättöhintaa. Jos ylössäättöä ei tehdä, tulee tunnin hinnaksi Suomen aluehintaa. Kyseinen kaksihintajärjestelmä tekee sen, että tuottajan ja tasevastaavan ei missään tilanteessa ole mahdollista saada hyötyä suunnitelluista tasepoikkeamista. Tasesähkön ostohinta pysyy aina Suomen aluehintaa korkeampana ja myyntihinta aluehintaa alempana. (Fingrid 2021 d)

Kulutustase muodostuu tuotantosuunnitelmasta, kiinteistä toimituksista, toteutuneesta kulutuksesta sekä kulutustaseen tehokaupoista. Tasepoikkeamaa syntyy sähkön tuotannon ja hankinnan sekä toteutuneen kulutuksen erotuksesta. Alijäämää muodostuu, jos tasevastaava kuluttaa enemmän sähköä kuin tuottaa. Alijäämän kattamiseksi tasevastaava ostaa tasesähköä Fingridiltä. Kulutustaseesta muodostuu ylijäämäinen, jos tasevastaavan kulutus on pienempää kuin suunniteltu tuotanto. Siinä tapauksessa tasevastaava myy tasesähköä Fingridille. Kulutustaseen puolella käytetään yksihintajärjestelmää, jolloin tasesähkön ostaminen ja myyminen on samanhintaista. Mikäli käyttötunti on ylössäättötunti käytetään ylössäättöhintaa. Vastavasti alassäättötunnilla käytetään alassäättöhintaa. Mikäli säätöjä ei käyttötunnilla tehdä, käytetään hintana kyseisen tunnin Suomen Elspot-aluehintaa. Kuvassa 5 näkyy tarkemmin hinnan muodostuminen. (Fingrid 2021 d)



Kuva 4. Kahden taseen malli. (Fingrid 2021 d)

	Tuotantotase 2-hinta			Kulutustase 1-hinta			
	Ylösäättötunti	Ei säättöjä	Alasäättötunti	Ylösäättötunti	Ei säättöjä	Alasäättötunti	
Ylösäättöhinta	100	50	50	100	50	50	€/MWh
Spothinta	50	50	50	50	50	50	-
Alasäättöhinta	50	50	20	50	50	20	-
tasesähkön ostohinta	100	50	50	100	50	20	-
tasesähkön myyntihinta	50	50	20	100	50	20	-

Kuva 5. Tasesähkön hintaesimerkki. (Fingrid 2021 e, muokattu)

2.5 Varttitase ja yksitasemalli

Energia-alan meneillään oleva murros ja Euroopan asteittain yhdistyvät sähkömarkkinat tuovat lähivuosina muutoksia myös pohjoismaiseen sähköjärjestelmään. Nykyisessä pohjoismaisessa taseselvityksessä käytetään aikaresoluutiona yhtä tuntia, mikä tarkoittaa, että kaikki kulutus ja tuotanto lasketaan tunnin ajanjaksoissa. Tulevaisuudessa uusiutuvien energialähteiden lisääntyminen ja niiden

säänmukainen vaikeasti ennustettava tuotannonvaihtelu muuttaa sähköjärjestelmän tilaa epävakammaksi. Koko Euroopassa olisi tarkoituksena siirtyä lähivuosina taseselvityksessä 15 minuutin aikaresoluutioon, eli tuotanto ja kulutus tasataan aina 15 minuutin aikajaksolla. (Fingrid 2021 f)

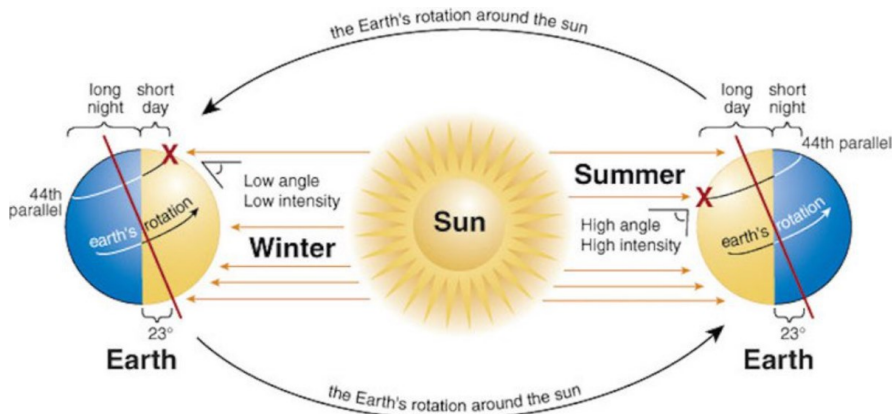
Nykyisin Pohjoismaissa käytettävän kahden taseen mallin on suunniteltu muuttuvan tulevaisuudessa osana muutosta kohti yhteisiä eurooppalaisia sähkömarkkinoita. Tasehallintamallissa luovuttaisiin erillisistä tuotanto- ja kulutustaseista ja siirryttäisiin ns. yksitasemalliin, jossa tuotanto ja kulutus käsiteltäisiin samassa taseessa. Yksitasemalli on pohjaltaan samanlainen kuin nykyinen kulutustase, mutta lukittujen tuotantosuunnitelmien tilalle tulee todellinen tuotanto. Uudessa mallissa tuotantosuunnitelmaa ei enää huomioida sähkötaseessa, mutta kantaverkkoyhtiöt tarvitset jatkossakin mahdollisimman tarkkoja tuotantosuunnitelmia verkon hallintaan. (Fingrid 2021 g)

Yhden taseen mallissa hinnoitteluna toimii sama hinta tasesähkön ostolle ja myynnille eli samanlainen hintajärjestelmä kuin nykyään kulutustaseen puolella. Uusi malli mahdollistaa tuotantopoikkeamien korjaamisen samoin ehdoin toisen tuotantolaitoksen lisäksi myös kulutusta pienentämällä. Tämä helpottaa ja yksinkertaistaa tuotannon ja kulutuksen tasapainottamista siirryttäessä kohti hiilineutraalia sähkön-tuotantoa, jossa erilaisten joustojen merkitys kasvaa sähkövoimajärjestelmän tasapainottamisessa. (Fingrid 2021 g)

3 AURINKOENERGIA

Auringossa tapahtuva fuusioreaktio tuottaa jatkuvasti energiaa ympäri aurinkokuntaa ja Maan optimaalinen sijainti Aurinkoon nähden mahdollistaa maan monipuolisen elämän. Ilman Auringosta hohtavaa lämpöä, energiaa ja valoa, maapallolla ei olisi elämää. Auringon säteilyn avulla tuotetaan välillisesti lähes kaikki energia maapallolla, pois lukien ainoastaan ydinvoima ja geoterminen energia. Aurinko lämmittää Maata, saa aikaan veden kiertokulun, tuulet ja kasvien kasvamisen. Aurinko säteilyn teho maan pinnalla on valtava, noin 170 000 TW, eli sillä kattaisi moninkertaisesti koko maapallon energiantarpeen, mutta siitä ei saada käytännössä hyödynnettyä kuin hyvin pieni osa. Tämä säteilytehon määrä tarkoittaa, että tunnin aikana maapallon pinnalle tulee auringon säteilyenergiaa enemmän kuin koko ihmiskunta ehtii kuluttaa energiaa vuodessa. (Edu Helsinki 2021; Energiamaailma 2021; Piesala 2021)

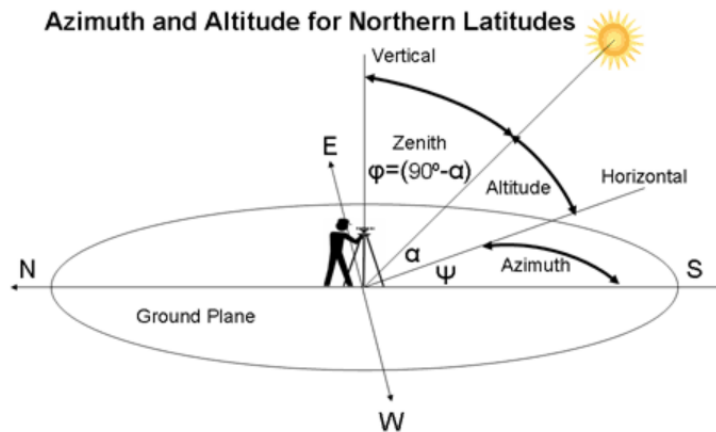
Maapallo kiertää auringon ympäri hieman ellipsin muotoista rataa pitkin. Tämän takia maapallo on lähimpänä Aurinkoa tammikuussa ja kauimpana kesäkuussa. Maapallo kiertää aurinkoa rata-akseliaan pitkin, johon nähden maapallon oma pyörimisakseli on kallistunut $23,5^\circ$ ja sen seurauksena aiheutuvat vuodenaikojen vaihtelut. Kuten kuvasta 6 näkyy, kallistuksen vuoksi pohjoinen pallonpuolisko saa keuhaisin enemmän auringonsäteilyä kuin eteläinen ja talvisin päinvastoin. (Roper 2016)



Kuva 6. Maan kierto suhteessa Aurinkoon. (Roper 2016)

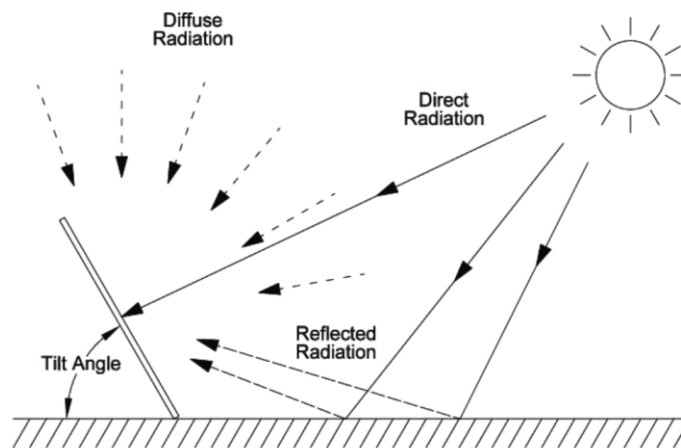
Aurinkoenergia on uusiutuvaa energiaa, jossa auringon säteilyenergia hyödynnetään sähkö- tai lämpöenergiana. Tässä työssä keskitytään aurinkosähkön tuotantoon. Auringon säteilyenergian muuntaminen sähköenergiaksi tapahtuu, kun säteilyn sisältämät pienet hiukkaset, fotonit osuvat aurinkokennon pintaan ja imeytyvät aurinkokennoissa oleviin puolijohdemateriaaleihin. Siellä negatiivisen varauksen omaavat elektronit irtoavat atomeistaan ja alkavat virrata vapaasti puolijohteessa, yleensä piissä ja muodostavat näin sähkövirtaa aurinkokennojen virtajohtimiin. Kun valon määrä ja siten samalla säteilyn intensiteetti kasvaa, niin myös elektroneja irtoaa atomeista enemmän ja sitä kautta syntyy enemmän sähköä. (Vattenfall 2021)

Aurinkoenergian kannalta on tärkeää, että aurinko paistaa valittuun kohteeseen mahdollisimman pitkään, esteettömästi ja sopivasta kulmasta. Auringon paikkaa taivaalla suhteessa maanpinnalla olevaan kohteeseen voidaan määrittää kahden kulman avulla. Kuvassa 7 näkyvä korkeuskulma (altitude) kertoo kulman auringonsäteiden ja horisontin välillä. Suomessa se on kesällä suurempi ja talvella pienempi. Koska auringon korkeuskulmaan ei voi vaikuttaa, tulee paneelien kallistuskulma valita paneelien sijainnin mukaan sopivaksi, jotta auringonsäteet osuisivat aurinkopaneelin pintaan nähden mahdollisimman suorasti. Maapallon pyöriessä akselinsa ympäri auringonsäteet osuvat paneeliin joka hetki eri kulmasta. Suunta- eli atsimuuttikulma (azimuth) kertoo auringonsäteiden ja etelän välisen kulman. Itä on -90 astetta, etelä on 0 astetta ja länsi +90 astetta. Yleensä pohjoisella pallonpuoliskolla paneelien suuntaus etelään on energiantuoton kannalta paras mahdollinen, sillä aurinko säteilee etelästä kaikkein korkeimmalta. (Electropaedia 2021)



Kuva 7. Auringonsäteiden ja maan välisiä kulmia. (Electropaedia 2021)

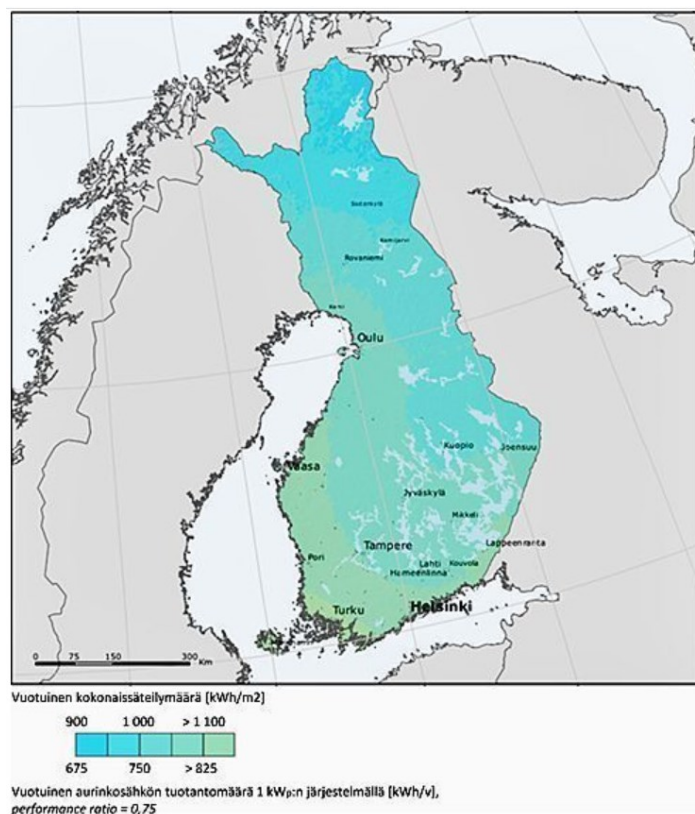
Kuvasta 8 näkyy, kuinka auringosta paneelin pinnalle tuleva säteily koostuu suorasta auringon säteilystä sekä hajasäteilystä. Suoraan auringosta tulevaa säteilyä kutsutaan suoraksi säteilyksi ja muualta, esimerkiksi ilmakehästä, pilvistä tai maasta heijastunutta säteilyä kutsutaan hajasäteilyksi. Hajasäteilyn osuus on sitä merkittävämpi mitä matalammalta aurinko paistaa eli Suomen leveysasteilla huomattava osa säteilystä on hajasäteilyä. Suoran säteilyn ja hajasäteilyn yhteissummaa kutsutaan globaalisäteilyksi. Aurinkopaneelien tuotannon kannalta ei ole merkitystä tuleeko säteilyenergia paneelille suorasta säteilystä vai hajasäteilystä. (Motiva 2020 a)



Kuva 8. Auringon suora säteily ja hajasäteily. (Mallon et al. 2017)

Suomen pohjoinen sijainti aiheuttaa tiettyjä rajoituksia vuotuisiin Auringon säteilymääriin ja sitä kautta myös paneelien tuoton tehokkuuteen. Etelä-Suomessa päästään 1100 kWh/m^2 vuotuisiin säteilymääriin, kun taas pohjoisessa jäädyään alle 900 kWh/m^2 tasolle. Lisäksi tulee huomioida vuoden sisäiset vaihtelut. Talvella kun sähkönkulutus on suurinta, Suomen leveyspiirillä aurinko paistaa vähiten. Kesällä taas, kun kulutus on muutenkin vähäistä, aurinkosähköä on saatavilla suurempia määriä. Tämä tulee painamaan sähkön hintaa jatkossa kesäkuukausina huomattavan alas. Tulevaisuudessa tähän on mahdollista löytää ratkaisuja, kun sähkön varastointiratkaisut kehittyvät ja tulevat kustannustehokkaiksi myös teollisessa mittakaavassa. Suomen suhteellisen viileissä oloissa on toisaalta etuna se, että paneelit tuottavat paremmin viileällä kuin kuumalla lämpötilalla.

Kuvasta 9 näkyy optimaaliseen kulmaan asetetun pinnan vuotuisia säteilymääriä Suomessa. Vihreämmillä alueilla säteilyä on tarjolla runsaammin ja sinisellä vähemmän. Kokonaissäteilymäärät ovat selvästi suurimpia Länsi- ja Etelä-Suomessa, jossa päästään vuositasolla suunnilleen Pohjois-Saksan tasolle. Tämä on merkittävä huomio siksi että Saksa on maailman edistyneimpiä aurinkoenergian tuottajia ja vuonna 2018 Saksan kokonaissähköntuotannosta $8,4 \%$ tuotettiin aurinkosähköä. (Kokkonen 2019)

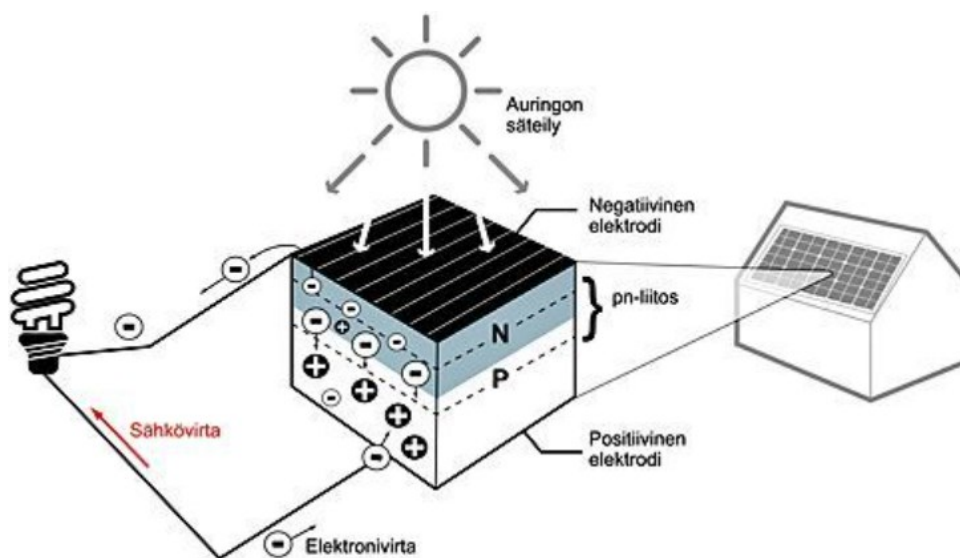


Kuva 9. Vuotuisia säteilymääriä Suomessa. (Motiva 2020 a)

3.1 Aurinkokennot

Ranskalainen fyysikko Becquerel oli ensimmäinen, joka havaitsi valosähköilmiön vuonna 1839. Becquerel huomasi, että kahden elektrodin välille syntyy pieni jännite, kun toiseen niistä kohdistaa valoa. Aluksi valosähköilmiötä tutkiessa keskityttiin kiinteisiin aineisiin, joista seleenin kanssa edettiin pisimmälle. 1880-luvulla saatiin rakennettua toimivia seleenikennoja, joiden hyötysuhteet kuitenkin jäivät 1–2 %. Seleenikennot eivät lopulta olleet kovin käytännöllisiä, kun yhdistetään huono hyötysuhde kalliiseen hintaan. Suuri läpimurto tekniikassa tuli 1950-luvulla kun Yhdysvalloissa keksittiin käyttää piitä puolijohteena aurinkokennoteknologiassa. Piikennoilla saavutettiin jopa 6 % hyötysuhde ja niitä hyödynnettiin varsinkin avaruuden lähetettyjen satelliittien ja avaruusaluksien virtalähteenä. Piikennojen kehitys on jatkunut aina näihin päiviin ja nykyisin niillä saadaan lähes 20 % hyötysuhde. (Hersch et al. 1982)

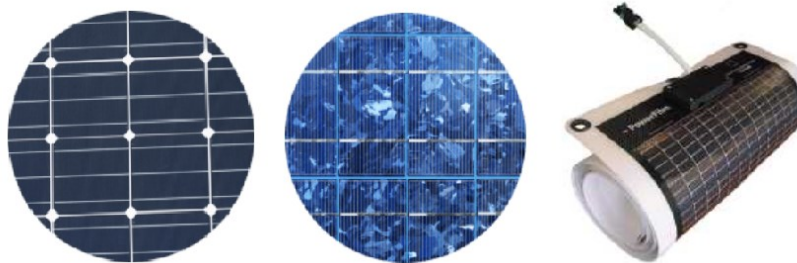
Aurinkokennoissa hyödynnetään puolijohdetekniikkaa ja puolijohdeena käytetään käytännössä aina piitä sen hyvän saatavuuden ja suhteellisen korkean hyötysuhteen ansiosta. Puolijohdemateriaalit ovat normaalisti eristäviä mutta kun niihin kohdistuu energiaa ne alkavat tietyissä olosuhteissa johtamaan sähköä. Aurinkokennossa on yhdistetty kaksi erityyppistä puolijohdekerrosta. Boorilla seostettu p-tyypin kerros ja fosforilla seostettu n-tyypin kerros. Näiden puolijohdekerrosten välille syntyy pn-liitos, joka p-puolelle muodostuu positiivinen varaus ja n-puolelle negatiivinen varaus. Liitoksen väliin jäävälle rajapinnalle syntyy valosähköisen ilmiön takia sähkökenttä, joka estää varausten kulkemisen rajapinnan yli n-puolelta p-puolelle, aiheuttaen aurinkokennon ylä- ja alapinnan välille jännite-eron. Kuvassa 10 näkyy aurinkokennon rakenne. Yksittäisessä kennossa on kuitenkin suhteellisen pieni jännite, joten käytännössä kennoja kytketään monta sarjaan tai rinnan. Yhteen kytketyt kennot koteloidaan kehyksen ja auringonsäteilyä läpäisevän suojalasin avulla. Näitä yhteen kytkettyjä kennoryhmiä kutsutaan aurinkopaneeleiksi. (Motiva 2021)



Kuva 10. Aurinkokennon toimintaperiaate. (Motiva 2021)

Kaupallisessa käytössä olevat kolme kennotyyppiä ovat jaoteltu piin käyttötavan mukaan, ensimmäisen sukupolven yksi- ja monikiteisiin kennoihin sekä toisen sukupolven ohutkalvokennoihin, jotka näkyvät kuvassa 11. Lisäksi on jatkuvasti kehitteillä tulevaisuuden kolmannen sukupolven kennoteknologioita, joilla pyritään

saamaan yhdistettyä alhaiset kustannukset ja korkean tekniikan. Pisimmällä kehityksessä ovat nanokidekennot, joissa ei ole pn-liitoksen aikaansaamaa sähkökenttää, vaan elektronien liike perustuu kemiallisiin reaktioihin. (Motiva 2021)



Kuva 11. Yksi- ja monikidekennot sekä ohutkalvokenno. (GreenMatch 2021; The Renewable Energy Website 2021)

Yksikidekenno valmistetaan jalostamalla luonnossa esiintyvää piitä. Yksikiteinen piikenno on hiukan kalliimpi, koska sen valmistustapa on hidas, vaatii huolellista työtä ja sen valmistus on teknisesti haastavaa, joten tuotantokustannukset ovat suhteellisen suuret. Toisaalta yksikiteinen pii on kennotyypeistä hyötysuhteeltaan paras, noin 15–19 %. ja rakenteeltaan kestävin säilyttämään ominaisuutensa koko elinkaarensa ajan. Se on myös vähemmän altis korkean lämpötilan aiheuttamille tehohäviölle kuin muut tyypit.

Monikiteinen kenno on ominaisuuksiltaan hyvin samankaltainen kuin yksikiteinen kenno. Se on kuitenkin huomattavasti yksinkertaisempi valmistaa koska ei vaadi yhtä huolellista valmistusprosessia. Monikidekennoissa pii sulatetaan ja valetaan haluttuun muotoon, mikä johtaa siihen, että kiderakenne ei ole täysin yhtenäinen. Rakeisen rakenteen takia elektronit eivät liiku puolijohteessa täysin sulavasti mikä heikentää monikidekennon hyötysuhdetta verrattuna yksikiteiseen kennoon.

Ohutkalvopaneeleilla saadaan kerättyä tehokkaammin auringon hajasäteilyä, mutta toisaalta ne myös päästävät ohuen rakenteensa takia valoa enemmän lävitseen, joten niillä ei saada hyödynnettyä auringonsäteilyä sähköntuotantoon yhtä hyvin kuin kiteiseen piihin perustuvilla paneeleilla. Hyötysuhde jää noin 10 %. Paneelin ohuudesta johtuen kennomateriaalia tarvitaan vähemmän mikä tarkoittaa myös

halvempaa hintaa. Etuna on myös ohutkalvon taipuisuus, joka mahdollistaa niiden käytön hankalissakin sovelluksissa. (Motiva 2021)

Suomen maantieteellisen sijainnin kannalta on hyödyksi, että aurinkopaneeli tuottaa kylmänä paremmin kuin lämpimänä. Piin ominaisuuksien takia paneelin tuotama teho vähenee noin 0,5 % yhtä astetta kohden, kun paneelin lämpötila on yli 25 °C. Auringon paistaessa korkealta, ulkolämpötilan ollessa 25 °C, voi paneelin pintalämpötila kohota helposti yli 50 °C. Tämä tarkoittaa laadukkaallakin paneeleilla 10 % tehohäviötä, ja huonommilla paneeleilla vieläkin enemmän. Onkin tärkeää suunnitella paneelien sijainti niin että se olisi mahdollisimman esteetön jäähdyttävälle tuulelle ja ilmavirtauksille.

3.2 Aurinkosähkön tuotanto

Aurinkopaneelien tuottoon vaikuttaa merkittävästi paneelien sijainti, suuntaus ja kallistuskulma. Aurinkosähkön tuotannon tehokkuuden kannalta tärkeintä on asentaa paneelit paikkaan, jossa auringonvaloa on tarjolla mahdollisimman pitkään ja esteettömästi. Aurinkopaneelit tulisi sijoittaa riveihin niin että yksikään paneeleista ei joutuisi varjoon minään vuodenaikana, paistoi Aurinko kuinka matalalta tahansa. Varjostuksia voivat aiheuttaa puut, rakennukset ja muut rakenteet. (Motiva 2020 b)

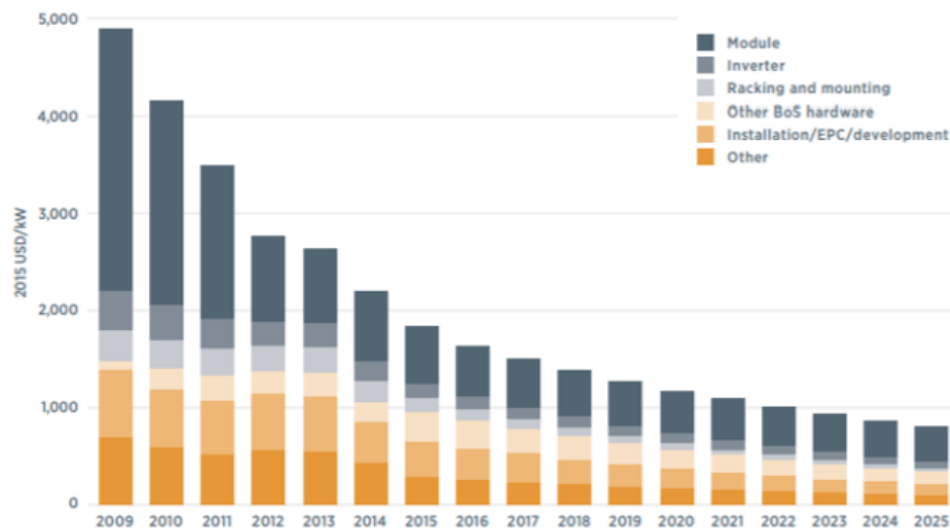
Suomessa aurinkopaneelit kannattaa suunnata pääsääntöisesti etelään, jotta saadaan paras mahdollinen vuosituotto. Kun paneelin pinnan ja säteilyn välinen kulma eli tulokulma on kohtisuora, saavutetaan paneeleilla paras mahdollinen energiantuotto. Optimaalinen kallistuskulma (tilt angle, kuvassa 8), eli maanpinnan ja paneelin välinen kulma on Suomen oloissa 30–45 astetta. Eri vuodenaikoina Auringon korkeus taivaalla vaihtelee, esimerkiksi keskikesällä, kun Aurinko on korkeimmillaan, paras tuotantohuippu saataisiin pienemmällä kallistuskulmalla. Vastaavasti talvella Aurinko paistaa matalammalta, joten paras tuotantohuippu saataisiin paneelien korkealla kallistuskulmalla. (Motiva 2020 b)

Kiinteän asennuksen lisäksi aurinkopaneelit voidaan asentaa Aurinkoa seuraavan järjestelmän kanssa. Yhden akselin systeemillä voidaan seurata joko auringon korkeutta tai ilmansuuntaa. Kahden akselin järjestelmällä paneelit saadaan suunnattua

aina suoraan kohti Aurinkoa. Aktiivinen seurantajärjestelmä sisältää moottorin, jonka avulla aurinkoa seurataan. Moottori kohdistaa paneelin oikeaan suuntaan joko säteilyä havaitsevan sensorin tai päivään sekä kellonaikaan perustuvien algoritmien avulla. Passiiviset seurantajärjestelmät toimivat hydraulisesti. Ne sisältävät nestettä, jolla on matala kiehumispiste ja auringon säteilyn osuessa seurantamekanismiin, nesteeseen muodostuva paine liikuttaa järjestelmää Auringon suuntaan. (Motiva 2020 b)

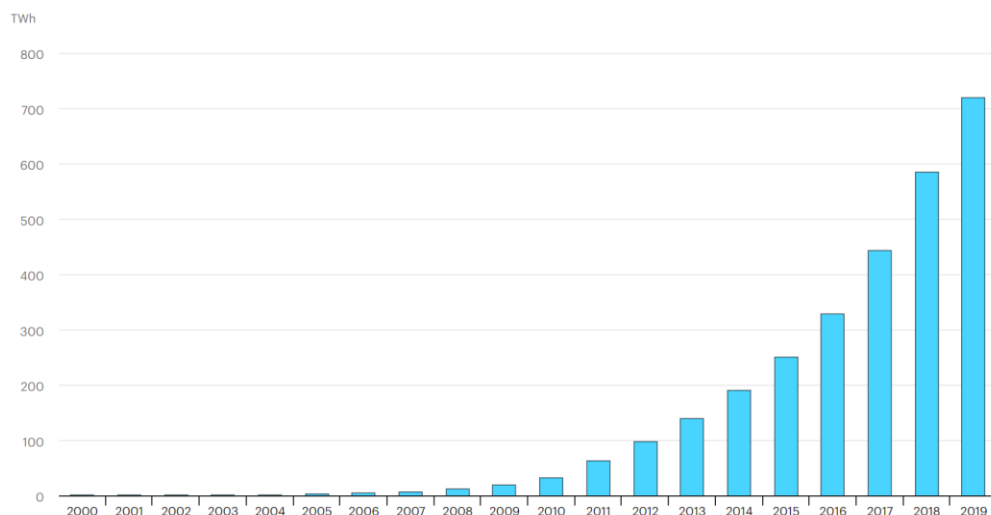
Paikoissa, joissa suoraa auringonsäteilyä on runsaasti ja pilvisyys vähäistä, seurantajärjestelmillä voidaan saada merkittävää, jopa 30 % tuotannon lisäystä verrattuna kiinteisiin paneeleihin. Silloin niiden käyttö on perusteltua varsinkin isoimmissa tuotantolaitoksissa. Pilvisellä säällä seurannalla ei saada juuri mitään etua koska silloin taivaalta on saatavilla ainoastaan hajasäteilyä. Suomessa hajasäteilyn osuus on noin 50 % kokonaissäteilystä, joten täällä seurantajärjestelmästä on vaikea saada riittävän suurta hyötyä. Suuntaavat järjestelmät kasvattavat hankintahintaa ja lisäksi ne sisältävät liikkuvia, sähköä kuluttavia osia. Ne myös monimutkaistavat rakennetta ja lisäävät huollon tarvetta. Niiden kanssa aurinkosähkön tuotanto menettääkin yhden parhaista ominaisuuksistaan, sen että siinä ei ole liikkuvia osia. (Motiva 2020 b; Åman 2015)

Aurinkosähköntuotanto on tällä hetkellä yksi nopeimmin kasvavista uusiutuvan energiantuotannon muodoista. Aurinkosähköntuotannossa primäärienergia eli auringonsäteily on ilmaista, sitä on rajattomasti saatavilla. ja sen tuotannon kasvu edesauttaa ilmastonmuutoksen hillintää. Aurinkoenergian hinta on perinteisesti ollut esteenä sen laajamittaisemmalle tuotannolle mutta kuten kuvasta 12 näkyy, viime vuosina aurinkosähköjärjestelmien kustannukset ovat laskeneet nopeasti, mikä on parantanut aurinkosähkön tuotannon kannattavuutta suhteessa muihin energiamuotoihin nähden ja lisännyt aurinkosähkövoimaloiden asennettua kapasiteettia globaalisti. Varsinkin itse paneelien hinnat ovat laskeneet voimakkaasti viimeisen 10 vuoden aikana. (IRENA 2021)



Kuva 12. Aurinkopaneelijärjestelmien hinnan lasku. (IRENA 2021)

Kuvassa 13 näkyy aurinkosähkön tuotantomäärän eksponentiaalinen kasvutahti aina vuosituhaten alusta vuonna 2019 tuotettuun 720 TWh:n saakka. IEA:n (International Energy Agency) kestävä kehityksen skenaariossa aurinkoenergian kaavailtu kasvutahti on hurjaa, sillä vuonna 2025 globaalin aurinkoenergiatuotannon tulisi olla 1940 TWh ja vuonna 2030 jo 3268 TWh. (IEA 2021)



Kuva 13. Aurinkoenergian tuotantomäärän kehitys. (IEA 2021)

Aurinkosähkön tuottamisesta ei synny polttoainekustannuksia eikä suoria hiilidioksidipäästöjä. Täysin ympäristön kannalta haitatonta aurinkoenergian tuotanto ei kuitenkaan ole sillä paneelien valmistuksessa ja valmistuksessa tarvittavien materiaalien hankinnasta syntyy päästöjä ja jätettä. (Vattenfall 2021) Ympäristövaikutukset ovat kuitenkin kokonaisuudessaan melko vähäisiä verrattuna moneen muuhun tuotantomuotoon. Teollisen mittakaavan aurinkoenergiatuotanto on tällä hetkellä samanlaisessa tilanteessa, kun tuulienergia vuosituhaten alkuvuosina. Tekniikka on olemassa ja yleisesti tunnustetaan, että kyseessä on tulevaisuuden tuotantotapa mutta teknologia ei ole vielä markkinaehtoisesti riittävän tehokasta kustannuksiin nähden. Aurinkopaneelien teknologinen ja uusien materiaalien kehitys sekä jatkuvasti parantuneet hyötysuhteet ovat laskeneet merkittävästi aurinkopaneelien hintoja ja lisänneet tuotannon määrää viimeisten vuosien aikana. Aurinkoenergialla onkin tärkeä rooli tulevaisuuden energiajärjestelmässä ja se on osana energiantuotannon siirtymisessä kohti uusiutuvia energianlähteitä.

4 AURINGONSÄTEILYN ENNUSTAMINEN

Uusiutuvien energianlähteiden käytön jatkossakin yleistyessä sähkömarkkinoilla, myös niihin liittyvä ennuste-epävarmuus tulee korostumaan. Sähkömarkkinoilla kysynnän ja tarjonnan on oltava tasapainossa joka hetki. Tällä hetkellä sähkökauppa kuitenkin tehdään tulevaisuuteen asettuvassa aikaikkunassa, aina vuorokauden päähän tarjontahetkestä. Jos todellinen tuotanto poikkeaa ennustetusta, se saattaa aiheuttaa kustannuksia energiantuottajalle tai tasevastaavalle. Keskeisessä roolissa tulevat olemaan paikalliset lyhyen tähtäimen sääennusteet, jotka ulottuvat parin vuorokauden päästä aina käyttöhetkeen asti.

Aurinkosähkön ennustettavuuteen tuntitasolla liittyy runsaasti epävarmuustekijöitä. Koska Aurinko lämmittää maapalloa epätasaisesti niin tuulet ja merivirrat yrittävät tasata eroa siirtämällä lämpöä lämpimimmiltä alueilta kohti napa-alueita. Päiväntasaajan seudulla ilmakehä käyttäytyy vähemmän kaoottisesti, kun taas pohjoisessa sää vaihtelee hyvinkin nopeasti ja olosuhteet ovat usein erittäin vaikeasti ennustettavissa. Auringon säteilyä ennustettaessa merkittävässä asemassa on pilvisyyden nopeat vaihtelut, joiden tuntitason ennustaminen esimerkiksi puolipilvisenä päivänä on erittäin haastavaa.

Auringon säteilytehoon maanpinnalla vaikuttaa pääosin kaksi asiaa, Auringon paikka taivaalla sekä pilvipeitteen määrä, laatu ja sijainti. Auringon paikka taivaalla on melko helposti laskettavissa eri vuodenajoille suhteessa haluttuun kohteeseen. Kun se on tiedossa, niin saadaan selvillä niin sanottu kirkkaan taivaan malli, jossa selviää kokonaissäteilyn määrä täysin pilvettömän päivän aikana. Niinpä tietyn päivän ja tuntitason auringon säteilytehoa ennustettaessa tarvitsee keskittyä pääasiassa pilviin ja niiden liikkeisiin. Pilvien muodostumiset ja niiden liikkeet ovat erittäin kaoottisia prosesseja, jonka vuoksi niitä on äärimmäisen vaikea ennustaa ja mallintaa. Pilvifysiikan ja pilvimallien uskotaan olevan tärkeimmät tekijät, jotka vaikuttavat aurinkoennusteiden tarkkuuteen. Haasteena on, että pilven muodostuminen on yksi monimutkaisimmista luonnonilmiöistä mallinnettaviksi, koska ne voivat sisältää kaikki kolme veden faasimuotoa, eri kiintoaineiden ja nesteiden yhdistelmää sekä turbulenssia muutosta. Muut meteorologiset muuttujat, kuten suhteellinen

kosteus ja tuulen nopeus ovat myös tärkeitä fyysisen pilvimallinnuksen kannalta. (Yang et al. 2018)

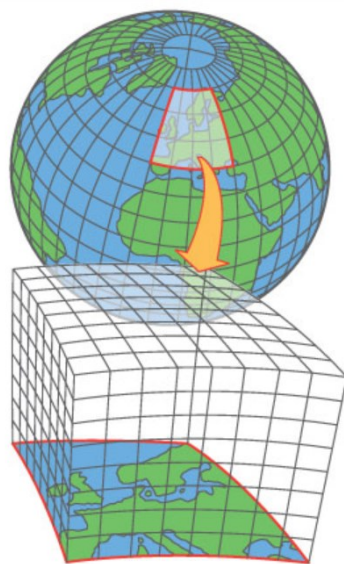
Seuraavassa käydään läpi muutamia erityyppisiä pilvisyyden ennustamismenetelmiä. Kaikissa niissä on omat hyvät ja huonot puolensa. Esimerkiksi satelliittidatasta on vaikea ja lähes mahdotonta saada pieneltä rajatulta alueelta reaaliaikaista tietoa, mutta yli päivän pituisiin ennusteisiin sen ominaisuudet sopivat hyvin. Laajan ja kattavan säteilymittariverkoston rakentaminen taas antaa tarkkaa tietoa itse kohteen läheisyydestä tuntitasolla ja jopa tunnin sisällä. Toisaalta tällaisen mittariverkoston suunnittelu, hankkiminen, ylläpito ja huoltaminen tietää merkittävästi lisää kustannuksia. Mahdollisesti yksi resurssitehokas tapa ennustaa aivan lähituntien säätä voisi olla datan hankkiminen lähimmiltä olemassa olevilta mittausasemilta ja saadun datan ekstrapolointi. Eli oletetaan ilmakehän ilmiöiden jatkavan mittausasemalla havaittua liikettään. Tätä menetelmää rajoittaa se, että ennustevirheen mahdollisuus ja suuruus kasvaa mitä pidemmän matkan joudutaan ekstrapoloimaan. Mittausaseman ja ennustettavan kohteen tulisi siis olla mahdollisimman lähellä toisiaan. (Inman et al. 2013, 554)

4.1 Numeeriset sääennustemallit

Nykyaikana säätä ja ilmastoa ennustettaessa keskeinen menetelmä on numeeriset sääennustemallit. Jokapäiväisten sääennusteiden pohjana ovat numeeristen säämallien tuottamat ennusteet ilmakehän tulevasta tilasta. Niiden avulla pystytään simuloimaan ilmakehän prosesseja ja ilmiöitä fysiikan tunnettuihin säilymlakeihin perustuen. Varsinkin keskipitkien ja pitkien ennusteiden tekemisessä numeeriset sääennustemallit (NWP, Numerical Weather Predictions) ovat oikeastaan ainut luotettava tapa ennustaa säätä ja ilmastoa. Ilmakehästä havaintoina saatujen eri sääsuureiden ja aiempien simulointien tiedot yhdistetään ja saadaan mallinnettua ilmakehän arvioitu tila tulevalla ajanhetkellä.

Periaatteena on, että ilmakehä esitetään pisteissä, jotka muodostavat tasavälisen hilan. Hilaväli voi olla esimerkiksi rajoitetun mallin muutamasta kilometristä globaalin mallin kymmeneen kilometriin. Hilaruudukko on esitetty kuvassa 14. Laskeaan havaintotiedoista ja vanhan ennusteen pohjalta lähtötila jokaisessa

hilapisteessä ja ratkaistaan fysiikan lakeihin perustuvien liike- ja termodynaamisten yhtälöiden, sekä viereisten pisteiden arvojen avulla suureiden muutosnopeus hilapisteissä. Muutosnopeuksien avulla ratkaistaan uudet arvot esimerkiksi tunnin kuluessa. Laskuja toistetaan, kunnes haluttu ennusteen pituus on valmis. Tämä kaikki vaatii valtavan määrän dataa käsiteltäväksi ja huolimatta nykyisistä supertietokoneista entistä tarkempien ja pidempien mallinnusten suurin rajoite on edelleen tietokoneen laskentateho. Hilavälin pienentyessä ja sitä kautta tarkemman resoluution ennustetta tehdessä, tietokoneressurssin tarve aina vaan kasvaa. (Inman et al. 2013, 560)



Kuva 14. Numeerisissa sääennustemalleissa maapalloa ympäröivä ilmakehä on jaettu kolmiulotteiseen hilaruudukkoon. (Indivisual/Ilmatieteen laitos 2021)

Kaiken pohjana on kuitenkin mahdollisimman tarkat ja kattavat mittaustulokset. Mikäli mittaustulokset eivät ole riittävän täsmällisiä, pienikin virhe lähtötiedoissa johtaa suureen virheeseen ennusteen lopussa. Ympäri maailmaa sijoitelluilta sääasemilta, satelliiteista ja muista paikallisista mittauspisteistä saadaan jatkuvasti tuoreita tuuli- lämpötila-, kosteus- ja ilmanpainetietoja. Lisäksi esimerkiksi kaupalliset lentokoneet luotaavat jatkuvasti noustessaan ja laskeutuessaan ilmakehää ja tarjoavat mittaustietoa saataville. Myös meriä kiertävät laivat keräävät jatkuvasti säädataa esimerkiksi taivaalle lähettävillä säähavaintopalloilla. Tärkeimmät ilmakehän

tutkijat ovat kuitenkin maapallon kiertoradoilla kiertävät sääsatelliitit, ne keräävät jopa sata miljoonaa havaintoa vuorokaudessa ja muodostavat globaaleissa malleissa noin 98 % ennustuksissa käytetyistä havainnoista. (Pöntinen 2015; Alatalo 2009)

On siis olemassa globaaleja ja rajoitettuja ennustemalleja. Globaaleilla malleilla saadaan kokonaiskuvaa koko maapallon ilmakehän tapahtumista, mutta ne ovat laskennallisesti äärimmäisen raskaita, joten kompromissina niiden alueellista tarkkuutta joudutaan rajoittamaan. Hilakoko eli mallinnettavan alueen tarkkuus eri globaaleissa malleissa on nykyään joitain kymmeniä kilometrejä. Rajoitetut mallit pyrkivät tuottamaan ennusteita paremmalla paikallisella erottelukyvyllä erikseen valitulle alueelle. Ne toimivat kuin suurennuslasit globaalien mallien pohjalta. Rajoitettuja ennustemalleja ovat esimerkiksi HIRLAM- ja HARMONIE-mallit, joiden kehityksessä on mukana myös Ilmatieteenlaitos. HIRLAM-malli kattaa Euroopan lisäksi Pohjois-Atlantin alueen. Sen hilakoko eli tarkkuus sivusuunnassa on 7,5 km ja se on jaettu pystysuunnassa 65 tasoon. HIRLAM-konsernin jatkokehittämä HARMONIE-malli kattaa Skandinavian, Baltian ja Norjanmeren alueet. Sillä saadaan ennustettua vielä tarkemmin rajattua aluetta 2,5 km:n tarkkuudella. Molempia malleja ajetaan 4 kertaa vuorokaudessa UTC 00, 06, 12, 18 aikaan. (Lantsheer 2016; Ilmatieteenlaitos 2021 a)

Mallien tarkkuus on kasvanut suunnilleen samalla vauhdissa tietokoneiden laskentatehon kasvaessa. Hilaresoluutio valitaan yleensä ennusteen käyttötarkoituksen perusteella sopivan kokoiseksi. Globaalien mallien erotuskyky on aina huonompi kuin rajoitetun alueen mallien, koska globaaleilla malleilla kuvataan koko ilmakehä samanaikaisesti. (Alatalo 2009) Globaaleilla malleilla riittää karkeampi resoluutio kuvaamaan suuren mittakaavan liikettä, kun taas rajoitetun alueen mallit tarvitsevat tiheimmän resoluution kuvaamaan paremmin paikallisia vaihteluita. Säämallit eivät pysty kunnolla ennustamaan hilaväliä pienempiä ilmiöitä, kuten pilvikenttien tarkkaa sijaintia ja laajuutta, vaan ne katoavat mallinnuksessa hilavälin sisään. Tulos jää virheelliseksi pienen skaalan ilmiöiden kuten säteilyn, turbulenssin, ja pilvien muodostumisen mallintamisessa. Tämän seurauksena pilviennusteiden epätarkkuus onkin yksi suurimmista virhelähteistä numeerisen säämallin aurinkosäteilyennusteissa. (Korppinen 2018)

4.2 Satelliitit

Ensimmäinen onnistunut sääsatelliitti saatiin NASA:n toimesta maan kiertoradalle 1960-luvun alussa. TIROS-1 niminen satelliitti sai toimintavirtansa aurinkokennoista, sisälsi kaksi televisiokameraa, joilla saatiin tuhansia onnistuneita kuvia Maan pilvipeitteestä ja sen avulla saatiin todistettua, että satelliitit ovat jatkossa tärkeässä roolissa tutkittaessa maapallon ilmastoa avaruudesta käsin. (NASA Science 2021)

Tänä päivänä satelliiteissa on usein mukana eri mittausinstrumentteja, joita käytetään eri tarkoituksiin, pääasiassa passiivisia radiometrejä, jotka mittaavat alapuolelta ilmakehästä ja maan pinnalta tulevaa sähkömagneettista säteilyä. Sääsatelliitteja kiertää kahdella maan kiertoradalla. Maan matalalla kiertoradalla (LEO, low Earth orbit) noin 750–850 km korkeudella Maan pinnasta olevat satelliitit kiertävä maata napojen läheisyydestä. Yhden kierroksen kesto on noin 100 minuuttia eli ne kiertävät maan suunnilleen 15 kertaa vuorokauden aikana. Näitä voidaan kutsua myös aurinkosynkronisiksi satelliiteiksi koska ne yhdistävät korkeuden ja kaltevuuden jatkuvasti siten, että satelliitti kulkee tietyn paikan päällä maapallolla aina samaa paikallista aurinkoaikana. Esimerkiksi LEO:lla kiertävä satelliitti saattaa ylittää päiväntasaajan viisitoista kertaa päivässä joka kerta klo 11.00 paikallista aikaa. Matalan kiertoradan satelliitit ohittavat Maan navat aina hiukan eri kohdasta ja täten kuvaavat maata useista eri kohdista useina eri ajankohtina. Tästä syystä se kattaa laajasti Maan eri alueita mutta toisaalta yhden kohteen tarkka tutkinta on haastavaa. (Ilmatieteenlaitos 2021 b)

Geostationäärisellä kiertoradalla päiväntasaajan kohdalla noin 36 000 kilometrin korkeudessa olevat sääsatelliitit pysyvät jatkuvasti maan pinnan suhteen paikallaan, joten niiden kiertoaika on sama kuin Maan pyrähdysaika. Tällainen satelliitti näkee siis jatkuvasti saman puolen maapallosta. Niiden näkemä alue on suurempi, mutta koska ne ovat noin 50 kertaa kauempana Maasta kuin matalalla kiertoradalla olevat satelliitit, niiden erotuskyky on myös usein heikompi ja kuvien resoluutio huomattavasti karkeampi. (Ilmatieteenlaitos 2021 b)

4.3 Säteilymittarit

Koska satelliiteilla ei saada kerättyä riittävän korkean tarkkuuden dataa, niin varsinkin lyhyen aikavälin ennusteissa suositetaan havaintotiedon keräämistä paikallisilla mittaussensoreilla. Auringon säteilymäärää mittaavaa laitetta kutsutaan pyranometriksi. Pyranometri on anturi, joka mittaa auringon säteilyn intensiteettiä 180 asteen näkökentällä watteina neliometriä kohden. Niiden toiminta perustuu lämpö-sähköpariin, joka muuttaa lämmön sähköiseksi signaaliksi, joka sitten saadaan tallennettua. Säteilymittareita käytetään laajasti sään, ilmaston ja aurinkoenergian tutkimuksessa. Säteilymittarit havaitsevat normaalisti anturin yläpuolisesta tilasta tulevan säteilyn, joka käsittää sekä suoran auringon säteilyn että taivaalta tulevan hajäsäteilyn. Pyranometri kuvassa 15. (Yang 2014; Pyranometri 2021)



Kuva 15. Pyranometri. (HandWiki 2021)

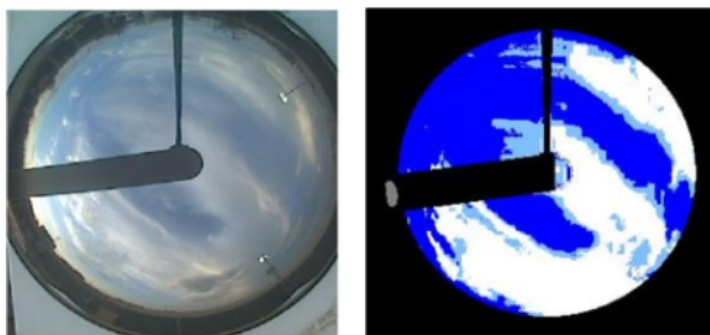
Lähituntien sään ennustamisessa turvaudutaan usein havaintotietoon ja sään kehityksen arviointiin aiempaan kokemukseen perustuen. Pyranometrien keräämää reaaliaikaista säteilydataa voidaan verrata ja käyttää aurinkopuiston historiatietojen kanssa rinnakkain, jolloin saadaan rakennettua lyhyen aikavälin, jopa tunnin sisäinen ennuste. (Tuohy et al. 2015)

4.4 Ceilometri

Ceilometri on laite, jolla voidaan mitata pilvisyyttä. Se lähettää maanpinnalta sähkömagneettista pulssia taivaalle ja havaitsee pilvestä takaisin mittariin kimmonneen signaalin. Ceilometrillä saadaan mitattua pilven alareunan korkeus, mutta ei sitä minkä tyyppinen pilvi on kyseessä ja päästääkö mitattu pilvi säteilyä osittain läpi vai ei. Sillä siis saadaan selville karkeasti, onko pilvisyyttä mittauspisteessä vai ei. Ceilometrillä on yleensä myös maksimikorkeus, josta se kykenee pilven alareunan havaitsemaan. Tämä saattaa aiheuttaa ristiriitaa silmällä tehtyjen havaintojen ja automaattimittarin välillä. (Tuononen 2019; Ilmatieteenlaitos 2021 c)

4.5 Total sky imagers -kamerat

Yhtenä vaihtoehtona lähituntien ennustamiseen on maanpinnalta taivaan kuvantaminen paikallisesti. Puolipallon muotoisilla digitaalikameroilla saadaan taivaalta korkealaatuisia laajakuvia juuri tietyn hetken vallitsevista pilviolosuhteista. Kamerat ottavat taivaasta kuvia halutulla frekvenssillä ja kuvat prosessoidaan tietokoneella sellaisiksi, että pilvet ja sininen taivas erottuvat selkeästi toisistaan. Kamera kuva ja prosessoitu kuva näkyvät vierekkäin kuvassa 16. Useita peräkkäisiä kuvia otettaessa saadaan laskettua pilvien liikenoisuus. Kun taivaskuvia otetaan useista eri sijainneista ja eri etäisyyksiltä aurinkopuistoista sekä yhdistetään niitä mitattuihin ja ennustettuihin sääsuureisiin saadaan puiston säteilyennuste halutulle ajalle.



Kuva 16. Puolipallokameralla otettu taivaskuva ja vastaava tietokoneella prosessoitu kuva. (Marquez et al. 2013)

Yhden kameran järjestelmä olisi kustannuksiltaan sopivin mutta sillä ei saisi hyödynnettyä kamerajärjestelmän suurinta etua eli avaruudellista, kolmiulotteista mallinnusta. Pilvet ovat usein pystysuunnassa kilometrejä korkeita ja pilvikerroksia voi olla useita päällekkäin. Suurimman edun taivaskamerajärjestelmästä saisi, jos puolipallokameroita sijoittelisi kolmion tai neliön muotoisiin ryppäisiin eri etäisyyksille paneeleista. Näin saisi kuvannettua tarkasti pilvien ja pilvikerrosten kolmiulotteisuuden. Ongelmaksi muodostuu vielä tällä hetkellä hankala kuvien prosessointi, ratkaisun yleinen monimutkaisuus ja kalliit kustannukset. (Yang et al. 2018)

5 VUORENNEVAN MITTAUSLAITOS

EPV:llä on ollut vuodesta 2018 käytössään oma mittauslaitos Alavuden Vuorennella, jossa voidaan tutkia paljonko auringon säteilyä kohteessa ja miten eri valmistajien erilaiset paneelityypit tuottavat. Myös maastosta saadaan kokemuksia, miten tämäntyyppinen maasto sopisi suuremman aurinkopuiston infran rakentamiseen. Samalla kerätään tulevaisuutta varten tietoa, mitä kaikkea mahdollisessa suuren koluokan aurinkopuistossa on otettava huomioon. Testipuiston avulla saadaan kokemusta aurinkovoiman käyttäytymisestä Suomessa teollisessa mittakaavassa.



Kuva 17. Ilmakuva Vuorennelan mittauslaitokselta.

Testipuistossa on useita eri aurinkopaneelityyppejä, niin kiinteästi asennettuina, kuin myös aurinkoa seuraavilla tracker-systeemeillä varustettuina. Paneelit ovat ensimmäisen sukupolven yksi- ja monikidekennopaneeleja nimellistehoiltaan 300–400 Wp. Osa paneeleista on tyypiltään kaksipuoleisia ja keräävät auringon hajasäteilyä myös paneelin takapuolelta. Kiinteät paneelirivit ovat asennettuina 30 asteen kallistuskulmaan ja ovat suunnattuina kohti etelää. Valkoisessa sähkökopissa sijaitsevat invertterit ja tiedonsiirtolaitteisto.



Kuva 18. Tracker-järjestelmät seuraavat auringonsäteitä itä-länsi suunnassa.

Kuvan 18 kaksi tracker-järjestelmää seuraavat Aurinkoa itä-länsi suunnassa, pienten järjestelmän yläosassa olevien vertailukennojen avulla. Vasemmalla, keskellä ja oikealla olevat kennot havaitsevat säteilyä ja moottorit kääntävät paneeleja aina havaintojen suuntaan. Testipuistossa saadaan tietoa tulevaisuutta varten, onko tällainen seurantalaitteisto taloudellisesti kannattavaa Suomen säteilyolosuhteissa. Alueilla, joissa suoran säteilyn määrä on runsasta, tällaisen järjestelmän on havaittu tuottavan jopa 30 % lisäystä tuotantomääriin. Suomen olosuhteissa valtaosa säteilystä tulee pilvien, ilmakehän ja maanpinnan kautta hajasäteilyinä, joten on

epätodennäköistä, että seurantajärjestelmää on kannattavaa käyttää teollisen mitta-kaavan aurinkosähköpuistoissa.

Kiinteiden paneelirivien etupuolelle on pystytetty kuvassa 19 oikealla näkyvä varjostusseinä, jolla pyritään simuloimaan paneelirivien etupuolella olevaa kuvitteellista lisäpaneeliriviä. Aurinkopaneelirivit tulisi olla sijoitettuina sellaisille etäisyyksille toisistaan, että ne eivät milloinkaan aiheuta varjostuksia toisille paneeliriveille. Testipuistossa on myös mahdollista testata vaaleiden pintojen lisäämistä maanpinnalle. Tällä tavoin saadaan testattua voisiko kaksipuoleisten paneelien tuotantomäärä mahdollisesti muuttua, jos säteilymäärää saisi näin lisättyä myös paneelin takapuolelle.



Kuva 19. Aurinkopaneelirivit, invertteriasema ja varjostusseinä.

Testipuistossa on Lufft Weather Station -sääasemia, joilla saadaan mitattua tuuliolosuhdetta, ilmanpainetta, kosteutta ja lämpötilaa. Lisäksi aseman läheisyyteen on sijoitettuina Hukseflux -säteilymittareita, jotka mittaavat auringon kokonaissäteilyä. Lämpötiloja, säteilymäärää ja paneeleista saatuja tuotantomääriä seuraamalla saadaan vertailtua, miten eri paneelityypit käyttäytyvät eri olosuhteissa. Tulevaisuudessa mittausaseman kehittämistä tullaan jatkamaan.

6 TUOTANNON ENNUSTAMINEN

Kun mietitään tulevaisuudessa mahdollisia teollisen mittakaavan aurinkopuistoja ja niiden tuotannon ennustamista, voidaan ennusteet jakaa pitkän ja lyhyen aikavälin ennusteisiin. Projektin suunnitteluvaiheessa käytetään tilastollista säädataa pidemmältä ajalta, vuosi- ja kuukausitasolla. Niiden perusteella tehdään laskelmat, onko puiston sijoittaminen kyseiseen kohteeseen taloudellisesti kannattavaa. Tässä työssä on keskitytty lyhyempiin, käyttöhetkestä aina parin päivän päähän yltäviin ennusteisiin. Vuorokausi- ja tuntitason ennusteissa käytetään pääasiassa numeerisia ennustemalleja ja niiden tukena paikallisia havaintotietoja. Havainnointiasemilta kiinnostaa erityisesti tuulen nopeus ja suunta, ilmanpaine, lämpötila, ilmankosteus, sademäärä ja auringon säteily.

Kuten aiemmissa kappaleissa todettiin, pilvet ja niiden liikkeet ovat olennainen osa aurinkosähkön tuotannon ennustamista. Pilvet on jaoteltu yleensä kymmeneen pilvisukuun, joista neljä ala-, kolme keski- ja kolme yläpilvisukua. Alapilvet sijaitsevat alle 2 kilometrin korkeudessa ja niihin kuuluu muun muassa sumupilviä ja erittäin tiheitä kuuropilviä, joita auringon säteet eivät läpäise käytännössä lainkaan. Yläpilvet sijaitsevat 5 kilometristä ylöspäin ja niihin kuuluu esimerkiksi untuva- ja harsopilviä. Niitä auringon säteet läpäisevät erittäin tehokkaasti ja antavat maanpinnalle melkein saman säteilytehon kuin täysin kirkkaalta taivaaltakin. Pilvet liikkuvat ilman mukana ja maanpinnan kitkan takia tuulen nopeus kasvaa mitä ylemmäs ilmakehässä mennään. Yli 10 kilometrin korkeudessa troposfäärin yläosassa pilvet voivat liikkua suihkuvirtausten mukana 200 kilometriä tunnissa ja ajoittain jopa lähes 400 kilometrin tuntivauhdilla. Tiheämmät auringonsäteilyä läpäisemättömät alapilvetkin liikkuvat yli 50 kilometrin tuntinopeudella. Eri pilvityypit, niiden muodostumiset ja eri kerrosten tuulten nopeudet vaikeuttavat entisestään pilvisyyden ennustamisesta tietyssä sijainnissa tiettyyn aikaan. (Gregow 2017; Ilmatieteenlaitos 2021 d)

Tuulen suunnan ja nopeuden avulla on mahdollista arvioida pilvialueiden liikkeitä, mutta ongelmana on, että sääasemien tuulianturit mittaavat tuulen nopeutta lähellä maanpintaa, kun pilviä kuitenkin esiintyy koko ilmakehän alimmassa kerroksessa

aina 15 km korkeudella asti. Esimerkiksi 10 km korkeudessa pilvet liikkuvat moninkertaisella nopeudella verrattuna maahan. Yksi mahdollinen tapa arvioida pilvien liikkeitä on tutkia korkea- ja matalapainealueiden välisiä paine-eroja ja laskea niistä pilvialueiden nopeuksia ja sijainteja tuleviin aikaikkunoihin. Toinen viime vuosina tutkittu menetelmä on laskea kahden eri aikaan otetun satelliittikuvan avulla pilvien liikevektoreita. Esimerkiksi jatkuvasti 30 sekunnin välein otettuja havaintokuvia vertaillaan, ja tietokonemallinnuksen avulla saadaan ennuste pilvialueiden liikkeiden suunnasta ja nopeudesta, ja siten pystyttäisiin arvioimaan, milloin ne mahdollisesti voisivat olla ennustettavan kohteen yllä. (Takala 2012; Abuella et al. 2016)

Suomen oloissa tulee talvisin ottaa huomioon myös lumitilanne. Paneeleiden päällä makaava lumi estää osittain tai kokonaan auringonsäteiden osumisen paneelin pintaan. Yleisesti ei suositella lumien putsausta paneelien päältä, koska siinä on aina vaarana rikkoa paneelin pinta. Lisäksi suuressa aurinkovoimalassa paneeleita saatetaan olla satoja vierekkäin useissa riveissä, joten niiden puhdistus ihmisvoimin on käytännössä mahdotonta toteuttaa. Sähköiset putsaajat taas lisäävät liikkuvien osien määrää ja monimutkaistavat järjestelmän rakennetta sekä kuluttavat tuotettua energiaa ja näin ollen laskevat paneelien hyötysuhdetta. Lumen haittavaikutuksia vähentää se, että sitä esiintyy pääasiassa talvisin, jolloin aurinkoenergian tuotanto on muutenkin vähäistä ja näin ollen lumipeitteestä syntyvän ennustevirheen määrä jää suhteessa alhaisemmaksi. Suurempia ongelmia on yllättävät kevät- ja syyslumisaateet, jolloin on ennustettu tuotantoa, mutta mahdollinen lumipeite estää sen aiheuttaen tasepoikkeamaa, joka saattaa aiheuttaa suuriakin kustannuksia. Toisaalta Suomen leveyspiireillä paneelien kallistuskulmat ovat melko suuria minkä takia lumi valuu sopivalla säällä hyvin paneelin pinnalta pois painovoiman avulla. Lisäksi maassa oleva vaalea lumipeite parantaa maan kautta heijastuvaa hajasäteilyä paneelien pinnoille. Tuotantoennusteita tehdessä lumitilanne tulee kuitenkin huomioida, esimerkiksi jos huomiselle on ennustettu kovaa lumisadetta niin riskienhallinnan kannalta tuotantoennustetta on syytä pienentää esimerkiksi jonkun prosenttimäärän mukaan, jos itse käyttöpäivänä lumipeite rajoittaa säteilyä paneelien pinnoille. Jos spot -ennusteet eivät vielä näe lumen tuloa niin esimerkiksi aurinkopuistoon asetelluilla valvontakameroilla voidaan nähdä lunta paneelien päällä ja näin korjata

suunnitelmaa itse käyttöpäivänä. Jos spot-markkinalle on esimerkiksi myyty tuotantoa 50 MWh/h mutta lumipeitteen takia jäädäänkin 10 MWh/h tuotantoon niin siitä aiheutuu 40 MWh tasepoikkeamaa. Jos tämä tulisi ilmi tarpeeksi aikaisin, niin tasepoikkeama pystyttäisiin mahdollisesti tasaamaan päivänsisäisillä Elbas -markkinoilta, jolloin hinta määräytyy vastatarjousten mukaan. Muussa tapauksessa poikkeama siirtyisi tasesähkökustannuksiin. (Revision Energy 2021)

Lumen lisäksi sumu estää auringonsäteiden täysimääräisen pääsyn paneelin pintaan aiheuttaen näin tuotantopoikkeamaa ennusteeseen. Kun ilma on tarpeeksi kylmää ja kosteaa, niin ilmassa oleva näkymätön vesihöyry tiivistyy pieniksi pisaroiksi ja aiheuttaa sumua. Sumun ennustaminen on melkoista arpapeliä mutta ilman lämpötilan ja kastepisteen kohdatessa on periaatteessa otolliset olosuhteet sumun muodostumiselle.

6.1 Spot-vuorokauden ennustaminen

Aurinkosähkön tuotannon ennustamiseen on monia eri menetelmiä, jotka soveltuvat eri lailla eri pituisten ennusteiden käyttöön. Pidempien esimerkiksi yli 6 tunnin päähän kohdistuvien ennusteiden kohdalla toimii numeeriset säämallit, joissa hilaruudukoittain mallinnetaan sään tulevaa tilaa fysiikan säilymlakeihin perustuvien yhtälöiden avulla. Havaintoasemilta ja satelliiteista kerättyä mittaustietoa käytetään mahdollisimman tarkan alkutilanteen hahmottamiseen. Sen jälkeen yhtälöryhmä ratkaistaan jokaisena ajanhetkenä mallin jokaisessa hilapisteessä, kunnes haluttu ennustepituus on valmis. Toinen, hieman yksinkertaistettu tapa tehdä säteilyennustetta päivän - kahden päähän on käyttää pidemmän ajan tilastollista säädataa, jonka avulla arvioidaan tietyn päivän olosuhdetta historiatietoihin perustuen. Tämä ei tietenkään ole täysin tarkka menetelmä mutta myös numeerisen ennustemallin avulla seuraavan päivän tuntikohtaisen pilvisuuden ennustaminen muutaman sadan metrin rajatulla alueella on hyvin haastava. Vasta pidemmän ajan kokemukset joko mittauslaitoksella tai itse tuotantopuistossa kertovat mikä menetelmä on tuottanut tarkimman ennusteen pidemmällä aikavälillä.

Käytännössä tällaiset day-ahead spot -ennusteet ostetaan joltain energiasääpalveluita tuottavalta yritykseltä, joko tuntikohtaisen säteilyennusteena tai sitten suoraan

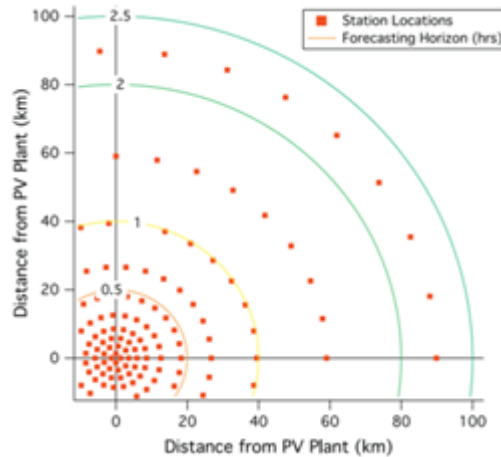
tuotantoennusteena. Jälkimmäisessä ennusteen toimittavalle yritykselle annetaan paneelien tiedot, sijainnit ja suuntaukset ja niiden perusteella saadaan suoraan tunnikohtainen MWh -ennuste. Jos tilataan säteilyennuste, täytyy itse kehittää laskelmat, jotka laskevat kunkin tunnin säteilytehosta saatavan tuotannon suuruuden. Tässä vaihtoehdossa etuna on se, että voidaan saada vuosien kuluessa paremmin selville paneelien ikääntymisen vaikutukset hyötysuhteeseen. Energiasääennusteita on saatavilla muun muassa pohjoismaisilta ilmatieteenlaitoksilta sekä joiltain alaan erikoistuneilta yrityksiltä, kuten esimerkiksi Spire, ConWX, EuroWind, Next Kraftwerke tai Solcast.

6.2 Vuorokaudensisäinen ennustaminen

Kun mennään vuorokaudensisäisiin ennusteisiin ja aina lähemmäs itse käyttötuntia niin numeeristen sääennustemallien hyöty vähenee. Aiemmin mainittuja, paineroihin tai satelliittikuvien avulla laskettuja pilvien liikevektoreita on mahdollista käyttää pohjana päivänsisäisiin ennusteisiin. Satelliittihavaintojen etuna on, että niillä näkee pilvimuodostelmat hyvällä tarkkuudella ylhäältäpäin ja toisaalta ongelmana, että niiltä hukuvat ylimmän kerroksen alapuolella olevat pilvikerrokset. Tämän takia on tärkeää saada myös maanpäällistä havaintodataa. (Gregow 2017)

Maksimissaan muutaman tunnin pituisiin ennusteisiin on mahdollista käyttää myös maanpinnalta saatua mittaustietoa satelliittihavaintojen tueksi. Koska pilvet voivat liikkua taivaalla jopa satoja kilometrejä tunnissa, säteilymittareita olisi hyvä olla sijoitettuna eri etäisyyksille puistosta. Anturiverkostoa rakennettaessa tulee huomioida, että maaston tulisi olla mahdollisimman tasainen, eikä läheisyydessä saisi olla mäkiä, rinteitä, puita tai suurempia rakennuksia. Parhaan anturiverkoston saisi rakennettua, jos puiston ympärille sijoittaisi renkaan muotoisia anturiympyröitä kuvan 17 periaatteen mukaisesti. Käytännössä käytössä on kuitenkin rajatut resurssit, joten antureita pitää sijoitella säästeliäämmin. Suomessa vallitseva tuulen suunta on lounaasta (länsi-etelä) (Suomen tuuliatlas 2021), joten tihein anturiverkosto tulisi suunnata sinne suuntaan. Ilmatieteenlaitoksella on toiminnassa olevia säteilymittareita Virroilla, Kokemäellä, Turussa ja Kaarinassa, joista saatavaa dataa voisi käyttää hyödyksi. EPV:llä on toiminnassa olevia sähköasemia ympäri pohjanmaata,

joten niihin saisi kätevästi sijoitettua sääasemia olemassa olevan sähkö- ja tiedon-
siirtoinfran avulla.



Kuva 20. Esimerkki anturiverkostosta. (Lonij et al. 2013)

Käytännössä lyhyen ajan säteilyennuste rakennetaan jonkun aurinkoenergiaan erikoistuneen konsulttiyrityksen kanssa. Kerätyn mittausdatan perusteella lasketaan aluksi ennuste, kuinka paljon auringonsäteilyä lankeaa paneelin pinnalle esimerkiksi 30 minuutin, tunnin tai kahden tunnin päästä. Koska aurinkopaneelien hyötysuhde riippuu säteilymäärän lisäksi voimakkaasti myös niiden lämpötilasta, lasketaan tämän jälkeen säteily-, lämpötila- ja tuulitiedoista yhdistämällä kyseisen hetken sääoloja vastaava tuotannon ennuste.

Reilusti yksinkertaistettu ja halvempi vaihtoehto säteilymittariverkostosta olisi pienten aurinkopaneelien sijoittaminen sensoreiksi aurinkopuiston reunoille. Ne toimivat samoin kuin tuotannossa olevat paneelit eli muuntavat auringonsäteilytehön sähkövirraksi. Paneelien tuottojen sekä tuulimittausten perusteella voitaisiin rakentaa ennuste tulevaisuuteen. (Bosch et al. 2013)

7 YHTEENVETO

Voidaan yleisesti todeta, että tulevaisuudessa säähän perustuvan tuotannon jatkuvasti lisääntyessä myös niihin liittyvä ennuste-epävarmuus tulee kasvamaan. Tämä aiheuttaa jatkossa sähköntuottajan ja tasevastaavan kannalta kasvavan tarpeen mahdollisimman tarkoilta sää- ja tuotantoennusteille. Tarkalla tuotannon ennustamisella on toisaalta merkitystä sekä verkon vakauden että tasevastaan sähkötaseen hallinnan kannalta. Epätarkka ennuste aiheuttaa tasevastaavalle kasvavaa taloudellista riskiä tasesähkökustannusten muodossa.

Aurinkoenergian tuotannon kannalta olennaisessa osassa on pilvisyys ja pilvien liikkeet. Ongelmana ennustamisen kannalta on, että pilvien muodostumiset ovat yksi monimutkaisimmista ilmiöistä mallinnettaessa ilmakehää. 1–2 päivän päähän ennustettaessa on oikeastaan mahdotonta nähdä yksittäisten pilvipeitteiden muodostumiset ja niiden tarkat sijainnit suhteessa aurinkopuistoon. Numeeristen sääennustemallien avulla saadaan arvioita suurempien pilvialueiden liikkeistä sekä matala- ja korkeapainealueista. Lähialueille sijoittuvan havaintoverkoston kanssa saataisiin ennustettua lyhyemmän ajan ja pienemmän kokoluokan sääilmiöitä. Paikallisen mittausverkoston avulla on mahdollista kehittää päivän sisäinen ja erityisesti lähituntien ennustemalli.

Vuorenevan testipuiston avulla jatketaan edelleen tutkimuksia, miten teknologia kehittyy aurinkoenergian puolella ja millaisesta potentiaalista puhutaan nykyisellä paneelitekniikalla. Tulevaisuudessa jatketaan mittausaseman kehittämistä uusilla paneelityypeillä ja kehitetään myös pilvisyyden vaihtelun seurantaa. Aurinkoenergia tulee olemaan jatkossa suurella todennäköisyydellä merkittävä osa energiantuotantoa myös Suomessa. Varsinkin Länsi- ja Etelä-Suomessa vuotuiset säteilymäärät pitäisivät olla riittäviä, kunhan aurinkojärjestelmien kustannukset tulevat vielä jatkossakin laskemaan. Sähköntuotanto aurinkovoimapuistossa tulee vaihtelevaan jopa minuuttitasolla ja sillä tulee olemaan tulevaisuudessa merkittävää vaikutusta myös sähkömarkkinoihin.

Työ opetti työn tekijälle paljon, sekä tiedonhausta, kirjoitusprosessista, että itse työn aiheesta. Aihe oli sopiva ja ajankohtainen energiatekniikan opiskelijalle koska

siinä tutustuttiin niin sähkömarkkinoihin, tulevaisuuden tekniikkaan, kuin myös sääilmiöiden muodostumiseen. Varsinkin auringon säteilyn ja pilvisyyden ennustamisesta tuli saatua runsaasti täysin uutta tietoa.

LÄHTEET

Abuella et al. 2016. Solar Power Forecasting Using Support Vector. University of North Carolina at Charlotte. https://www.researchgate.net/publication/315696401_Solar_Power_Forecasting_Using_Support_Vector_Regression

Alatalo M. 2009. Havaintojärjestelmäkokeet numeerisessa sään ennustamisessa. Helsingin Yliopisto Fysiikan Laitos. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/21015/havainto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bosch J.L. et al. 2013. Cloud motion vectors from a network of ground sensors in a solar power plant. Department of Mechanical and Aerospace Engineering Center for Renewable Resources and Integration University of California. http://maeresearch.ucsd.edu/kleissl/pubs/BoschKleisslSE2013_CloudSpeed.pdf

Edu Helsinki 2021. Auringon energia kiertää Maapallolla. Viitattu 02.05.2021. http://www.edu.helsinki.fi/astel-ope/sahko/auringon_energia_kiertaa.htm

Electropaedia 2021. Solar Power. Viitattu 03.05.2021. https://www.mpoweruk.com/solar_power.htm

Energiamailma 2021. Aurinkoenergia. Viitattu 02.05. 2021 <https://energiamailma.fi/energiasta/energiantuotanto/aurinkovoima/>

EPV Energia Oy 2020 a. EPV Energia yritys. Viitattu 09.04.2021. <https://www.epv.fi/yritys>

EPV Energia Oy 2020 b. EPV Energia liiketoiminta alueet. Viitattu 10.04.2021. <https://www.epv.fi/liiketoiminta-alueet>

Fingrid 2021 a. Johdanto sähkömarkkinoihin. Viitattu 10.04.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/johdanto-sahkomarkkinoihin/>

Fingrid 2021 b. Säätosähkömarkkinat. Viitattu 09.04.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/>

Fingrid 2021 c. Tasepalvelut. Viitattu 09.04.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/>

Fingrid 2021 d. Tasemallin kuvaus. Viitattu 10.04.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/tasemallin-kuvaus/>

Fingrid 2021 e. Taselaskennan esimerkki. Viitattu 09.04.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/taseselvitys/taselaskennan-esimerkki/>

Fingrid 2021 f. Varttitase. 03.05.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase/>

Fingrid 2021 g. Taseselvitysmallin muutos. 03.05.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pohjoismainen-tasehallinta/taseselvitysmallin-muutos/>

GreenMatch 2021. Types of Solar Panels. Viitattu 01.05.2021. <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels>

Gregow, E. 2017. BCDC Weather. BCDC Energia. 02.05.2021. <http://www.bcdcenergia.fi/blogi-ja-uutiset-improving-the-solar-production-forecast/>

HandWiki 2021. Viitattu 02.05.2021. <https://handwiki.org/wiki/Engineering:Pyranometer>

Hersch et al. 1982. Basic Photovoltaic Principles and Methods. Solar Energy Research Institute. <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/1448.pdf>

IEA 2021. Solar PV. IEA website. 09.04.2021. <https://www.iea.org/reports/solar-pv>

Ilmatieteenlaitos 2021 a. Säänennustusmallit. Ilmatieteenlaitoksen sivut. Viitattu 15.04.2021. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/saanennustusmallit>

Ilmatieteenlaitos 2021 b. Satelliittihavainnot. Ilmatieteenlaitoksen sivut. 03.05.2021 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/satelliitit>

Ilmatieteenlaitos 2021 c. Sade, pilvet ja lumi. Ilmatieteenlaitoksen sivut. 03.05.2021. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/sade-pilvet-ja-lumi#0>

Ilmatieteenlaitos 2021 d. Pilvikuvasto. Ilmatieteenlaitoksen sivut. Viitattu 03.05.2021 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/pilvikuvasto>

Indivisual/Ilmatieteen laitos 2021. Pilvilaskenta avuksi säämallien kehitykseen. Koski, H. 2017. CSC. Viitattu 06.05.2021. <https://www.csc.fi/web/atcsc/-/pilvilaskenta-avuksi-saamallien-kehitykseen>

Inman et al. 2013. Solar forecasting methods for renewable energy integration. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Jacobs School of Engineering, Center of Excellence in Renewable Energy Integration and Center for Energy Research, University of California. http://132.239.93.208/publications/papers/2013_Inman_Pedro_Coimbra.pdf

IRENA 2021. Solar Costs. The International Renewable Energy Agency. Viitattu 02.05.2021. <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Solar-Costs>

Kokkonen, Y. 2019. Saksa tuottaa enemmän sähköä uusiutuvilla lähteillä kuin hii-
lällä. Yle. Viitattu 03.05.2021. <https://yle.fi/uutiset/3-10580471>

Korppinen, A. 2018. Rajakerroksen simulointi heterogeenisellä. Helsingin Yli-
opisto Ilmakehätieteen Keskus. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/299765>

Lantsheer, F. 2016. HIRLAM. Viitattu 08.05.2021. [http://hirlam.org/in-
dex.php/hirlam-programme-53](http://hirlam.org/index.php/hirlam-programme-53)

Lonij et al. 2013. Intra-hour forecasts of solar power production using measure-
ments from a network of irradiance sensors. University of Arizona, Department of
Physics. <https://forecasting.energy.arizona.edu/media/papers/lonij2013.pdf>

Mallon et al. 2017. Analysis of On-Board Photovoltaics for a Battery Electric Bus
and Their Impact on Battery Lifespan. Department of Mechanical and Aerospace
Engineering, University of California. [https://www.researchgate.net/figure/Types-
of-solar-radiation_fig5_318292540](https://www.researchgate.net/figure/Types-of-solar-radiation_fig5_318292540)

Marquez et al. 2013. Forecasting of Global Horizontal Irradiance Using Sky
Cover Indices. Journal of Solar Energy Engineering. [https://www.re-
searchgate.net/publication/267492924_Forecasting_of_Global_Horizontal_Irradi-
ance_Using_Sky_Cover_Indices](https://www.researchgate.net/publication/267492924_Forecasting_of_Global_Horizontal_Irradiance_Using_Sky_Cover_Indices)

Motiva 2020 a. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. Viitattu 02.05.2021.
[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurin-
kosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara-suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurin-
kosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara-suomessa)

Motiva. 2020 b. Aurinkopaneelien asentaminen. Viitattu 02.05.2021.
[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/han-
kinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/han-
kinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen)

Motiva. 2021. Aurinkosähköteknologiat. Viitattu 02.05.2021. [https://www.mo-
tiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurin-
kosahkoteknologiat](https://www.mo-
tiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurin-
kosahkoteknologiat)

Nord Pool. 2021. Day-ahead prices 16.4.2021. Viitattu 28.04.2021.
<https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/#/nordic/map>

Nordic Law. 2015. Nordic Law. Viitattu 18.04.2021. [https://nordiclaw.fi/mankala-
periaate-suomen-energiateollisuudessa/](https://nordiclaw.fi/mankala-
periaate-suomen-energiateollisuudessa/)

Partanen et al. 2014. Sähkömarkkinat - opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen
yliopisto.

Piesala, P 2021. Suomen luonnonvarat. Opetushallitus. Viitattu 03.05.2021.
[https://www.oph.fi/fi/oppimateriaali/luovasti-luonnonvaroista/suomen-luonnonva-
rat/ilma-tuuli-ja-aurinko](https://www.oph.fi/fi/oppimateriaali/luovasti-luonnonvaroista/suomen-luonnonva-
rat/ilma-tuuli-ja-aurinko)

Pyranometri 2021. Viitattu 08.05.2021. <https://defi.qaz.wiki/wiki/Pyranometer>

Pöntinen, P. 2015. Näin syntyy tarkka sääennuste. Suomen kuvalehti. Viitattu 03.05.2021. <https://suomenkuvalehti.fi/jutut/kotimaa/nain-syntyy-tarkka-saaennuste-aluksi-tarvitaan-sata-miljoonaa-havaintoa-vuorokaudessa/>

Revision Energy 2021. Solar Works in Winter. Revision Energy. Viitattu 02.05.2021. <https://www.revisionenergy.com/why-go-solar/solar-works-in-winter/>

Roper, C. 2016. Learn Solar #1: How much solar power do we receive? Viitattu 05.05.2021. <https://octopus.energy/blog/learn-solar-1-how-much-solar-power-do-we-receive/>

NASA Science 2021. The Television Infrared Observation Satellite Program (TIROS). NASA. 02.05.2021. <https://science.nasa.gov/missions/tiros>

Suomen tuuliatlas 2021. Tuulisuus Suomessa. Suomen tuuliatlas. Viitattu 06.05.2021. <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/>

Takala, P. 2012. Tuulissääntö. Foreca. Viitattu 12.05.2021. <https://blogi.foreca.fi/2012/03/tuulisaanto-2>

The Renewable Energy Website 2021. How are Solar Panels Made. Viitattu 02.05.2021. <http://www.reuk.co.uk/wordpress/solar/how-are-solar-panels-made>

Tuohy et al. 2015. IEEE PES magazine Solar Forecasting Article v5. Viitattu 14.04.2021. https://www.researchgate.net/publication/283240263_Solar_Forecasting_Methods_Challenges_and_Performance

Tuononen, M. 2019. Meteorological conditions affecting renewable energy. Finnish Meteorological Institute. <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/305985/meteorol.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Vaskiluodon Voima 2021. Voimalaitokset. Vaskiluodon voima. Viitattu 04.04.2021. <https://www.vv.fi/voimalaitokset/>

Vattenfall 2020. Sähkön hinta ja hiilijalanjälki. Viitattu 16.04.2021. www.vattenfall.fi/ilmasto/fossiilivapaa-elama-artikkelit/sahkon-hinta-ja-hiilijalanjalki/

Vattenfall 2021. Aurinkovoima. Viitattu 16.04.2021. <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/aurinkovoima/>

Yang et al. 2018. History and trends in solar irradiance and PV power forecasting: A preliminary assessment and review using text mining. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California. <https://escholarship.org/content/qt5dk0b8t5/qt5dk0b8t5.pdf>

Yang, D. 2014. Thesis for: Doctor of Philosophy, Solar Irradiance Modeling and Forecasting Using Novel Statistical Methods. National University of Singapore.

Ympäristöministeriö 2021. Pariisin ilmastopimus. Viitattu 04.05.2021. <https://ym.fi/pariisin-ilmastopimus>

Åman, J. 2015. Aurinkoenergian mahdollisuudet Suomessa. Metropolia Ammattikorkeakoulu. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/87926/Aman_Jussi.pdf?sequence=1&isAllowed=y