



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Joni Jeskanen

# Sähkön mikrotuotannon vaikutus Suomen sähkömarkkinoihin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

5.5.2020

Tekijä Otsikko	Joni Jeskanen Sähkön mikrotuotannon vaikutus sähkömarkkinoihin
Sivumäärä Aika	38 sivua 5.5.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori Jukka Karppinen
<p>Insinöörityössä määriteltiin sähkön mikrotuotanto ja käytiin läpi mikrotuotannon eri tuotantomuodot sekä tuotannossa käytettävät energianlähteet. Työssä selvitettiin sähkön mikro- tuotannon esiintymistä Suomen sähkömarkkinoilla ja mikrotuotetun sähkön hinnoittelun perustaa. Lisäksi insinöörityössä tuotiin esille mikrotuotantolaitoksiin kohdistuvia vaatimuksia.</p> <p>Työssä esitettiin mikrotuotannon kasvuun vaikuttavia tekijöitä ja nojaututtiin kansainvälisen energajärjestön mikrotuotannon kasvuarvoihin.</p> <p>Työn tarkoituksena oli tutkia miten mikrotuotannon kasvu voi vaikuttaa Suomessa sähkön hintaan, -tuotantoon ja -jakeluverkkoon. Työn tuloksena esiintyi mahdollisia ongelmia ja ratkaisuja, joita sähkön mikrotuotannon yleistyminen tuo tullessaan.</p>	
Avainsanat	sähkön mikrotuotanto, sähkömarkkinat, uusiutuva energia

Author Title	Joni Jeskanen The impact of microgeneration on Finland's electricity market
Number of Pages Date	38 pages 5 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>This work clarified what microgeneration is and which forms of energy it utilizes when producing electricity. This thesis investigates the occurrence of microgeneration in Finland's electricity market and how microgenerated electricity is being priced there. Additionally, this thesis listed suggestions set for microgeneration technologies.</p> <p>Thesis presents the factors affecting the growth of microgeneration. Presented microgeneration growth factors are based on the growth estimates of the International Energy Agency.</p> <p>The purpose of the thesis was to investigate how the growth of microgeneration can affect the price, production and distribution of electricity in Finland.</p>	
Keywords	microgeneration, electricity market, renewable energy

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkön mikrotuotanto	2
2.1	Sähkön mikrotuotannon määritelmä	2
2.2	Sähkön mikrotuotannon käyttökohteet	3
3	Sähkön mikrotuotannon tuotantomuodot	3
3.1	Aurinkovoima	3
3.2	Tuulivoima	11
3.3	Biovoima	16
4	Sähkön mikrotuotanto Suomen sähkömarkkinoilla	19
4.1	Nord Pool	19
4.2	Ylijäämänsähkön hintarakenne	20
4.3	Mikrotuotannon kasvu	22
5	Verkkoyhtiöiden vaatimukset	26
6	Mikrotuotannon vaikutus sähkönhintaan	29
6.1	Vuodenajan ja sääolosuhteiden vaikutus sähkön mikrotuotantoon	29
6.2	Mikrotuotannon vaikutus sähköverkon kustannuksiin	32
6.3	Negatiivinen sähkön hinta	35
7	Mikrotuotannon vaikutus Suomen sähkön jakeluverkkoon	36
8	Yhteenveto	37
	Lähteet	39

## Lyhenteet

IEA	International Energy Agency (Kansainvälinen energiajärjestö)
IRENA	International Renewable Energy Agency (Kansainvälinen uusiutuvan energian järjestö)
kWp	Piikkikilowatti. Piikkiwattia käytetään kuvaamaan aurinkopaneelien tuottamaa sähkötehoa standardiolosuhteissa.
LE2019	Liittymisehdot, jotka koskevat sähkönkäyttöpaikan tai sähköntuotantopaikan liittymistä nimellisjännitteeltään enintään 36 kV sähkönjakeluverkkoon.
LoM	Loss of Mains. Tilanne, jossa jakeluverkon jännite katoaa.
SDG	Sustainable Development Goals. Yhdistyneiden kansakuntien kestävän kehityksen tavoitteet.
SDS	Sustainable Development Scenario. Kansainvälisen energiajärjestön kestävän kehityksen skenaario.
Un	Nimellisjännite
VPE2019	Verkkosopimusehdot, joita sovelletaan jakeluverkkoon liitetyle sähkönkäyttäjälle toimitettavassa sähköverkkopalvelussa, joka tapahtuu nimellisjännitteeltään enintään 36 kV sähkönjakeluverkossa.

## 1 Johdanto

Ilmastohuoli on noussut viime vuosina suureksi keskustelunaiheeksi maailmanlaajuisesti. Ilmaston parantamiseksi on pyritty tekemään ilmastotyötä jo vuosia. Euroopan Unioni on asettanut uusiutuvien energioiden lisäys- ja ilmastotavoitteet jäsenvaltioille. Kansanvälisen energiajärjestön (International Energy Agency) arvion mukaan yksi merkittävä tekijä ilmastomuutoksen pysäyttämiseen on uusiutuvien energioiden lisääminen sähköntuotannossa. Myös Euroopan parlamentti päätöslauseessaan (2012/2930(RSP)) vahvisti, että energian mikrotuotannon on oltava keskeinen osa tulevaisuuden energiantuotantoa.

Kuluttajien ympäristötietoisuus, mikrotuotantojärjestelmien hintojen lasku ja halu pienentää omaa sähkölaskua ovat lisänneet kiinnostusta mikrotuotantojärjestelmiin. Tässä insinööriyössä selvitetään, mitä on sähkön mikrotuotanto, miten sähkön mikrotuottaja voi myydä tuotettua sähköä ja mistä ylijäämänsähkön hinta rakentuu.

Insinööriyön tavoitteena on selvittää, minkälaisia vaatimuksia sähkön mikrotuotantoon kohdistuu ja miten sähkön mikrotuotannon yleistymisen tulee vaikuttamaan Suomessa sähkön hintaan, - tuotantoon, ja – jakeluverkkoon.

Insinööriyön avulla voidaan havaita ratkaisuja ja ongelmia, joita sähkön mikrotuotannon yleistymisen tuo tullessaan. Insinööriyön toteutustapa on tutkimustyö. Työ toteutetaan Metropolia Ammattikorkeakoululle.

## 2 Sähkön mikrotuotanto

### 2.1 Sähkön mikrotuotannon määritelmä

Sähkön mikrotuotannon päätarkoituksena on tuottaa kuluttajalle sähköä paikallisesti, hyödyntäen uusiutuvia energioita [1]. Yleisimmät mikrotuotannossa käytetyt tuotantomuodot ovat aurinko-, tuuli- ja biovoima. Myös pienimuotoista vesivoimaa esiintyy mikrotuotantona. Pienimuotoinen vesivoima on rajattu tämän työn ulkopuolelle, johtuen sen harvinaisuudesta ja paikkariippuvuudesta.

Energiaviraston mukaan sähkön mikrotuotannolla tarkoitetaan sähköntuotantojärjestelmiä, joiden nimellisteho on enintään 100 kVA tai 11 kW. Yksivaiheisen tuotannon kokoraja on 16 A. [2.]

Mikrotuotantoon liittyy useita rajoituksia, määräyksiä ja suosituksia, jotka vaihtelevat maittain. Mikrotuotantolaitoksen suositeltu maksimiteho verkkoon liitettynä saadaan standardi SFS-EN 50549:n teknillisistä suosituksista, jonka mukaan mikrotuotantolaitos saa liittyä verkkoon enintään 3 x 16 A:n sulakkeilla. Sallitut verkkoon liitettävät sulakekoot tulee varmistaa omalta sähköyhtiöltä, koska ne saattavat vaihdella sähköyhtiöittäin.

Standardi SFS-EN 50549:n teknillisistä suosituksista sulakekokoon liittyen voidaan laskea mikrotuotantolaitoksen maksimiteho yksi- ja kolmivaiheisena, kun verkon jännite on 230 V.

Lasketaan mikrotuotantolaitoksen maksimiteho yksi- ja kolmivaiheisena. Yhtälöistä

$$P_{max} = 16 \text{ A} * 230 \text{ V} = 3680 \text{ W}$$

$$P_{max} = 3 * 16 \text{ A} * 230 \text{ V} = 11040 \text{ W}$$

$W_{max}$  on mikrotuotantolaitoksen maksimiteho

16 A on suurin sallittu sulakekoko

230 V on Suomen verkkojännite.

## 2.2 Sähkön mikrotuotannon käyttökohteet

Sähkön mikrotuotannon tehorajoitusten myötä mikrotuotannon käyttökohteet rajoittuvat pienikulutteisiin kohteisiin, kuten omakotitaloihin, kesämökkeihin ja pienyrityksiin [2, s. 2]. Pienyritykseksi lasketaan esimerkiksi maatila. Mikrotuotanto tuottaa sähköä omaan kulutuskohteeseen, minkä vuoksi mikrotuotantolaitokset sijoitetaan kulutuskohteiden yhteyteen.

Mikrotuotantolaitoksen sijoittamisessa otetaan huomioon myös tuotannon energialähteen saatavuus, järjestelmän hyötysuhteen maksimointi sekä mikrotuotantolaitoksen tuottaman energian kulutuskohteen ympäristö ja sijainti.

1990-luvun alussa mikrotuotantoa esiintyi pääosin kesämökeillä ja veneissä [3, s. 12]. On-grid-järjestelmien hintojen laskun myötä mikrotuotantojärjestelmät ovat kuitenkin yleistyneet myös kotitalouksien yhteydessä [4, s. 4].

## 3 Sähkön mikrotuotannon tuotantomuodot

Mikrotuotantolaitos on kulutuskohteen yhteyteen kytketty sähköntuotantolaitos, joka tuottaa ensisijaisesti sähköä kulutuskohteen omaan käyttöön [2, s. 2]. Tuotetun ylijäämänsähkön myynti on silti mahdollista. Mikrotuotannon energialähteenä käytetään pääosin uusiutuvia energialähteitä, kuten aurinko-, tuuli-, bio- ja vesivoimaa. Mikrotuotantolaitokset ovat yleisiä yksityisten kuluttajien käytössä, esimerkiksi kotitalouden sähkön tuotannossa.

### 3.1 Aurinkovoima

Aurinkovoima ja aurinkosähköjärjestelmät ovat Suomen yleisin mikrotuotannon energianlähde [5, s. 4]. Aurinkovoimaa pystytään muuntamaan sähköksi aurinkopaneeleilla.



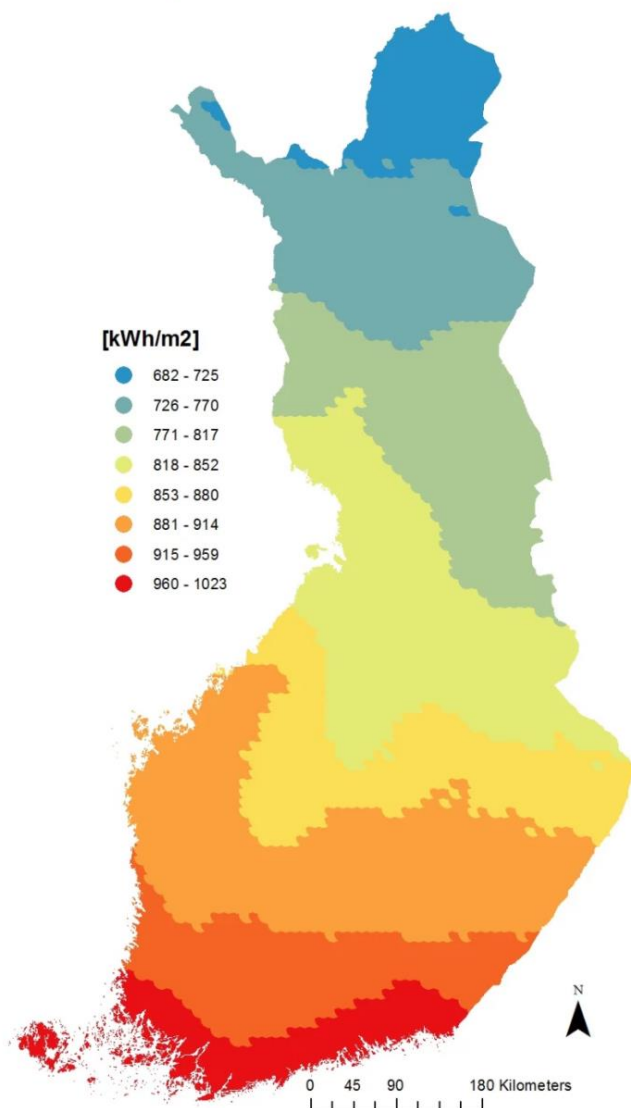
Aurinkopaneelit muodostuvat sarjaan kytketyistä aurinkokennoista, jotka muuntavat auringonvaloa sähköksi hyödyntäen valosähköistä ilmiötä. Aurinkokennojen raaka-aineena käytetään yleensä kiteistä, monikiteistä tai amorfista piitä. [6.]

Aurinkopaneelit ovat suosittu tuotantomuoto niiden luotettavuuden ja helppouden vuoksi. Aurinkopaneelit eivät tarvitse liikkuvia osia toimiakseen, mikä tekee niistä pitkäkestoisia ja luotettavia.

#### Aurinkoenergian esiintyminen Suomessa

Ilmatieteen laitos suorittaa mittauksia Suomen vuotuisesta auringon säteilykertymästä. Kuvassa 1 on Ilmatieteen laitoksen vuotuinen säteilykertymän kartta, josta selviää, että Etelä-Suomessa aurinkoenergiaa esiintyy keskimäärin noin 980 kWh/m<sup>2</sup> ja Pohjois-Suomessa noin 790 kWh/m<sup>2</sup>. Etelä-Suomen vuotuinen kokonaissäteily määrä vastaa Pohjois-Saksan vuotuista kokonaissäteily määrää. [7.]

### Average global radiation at period 1981-2010



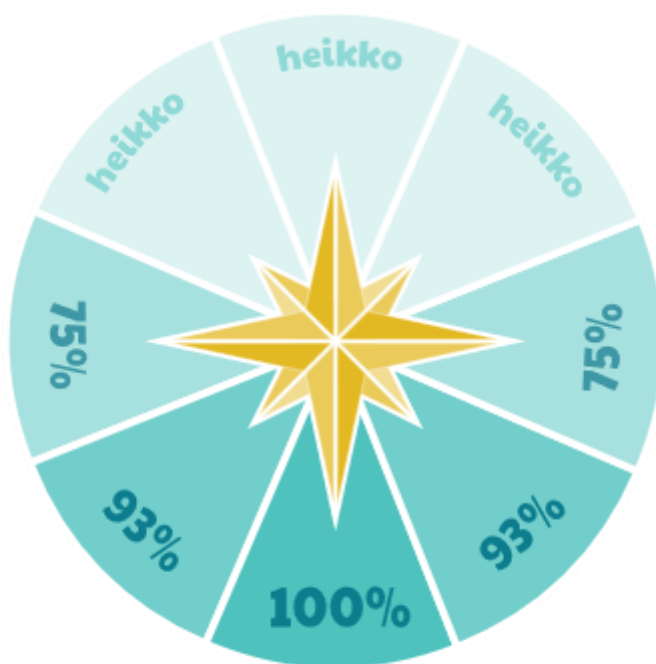
Kuva 1. Ilmatieteen laitoksen vuotuisen säteilykertymän kartta. Säteilyarvoista on laskettu keskiarvo vuosilta 1981–2010. [8.]

### Aurinkopaneelien tuotantokyky

Aurinkopaneelien tuotantokykyyn vaikuttava tekijä on niiden suuntaus ja asennuskulma. Etelä-Suomessa tuottavuudeltaan paras sijoitus aurinkopaneelille on etelään päin, noin

40 asteen kulmassa. Kun aurinkopaneelit sijoitetaan 40 asteen kulmaan, voidaan säästää jopa 20–30 % parempi hyötysuhde kuin vaakatasoon sijoitettuna.

Tuottavuus voi laskea merkittävästi riippuen asennetusta ilmansuunnasta. Kuvassa 2 on havainnollistettu ilmansuuntien vaikutus aurinkopaneelin tuottavuuteen. Prosenttimäärä ilmaisee tuotantomahdollisuutta suhteessa maksimiin. [9.]



Kuva 2. Aurinkopaneelin suuntauksen vaikutus aurinkopaneelin tuottavuuteen [9].

Aurinkopaneelin käyttöikä on vaikea arvioida, sillä siitä ei olla kyetty keräämään tarpeeksi luotettavaa dataa. Tämä johtuu aurinkopaneelien nuoresta kehityskaaresta ja markkinoille tuloajasta. Sähkönjakeluyhtiö Caruna on laskenut, että nykyhinnoilla Etelä-Suomeen asennettu aurinkopaneeli maksaa itsensä takaisin 10–15 vuoden sisällä [10].

Aurinkojärjestelmät Suomessa

Energiavirasto kerää energiayhtiöiltä virallista tietoa Suomen aurinkovoiman on-grid-järjestelmien tuotannosta. Vuoden 2018 lopussa asennettu aurinkovoimakapasiteetti Suomessa oli kokonaisuudessaan 133,5 MW. Kasvua vuodesta 2017 oli 53,1 MW. Arvioitu aurinkovoiman tuotantojärjestelmien lukumäärä Suomessa vuonna 2018 oli 15 000 kappaletta. [4, s. 6.]

Suomessa ennen vuotta 2010 aurinkovoimamarkkinat olivat pitkään keskittyneet off-grid-järjestelmiin. Syynä oli niiden suosittu käytettävyys kesämökeillä ja veneillä. Vuodesta 2010 lähtien on-grid-järjestelmien suosio on kasvanut. Tällä hetkellä on-grid-järjestelmät ylittävät off-grid-järjestelmät Suomessa tuotantokapasiteetiltaan [4, s. 4]. Lukumäärältään off-grid-järjestelmiä on enemmän kuin on-grid-järjestelmiä.

Vuonna 2018 aurinkosähkön tuotanto kattoi maailmanlaajuisesti 0,2 % sähkönkulutuksesta [11, s. 6]. Maailmanlaajuisesti aurinkosähkö on ollut viime vuosina voimakkaimmin kasvava sähkön tuotantomuoto. Myös Suomessa aurinkosähkön tuotantokapasiteetti on ollut viime vuosina kasvusuhdanteinen. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty aurinkosähkön tuotantokapasiteetti Suomessa, vuosina 2015–2018. Taulukosta 1 nähdään, että vuosien 2015–2018 välillä aurinkopaneelien tuotantokapasiteetti Suomessa lähes 7-kertaistui.

Taulukko 1. Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti vuosina 2015–2018. \*Off-grid-järjestelmistä ei ole virallista dataa saatavilla. Ne sisältävät pääosin pieniä aurinkovoimajärjestelmiä kesämökeillä ja veneillä [4, s. 6].

Vuosi	Aurinkopaneelit Off-grid -järjestelmät (MW)*	Aurinkopaneelit On-grid -järjestelmät (MW)	Aurinkopaneelijärjestelmät yhteensä (MW)
2015	10	10	20
2016	10,3	27,1	37,4
2017	10,6	69,8	80,4
2018	10,9	122,6	133,5

Aurinkosähkön kapasiteetin kasvua edesauttaa moni asia, kuten sähkönkulutuksen kasvu ja aurinkopaneelien hintojen lasku. Suomessa aurinkopaneelien hinnat ovat laskeneet merkittävästi viime vuosina. Huomattavaa kehitystä hintojen suhteen on tapahtunut vasta vuodesta 2017 lähtien. Tällöin aurinkopaneelien hinnat laskivat globaalisti. Aurinkopaneelien hintaa mitataan moduulin kidepiin (€/W) mukaan. [4, s. 8.]

IRENA:n (International Renewable Energy Agency) mukaan vuonna 2017 ja 2018 välillä aurinkosähköjärjestelmien hinta laski globaalisti 13 %. Vuosien 2010–2018 välillä hinta laski 77 %. Vuonna 2018 maailmanlaajuinen keskiarvo aurinkosähköjärjestelmän tuottaman energian hinnalle per kWh oli 0,079 € [12]. Taulukosta 2 nähdään aurinkopaneelien hintakehitystä Suomessa.

Taulukko 2. Moduulin piikidepaneelin hinnoittelua vuosilta 2014–2018. [4, s. 8.]

Vuosi	Moduulin piikidepaneelin alhaisin hinta (€/W)	Moduulin piikidepaneelin korkein hinta (€/W)	Moduulin piikidepaneelin keskiverto hinta (€/W)
2014	0,65	1	0,85
2015	0,6	0,7	0,65
2016	0,5	0,65	0,55
2017	0,4	0,55	0,45
2018	0,25	0,35	0,3

Aurinkovoimajärjestelmien hinnat ovat tyypillisesti sitä korkeampia per watti mitä pienempi järjestelmä on kyseessä. Mikrotuotantoon tarkoitettujen off-grid-aurinkovoimajärjestelmien hinnat per watti ovat lähes kymmenkertaiset teollisuuskäyttöön rakennettuihin aurinkovoimajärjestelmiin verrattuna. [4, s. 9.]

Taulukko 3. Aurinkovoimajärjestelmien hinnoittelua niiden tehokoon mukaan. [4, s. 9.]

Järjestelmän koko	Tyypillinen käyttö/kuvaus	Hinta (€/W)
Mikrotuotanto Off-grid (<1kW)	Yksittäinen off-grid -järjestelmä lyijyakuilla. Tyypillinen kesämökeillä, veneillä ja asuntovaunuilla	5
Mikrotuotanto On-grid (5-10 kW)	On-grid -järjestelmä, jaotellut sähköpaneelit asennettuna esim. omakotitalon katolle	1,05 - 1,61
Pientuotanto (10-100 kW)	On-grid -järjestelmä, jaotellut sähköpaneelit asennettuna esim. toimistorakennuksen käyttöön	0,85 - 1,05
(100-250 kW)	On-grid -järjestelmä, jaotellut sähköpaneelit asennettuna esim. Teollisuuslaitoksen käyttöön	0,75 - 0,85
(>250 kW)	On-grid -järjestelmä, jaotellut sähköpaneelit maahan asennettuna, suunniteltu sähkön myyntikäyttöön	0,65 - 0,75

Aurinkovoimajärjestelmien hintarakenne taulukkoon 3 saatiin tiedustelemalla aurinkovoimajärjestelmien toimittajilta järjestelmien hintaa. Järjestelmän tehokooksiksi valittiin 5 kW. Tämän jälkeen arvioitiin asennuskustannuksia. Arvioksi saatiin  $25 \text{ €/h} \cdot 1,6 = 40 \text{ €/h}$ . Arvioitu asennustyö sisältäen sähköasennukset olivat 2 tuntia/moduuli (275 W). Järjestelmän suunnittelun, matkakustannuksien ja lupa-anomusten kokonaiskustannukseksi arvioitiin 0,05 €/W. [4, s. 10.]

#### Aurinkovoiman globaali kasvu

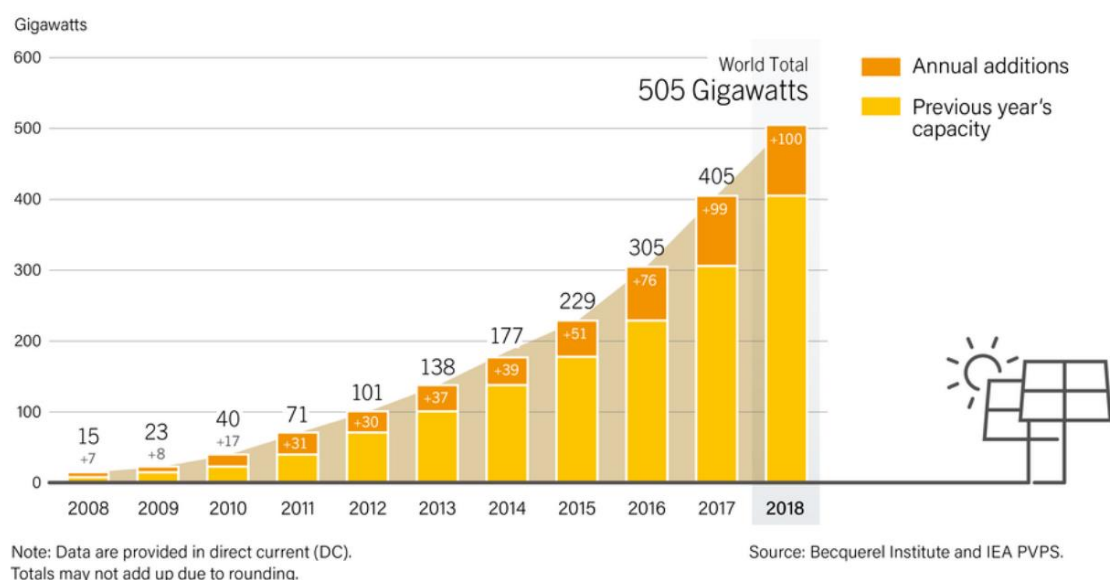
Aurinkopaneelien suosio globaalisti kasvaa nopealla tahdilla. Vuosien 2008–2018 välillä aurinkopaneelien kokonaiskapasiteetti kasvoi lähes 34-kertaiseksi. Vuonna 2018 aurinkopaneelien maailmanlaajuinen kokonaiskapasiteetti oli 505 GW. Sen kasvu oli 100 GW verrattuna vuoden 2017 samaan ajanjaksoon. [12.]

Suomessa aurinkopaneelien kokonaiskapasiteetin kasvu on viime vuosina ollut prosentuaalisesti maailmanlaajuista keskiarvoa korkeampi. Vuoden 2018 lopussa Suomen au-

rinkopaneelien tuotannon kokonaiskapasiteetti oli 133,5 MW. Se kasvoi 53,1 MW vuodesta 2017, eli kasvua tapahtui 39,8 %. Maailmanlaajuisesti vuosittainen kasvu on ollut keskimäärin noin 20 %. [11.]

Suomessa vuonna 2018 aurinkovoima kattoi 0,2 % kulutetusta sähköstä. Aurinkovoiman globaalin keskiarvon osuus kulutetusta sähköstä vuonna 2018 oli 2,58 % ja Euroopassa 4,3 % [12]. Kuvasta 3 nähdään aurinkovoiman tuotantokapasiteetin globaali kasvu vuosien 2008 ja 2018 aikana.

Solar PV Global Capacity and Annual Additions, 2008-2018



Kuva 3. Aurinkovoiman tuotantokapasiteetti globaalisti vuosien 2008–2018 välisenä aikana. [10.]

Aurinkosähkön globaalia kasvua on ajanut valtioiden tukiohjelmat, aurinkopaneelien teknologian ja tuotannon kehittyminen sekä tuotteiden hintojen lasku. Joissakin maissa, kuten Japanissa, aurinkosähkön tuotannon kapasiteetin kasvu on hidastunut tilanpuutteen, korkeiden palkkojen ja verkon rasitteiden takia. [11.]

### 3.2 Tuulivoima

Tuulivoima on tuulen liike-energiaa, joka muutetaan sähköksi tuuliturbiinien avulla. Tuulivoima on mikrotuotannon toiseksi yleisin muoto Suomessa. Mikrotuotannossa käyttävät tuulivoimalat ovat nimeltään pientuulivoimaloita. Pientuulivoimaloille on määriteltä eri kokoluokkia. Niiden potkurin pinta-ala on tyypillisesti alle 200 m<sup>2</sup>, ja nimellisteholtaan ne ovat alle 50 kW. [13.]

Pientuulivoimaloiden käyttökohteet ovat tyypillisiä mikrotuotannon kohteita, kuten maa- ja kotitaloudet sekä pienet laitokset. Pientuulivoimalat soveltuvat erityisesti kotitalouksien ja vapaa-ajan asuntojen sähköntuotantoon, jossa ne kykenevät tuottamaan osan niiden sähköntarpeesta. Voimaloiden kokoluokissa on huomattavia eroja. Pientuulivoimaloiden lavat ovat tyypillisesti joko 2 metriä tai 4–8 metriä. Korkeudeltaan pientuulivoimalat ovat tyypillisesti 5–30 metriä. 2 kilowatin pientuulivoimala kykenee tuulisella paikalla tuottamaan noin puolet omakotitalon sähköntarpeesta. [13.]

Tuulivoimalat, joiden lapojen halkaisija on 2 metriä, soveltuvat esimerkiksi akkujen latauskäyttöön. Tämänkaltaisia tuulivoimaloita on käytössä muun muassa kesämökeillä. Suuremmat pientuulivoimalat, joissa on 4–8 metrin pituiset lavat, soveltuvat paremmin kotitalouksien käyttöön ja sopivat esimerkiksi lämmityksen tai valaistuksen ylläpitoon. [14.]

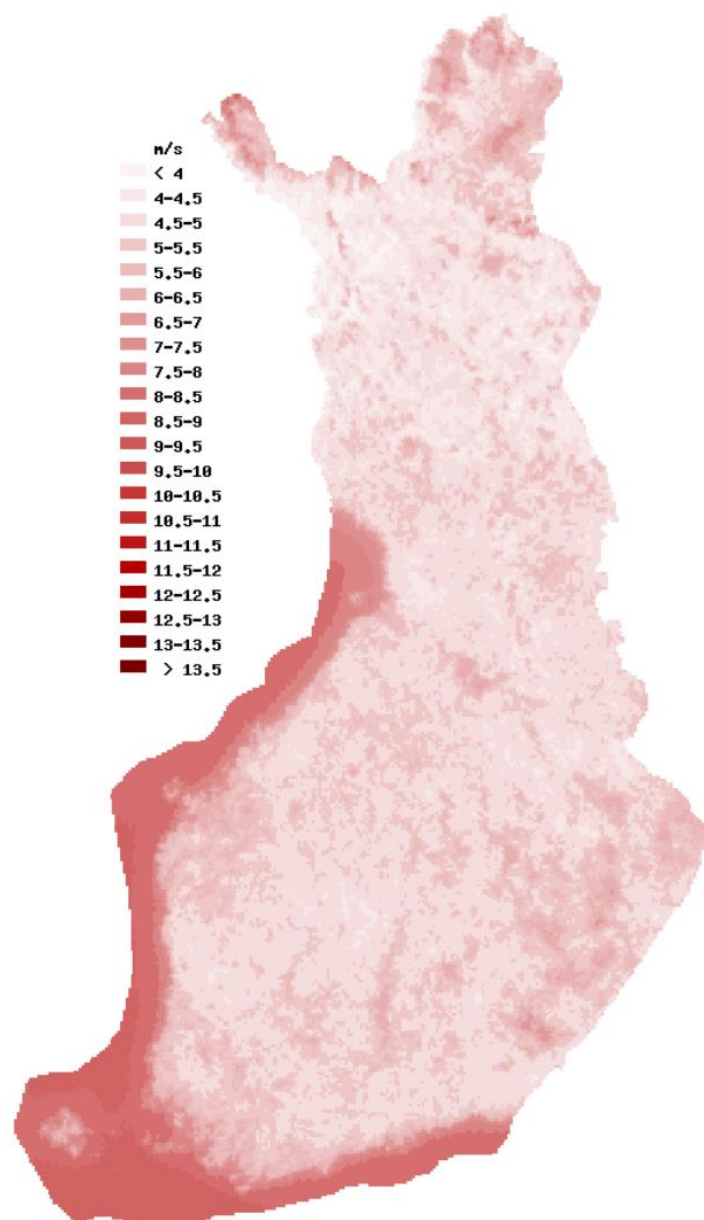
#### Suomen tuuliolosuhteet

Suomen tuuliolosuhteita voi tarkastella Tuuliatlas verkkosivulla, jossa on esitetty avointa dataa Suomen tuulitiedoista. Tuuliatlas on tärkeä apuväline arvioitaessa tuulivoiman tuotantomahdollisuuksia.

Tuuliatlaksen säämallilla on tarkasteltu Suomen tuuliolosuhteita eri korkeuksilta. Säämalli tarkastelee tuuliolosuhteita 50 metristä 400 metriin. Säämallin tuuliolosuhde mitaukset ovat vuosien 1989–2007 väliseltä ajalta. [15.]



Kuvassa 4 on tuuliatlaksen tuulen keskinopeuskartta. Tuulen keskinopeuskartasta nähdään kuinka Suomessa tuulen aritmeettinen keskinopeus (m/s) on korkeinta rannikkoalueilla.



Kuva 4. Tuulen keskinopeuskartta Tuuliatlaksen verkkosivuilta. Kartan tuulennopeudet ovat mitattu 50 metrin korkeudelta maanpinnasta. [15.]

Tuulivoiman hyödyt

Suomessa tuulivoiman hyöty on siinä, että se ei ole yhtä riippuvainen vuodenajasta kuin esimerkiksi aurinkovoima. Olosuhteiden salliessa tuulivoimaa voidaan tuottaa myös talvella. Tuulivoiman tuotantomahdollisuus on talvella sopivissa olosuhteissa jopa korkeampi kuin kesällä, sillä talvella tuulee kesää keskimääräistä enemmän. [16.]

#### Tuulivoiman haasteet

Tuulivoiman yleistyminen suhteessa aurinkovoimaan on ollut hidasta. Kunnissa pientuulivoiman lupasääntely on ollut epäselvää tai olematonta. Kaikissa kunnissa ei ole esimerkiksi määritelty, minkälaisen rakennusluvan pientuulivoimala tarvitsee. [17.]

Myös pientuulivoimalan sijoittelussa ja rakentamisessa on todettu ongelmia. Pientuulivoimala tarvitsee tuulisen sijoituspaikan ja korkean maaston tai maston. [17.]

Koska tuulivoimala toimii tuulen synnyttämällä liike-energialla, vaatii pientuulivoimalan liikkuvat osat säännöllistä tarkastusta. Tätä haittaa ei esiinny esimerkiksi aurinkopaneeleilla. Pientuulivoimalat ovat myös kalliimpia kuin aurinkosähköjärjestelmät. Pientuulivoimala voi maksaa jopa 2–3 kertaa enemmän kuin tuotantokapasiteetiltaan vastaava aurinkosähköjärjestelmä. [17.]

#### Tuulen tuottaman tehon laskenta

Tuulen tuottamaan tehoon vaikuttaa lavan pinta-ala, ilmantiheys ja ilmavirtaus (tuulen nopeus). Suurin vaikuttava tekijä tuulesta saadun tehon muutokseen on ilmavirtaus, sillä tuulesta saatu teho on suoraan verrannollinen ilmavirtauksen kolmanteen potenssiin. Tuulen energiaa suhteessa ilmavirtaukseen kuvataan alla olevassa kaavassa.

Lasketaan ilmavirtauksesta saatava teho. Kaavalla

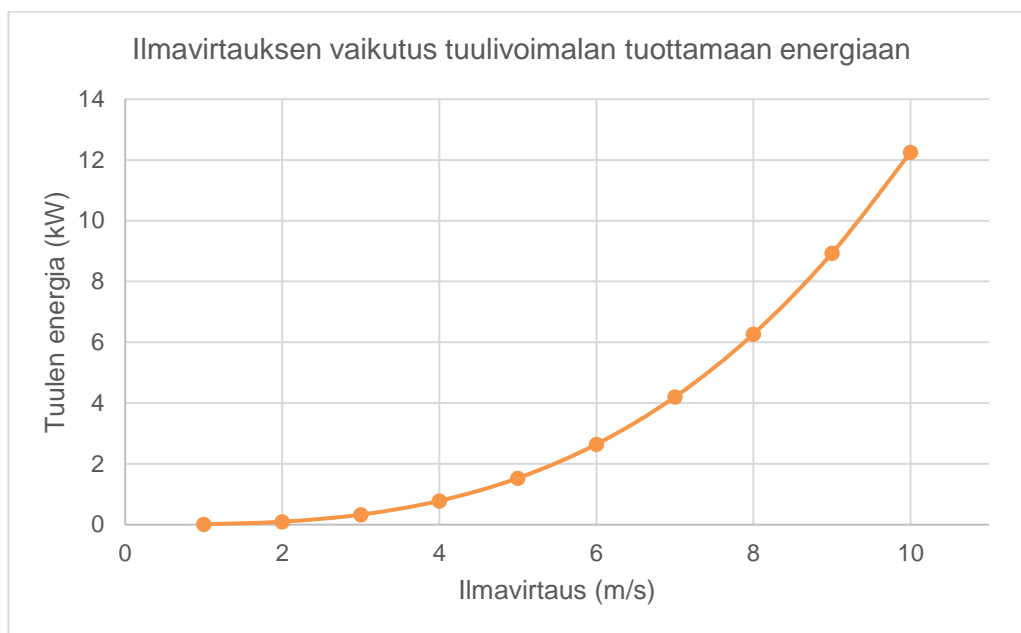
$$P_i = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

$\rho$  on ilmantiheys (1,225 kg/m<sup>3</sup>, ilma 15 °C:ssa)

$A$  on lavan pinta-ala

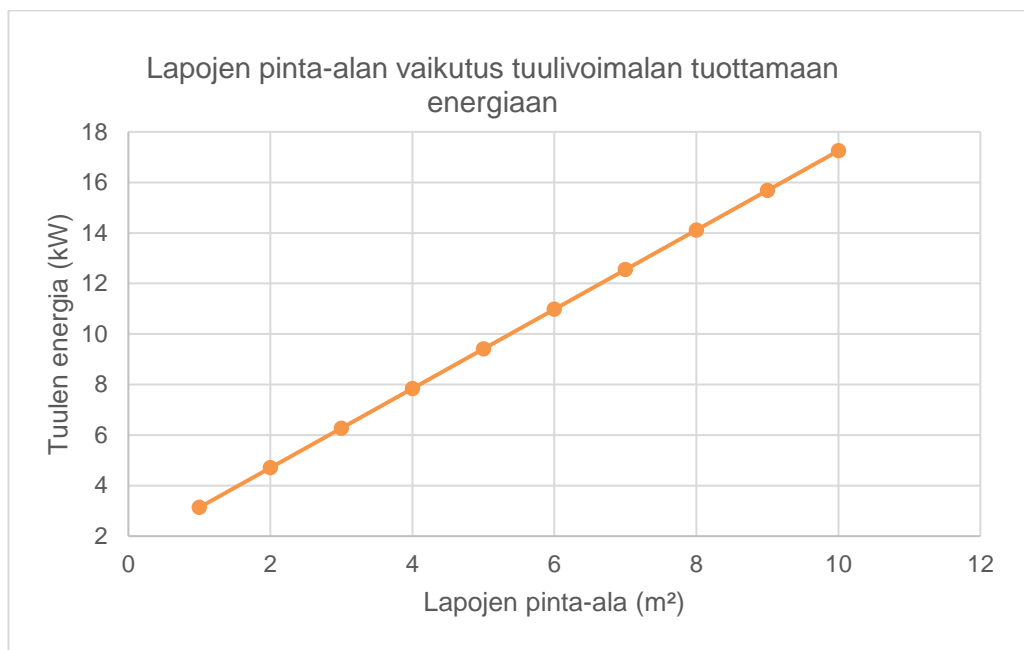
$v$  on ilmavirtaus

Kuvassa 5 on kuvailtuna ilmavirtauksesta saatavan tehon kaavaa käytännössä. Kaaviosta nähdään ilmavirtauksen muutoksen vaikutus tuulen teoreettisesti suurimpaan energiaan. Ilmanpaine  $1,225 \text{ kg/m}^3$  (ilma  $15^\circ\text{C}$ :ssa) ja tuulivoimalan lapojen pinta-ala ( $20 \text{ m}^2$ ) ovat kaavassa vakioita.



Kuva 5. Teoreettisesti suurin tuulenenergia. Ilmavirtauksen vaikutus tuulen tehoon.

Kuvassa 6 on toinen esimerkki ilmavirtauksesta saatavan tehon kaavasta. Kaaviosta nähdään lapojen pinta-alan muutoksen vaikutus tuulen teoreettisesti suurimpaan energiaan. Ilmanpaine  $1,225 \text{ kg/m}^3$  (ilma  $15^\circ\text{C}$ :ssa) ja ilmavirtaus ( $8 \text{ m/s}$ ) ovat kaavassa vakioita.



Kuva 6. Teoreettisesti suurin tuulen energia. Lapojen pinta-alan vaikutus tuulen tehoon.

#### Tuulivoimalaitoksen tuotannon tarkastelu

Tuulivoimalaitosten tuotantoa voidaan tarkastella huipunkäyttöajan ja kapasiteettikertoimen avulla.

Huipunkäyttöaika on energiatekniikassa käytetty vertailuluku. Sillä voidaan kuvata, kuinka suuren osan vuoden tuotannosta voimala on tuntimääräisesti tuottanut nimellistehollaan.

$$\text{Huipunkäyttöaika (h)} = \frac{\text{Vuoden aikana tuotettu energia [Wh]}}{\text{Nimellisteho [W]}}$$

Kapasiteettikerroin on huipunkäyttöajasta prosentuaalinen esitystapa. Kapasiteettikerroin voidaan laskea jakamalla huipunkäyttöaika vuoden kaikilla tunneilla.

$$\text{Kapasiteettikerroin (\%)} = \frac{\text{Huipunkäyttöaika (h)}}{24 * 365}$$

### 3.3 Biovoima

Biovoimaa voidaan tuottaa erilaisista biomassoista ja kierrätysmateriaaleista. Biovoiman mikrotuotantoa esiintyy Suomessa etenkin maatalouksissa, joissa eloperäisestä aineesta, kuten lannasta ja ylijäämärehuista saadaan tuotettua biokaasua. Tuotettu biokaasu voidaan muuntaa sähkö- ja lämpövoimaksi. Tällaisia ratkaisuja kutsutaan biokaasulaitoksiksi. [18.]

#### Biokaasun koostumus

Biokaasulaitokset tuottavat metaania ja hiilidioksidia, jotka muutetaan energiaksi polttamalla. Metaani ja hiilidioksidi syntyvät biokaasulaitoksessa, kun maatilalla rehut ja lannoite muutetaan syötteeksi, eli hienojakeiseksi seokseksi. Anaerobiset bakteerit mädättävät hienojakeista seosta synnyttäen kaasuja. Noin kaksi kolmasosaa biokaasusta on metaania. [18, s. 4.]

Taulukossa 4 on jaoteltu biokaasun koostumus prosentuaalisesti. Taulukosta nähdään että biokaasu koostuu lähes kokonaan metaanista ja hiilidioksidista.

Taulukko 4. Biokaasun koostumus prosentuaalisesti. [18, s. 3.]

Aine	Koostumus %
Metaani, CH <sub>4</sub>	55–75
Hiilidioksidi, CO <sub>2</sub>	25–45
Hiilimonoksidi, CO	0–0,3
Typpi, N <sub>2</sub>	1–5
Vety, H <sub>2</sub>	0–3
Rikkivety, H <sub>2</sub> S	0,1–0,5

#### Biokaasun tuotanto ja kannattavuus Suomessa

Biokaasua tuotetaan Suomessa vähän sen tuotantopotentiaaliin nähden. Vuonna 2018 biokaasun tuotanto oli noin terawatti tunnin luokkaa vuodessa. Se vastasi noin 0,3 % koko energian kulutuksesta Suomessa. Energiatalous arvioi, että Suomessa biokaasun tuotantopotentiaali on noin 15–20 terawatti tuntia. Energiatalouden tuotantopotentiaalin arviossa ei ilmoiteta, kuinka paljon biokaasun tuotantopotentiaalista on pientuotantoa. [19.]

Suomessa pienbiokaasutuotantolaitosten valmistajia ja kehittäjiä on vain kymmeniä. Energiatalous avaa artikkelissaan ”Biokaasun tuotanto Suomessa etenee vaikeuksista huolimatta” biokaasutuotannon markkinoiden mahdollisuuksia ja haasteita. Artikkelissa mainitaan, kuinka ylijäämäbiokaasun myynti voi olla haasteellista, sillä se kilpailee maakaasun kanssa samoista markkinoista. Maakaasu on yleiseltä hintatasoltaan halvempaa kuin biokaasu, mutta ominaisuuksiltaan lähes identtistä [18]. Gasumin tankkausasemilla liikennebiokaasun kilohinta maaliskuussa vuonna 2020 oli 1,52 €/kg ja maakaasun kilohinta 1,27 €/kg [20].

Myös Motiva verkkoaineistossaan ”Biokaasun tuotanto maatilalla” on laskenut biokaasulaitoksen kannattavuutta. Esimerkkinä käytettiin 150 lehmän maatilaa, jonka vuosittainen sähkönkulutus on noin 150 MWh. 10 snt/kWh sähkön hinnalla maatilan vuotuinen sähkölasku on 15 000 euroa. Motivan esimerkkimaatilalla lannan mädättämisellä tuotettu biokaasu riittää kattamaan tilan oman sähköntarpeen. [18, s. 25]

150 lypsylehmän maatilan tuottama biokaasu saadaan laskettua, kun tiedetään lypsylehmän tuottavan noin 65 kg lietelantaa vuorokaudessa. Näin ollen 150 lypsylehmän tilan lannan määrä vuorokaudessa on noin 10 000 kg. Lannan kuiva-ainepitoisuus on noin 10 %. Kuiva-aineesta noin 80 % koostuu orgaanisesta aineesta, jota voidaan käyttää biokaasun tuottamisessa. [18, s. 23]

Lasketaan esimerkkimaatilan orgaanisen aineen määrä vuodessa. Kaavasta

$$\text{Orgaanisen aineen määrä vuodessa} = 10000 \text{ kg} * 10 \% * 80 \% * 365 = 292 \text{ tonnia}$$

Esimerkkimaatilalla orgaanista ainetta syntyy 292 tonnia vuodessa. Sillä voidaan tuottaa seuraava määrä biokaasua, kun tiedetään että naudan lietelannasta saadaan 360 kuutiometriä biokaasua per tonni orgaanista ainetta:

$$\text{Metaanin määrä vuodessa} = 292 \text{ tonnia} * 360 \text{ m}^3 \frac{\text{biokaasua}}{\text{tonni}} = 105\,120 \text{ m}^3 \text{ biokaasua}$$

Esimerkkimaatila tuottaa 105 120 m<sup>3</sup> biokaasua, josta voidaan laskea tilan biokaasun sähköntuotanto vuodessa, kun tiedetään että yksi kuutiometri biokaasua vastaa noin 6 kWh energiaa ja tyypillisen biokaasulaitoksen hyötysuhde on noin 30 % [18, s. 25].

$$\text{Sähkötuotantokapasiteetti} = 105\,120 \text{ m}^3 * 6 \text{ kWh} * 30 \% = 189\,216 \text{ kWh}$$

Biokaasulaitoksen sähköntuotannosta noin 55 % energiasisällöstä muuttuu lämmöksi ja 15 % on hukkaenergiaa, joka poistuu pakokaasuina ja säteilyhävikkeinä. Jäljelle jäänyt energia muuttuu sähköksi [18, s. 24]. Tämän vuoksi biokaasutuotannossa on kannattavaa käyttää sähkön ja lämmön yhteistuotantoa.

## 4 Sähkön mikrotuotanto Suomen sähkömarkkinoilla

Tuotetun ylijäämänsähkön voi myydä sähkömarkkinoille. Sähköä ei saa kuitenkaan itse syöttää verkkoon, vaan sille pitää olla ostaja. Sähkönostajat ovat tyypillisesti sähköyhtiöitä. Sähköyhtiöt mittaavat verkkoon syötetyn sähkön tunnin tarkkuudella, jonka mukaan he maksavat sähkön mikrotuottajalle tehdyn sähkösopimuksen mukaisesti.

Lähes jokainen sähköyhtiö tarjoaa sähkösopimuksissaan ylijäämänsähköstä spot-hinnan. Tämä tarkoittaa Nord Poolin määrittelemää pohjoismaisen pörssisähkön tuntihintaa. [21.]

### 4.1 Nord Pool

Nord Pool on osakeyhtiömuotoinen sähköpörssi, jonka omistaa Euronext ja pohjoismaiden sekä Baltian maiden kantaverkkoyhtiöt. Euronext omistaa enemmistön Nord Poolista 66 % osuudellaan. Nord Pool on pörssityypiltään raaka-ainepörssi, jossa käydään kauppaa sähköllä. [21.]

Nord Poolin yksi keskeisimmistä kauppapaikoista on sähkön spot-markkinat. Spot-markkinoilla käydään kauppaa seuraavan päivän sähkön hinnasta tunnin tarkkuudella. Spot-markkinoilla toimii tarjontapuoli, eli sähköntuottajat ja ostajapuoli, eli sähkönmyyjät sekä teollisuuslaitokset, jotka ostavat sähkön suoraan omaan kulutukseen. [21.]

Spot-markkinoilla nämä kaksi toimitsijapuolta lähettävät oman tarjouksensa päivittäin Nord Pooliin kello 13 Suomen aikaan mennessä. Tarjouksessa he ilmoittavat ostettavan/myytävän hinnan ja määrän sähkölle. Näiden tarjousten perusteella Nord Pool laskee seuraavan päivän sähkön spot-hinnan. [21.]

Taulukossa 5 on kerätty Suomen kuukausittaista spot-hinnastoa vuosien 2010 ja 2019 väliseltä ajalta.



Taulukko 5. Suomen kuukausittainen spot-hinnasto vuosilta 2010–2019 ja vuosien keskimääräinen hinta. Spot-hinnat ovat luokkaa EUR/MWh. [22].

	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	Avg.
Tammi	55,78	37,08	33,29	37,83	33,8	40,23	41,59	38,82	68,92	65,78	45,31
Helmi	46,76	43,36	35,07	26,09	33,18	34,16	39,43	52,81	64,58	93,7	46,91
Maalis	40,01	45,6	30,68	27,09	29,42	31,21	45,01	36,51	60,91	55,22	40,17
Huhti	41,44	40,21	31,4	27,25	30,09	31,53	43,91	36,48	52,93	43,71	37,90
Touko	39,84	38,63	30,67	28,06	25,87	36,62	37,35	33,34	54,42	39,47	36,43
Kesä	30,71	47,17	30,64	35,41	21,52	35,43	38,63	27,38	48,54	41,96	35,74
Heinä	45,91	54	34,17	30,97	27,57	36,81	37,03	13,67	42,2	48,76	37,11
Elo	48,77	55,48	36,28	31,38	31,12	38,38	43,47	38,18	48,98	43,21	41,53
Syys	48,75	51	37,27	32,52	31,75	38,33	47,76	41,03	38,86	51,2	41,85
Loka	46,33	46,36	33,42	37,54	33,49	36,72	45,95	38,57	36,9	51,23	40,65
Marras	45,71	50,08	33,67	41,02	31,74	35,41	38,04	36,95	42,03	56,63	41,13
Joulu	38,42	52,32	31,92	34	26,56	37,13	35,65	46,79	33,34	91,34	42,75

#### 4.2 Ylijäämä sähköön hintarakenne

Sähkön mikrotuottajan kannattaa sähkösopimuksia kilpailuttaessa kiinnittää huomiota välityspalkkioon. Välityspalkkio on marginaali, jonka sähköyhtiö veloittaa tuottajalta verkko koon myydystä sähköstä.

$$\text{Ylijäämä sähköön hinta} \left( \frac{\text{snt}}{\text{kWh}} \right) = \text{Spot tuntihinta} \left( \frac{\text{snt}}{\text{kWh}} \right) - \text{välityspalkkio} \left( \frac{\text{snt}}{\text{kWh}} \right)$$

Taulukkoon 6 on kerätty sähköyhtiöiden tarjoamia ylijäämäsähkön hintoja ja välityspalkkioita ylijäämäsähköstä. Taulukosta nähdään kuinka välityspalkkiot ovat tyypillisesti luokkaa snt/kWh.

Taulukko 6. Sähköyhtiöiden tarjoamia sähkösopimuksia ylijäämäsähköstä. Spot (h) on pohjoismaisen pörssisähkön tuntihinta ja spot (kk) kuukausihinta. Hinnat 6.2.2020.

Sähköyhtiö	Ylijäämäsähkön hinta	Välityspalkkio
Helen	Spot (h)	0 snt/kWh
Vaasansähkö	Spot (h)	0,20 snt/kWh
Kokkolanenergia	Spot (h)	0,20 snt/kWh
Fortum	Spot (h)	0,24 snt/kWh
Turkuenergia	Spot (h)	0,30 snt/kWh
Äänekosken energia	Spot (h)	0,30 snt/kWh
Vattenfall	Spot (h)	0,30 snt/kWh
Lumme-energia	Spot (h)	0,30 snt/kWh
Porvoon energia	Spot (kk)	0,30 snt/kWh
Keravan energia	Spot (h)	0,30 snt/kWh
Valkeakosken energia	Spot (h)	0,35 snt/kWh

Taulukossa 7 on tutkittu spot-hintojen ja välityspalkkioiden erotusta. Esimerkkitaulukoon on otettu vuoden 2019 kuukausittaista day-ahead spot-hinnastoa. Välityspalkkion arvoksi valittiin 0,30 snt/kWh.

Taulukko 7. Esimerkkitaulukko ylijäämänsähkön hinnasta vuoden 2019 day-ahead -hinnoilla. Taulukon day-ahead -hinnat ovat vuoden 2019 day-ahead kuukausihinnoista.

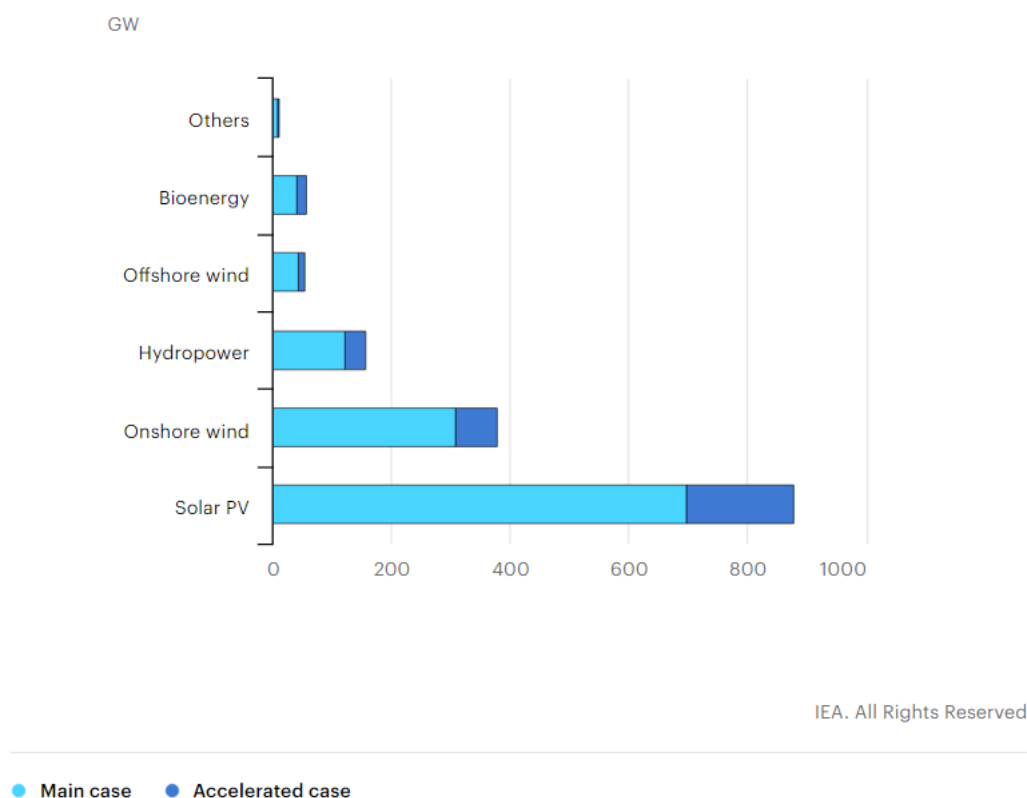
	Day-ahead snt/kWh	Välityspalkkio snt/kWh	Erotus snt/kWh
Tammi	5,578	0,3	5,278
Helmi	4,676	0,3	4,376
Maalis	4,001	0,3	3,701
Huhti	4,144	0,3	3,844
Touko	3,984	0,3	3,684
Kesä	3,071	0,3	2,771
Heinä	4,591	0,3	4,291
Elo	4,877	0,3	4,577
Syys	4,875	0,3	4,575
Loka	4,633	0,3	4,333
Marras	4,571	0,3	4,271
Joulu	3,842	0,3	3,542

#### 4.3 Mikrotuotannon kasvu

Euroopan parlamentti päätöslauseessaan (2012/2930(RSP)) vahvisti, että energian mikrotuotannon on oltava keskeinen osa tulevaisuuden energiantuotantoa. Jäsenvaltioita kehoitettiin ottamaan mikrotuotannon erityispiirteet huomioon suunnitellessa kansallisia kannustin- ja tukiohjelmia. [23.]

Voimakkainta kasvu on tällä hetkellä aurinkovoiman mikrotuotannossa [24]. Aurinkovoiman kasvun voidaan olettaa olevan kasvamaan päin, kun taistelu ilmastonmuutosta vastaan voimistuu ja aurinkosähköjärjestelmien hintojen lasku jatkuu. Suurin vaikuttava tekijä mikrotuotannon yleistymisessä on siitä saatava rahallinen ja käytännöllinen hyöty. IRENA:n (International Renewable Energy Agency) mukaan vuosien 2010 ja 2018 välillä aurinkosähköjärjestelmien hinta laski globaalisti 77 %. [10.]

Kuvassa 7 on esitetty kansainvälisen energiajärjestön arvio uusiutuvien energioiden tuotantokapasiteetin kasvusta. Arviosta nähdään, kuinka uusiutuvien energioiden kasvun odotetaan olevan suurinta aurinkosähköjärjestelmillä.



Kuva 7. Kansainvälisen energiajärjestön arvio uusiutuvien energioiden tuotantokapasiteetin kasvusta vuosien 2019 ja 2024 välillä. [24].

Sähkön käytön lisääntyminen lisää tarvetta mikrotuotannolle, kun globaali ja valtakunnallinen sähkön tarve lisääntyy. Energiantuotanto ja -kulutus ovat murrosvaiheessa, jossa fossiilisia voimanlähteitä pyritään uusimaan sähköisillä vaihtoehdoilla, kuten siirtymällä bensiiniautoista sähköautoihin. [24.]

Yksi mikrotuotannon yleistymisen haasteita on sen sää- ja vuodenaikariippuvuus. Sää- ja vuodenaikariippuvuutta on mahdollista vähentää sähkön varastoinnilla, kuten akustoilla. Sähkön varastointijärjestelmiin ja -komponentteihin investointi on kallista ja usein

se ei ole rahallisesti kannattavaa. Tämä vähentää yleistä halua investoida mikrotuotantojärjestelmiin.

#### Kestävän kehityksen skenaario SDS

Kansainvälinen energiajärjestö on luonut kestävän kehityksen -skenaarion (SDS), joka hahmottelee globaalin energiajärjestelmän merkittävää muutosta. Se osoittaa, kuinka maailma voi muuttaa suuntaansa saavuttaakseen kolme pääasiallista energiaan liittyvää kestävän kehityksen tavoitetta. [25.]

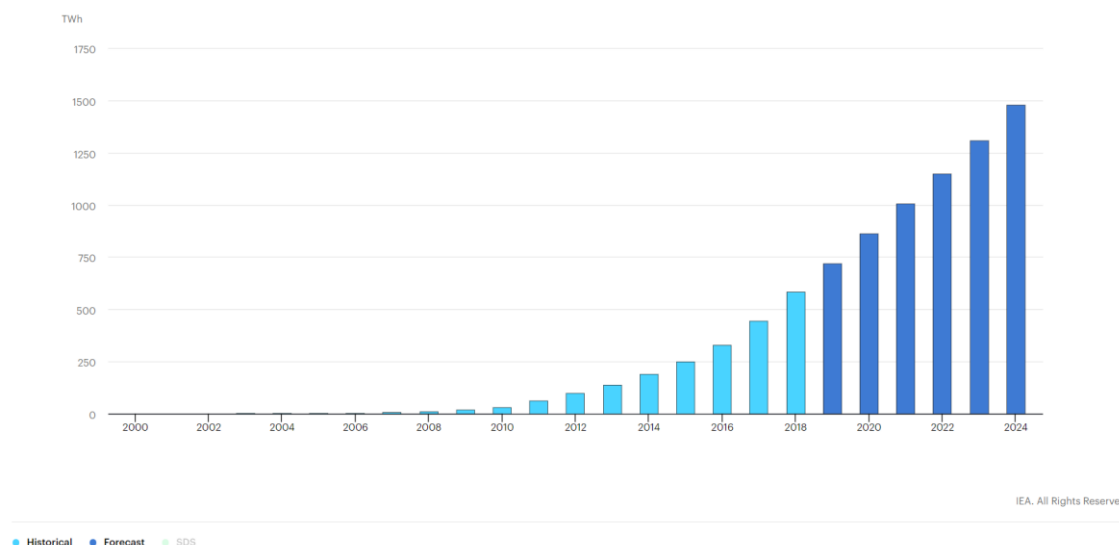
Nämä kolme energiaan liittyvään kestävän kehityksen tavoitetta ovat:

- SDG 7, saavuttaa energian yleinen saatavuus globaalisti
- SDG 3 (yksi osa), vähentää ilmansaastumisen vakavia terveysvaikutuksia
- SDG 13, taistella ilmastonmuutosta vastaan

Suurena osana Kansainvälisen energiajärjestön SDS-skenaariota on uusiutuvat energiat, joiden avulla saavutetaan hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ja ilmastonmuutoksen hillitseminen. Jotta kestävän kehityksen -skenaarion tavoitteet saavutetaan, täytyy aurinkovoiman tuotantokapasiteetin lisääntyä 16 % vuositasolla, ja saavuttaa 3300 TWh tuotantokapasiteettitaso vuoteen 2030 mennessä. Aurinkovoiman tuotantokapasiteetin täytyy siis 6,6-kertaistua vuosien 2018 ja 2030 välillä. Nykyisellä vuositason kasvulla aurinkovoiman tuotantokapasiteetin kasvu on saavuttamassa vuoden 2030 SDS-tavoitteen. [25.]

Suomen aurinkovoiman tuotantokapasiteetin kasvaessa SDS-skenaarion mukaan, vuonna 2030 Suomi saavuttaisi 881 MW:n aurinkovoiman tuotantokapasiteetin. [25.]

Kuvassa 8 on esitetty kansainvälisen energiajärjestön ennuste aurinkovoiman tuotantokapasiteetin kasvusta. Ennusteen mukaan aurinkovoiman tuotanto yli kaksinkertaistuu vuosien 2018 ja 2024 välisenä aikana.



Kuva 8. Kansainvälisen energiajärjestön ennuste aurinkovoiman tuotantokapasiteetin kasvusta. Kansainvälisen energiajärjestön ennusteen mukaan vuonna 2024 aurinkovoimatuotantokapasiteetti on globaalisti 1480 TWh. [25].

Sähkönjakelu hintojen kasvu ja sähköntuotanto hintojen lasku johtavat tilanteeseen, jossa hajautettujen aurinkosähköjärjestelmien kasvava taloudellinen houkuteltavuus kasvaa. Se johtaa Kansainvälisen energiajärjestön ennusteen mukaan hajautettujen järjestelmien nopeaan laajentumiseen ja kasvuun tulevina vuosikymmeninä. Kansainvälinen energiajärjestö ennustaa, että tämä muutos tulee lisäämään hajautettujen järjestelmien määrää jopa sadoilla miljoonilla. [25]

Kustannusten laskulla ja poliittisella tuella odottaa seuraavan viiden vuoden aikana voimakasta aurinkosähkön kasvua Kiinan, Euroopan unionin, Yhdysvaltojen, Intian ja Japanin johtamana. [25].

### Poliittinen tuki

Euroopan unioni on YK:n ilmastopöytäkirjassa sitoutunut vähentämään hiilidioksidipäästöjä ja näin ollen hillitsemään ilmastonmuutosta. Ilmastopöytäkirjan sitoutumisen myötä Euroopan unioni on asettanut uusiutuvan energian kasvutavoitteita.

Mikrotuotannon kasvua pyritään edistämään Euroopan unionin ja Suomen valtion hallitustasolla, sääntelemällä muun muassa lakeja ja direktiivejä, jotta sähkön mikrotuotanto ja myyminen olisi kannattavampaa. Kansainvälinen energiajärjestö mainitsee kustannusten laskun ja poliittisen tuen tärkeinä tekijöinä mikrotuotannon kasvulle [11].

Mikrotuotannon rahallisen kannattavuuden kasvu Suomessa

Suomessa mikrotuotantoa ja sen rahallista kannattavuutta on pyritty lisäämään erilaisilla säätelyillä. Yksi näistä säätelyistä on verosäätely, jonka mukaan kotitalouden omiin tarpeisiin tuotettu sähkö ei ole verotettavaa. Myöskään sähkön myynnistä ei veroteta, jos myyty määrä on kalenterivuoden aikana ostettua sähkön määrää pienempi.

## 5 Verkkoyhtiöiden vaatimukset

Suomessa on laadittu vaatimuksia ja suosituksia verkkoon liitetulle mikrotuotantolaitokselle, nämä vaatimukset ja suositukset ovat pääosin suojaukseen tai tuotetun sähkön laatuun liittyviä vaatimuksia. Jotkin mikrotuotantojärjestelmien laitteet voivat vaatia rakennus- tai toimenpideluvan rakennusvalvonnasta. Ennen mikrotuotantolaitoksen perustamista vaaditaan tulevan mikrotuotantolaitoksen omistajan ottavan yhteyttä kolmeen tahoon: sähköverkkoyhtiöön, sähköurakoitsijaan sekä kunnan rakennusvalvontaan. [26.]

Verkkoyhtiöt laativat sähkön mikrotuottajan kanssa verkkopalvelusopimuksen, joka oikeuttaa mikrotuottajaa myymään tuotetun sähkön ja syöttämään sen sähkönjakeluverkkoon. [26.]

Mikrotuotantojärjestelmiä luokitellaan niiden käyttöominaisuuksien mukaan. Luokille on asetettu suosituksia siitä, mitä turvaominaisuuksia niiden pitäisi sisältää. Taulukossa 8 on havainnollistettu mikrotuotantojärjestelmien luokittelua niiden käyttöominaisuuksien mukaan.

Taulukko 8. Mikrotuotantojärjestelmien luokittelu käyttöominaisuuksien mukaan. [27].

	Luokka	Rinnankäynnin esto	Tahdistus	Yhteensopivuus	Saarekekäytön esto	Sopimusedot
Rinnankäyttö estetty mekaanisesti	1	X				LE2019 ja VPE2019
Sähkön siirto jakeluverkkoon estetty	2		X			LE2019 ja VPE2019
Tuotetulle sähkölle ei ole ostajaa	3		X	X	X	LE2019 ja VPE2019
Tuottaja myy sähköä sähkömarkkinaosapuolelle	4		X	X	X	LE2019 ja VPE2019

Verkkoon liitetulle mikrotuotantolaitokselle laaditut suositukset

Verkkoon liitetulle mikrotuotantolaitokselle on laadittu esimerkiksi seuraavat suositukset:

- Mikrotuotantolaitokset tulee varustaa suojalaitteilla, jotka varmistavat, ettei mikrotuotantolaitos aiheuta turvallisuusriskiä ihmisille tai omaisuudelle, syötä huonolaatuista sähköä verkkoon ja ettei mikrotuotantolaitos, verkko, tai muut verkonkäyttäjien laitteet vaurioitu tai rikkoonnu [2, s 6].
- Mikrotuotantolaitos ei saa aiheuttaa minkäänlaista häiriötä verkkoon [2, s 5].
- Sähköliittymän liitintään vaaditaan, että mikrotuotannon käynnistyminen tai poistuminen ei aiheuta yli 4 % jännitteen muutosta. Tuotannon teho ei saa ylittää standardin SFS-EN 50160 määrittämää mikrotuotannon maksimitchoa [2, s 3].
- Sähköturvallisuusstandardit SFS6002 ja SFS6000 määrittävät, että mikrotuotantolaitoksen täytyy olla tarvittaessa erotettavissa verkosta ja että jakeluverkon haltijalla täytyy olla täysin rajoittamaton pääsy erottimelle [2, s 4].
- Mikrotuotantolaitos ei saa aiheuttaa vaaraa verkonhaltijalle ja verkossa työskenteleville. Siksi on tärkeää, että mikrotuotantolaitos irtoaa verkosta LoM (Loss of



Mains) -tilanteessa, eli tilanteessa, jossa verkon jännite katoaa. Tämän takia mikrotuotantolaitoksessa pitää olla oma suojaus, joka estää laitoksen syöttämästä jännitettä jännitteettömään verkkoon. Mikrotuotantolaitoksen tulee kyetä LoM-tilanteessa irrottautumaan verkosta 5 sekunnissa saarekekäytönestosuojauksella. [2, s. 8.]

- Mikrotuotantolaitos ja sen liityntäverkko täytyy merkitä selkeästi varoitusmerkein ja tekstein, jotta asentajat ja maallikot osaavat varautua niiden mahdollisiin riskeihin. Varoitustekstien tulee olla mahdollisen informatiivisia. Mikrotuotantolaitoksen kaikki jännitteiset paikat tulee myös merkitä, esimerkiksi jakokeskukset ja muuntajien lähdöt. [2, s. 5.]
- Mikrotuotantolaitoksen tulee irrota verkosta, mikäli verkon jännite tai taajuus ei pysy sille asetetuissa rajoissa. Kyseiset rajat on asetettu standardissa SFS-EN 50438. Tuotantolaitoksen tulee kyetä pysymään verkossa vähintään 30 min taukossa 9 esitetyillä taajuusarvoilla. [2, s. 7.]

Taulukko 9. Standardin SFS-EN 50438 asetteluarvot tuotantolaitokselle [2, s. 7.]

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0,2 s	$U_n + 10 \%$
Alijännite	0,2 s	$U_n - 15\%$
Ylitaajuus	0,2 s	51,5 Hz
Alitaajuus	0,2 s	47,5 Hz
Saarekekäytönestosuojaus (LoM)	enintään 5 s	

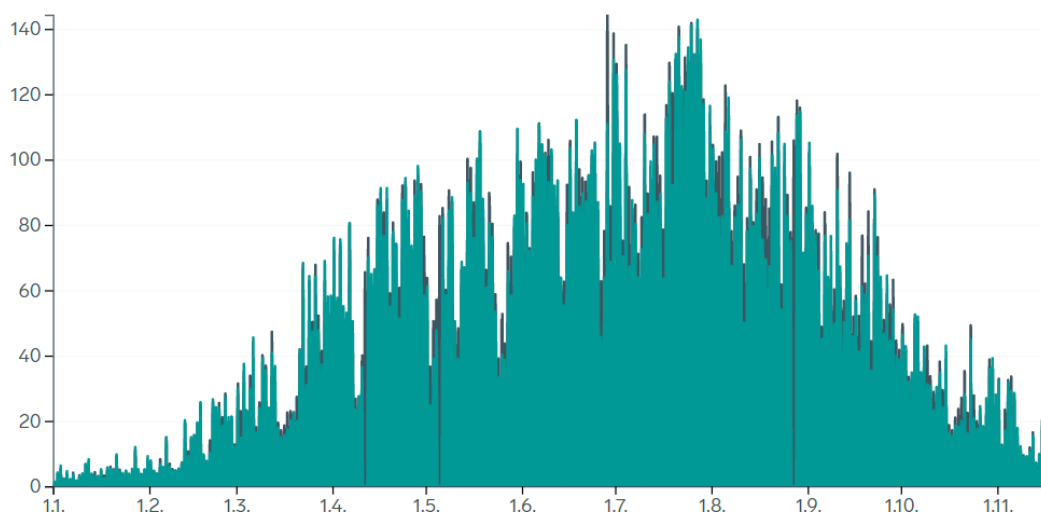
## 6 Mikrotuotannon vaikutus sähkönhintaan

Mikrotuotannon yleistymisellä tulee olemaan vaikutuksia sähköntuotantoon ja sähkön jakeluverkkoon, tuotannon hajautuessa ja siirtyessä lähemmäs kulutuskohdetta [28, s. 1]. Mikrotuotannossa käytetään uusiutuvia energialähteitä, jotka ovat usein riippuvaisia säästä tai muista olosuhteista. Olosuhderiippuvuus johtaa tilanteisiin, joissa tuotannon määrä vaihtelee paljon vuodenajan ja päivittäisten olosuhteiden mukaan.

### 6.1 Vuodenajan ja sääolosuhteiden vaikutus sähkön mikrotuotantoon

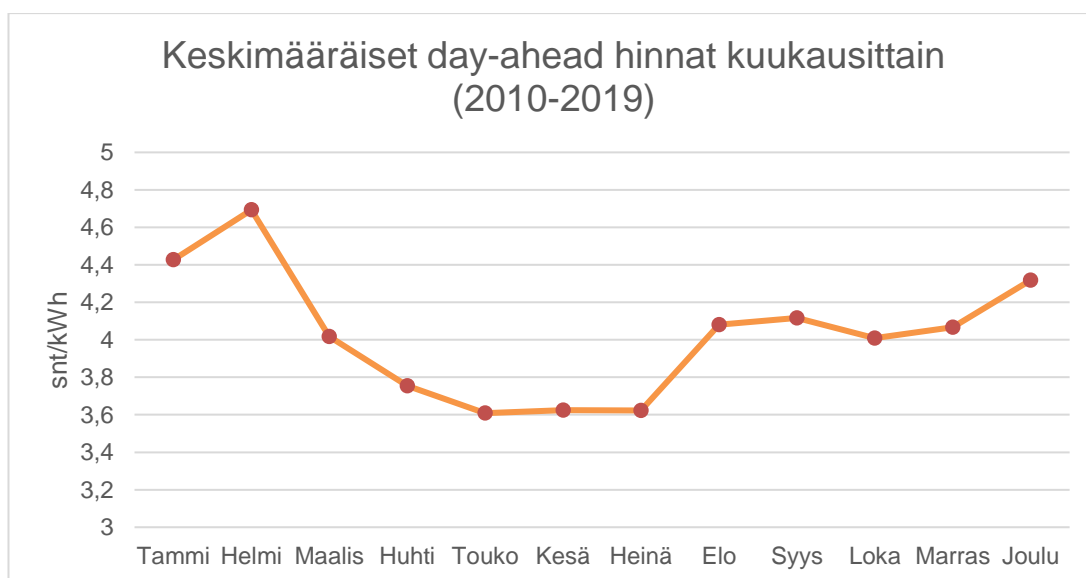
Yksi sähkön mikrotuotantoon ja sitä kautta sähkön hintaan vaikuttava tekijä on vuodenaika ja sääolosuhteet. Mikrotuotannon lisääntyessä tulee sähkön hinta vaihtelevaan rajummin vuodenajan ja sääolosuhteiden mukaan. On arvioitavissa, että etenkin tuulivoiman ja aurinkovoiman lisääntyminen tulee laskemaan sähkön hintaa kesällä ja kasvattamaan sitä talvella. Kyseisten mikrotuotantomuotojen tuotanto keskittyy kesälle ja on moninkertaisesti pienempää talvella. Sähkön kuukausittainen ja päivittäinen spot-hinnan hintavaihtelu tulee voimistumaan, kun mikrotuotantoa ja muuta sääriippuvaista tuotantoa on enemmän.

Kuvassa 9 on esitetty Fingridin aurinkovoiman tuotantoennuste. Fingridin aurinkovoiman tuotantoennusteesta nähdään, kuinka aurinkovoiman tuotanto on moninkertaista kesällä suhteessa talveen.



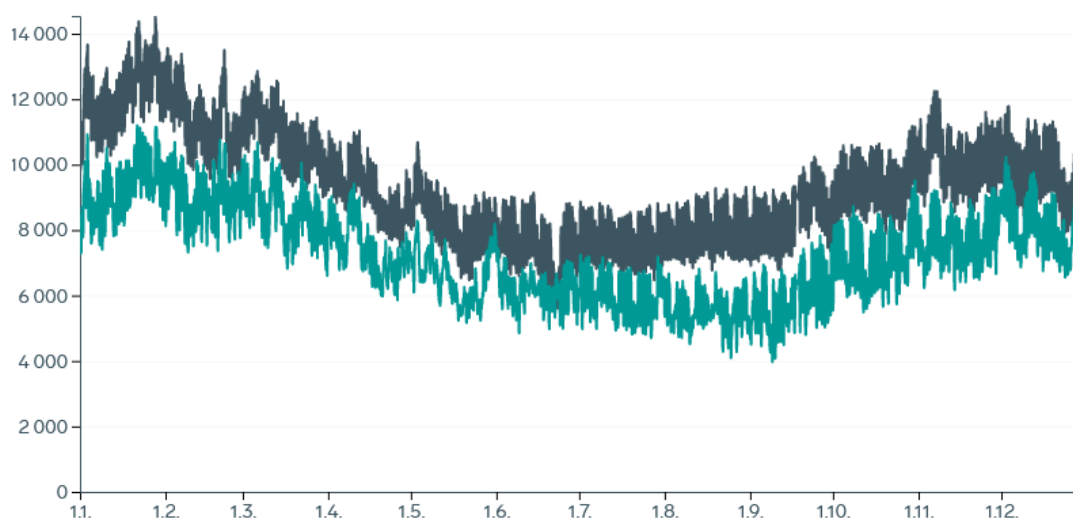
Kuva 9. Fingridin aurinkovoiman tuotantoennuste vuodelle 2019. Ennuste perustuu sääennusteisiin ja arvioihin Suomeen asennettujen aurinkopaneelien kokonaistuotantotehosta sekä niiden sijainnista. Ennuste on ajanjaksolta 1.1 – 31.12.2019. [29.]

Kuvasta 10 nähdään, kuinka sähkön hinta vaihtelee nykyisin vuodenajan mukaan. Kuvasta nähdään, kuinka sähkön hinta on korkeimmillaan talvella ja matalimmillaan kesällä. Sähkön hintaan vaikuttaa kulutus ja tuotanto. Talvella kulutus on Suomessa suurempaa kuin kesällä.



Kuva 10. Nordpoolin keskimääräiset day-ahead -hinnat kuukausittain. Hinnat ovat keskiarvoja vuosilta 2010-2019. [22.]

Kuvassa 11 on esitetty Suomen sähkön kulutus ja tuotanto. Suomessa sähkön kulutus on huipussaan alkuvuodesta, kun sääolosuhteet on kylmimmillään.



Kuvaaja	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
● Sähkön kulutus	5455	14542	9483 MWh/h
● Sähkön tuotanto	3970	11195	7284 MWh/h

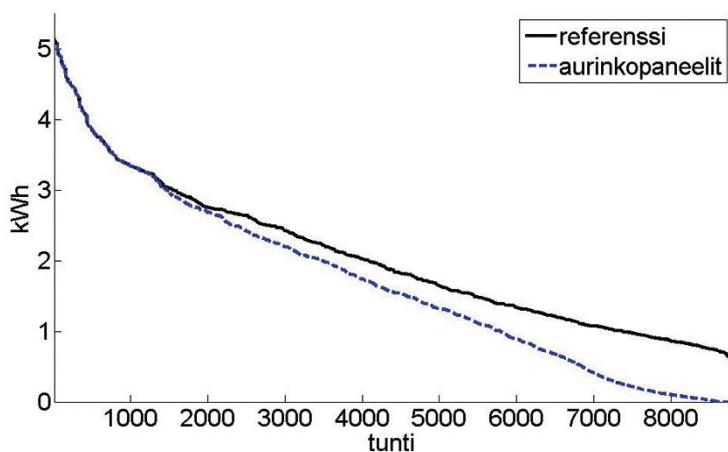
Kuva 11. Sähkön tuotanto ja kulutus Suomessa vuonna 2019 [30].

Jos vuoden 2019 sähköntuotantoa (kuva 11) verrataan Fingridin aurinkovoiman tuotantoennusteeseen (kuva 8), huomataan että nykyinen sähköntuotanto on paljon tasaisempaa vuoden ympäri. Se ei myöskään ole riippuvainen vuodenajasta tai sääolosuhteista. Nykyinen sähköntuotanto on korkeampaa talvella ja matalampaa kesällä, mikä on täysin vastakkaista aurinkovoiman tuotantoennusteen kanssa. Tämä tulee johtamaan mahdollisiin tuotanto ongelmiin talvella ja ylituotantoon kesällä. Tässä skenaariossa kuvan 10 hintojen vaihtelu tulee voimistumaan.

## 6.2 Mikrotuotannon vaikutus sähköverkon kustannuksiin

Sähköalan artikkelissa *'Miten tehohinnoittelu vaikuttaa pientuotannon kannattavuuteen?'* on mallinnettu esimerkkitilanne, jossa 18000 kWh kuluttava kotitalous investoi 4,86 kWp tehoiseen aurinkopaneelijärjestelmään. Esimerkkitalanteen kotitalous kyseisellä investoinnilla pystyy vähentämään sähköverkosta siirretyn sähkön määrää 17 %:lla. Aurinkopaneelijärjestelmien ja muiden mikrotuotantojärjestelmien yleistymisen näin ollen tulee vähentämään sähköverkon keskimääräistä kulutusta. Artikkelin esimerkkitilanteessa myös todetaan, että aurinkopaneelijärjestelmän investoinnilla ei ole vaikutusta huippukulutustunteihin. [31.]

Kuvan 12 pysyvyyskäyrästä nähdään, kuinka aurinkopaneelijärjestelmään investointi laski jakeluverkosta siirretyn sähkön määrää alle 3 kWh kulutushetkinä, esimerkkitilanteen kotitalouksessa. Pysyvyyskäyrästä myös nähdään, kuinka aurinkopaneelijärjestelmä investoinnilla ei ole merkitystä kulutusprofiilin huippukulutustunteihin.



Kuva 12. Esimerkkitalanteen kotitalous ennen (referenssi) ja jälkeen (aurinkopaneelit) investointia aurinkopaneelijärjestelmään. Pysyvyyskäyrästä nähdään, kuinka investointi aurinkopaneeli järjestelmään vähensi sähkönjakeluverkosta siirretyn sähkön määrää esimerkkitilanteen kotitaloukseen. [31.]

Tilanne, jossa huippukulutustunnit pysyvät ennallaan, mutta kotitalouksien keskimääräinen sähköverkon kulutus laskee, tulee johtamaan tilanteeseen, jossa siirtoverkon kustannukset eivät jakaudu tasapuolisesti. Mikrotuotannon omistajilla verkon ylläpitomaksut vähenevät, mutta he käyttävät huippukulutustilanteissa verkkoa kuten ennen mikrotuotannon omistamista. [31.]

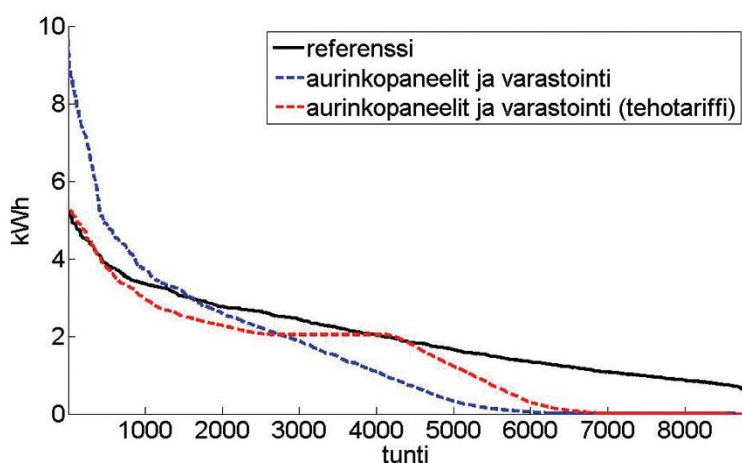
Mikrotuotannon omistaja pystyy vähentämään omaa huippukulutustaan varastoimalla tuotettua sähköä esimerkiksi akkuihin ja käyttämällä sitä suuren kulutuksen hetkinä. Näin he leikkaavat omia huipputehopiikkejä. [31.]

Sähköalan artikkelissa vertailtiin aurinkopaneelijärjestelmiä sähkön varastoinnilla ja ilman varastointia, ja kuinka nämä järjestelmät vaikuttavat esimerkkitalanteen kotitalouden siirtomaksuihin vuoden aikana. Taulukossa 10 nähdään aurinkopaneelijärjestelmien vaikutusta siirtomaksuihin.

Taulukko 10. Aurinkovoimajärjestelmän vaikutus sähköalan artikkelin esimerkkitalanteen kotitalouden siirtomaksuihin [31].

	Ei mikrotuotantoa	Aurinkopaneeli järjestelmä	Aurinkopaneeli ja varastointi
Verkosta ostettu sähkö [kWh/vuosi]	18 000	15 025	13 197
Energiaperusteinen siirtomaksu [€/vuosi]	655	546	480
Huipputehoperusteinen siirtomaksu [€/vuosi]	655	609	434
Muutos siirtomaksussa [kWh/vuosi]		+63	-46

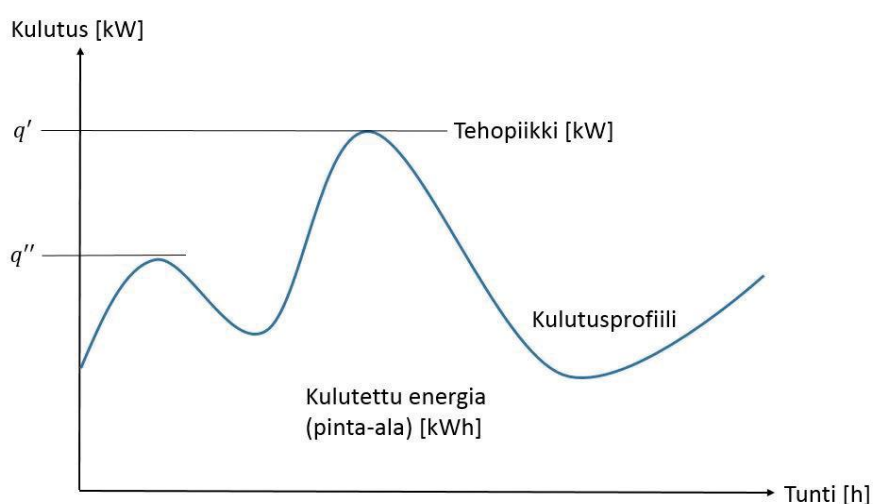
Kuvan 13 pysyvyyskäyrästä nähdään, kuinka eri järjestelmiin investointi laskee jakeluverkosta siirretyn sähkön määrää eri kulutushetkinä. Pysyvyyskäyrässä on esitetty kuinka tehotariffi ohjaa kotitaloutta hyödyntämään halpoja spot-tunteja. Sähkön kulutuksen ohjaus leikkaa kotitalouden kulutusprofiiliin tehohuippuja.



Kuva 13. Pysyvyyskäyrä kuvaa jakeluverkosta siirretyn sähkön määrää eri järjestelmillä, esimerkiksi tilanteen kotitalouksessa. Tehotariffi käyrässä kotitalouden sähkön kulutusta oli siirretty hyödyntämään halpoja sähkön hinta tunteja. Kulutuksen ohjaus johti tehuhiippujen leikkaukseen. [31.]

Sähkönjakeluyhtiöt ovat huomioineet tulevan sähkönsiirtomuutoksen, kun kotitalouksien mikrotuotanto yleistyy ja verkon ylläpitokustannukset eivät enää jakaudu tasapuolisesti. Tämän takia sähkönjakeluyhtiöt ovat tuoneet markkinoille uuden tehomaksun, joka veloittaa kuluttajaa vuoden suurimman tehopiikin mukaan. Tehomaksun tavoitteena on tasapainottaa verkon ylläpitokustannuksia kotitalouksien välillä. [31.]

Kuvan 14 kulutusprofiilissa on havainnollistettu miten huipputehopiikki ja kulutettu energia muodostuu.

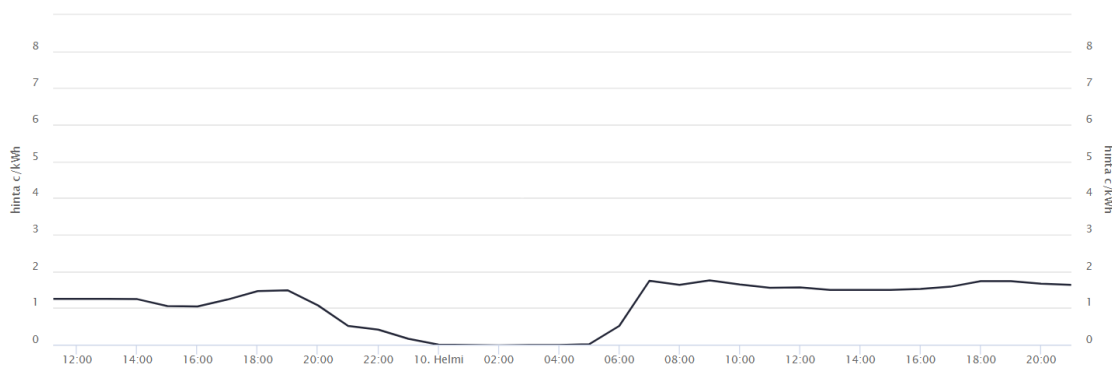


Kuva 14. Havainnollistava kuvaaja siitä, miten huipputehopiikki ja kulutettu energia muodostuu. [31].

Sähköverkkoon keskimääräisen siirretyn sähköenergian määrän väheneminen ei vaikuta, sillä sähköverkko mitoitetaan siirtokapasiteetin, eli tehohuippujen mukaan. Mitä suuremmaksi siirtokapasiteetti pitää mitoittaa, sitä suuremmaksi verkon kustannukset muodostuvat. Näin ollen mikrotuotannon yleistymisen ei tule vähentämään sähkön jakeluverkon mitoituskustannuksia, niin kauan kuin mikrotuotanto ei pienennä kotitalouksien tehohuippuja. [31].

### 6.3 Negatiivinen sähkön hinta

10. helmikuuta 2020 sähkön markkinahinta, eli spot-hinta, painui Suomessa ensimmäistä kertaa negatiiviseksi. Alimmillaan sähkön hinta oli -0,20 € megawattitunnilta. Tänä aikana, kun sähkön hinta oli negatiivinen, joutui sähköyhtiöt maksamaan tuotetusta sähköstä. Kuluttajille maksettiin sähkön kuluttamisesta. Kuvassa 15 nähdään kuinka sähkön markkinahinta kääntyi negatiiviseksi.



Kuva 15. 10. helmikuuta kello 00:30–04:00 sähkön markkinahinta kääntyi negatiiviseksi ensimmäistä kertaa Suomessa. [22.]

Negatiivisen sähkön markkinahinnan ilmiö nojautuu siihen, että sähkömarkkinoilla tuotannon ja kulutuksen on oltava jatkuvasti tasapainoissa. 10. helmikuuta sääriippuvainen tuulivoimatuotanto oli korkealla ja kulutus vähäistä, eli tuotanto oli suurempaa kuin kulutus. Tämä johti negatiiviseen sähkön markkinahintaan. [32.]



Suuri tuulivoimatuotanto johtui Ciara-myrskyn rantautumisesta Suomeen. Esimerkiksi Tanskassa ja Saksassa, joissa on paljon tuulivoimaa, on nähty ennenkin negatiivisia sähkönmarkkinahintoja. [32.]

Fingridin vanhemman asiantuntijan Mikko Heikkilän mukaan sähkömarkkinoita voitaisiin tasapainoittaa hyötykäyttämällä ylimääräinen energia. Sähkön varastointi akkuihin ei Heikkilän mukaan ole kustannustehokas ratkaisu, sillä nykyinen akkuteknologia ei mahdollista suuren ylituotannon varastoimista kilpailukykyiseen hintaan. [33.]

Toinen Heikkilän mainitsema vaihtoehto olisi sektorikytkentä, jolloin ylimääräinen sähkö varastoitaisiin lämpöenergiaksi ja muutettaisiin kaukolämmöksi. [33.]

Kuluttaja itse pystyy hyvin vaikeasti hyötymään negatiivisista sähkönhinnoista, sillä usein sähkösopimukset ovat kuukausitason sähkön spot-hinnalla, eivätkä ne seuraa sähkön reaaliaikaista hintaa, eli tunnin välein päivittyvää spot-hintaa. Tämän lisäksi kuluttajan pitää silti maksaa sähköstä marginaali ja sähkönsiirtomaksu, mikä nykyhinnoilla vähintään tuo sähkön nettohinnan yli nollan euron. [33.]

Energiaviraston uusiutuvasta energiasta vastaava johtaja Pekka Ripatti kommentoi Helsingin Sanomille 9. helmikuuta, että negatiivisia hintoja nähdään Suomessa oletettavasti jatkossakin. Myös hintojen vaihtelut voimistuvat, kun sääriippuvaista tuotantoa on enemmän. [32.]

## **7 Mikrotuotannon vaikutus Suomen sähkön jakeluverkkoon**

Suomen sähköverkko on suunniteltu yhdensuuntaiseen sähkönsiirtoon, joka on ristiriidassa mikrotuotannon kanssa. Mikrotuotannossa sähköllä on mahdollisuus siirtyä kahden suuntaan, kuluttajalta sähköyhtiölle ja sähköyhtiöltä kuluttajalle.

Suomen sähköverkon muutosta ajaa myös se, että nykyinen sähköverkko on suunniteltu siten, että sähkö tuotetaan keskitetyissä suurissa tuotantolaitoksissa, joista sähkö jae-

taan pitkien etäisyyksien päähän kuluttajalle. Mikrotuotanto tuo tuotannon kuluttajan läheisyyteen pienimuotoisena tuotantona, jolloin maanlaajuinen tuotanto hajaantuu. [28, s. 1.]

Hajautettu mikrotuotanto vähentää keskimääräistä kuormaa valtakunnallisessa verkossa ja vähentää sähkön siirtomattoja. Hajautetun mikrotuotannon yleistyminen ei vähennä suurijännitteisten valtakunnallisten jakelulinjojen tarvetta, sillä jakelulinjojen siirtokapasiteetti on mitoitettu tehohuippujen mukaan. Kuten kohdassa 6.3 todettiin, ei mikrotuotannolla ole vaikutusta tehohuippuihin lukuun ottamatta tilannetta, jossa mikrotuotajalla on kyky varastoida sähköä.

Mikrotuotannon lisääntyminen pakottaa sähköverkon muutoksiin. Mutta sähköverkon mitoitus pysyy samana, ellei sähkön varastointi ja älykkäät järjestelmät yleisty mikrotuotanto järjestelmissä. Tilanne, jossa sähköverkkoa ei voida mitoittaa pienemmäksi siirtokapasiteetiltaan, mutta sitä täytyy muokata sopivaksi mikrotuotanto huomioon ottaen, tulee vaatimaan investointeja ja näin ollen nostamaan sähkön jakeluhintoja.

## 8 Yhteenveto

Mikrotuotantojärjestelmien yleistyminen on vahvassa kasvussa niin globaalisti kuin Suomessa. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tuoda esiin selvityksien ja tuloksien kautta ongelmia ja ratkaisuja, joita ilmenee sähkönmikrotuotannon yleistyessä tulevaisuudessa.

Ongelmana tulee olemaan tuotannon olosuhderiippuvuus ja sähkön hinnan raju vaihtelevuus sääolosuhteiden ja vuodenajan mukaan. Jos mikrotuotanto kehittyy laajamittaisesti ja markkinasähkön hinta kesällä tämän takia tippuu rajusti, sillä voi olla vaikutusta perinteisten, pitkän aikavälin sähköntuotantoinvestointien, kuten uusien ydinvoimaloiden kannattavuuteen.

Jos sähkön varastointi teknologia ei kehity, olosuhderiippuvuus ongelma vahvistuu ja tulee myös pitämään verkon kapasiteettitarpeen nykyisellään. Verkon keskimääräinen siirtokulutus alenee, mutta tehohuiput säilyvät ennallaan. Osa sähköyhtiöistä on jo he-

rännyt tähän muutokseen ja asettanut asiakkailleen tehomaksun, joka veloittaa kuluttajaa sen vuotuisesta tehohuipusta. Kuluttaja pystyy tehohuippuaan leikkaamaan sähkönvarastoinnilla ja älykkäillä järjestelmillä.

Koska nykyinen sähköverkkomme on suunniteltu yhdensuuntaisiin ja pitkiin siirtoihin, eli siirtoon keskitetystä tuotannosta kotitalouksiin, joudutaan sähköverkkoa muokkaamaan niin, että se kykenee sallimaan sähkön siirron myös toiseen suuntaan, eli mikrotuotannosta (kotitalouksista) takaisin valtakunnalliseen sähköverkkoon. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa sähköverkkoon joudutaan tehdä investointeja, takaamaan turvallinen ja toimiva sähköverkko.

Sähkönmikrotuotannosta voi olla yhdeksi ratkaisevaksi tekijäksi taistelussa ilmastonmuutosta vastaan. Sähkönmikrotuotanto ja uusiutuvat energiat esiintyvät merkittävän tekijänä myös Kansainvälisen energiajärjestön ja SDS:n skenaariossa, joiden mukaan uusiutuvilla energioilla saavutetaan hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ja ilmastonmuutoksen hillitseminen.

## Lähteet

- 1 Jouni, K. Juntunen. 2014. Prosuming Energy – User Innovation and New Energy Communities in Renewable Micro-Generation. Väitöskirja. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Aaltodoc-tietokanta.
  
- 2 Mikrotuotannon liittäminen sähköjakeluverkkoon. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. <[https://energia.fi/files/762/Mikrotuotannon\\_liittaminen\\_sahkonjakelu-verkkoon\\_YA9\\_13\\_verkostosuositus\\_paivitetty\\_20160427.pdf](https://energia.fi/files/762/Mikrotuotannon_liittaminen_sahkonjakelu-verkkoon_YA9_13_verkostosuositus_paivitetty_20160427.pdf)>. Luettu 3.10.2019.
  
- 3 Juho Ylönen. 2015. Aurinkosähkön mikrotuotanto Suomessa. Kandidaattityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUTPub-julkaisuarkisto.
  
- 4 Jero Ahola. National Survey Report of PV Power Applications in Finland – 2018. Verkkoaineisto. IEA. <[https://www.researchgate.net/publication/335014131\\_IEA\\_PVPS\\_-\\_National\\_Survey\\_Report\\_of\\_PV\\_Power\\_Applications\\_in\\_Finland\\_2018](https://www.researchgate.net/publication/335014131_IEA_PVPS_-_National_Survey_Report_of_PV_Power_Applications_in_Finland_2018)>. Luettu. 4.10.2019.
  
- 5 Sähkön pientuotanto. Verkkoaineisto. VSV. <<https://www.vsv.fi/s%C3%A4hk%C3%B6n-pientuotanto/>>. Luettu 6.2.2020.
  
- 6 Aurinkosähkö. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. <<https://energia.fi/energia-asta/energiantuotanto/sahkontuotanto/aurinkovoima>>. Luettu 17.10.2019.
  
- 7 Auringonsäteilyn määrä Suomessa. Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon\\_perusteet/auringonsateilyn\\_maara\\_suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa)>. Luettu 14.10.2019
  
- 8 Janne Junttila. 2015. Suomen sään valoisa puoli: aurinkopaneeli tuottaa parhaiten kylmässä. Verkkoaineisto. Yle. <<https://yle.fi/aihe/artikkeli/2015/11/09/suomen-saan-valoisa-puoli-aurinkopaneeli-tuottaa-parhaiten-kylmassa>>. Luettu 13.2.2020.

- 9 Aurinkopaneelien sijoitus ja suuntaus. Verkkoaineisto. aurinkosahkoakotiin.fi. <<https://www.aurinkosahkoakotiin.fi/aurinkopaneelien-sijoitus-ja-suuntaus>>. Luettu 19.10.2019.
- 10 Aloita aurinkosähkön tuottaminen. Verkkoaineisto. Caruna. <<https://www.caruna.fi/palvelut/oma-sahkontuotanto/aloita-aurinkosahkon-tuottaminen>> Luettu 19.10.2019.
- 11 Renewables 2019 global status report, solar photovoltaics (PV). Verkkoaineisto. Ren21. <[https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter\\_03/chapter\\_03/#sub\\_5](https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_03/chapter_03/#sub_5)>. Luettu 4.10.2019.
- 12 Growth of photovoltaics. Verkkoaineisto. Wikipedia. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Growth\\_of\\_photovoltaics](https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics)>. Luettu 21.2.2020.
- 13 Pientuulivoima. Verkkoaineisto. Tuulivoima yhdistys. <<https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/pientuulivoima>>. Luettu 14.10.2019.
- 14 Pientuulivoimalan tekniikka. Verkkoaineisto. Tuulivoima yhdistys. <<https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/pientuulivoima/pientuulivoimalan-tekniikka>>. Luettu 14.10.2019.
- 15 Suomen tuuliatlas. Verkkoaineisto. <<http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html/>>. Luettu 3.4.2020.
- 16 Tuulivoimatuotanto talvella. Verkkoaineisto. Tuulivoima yhdistys. <<https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietopankki-tiiviisti-tarkeista-kysymyksista/tuulivoimatuotanto-talvella>>. Luettu 14.10.2019.
- 17 Tuula Laatikainen. 2018. Pientuulivoimalat eivät yleisty millään - missä vika? Verkkoaineisto. Tekniikka ja talous. <<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/pientuulivoimalat-eivat-yleisty-millaan-missa-vika/0eb1189d-5a26-3fd1-a4dc-554b0ca17814>>. Luettu 9.1.2020.

- 18 Biokaasun tuotanto maatilalla. Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun\\_tuotanto\\_maatilalla.pdf](https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf)>. Luettu 03.01.2020.
- 19 Biokaasun tuotanto Suomessa etenee vaikeuksista huolimatta. 2018. Verkkoaineisto. Energiatalous. <<https://www.energiatalous.fi/?p=2234>>. Luettu 25.1.2020.
- 20 Maa- ja biokaasun hinnat tankkausasemilla. Verkkoaineisto. Gasum. <<https://www.gasum.com/yksityisille/tankkaa-kaasua/tankkaushinnat/>>. Luettu 17.3.2020.
- 21 Nord Pool about us. Verkkoaineisto. Nord Pool. <<https://www.nordpoolgroup.com/About-us/>>. Luettu 13.2.2020.
- 22 Nord pool Day-ahead Prices FI. Verkkoaineisto. Nord Pool. <<https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Monthly/?view=table/>>. Luettu 6.2.2020.
- 23 Euroopan parlamentin päätöslauselma mikrotuotannosta – pienimuotoinen sähkön- ja lämmöntuotanto. 2012. 2012/2930(RSP).
- 24 Solar. Verkkoaineisto. IEA. <<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar/>>. Luettu 22.3.2020.
- 25 Solar PV. Verkkoaineisto. IEA. <<https://www.iea.org/reports/tracking-power-2019/solar-pv>>. Luettu 10.3.2020.
- 26 Mikrotuotanto. Verkkoaineisto. Keravan energia. <<https://www.keravanenergia.fi/fi/sahkoverkko/mikrotuotanto/>>. Luettu 6.2.2020.
- 27 Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi Helen Sähköverkko Oy:n sähkönjakeluverkkoon. Verkkoaineisto. Helen. <<https://www.helensahkoverkko.fi/globalassets/hsv/palvelut/ohjeet/hsv-yleista-laitteiston-liittaminen-su40317.pdf>>. Luettu 20.2.2020.

- 28 Ina Lehto. 2009. Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Aaltodoc-tietokanta.
- 29 Fingridin aurinkovoiman tuotantoennuste. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/aurinkovoima/>>. Luettu 10.2.2020.
- 30 Suomen sähkön kulutus ja tuotanto. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/>>. Luettu 28.3.2020.
- 31 Hannu Huuiki, Santtu Karhinen, Ari Korkala. Siirtohinta murroksessa. 2019. Verkkoaineisto. Sähköala. <[http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/artikkelit/muut\\_jutut/fi\\_FI/siirtohinta\\_murroksessa/](http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/artikkelit/muut_jutut/fi_FI/siirtohinta_murroksessa/)>. Luettu 13.2.2020.
- 32 Jarno Hartikainen. 2020. Sähkön hinta painuu Suomessa ensimmäistä kertaa negatiiviseksi. Verkkoaineisto. Helsingin Sanomat. <<https://www.hs.fi/talous/art-2000006401733.html>>. Luettu 17.2.2020.
- 33 Jesse Kuparinen. 2020. Tällaiset asiakkaat saavat parhaan hyödyn negatiivisesta sähkön hinnasta. Verkkoaineisto. Iltasanomat. <<https://www.is.fi/taloussanomat/oma-raha/art-2000006402963.html>>. Luettu 17.2.2020.