

**Taneli Nuolioja**

**TUULIVOIMAN PROFIILIKUSTANNUKSET SUOMESSA 2022**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus  
Marraskuu 2023**



<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Marraskuu 2023	<b>Tekijä/tekijät</b> Taneli Nuolioja
<b>Koulutus</b> Sähkö- ja automaatiotekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
<b>Työn nimi</b> TUULIVOIMAN PROFIILIKUSTANNUKSET SUOMESSA 2022		
<b>Työn ohjaaja</b> Aki Suokko		<b>Sivumäärä</b> 32
<p>Tuulivoimatuotanto on kasvanut voimakkaasti viime vuosina. Vuonna 2022 tuulivoimalla tuotetun sähkön osuus oli 16,7 % Suomen sähköntuotannosta.</p> <p>Tuulivoimassa polttoainetta ei voida varastoida, kuten perinteisissä voimalaitoksissa. Perinteisesti fossiilisia polttoaineita on voitu varastoida helposti jopa vuoden tarpeeksi. Tuulivoimatuotanto on täysin riippuvainen vallitsevista tuulioloista ja sen tuotanto vaihtelee hyvin paljon eri aikoina. Sähköntuotannon ja kulutuksen tulee olla koko ajan tasapainossa, joten sään mukaan vaihtelevien tuotantomuotojen lisääntyessä sähkömarkkinoille on syntynyt uusia kustannuksia, sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpitämiseksi sähköverkossa.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin tuulivoimatuotannon voimakkaan lisääntymisen myötä syntyneisiin tuulivoiman omaa kannattavuutta heikentäviin profiilikustannuksiin. Profiilikustannus on merkittävä osa tuulivoiman kokonaiskustannuksista laskien tuulivoiman tuottoa ja tulevana vuosina kenties halukkuutta investoida uusiin voimaloihin. Kuluttajille tuulivoiman profiilikustannukset ovat näkyneet halvempina sähköhintoina tuulisena aikana.</p>		
<b>Asiasanat</b> Arvokerroin, profiilikustannus, sähkömarkkinat, sähköntuotanto, tuotantokustannus, tuulivoima		

**ABSTRACT**

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> November 2022	<b>Author</b> Taneli Nuolioja
<b>Degree programme</b> Electrical and automation engineering		
<b>Name of thesis</b> PROFILE COSTS OF WIND POWER IN FINLAND 2022		
<b>Centria supervisor</b> Aki Suokko	<b>Pages</b> 32	
<p>Wind power production has grown strongly in the recent years. In 2022, electricity produced with wind power accounted for 16.7% of total Finland's electricity production.</p> <p>In wind power, fuel cannot be stored, as in traditional power plants. Traditionally, it has been possible to store enough fossil fuels easily for up to a year. Wind power is completely dependent on the prevailing wind conditions and there is significant fluctuation in this production. Electricity production and consumption must always be in balance. Thus, with the increase of weather-dependent production, new costs have risen for the electricity market to maintain the balance in the electricity grid.</p> <p>This thesis examined the profile costs of wind power whose profitability has decreased due to the strong increase in wind power production. The profile cost is a significant part of the total cost of wind power, decreasing the output of wind power and perhaps the willingness to invest in new power plants in the coming years. For consumers, the profile costs of wind power have shown as cheaper electricity prices during windy weather.</p>		
<p><b>Key words</b> Electricity production, electricity market, production costs, profile costs, value factor, wind power</p>		

## **KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**

### **Arvotekijä, arvokerroin**

Tuotantomuodon arvo sähkömarkkinoilla kaikkeen tuotantoon suhteutettuna.

### **CHP**

Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto.

### **Entso-e**

European Network of Transmission System Operators for Electricity, eurooppalainen kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö.

### **Huipunkäyttöaika**

Tuntimäärä, jolla voimalaitos tuottaisi sähköä nimellistehollaan vuoden aikana.

### **Hz**

Hertsi, taajuuden yksikkö.

### **Kapasiteettikerroin**

Huipunkäyttöaika suhteessa vuoden tunteihin.

### **LCOE**

Levelized Cost of Energy, tasoitetut tuotantokustannukset, eli omakustannushinta, jonka avulla eri tuotantomuodoilla tuotetun sähkön tuotantokustannusta voidaan verrata. Omakustannushinta ei huomioi markkinahinnan päälle tulevia systeemikustannuksia eikä ota kantaa sähköntuotannon ajoittumista kysyntään nähden.

### **Merit order**

Tuotannon ajojärjestys muuttuvien kustannusten mukaan. Tuotantojärjestys, jolla sähkö tuotetaan markkinoille.

### **MWh**

Megawattitunti, energian yksikkö.

**MW**

Megawatti, tehon yksikkö.

**PPA**

Power Purchase Agreement, pitkäaikainen sähkönostosopimus.

**Profilikustannus**

Tuotannon ajoituksen vaikutus saatavaan energian hintaan.

**Syöttötariffi**

Takuuhintajärjestelmä.

**TWh**

Terawattitunti, energian yksikkö.

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 SÄHKÖNTUOTANTO SUOMESSA</b> .....	<b>2</b>
2.1 Aurinkovoima Suomessa .....	4
2.2 Tuulivoima Suomessa .....	6
<b>3 POHJOISMAISET SÄHKÖMARKKINAT</b> .....	<b>9</b>
3.1 Vuorokausimarkkinat.....	10
3.2 Päivänsisäiset markkinat.....	11
3.3 Säättö- ja reservimarkkinat.....	11
3.4 Taseselvitys .....	12
3.5 PPA-sopimukset .....	12
<b>4 SÄHKÖNTUOTANNON KUSTANNUKSET</b> .....	<b>14</b>
4.1 Systemikustannukset.....	14
4.2 Markkinakustannukset.....	16
4.3 Tuotantokustannukset .....	16
4.3.1 Tuulivoiman tuotantokustannukset .....	19
<b>5 TUULIVOIMAN PROFILIKUSTANNUKSET VUONNA 2022</b> .....	<b>20</b>
5.1 Sähkön hinta vuonna 2022 .....	21
5.2 Tuulivoiman profiilikustannukset vuonna 2022 .....	23
5.3 Arvokertoimet vuonna 2022.....	24
<b>6 JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>28</b>
<b>LÄHTEET</b> .....	<b>30</b>
<b>KUVAT</b>	
KUVA 1. Pohjoismaisen sähkömarkkinan tarjousalueet.....	8
<b>KUVIOT</b>	
KUVIO 1. Sähköntuotanto tuotantomuodoittain vuosina 2013–2022.....	3
KUVIO 2. Aurinkoenergialla tuotettu sähkö Suomessa vuosina 2015–2022.....	5
KUVIO 3. Tuulivoimalla tuotettu sähkö Suomessa vuosina 2015–2022 .....	6
KUVIO 4. Tuulivoiman osuus kulutuksesta maittain Euroopassa 2021 .....	7
KUVIO 5. Sähkön markkinahinnan muodostuminen .....	10
KUVIO 6. Tuulivoiman tuotanto Pohjoismaissa kuukausittain 2022.....	15
KUVIO 7. Sähkön hinnan keskiarvo ja tuulivoimalla tuotetun sähkön hinta vuosina 2018–2022 .....	22
KUVIO 8. Sähkön tuotantomuotojen tuotantomäärillä painotettu keskihinta Suomessa vuonna 2022 .....	22
KUVIO 9. Uusiutuvien tuotantomuotojen profiilikustannus 2018–2022 .....	23
KUVIO 10. Sähköntuotantomuotojen suhteelliset arvokertoimet vuonna 2022 .....	24
KUVIO 11. Tuulivoiman arvokertoimet ja tuulivoimatuotanto 2018–2022 .....	26
KUVIO 12. Sähkön tuntihinta vuonna 2021 .....	27

**TAULUKOT**

TAULUKKO 1. Sähkön hankinta ja kokonaiskulutus, 2022.....2

## 1 JOHDANTO

Euroopassa on viime vuosina kohdistettu yhä enemmän huomiota ilmastonmuutoksen ja maapallon keskilämpötilan nousun hillitsemiseen. EU:n tavoitteena on hiilidioksidipäästöjen voimakas vähentäminen, ja yksi vähennyskeinoista on ollut hiilidioksidin päästökauppa. Sähköntuotannossa fossiilisiin polttoaineisiin perustuvat tuotantolaitokset kuuluvat päästökaupan piiriin, mikä on vähentänyt fossiililla polttoaineilla tuotetun sähkön määrää huomattavasti.

Fossiilisten polttoaineiden tuottaman sähkön tilalle on markkinoille tullut uusiutuvia energiamuotoja käyttäviä voimalaitoksia, joilla on saatu Euroopan sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjä laskuun. Siirtyminen uusiutuviin energioihin sähköntuotannossa on vaatinut kansallisia tukia, joilla on saatu kiihdytettyä teknologian kehitystä. Hyvänä esimerkkinä käytetyistä tuista on tuulivoimalle myönnetty syöttötariffi, joka sulkeutui Suomessa vuonna 2017 uusilta voimaloilta, mutta tuulivoiman voimakkain lisärakentaminen on alkanut vasta sen jälkeen. Teknologian kehitys on mahdollistanut siten sen, että tuulivoiman rakentaminen on ollut taloudellisesti kannattavaa ilman tukia.

Tuulivoimaa on rakennettu viime vuosina Suomeen kiihtyvällä tahdilla. Tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä on lähes kaksinkertaistunut viimeisen kahden vuoden aikana. Lisäksi aurinkovoimaa on alettu rakentamaan teollisessa mittakaavassa. Voimakkaasti lisääntynyt sään mukaan vaihteleva sähköntuotanto on tuonut mukanaan haasteita ja kustannuksia sähköntuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseen. Sään mukaan vaihteleva tuotanto ei vastaa kysyntäennusteisiin, joten sen lisääntyessä perinteiset tuotantomuodot ovat joutuneet muuttamaan tuotantorakennettaan. Tuuli- ja aurinkovoimaloiden polttoaine on ilmaista, eikä niiden tuotantoa kannata rajoittaa, mikä tarkoittaa sitä, että niiden tuotannon kasvussa perinteisten voimalaitosten käyttötunnit vähenevät ja niiden pääoman tuottoaste uhkaa laskea. Samalla niitä tarvitaan kuitenkin ajoittain yhtä paljon kuin ennenkin, joten on jossain määrin auki, miten säilytetään investoinnin kannusteet perinteiseen voimantuotantoon.

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin sään mukaan vaihtelevan sähköntuotannon erilaisiin kustannuksiin, lähinnä tuulivoiman osalta. Keskeisimpänä asiana opinnäytetyössä tutkittiin tuulivoiman profiilikustannuksia sekä niiden kehitystä voimakkaan tuulivoimatuotannon kasvun myötä.



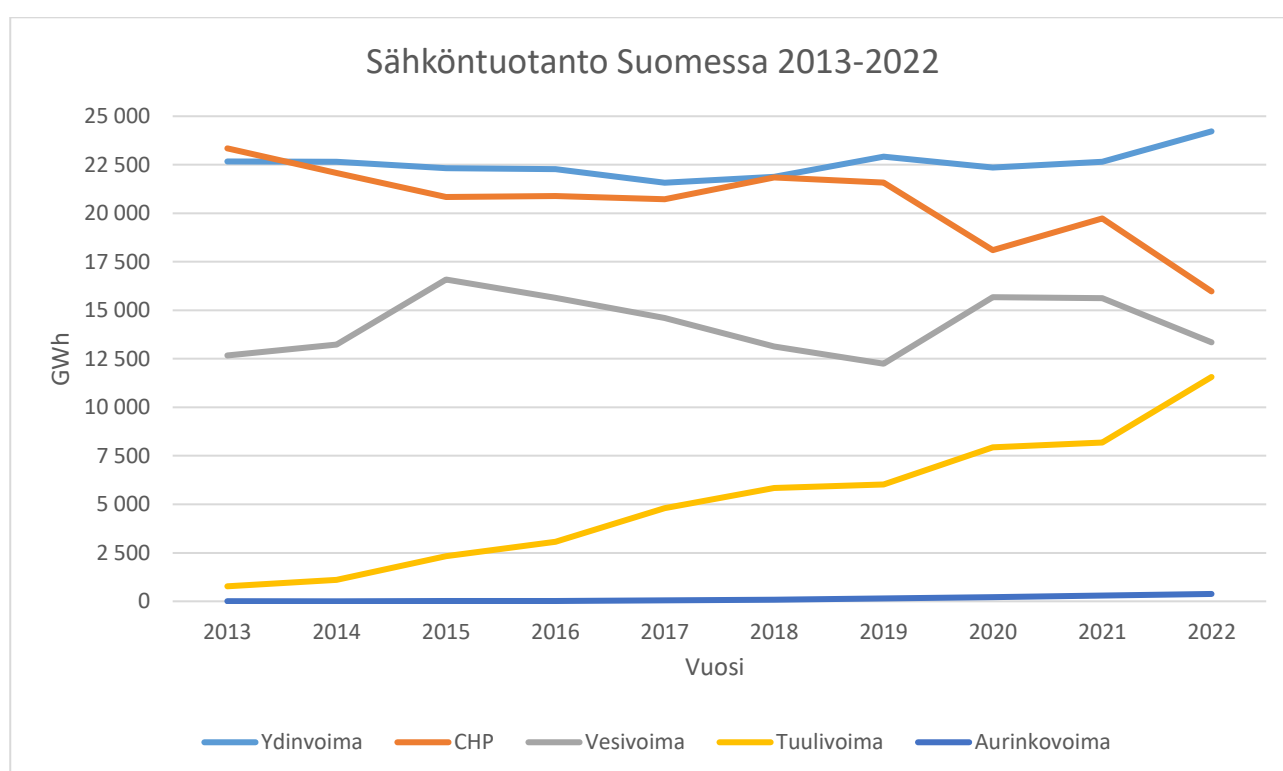
## 2 SÄHKÖNTUOTANTO SUOMESSA

Suomessa tuotettiin sähköä vuonna 2022 noin 69 TWh, mikä kattoi 84,7 % Suomen kokonaiskulutuksesta. Sähköntuotanto Suomessa on tähän mennessä ollut korkeimmillaan vuonna 2004, jolloin Suomessa tuotettiin noin 82 TWh sähköä. Tuotanto on sen jälkeen laskenut tasaisesti kääntyen vuonna 2018 nousuun. Tuotannon vähentymisen syynä on ollut luopuminen fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Vuodesta 2004 fossiilisilla polttoaineilla tuotetun sähkön määrä on vähentynyt 74 %, kun taas uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön määrä on kasvanut lähes 50 %. (Tilastokeskus 2023a.) Vuoden 2023 aikana sähköntuotanto Suomessa tulee kasvamaan merkittävästi, koska Olkiluoto 3-ydinvoimalan säännöllinen tuotanto alkoi huhtikuussa samalla kun tuulivoiman kapasiteetti kasvaa huomattavasti. Suomessa on paljon valmistumassa tuulivoimaa vuoden 2023 aikana ja tuulivoimatuotannon kapasiteetin odotetaan kasvavan 7200 megawattiin vuoden loppuun mennessä. (Tuulivoimayhdistys 2023a.) Taulukossa 1 on esitetty vuoden 2023 sähköntuotanto määrät eri tuotantomuodoilla.

TAULUKKO 1. Sähkön hankinta ja kokonaiskulutus, 2022 (mukailten Tilastokeskus 2023b)

	Määrä (GWh)	Vuosi­muutos (%)	Osuus tuotannosta (%)	Osuus kokonais­kulutuksesta (%)
SÄHKÖN KOKONAISKULUTUS	81 714	-6,2		100
SÄHKÖN TUOTANTO	69196	-0,2		84,7
Vesivoima	13354	-14,5	19,3	16,3
Tuulivoima	11562	41,4	16,7	14,1
Aurinkovoima	380	27,6	0,5	0,5
Ydinvoima	24221	7	35,0	29,6
Yhteistuotanto (CHP)	15973	-19	23,1	19,5
Tavallinen lauhdevoima	3706	30,1	5,4	4,5
SÄHKÖN NETTOTUONTI	12 518	-29,6		15,3
Norja	423	63,8		0,5
Ruotsi	15 250	1,7		18,7
Venäjä	3 637	-60,2		4,5
Viro	-6 792	2,3		-8,3

Suomeen tuodun sähkön (nettotuonti) määrä vuonna 2022 oli 12,5 TWh, joka oli 15,3 % kokonaiskulutuksesta. Aikaisempina vuosina merkittävä osaa sähköntuonnista on tullut Venäjältä. Vielä vuonna 2021 Venäjän sähköntuonti kattoi 10,5 % Suomen kokonaiskulutuksesta (Tilastokeskus 2023b). Venäjän aloitettua hyökkäyssodan Ukrainaan lännen asettamien pakotteiden myötä sähköntuonti Venäjältä loppui 14.5.2022. Vuonna 2021 nettotuonti Venäjältä oli 9,1 TWh, joka on saatu korvattua hyvin Olkiluodon kolmannen reaktorin käynnistyttyä sekä voimakkaasti kasvaneen tuulivoimatuotannon myötä. Suomen odotetaan olevan nettona omavarainen sähkön suhteen jo vuonna 2023. (Fingrid 2022a.) Kuviossa 1 on esitetty eri sähköntuotantomuotojen tuotantomäärien kehitys vuosien 2018–2022 välisenä aikana.



KUVIO 1. Sähköntuotanto tuotantomuodoittain vuosina 2013–2022. (mukaihen Tilastokeskus 2023b)

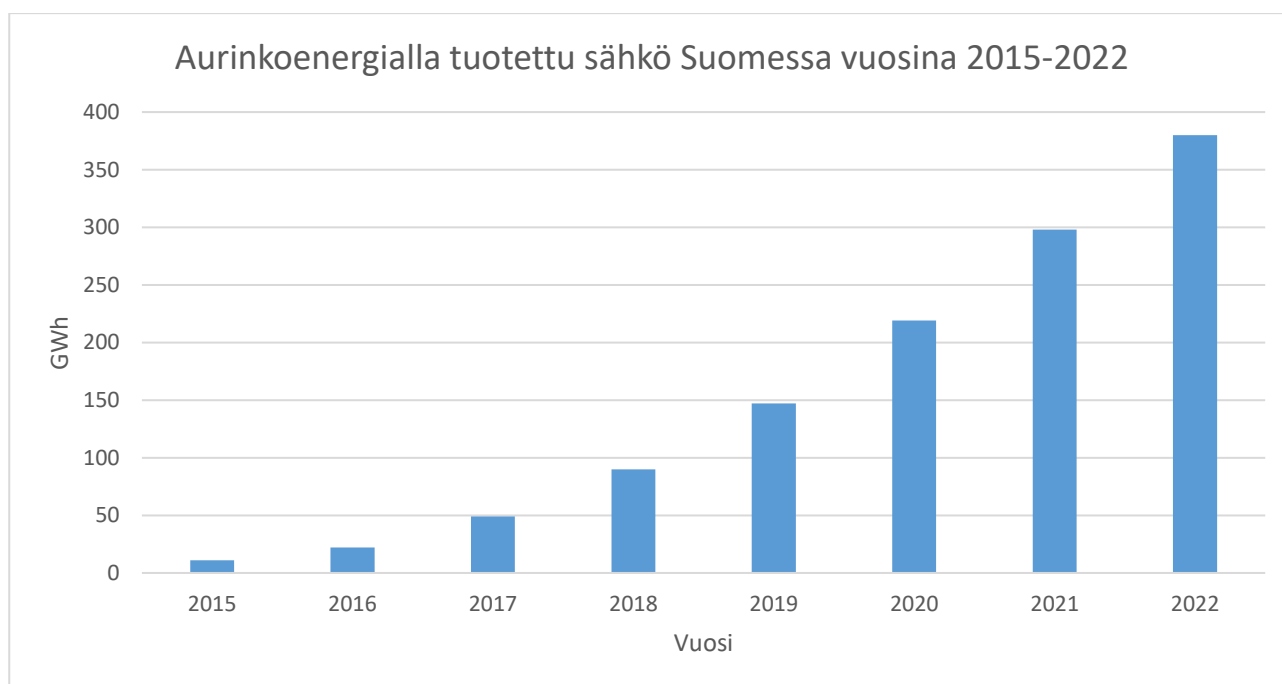
Suurin yksittäinen sähköntuotantomuoto Suomessa on ydinvoima. Suomessa on toiminnassa viisi ydinreaktoria, Loviisassa kaksi ja Olkiluodossa kolme, ja niiden nettosähköteho on yhteensä 4394 MW (TVO 2023; Fortum 2023). Vuonna 2022 Suomessa tuotetusta sähköstä ydinvoimalla tuotettiin 35 %, ja Olkiluodon kolmannen reaktorin myötä ydinvoimalla tuotetun sähkön määrä tulee kasvamaan merkittävästi tulevina vuosina. Vuonna 2023 elokuun loppuun mennessä Suomen tuottamasta sähköstä oli

jo 42 % tuotettu ydinvoimalla, vaikka Olkiluodon kolmannen reaktorin säännöllinen tuotanto alkoi vasta huhtikuussa (Energiateollisuus 2023a).

Vuonna 2022 CHP-tuotannon (Combined Heat and Power) osuus sähköntuotannosta oli 23,1 %. CHP-tuotannon määrä on laskenut viime vuosina huomattavasti johtuen kivihiilestä luopumisesta sekä siitä, että kasvava tuulivoimatuotanto on korvannut sitä. Säättövoimalla tarkoitetaan tuotantoa, jota voidaan helposti säätää esimerkiksi vaihtelevan tuulivoimatuotannon tai kulutus vaihtelujen vuoksi, kuten vesivoimaa. Vesivoimakapasiteettia Suomessa on noin 3190 MW ja vesivoimalla tuotetun sähkön osuus Suomen tuotannosta vaihtelee vuosittain 15–25 % välillä. Vesivoimatuotanto vaihtelee vuosittain riippuen vallitsevista vesitilanteista (Motiva 2023). Vesivoima on tällä hetkellä suurin säättövoima Suomessa ja sen tärkeys korostuu tulevaisuudessa säättövoiman tarpeen lisääntyessä. Suomessa on suunnitella mahdollisia uusia pumppuvoimalaitoksia säättövoiman lisäämiseksi, mutta muuten vesivoiman lisärakentaminen ei nykyisen lainsäädännön puitteissa ole mahdollista. Vuonna 2022 Suomen sähköntuotannosta vesivoimalla tuotettiin 19,3 %.

## **2.1 Aurinkovoima Suomessa**

Aurinkoenergialla tuotetun sähkön määrä on kasvanut Suomessa voimakkaasti viime vuosina (KUVIO 2). Valtaosa Suomeen asennetuista aurinkovoimalakapasiteetista on vielä pientuotantoa, jolla tarkoitetaan alle 1 MW:n kapasiteetin aurinkovoimaloita. Vuoden 2022 lopussa Suomen sähköverkkoon oli liitettyä 635 MW aurinkosähkön tuotantokapasiteettia. Yli 1 MW:n voimaloita oli vuonna 2022 energiaviraston ylläpitämän voimalaitosrekisterin mukaan vain 34 MW:n edestä, joka on vain noin 5 % koko kapasiteetista (Energiavirasto 2023a).

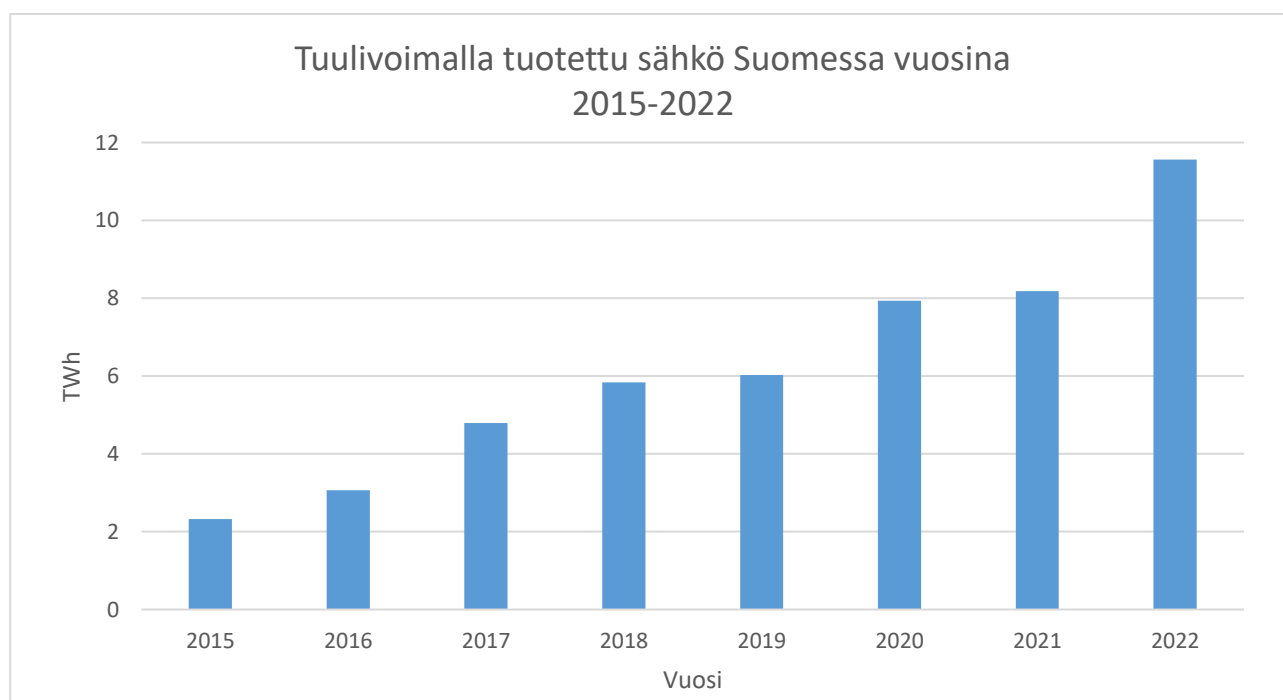


KUVIO 2. Aurinkoenergialla tuotettu sähkö Suomessa vuosina 2015–2022 (mukaillen Tilastokeskus 2023c)

Sähköntuotanto aurinkovoimalla kasvaa tällä hetkellä Suomessa nopeasti. Aikaisemmin rakennetut aurinkovoimalat on rakennettu lähinnä kiinteistöjen ja yritysten omiin tarpeisiin, mutta tekniikan kehittyessä teollinen aurinkovoima alkaa olla nyt kannattavuutensa kynnyksellä. Lähitulevaisuudessa teollisen kokoluokan aurinkovoimaloiden rakentaminen voi olla taloudellisesti kannattavaa myös Suomessa ilman tukia. Vuonna 2023 uusiin aurinkosähköhankkeisiin on mahdollista saada Työ- ja elinkeinoministeriöltä 15 % energiatukea (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023a). Elokuussa 2023 valmistui Kalajoelle tähän asti Suomen suurin aurinkovoimapuisto, jonka nimellisteho on 13 MW. Tällä hetkellä Suomeen on suunnitteilla useita kapasiteetiltaan jopa satojen megawattien aurinkovoimaloita. (Byman 2023.) Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin ennusteen mukaan aurinkoenergialla tuotetun sähkön määrän odotetaan kasvavan jopa kymmenkertaiseksi vuoteen 2030 mennessä (Fingrid 2023a). Vaikka aurinkovoimakapasiteetti kasvaa voimakkaasti, sen osuus Suomen sähköntuotannosta on vielä varsin pieni. Vuoden 2022 Suomen sähköntuotannosta aurinkovoiman osuus oli vain 0,5 % (Tilastokeskus 2023b). Fingridin ennusteen mukaan aurinkovoiman osuus sähköntuotannosta on vain murto-osa tuuli-voiman osuudesta ainakin vielä vuonna 2030 (Fingrid 2023a).

## 2.2 Tuulivoima Suomessa

Tuulivoiman määrä on kasvanut Suomessa erittäin paljon 2020-luvulla kuten kuvioista 3 käy ilmi. Vuodesta 2019 tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä on lisääntynyt lähes 100 %. Vuonna 2022 tuulivoimalla tuotettiin sähköä 11562 GWh, joka oli 16,7 % Suomessa tuotetusta sähköstä (Tilastokeskus 2023b). Uusia tuulivoimaloita otettiin käyttöön ennätysellisen paljon vuoden 2022 aikana, yhteensä 437 kappaletta. Uusien tuulivoimaloiden yhteenlaskettu teho oli 2430 MW. Suurin osa vuoden 2022 aikana valmistuneista voimaloista otettiin käyttöön vasta loppuvuoden aikana, joten niiden vaikutus tuotantoon näkyy kunnolla vasta vuonna 2023. Julkaistujen investointipäätösten mukaan uusien tuulivoimaloiden rakentaminen tulee hieman tasaantumaan, ja vuosien 2023, 2024 ja 2025 aikana tuulivoimakapasiteetti kasvaa arviolta 1000 MW vuodessa. Arvioiden mukaan vuonna 2025 tuulivoima kattaisi jo 25 % Suomen sähkönkulutuksesta. (Tuulivoimayhdistys 2023b.)

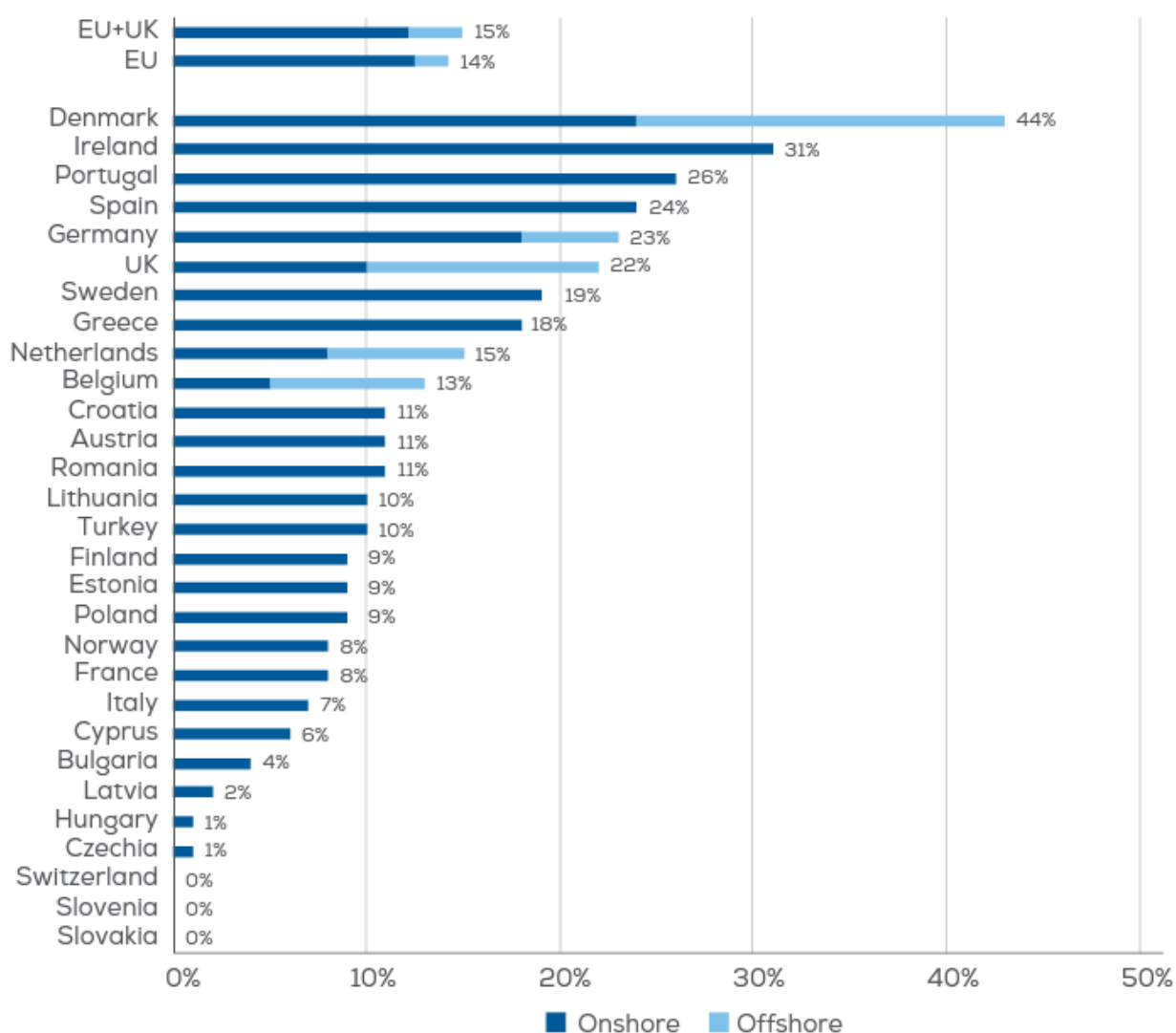


KUVIO 3. Tuulivoimalla tuotettu sähkö Suomessa vuosina 2015–2022 (mukaiillen Tilastokeskus 2023c)

Tuulivoimaa on rakennettu muuallakin Euroopassa viime vuosina hyvin paljon. Vuonna 2021 Euroopassa rakennettiin 17 GW uutta tuulivoimakapasiteettia ja kapasiteettia oli yhteensä 236 GW. Tuulivoimalla katettiin 15 % koko Euroopan sähkönkulutuksesta vuonna 2021. Pohjoismaisiin sähkömarkkinoihin merkittävästi vaikuttava asia on myös se, että vuonna 2021 Ruotsiin rakennettiin 2014 MW

uutta tuulivoimaa, mikä oli toiseksi eniten Euroopassa. Tuulivoiman osuus kulutuksesta vaihtelee hyvin paljon maittain Euroopassa. Suurin tuulivoiman osuus kulutuksesta vuonna 2021 oli Tanskassa. Tanskassa tuulivoimalla tuotetun sähkön osuus oli 44 % kulutuksesta, kun taas Sloveniassa ja Slovakiassa tuulivoimaa ei käytännössä ole lainkaan (KUVIO 4). On hyvä huomata, että Tanskan on suurta EU-maata, kuten Saksaa helpompi tuottaa iso osuus sähköstä tuulivoimalla, koska se pystyy tuomaan Norjan vesivoimalla tuotettua sähköä, kun tuulituotantoa on vähän ja viemään sähköä naapurimaihin, kun siitä on ylitarjontaa. (WindEurope 2021.)

Percentage of the average annual electricity demand covered by wind in 2021<sup>14</sup>



KUVIO 4. Tuulivoiman osuus kulutuksesta maittain Euroopassa 2021 (WindEurope 2021)

Kasvaneet kustannukset sekä kohonnut korkotaso ovat vähentäneet uusien tuulivoimaloiden investointipäätöksiä Suomessa. Sähköntuotannon voimakas kasvu Suomessa myös rajoittaa uusia hankkeita. Suomi alkaa olla nettona omavarainen sähkön suhteen ja Suomeen tulisi saada lisää sähkökäyttäjiä, jotta tuulivoiman lisärakentaminen olisi kannattavaa tulevina vuosina. Suomeen suunnitellut vetylaitokset sekä hiilidioksidivapaa teräksen tuotanto lisääisivät paljon Suomen sähkönkulutusta, joten niiden toteutuessa tuulivoiman lisärakentamisen kannattavuus paranisi tulevaisuudessa. (Vihanta 2023.)

### 3 POHJOISMAISET SÄHKÖMARKKINAT

Sähkömarkkinat avattiin Suomessa asteittain kilpailulle vuonna 1995, ja vuodesta 1998 alkaen kaikki sähkökäyttäjät ovat voineet kilpailuttaa sähkön hankinnan. Suomi kuuluu osana pohjoismaiseen tukusähkömarkkinaan, johon kuuluvat Pohjoismaiden lisäksi Baltian maat. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023b.) Sähkön markkinapaikkana toimii Nord Pool -sähköpörssi, joka on Euroopan johtava sähkömarkkinapaikka toimien 16 Euroopan maassa sähkömarkkinaoperaattorina. Nord Pool -sähköpörssissä vaihdettiin vuonna 2021 yhteensä 963 TWh sähköä, joista noin 300 TWh pohjoismaissa. (Nordpool 2023a). Pohjoismainen sähkömarkkina on jaettu 15 tarjousalueeseen (KUVA 1). Sähkön hinta voi vaihdella hyvinkin paljon eri tarjousalueiden välillä johtuen siirtokapasiteetin riittämättömyydestä alueiden välillä. Kaikki tuotettu sähkö ei päädy sähkömarkkinoille, vaan esimerkiksi osa ydinvoimaloiden tuottamasta sähköstä menee suoraan omistajiensa omaan käyttöön. Noin 70 % Pohjoismaissa käytetystä sähköstä välitetään Nord Pool -sähköpörssin kautta (Fingrid 2023b).

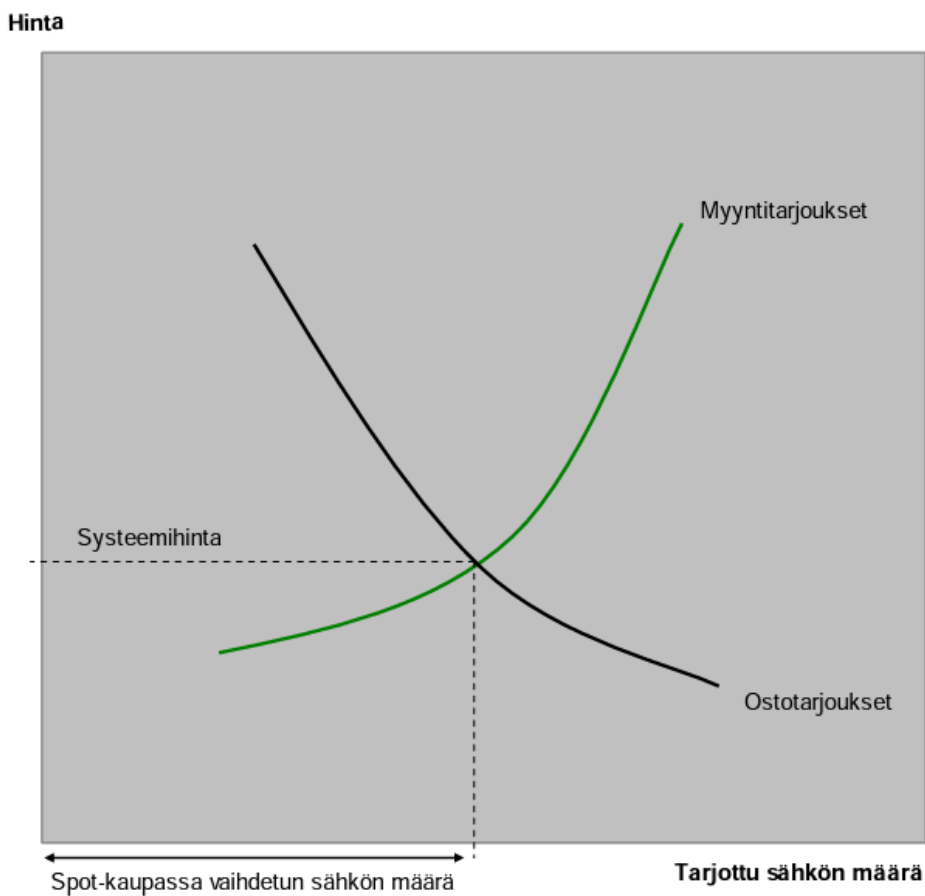


KUVA 1. Pohjoismaisen sähkömarkkinan tarjousalueet (Nordpool 2023b)



### 3.1 Vuorokausimarkkinat

Vuorokausimarkkinoilla käydään kauppaa seuraavan päivän jokaiselle tunnille. Jokainen markkinatoimija arvioi seuraavan päivän tilannetta kulutuksen ja tuotannon kannalta ja asettavat osto- ja/tai myyntitarjouksensa kello 13 mennessä Nord Pool -sähköpörssin toteuttamaa huutokauppaa varten. Sähköpörssissä lasketaan hinta vuorokauden jokaiselle tunnille annettujen osto- ja myyntitarjousten sekä siirtokapasiteetin perusteella. Hinta muodostuu kaikkien osto- ja myyntitarjousten leikkauspisteessä (KUVA 2). (Fingrid 2023b.) Sähköpörssissä siirrytään Euroopassa vaihteittain 15 minuutin kaupanäkäyntijaksoon tämänhetkisen arvion mukaan vuonna 2025 (Fingrid 2023d).



KUVIO 5. Sähkön markkinahinnan muodostuminen

### 3.2 Päivänsisäiset markkinat

Päivänsisäiset markkinat antavat markkinatoimijoille mahdollisuuden korjata tuotanto- ja kulutussuunnitelmia lähempänä kulutushetkeä. Esimerkiksi sää- tai vikatilanne voi aiheuttaa sähkömarkkinoille tilanteen, jolloin tulee tarve käydä kauppaa, jotta saadaan tuotanto ja kulutus tasapainoon. Päivänsisäiset markkinat avautuvat vuorokausimarkkinan jälkeen ja toimivat jatkuvalla kaupalla jokaiselle tunnille. Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla päivänsisäiset markkinat sulkeutuvat 0–60 minuuttia ennen toimitustuntia riippuen tarjousalueesta. (Fingrid 2023b.) Suomen tarjousalueella on ollut mahdollista tarjota 15 minuutin tuotteita päivänsisäisillä markkinoilla 22.5.2023 alkaen Suomen siirryttyä 15 minuutin taseselvitysjaksoon (Fingrid 2023d).

### 3.3 Säätosähkö- ja reservimarkkinat

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid ylläpitää muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa pohjoismaisia säätosähkömarkkinoita. Kantaverkkoyhtiöt varmistavat, että heillä on riittävä määrä säästökykyistä kapasiteettia tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseen. Säättotarjoukset annetaan 1 MW:n tarkkuudella ja vähimmäiskapasiteetti on 5 MW. Säättotarjouksia vapaasta kapasiteetista voidaan jättää 45 minuuttia ennen kohteena olevaa käyttötuntia ja kantaverkkoyhtiöt aktivoivat ne tehotasapainon tarpeen mukaan. (Fingrid 2023c.)

Sähköverkon taajuuden tulee olla koko ajan 49,9–50,1 Hz, mikä vaatii, että tuotannon ja kulutuksen täytyy olla hyvin tarkasti tasapainossa. Tuotannon ollessa suurempaa kuin kulutus verkon taajuus pyrkii nousemaan ja vastaavasti kulutuksen ollessa tuotantoa suurempaa taajuus laskee. Suomessa Fingrid ylläpitää reservimarkkinoita taajuudenvakautukselle ja automaattiselle taajuudenpalautukselle, joilla varmistetaan taajuuden pysyminen normaalilla taajuusalueella. (Fingrid 2023c.)

Lisäksi Fingrid ylläpitää tehoreservilakiin perustuvaa tehoreserviä, jolla turvataan sähkön toimintavarmuutta Suomessa tilanteissa, joissa tuotanto ei riitä kattamaan sähkönkulutusta. Valtioneuvosto on määrittänyt toimitusvarmuuden tavoitetason Suomeen, jonka perusteella Energiavirasto on aikaisemmin määrittänyt tehoreservin tarpeeksi 600 MW. Reserviin tarvittavat voimalaitokset valitaan yhdeksi vuodeksi kerrallaan tarjouskilpailun perusteella. Tehoreservilaki määrittää, että talvikaudella tehoreservissä oleva voimalaitos tulee kyetä ottamaan käyttöön 12 tunnin kuluessa ja talvikauden ulkopuolella

yhden kuukauden kuluessa. Tehoreservissä oleva voimalaitos ei saa muuten osallistua sähköntuotantoon markkinoilla. Tehoreservin käyttöönotto ei Suomessa ole kovin tavallista. Edellisen kerran tehoreserviä on tarvittu Suomessa talvena 2009–2010. (Energiavirasto 2022a.) Tehoreservin hankinta kaudelle 1.11.2022 – 31.10.2023 keskeytettiin syyskuussa 2023, koska Energiavirasto ei saanut yhtään hyväksyttävää tarjousta eikä siten kyseisellä kaudella tehoreservissä ollut yhtään voimalaitosta (Energiavirasto 2022b). Kaudelle 1.11.2023 – 31.10.2024 Energiavirasto on tehnyt päätöksen, ettei tehoreserviä hankita lainkaan. Olkiluodon kolmannen reaktorin säännöllisen tuotannon myötä Energiavirasto toteaa, ettei kaudella 2023–2024 tule olemaan merkittäviä sähkötehon riittävyyshuolia eikä näin ollen tehoreserville ole tarvetta. (Energiavirasto 2023b.)

### 3.4 Taseselvitys

Taseselvitys tehdään sähköntoimituksen jälkeen. Selvityksellä tarkistetaan tasevastaavien tarjotun ja toteutuneen tuotannon sekä kulutuksen. Sään mukaan vaihtelevan sähköntuotannon lisääntyessä on sähkömarkkinoiden toimintamallien muututtava yhteensopivaksi muuttuneen tuotantomallin mukana. Tämän vuoksi Euroopassa on siirrytty reaaliaikaisempiin sähkömarkkinoihin 15 minuutin taseselvityksen myötä, jotta tuotannon ja kulutuksen tasapainotus toimisi luotettavasti. Suomessa otettiin käyttöön 15 minuutin taseselvitysjakso edellisen 60 minuutin sijaan 22.5.2023. (Fingrid 2023e.) Lyhyempi taseselvitysjakso mahdollistaa tarkemman kustannusten jakamisen markkinatoimijoiden kesken tasepoikkeamista. Lyhyemmässä 15 minuutin taseselvitysjaksossa tulee esille myös sellaisia tasepoikkeamia, jotka aikaisemmassa 60 minuutin jaksossa olisivat kumonnet toisensa tunnin aikana.

### 3.5 PPA-sopimukset

Pitkäaikaiset sähkönostosopimukset (PPA, Power Purchase Agreement) ovat yleistyneet niin Suomessa kuin maailmalla viime vuosina, ja etenkin tuulivoimalla tuotetun sähkön PPA-sopimuksia on tehty runsaasti. PPA-sopimuksen ostaja voi olla sähkön loppukäyttäjä kuten isompi yritys, sähköntuottaja tai energiayhtiö. Yritys on voinut ostaa valtaosan kokonaisen tuulipuiston tuotannosta määräajaksi, jolloin PPA-sopimus suojaa ostajaa sähkön markkinahinnan vaihteluilta ja lisää näin kulujen ennakkointia vuosiksi eteenpäin. Esimerkiksi Google teki 10 vuoden sopimuksen vuonna 2022 valmistuneen Piiparinmäen tuulipuiston tuotannosta. Sopimuksella tuulipuiston tuotannosta noin 60 % menee

Googlen käyttöön ensimmäisen 10 vuoden ajan. Sähkön alkuperä ja puhtaus on myös monelle yritykselle tärkeä imagoasia (STT info 2022).

Sähkön tuottajalle PPA-sopimus tuo myös ennustettavuutta ja helpottaa rahoituksen saatavuutta. PPA-sopimus näin ollen luo paremmat mahdollisuudet uuden voimalan investoinnin toteutumiselle. PPA-sopimus voi olla niin sanottu fyysinen PPA, jossa sähkö siirtyy tuottajan sähkötaseesta fyysisenä toimituksena ostajan sähkötaseeseen, eikä sähkö näy pohjoismaisessa sähköpörssissä. Sopimus voi olla myös niin sanottu synteettinen PPA, jossa tuottaja myy sähkön markkinoille ja ostaja ostaa sen markkinoilta. Synteettisessä mallissa hinta määräytyy PPA-sopimuksessa sovitun hinnan ja toteutuneen markkinahinnan erotuksena. (Tuulivoimayhdistys 2019.)

## 4 SÄHKÖNTUOTANNON KUSTANNUKSET

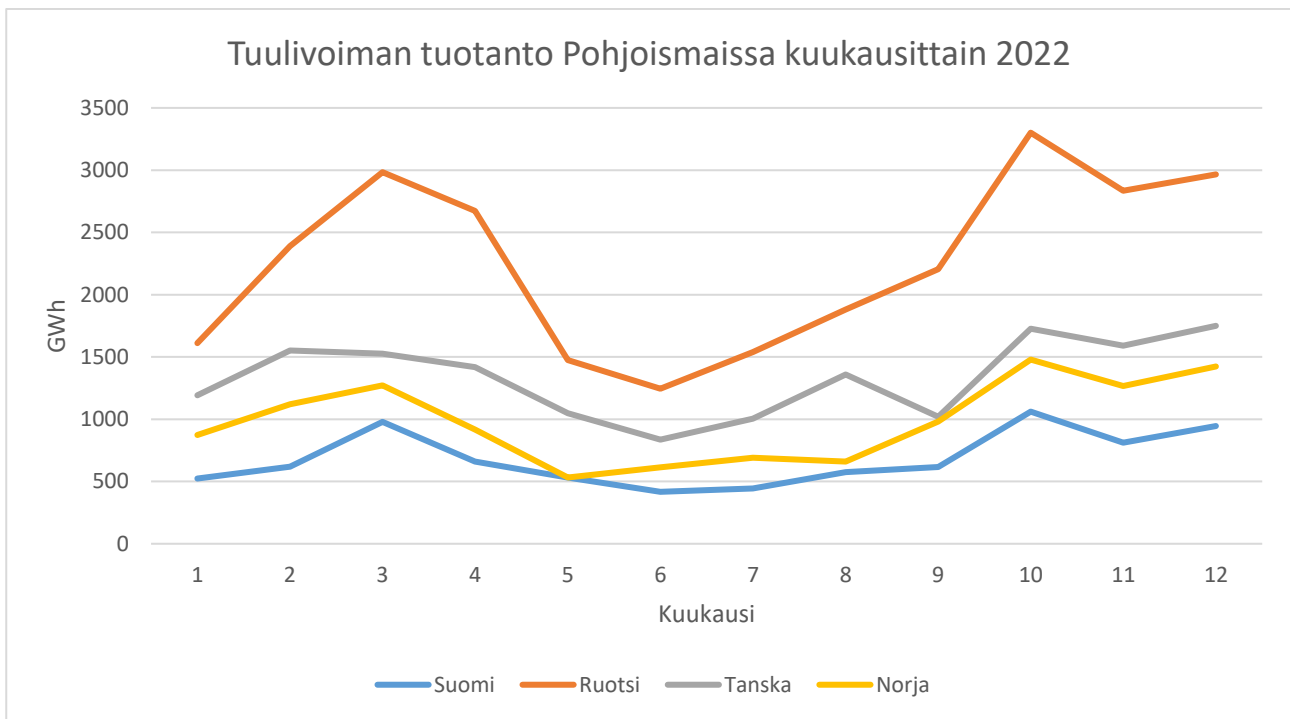
Sähköntuotannon kustannukset ovat merkittävässä osassa, kun verrataan eri sähkön tuotantomuotoja keskenään. Sähköntuotanto Pohjoismaissa on kilpailtua liiketoimintaa, joten sähkön tuotantotapa valikoituu kysynnän ja tarjonnan mukaan edullisuusjärjestyksessä muuttuvien kustannusten mukaan. Pohjoismaissa on hyvin erilaisia tuotantolaitoksia, jotka eroavat monin tavoin kustannusrakenteen tai sääntöominaisuuksien osalta. Sähköpörssi toimii kysynnän ja tarjonnan mukaan valikoituvan tuotantotavan myötä niin kutsutulla merit order -periaatteella. Merit order -periaatteella tarkoitetaan, että sähköntuottajien tarjoukset hyväksytään halvimmasta tarjouksesta alkaen ja markkinahinta määräytyy korkeimman hyväksytyt tarjouksen perusteella. Eri tuotantolaitokset tarjoavat tuotantoaan markkinoille muuttuvien kustannusten mukaan, minkä takia tuotantomuodot, joiden muuttuvat kustannukset ovat alhaisimmat, saavat tuotantonsa markkinoille ensin. Sään mukaan vaihtelevilla tuotantomuodoilla, kuten aurinko- ja tuulivoimalla muuttuvat kustannukset ovat alhaisimmat. Kun niillä on suotuisien olosuhteiden myötä runsasta tuotantoa ne syrjäyttävät markkinoilta muita tuotantomuotoja, joilla on korkeammat muuttuvat kustannukset. (Fingrid 2023b.)

### 4.1 Systemikustannukset

Systemikustannus kattaa kaikki kulut, jotka muodostuvat sähköntuotannosta ja sähkön toimittamisesta loppukäyttäjälle saakka. Se koostuu tuotantokustannuksista, integrointikustannuksista sekä profiilikustannuksista. Sähkön tuotantomuodon profiilikustannuksella tarkoitetaan kaikesta sähköstä saadun keskihinnan ja kyseisellä tuotantomuodolla tuotetun sähköstä saadun hinnan erotusta. Profiilikustannuksen merkitys on kasvanut etenkin viime vuosina, kun sään mukaan vaihteleva tuotanto on lisääntynyt. Esimerkiksi tuulisena päivänä, kun tuulivoimaa on paljon tarjolla ja sitä ei rajoiteta, sähkön markkinahinta laskee ja tuulivoimalla tuotetun sähkön hinta siten laskee suhteessa muihin tuotantomuotoihin. Käytännössä tuulisena aikana tämä tarkoittaa sitä, että mitä suurempi osuus kokonaistuotannosta on tuulivoimaa, sitä enemmän sähkön markkinahinta laskee. Profiilikustannus ei varsinaisesti nosta tuotannon kustannuksia, vaan se laskee voimaloiden tuottoa. Profiilikustannus voi olla myös miinusmerkinen, jolloin se ei ole tuotannolle kustannus vaan se tuo arvoa tuotannolle. (Suokko 2023.)

Tuulivoiman profiilikustannukset nousevat voimakkaan tuulivoiman rakentamisen myötä ja kuluttajille se näkyy halvempina sähkön hintoina tuulisena aikana. Suomessa ensimmäisen kerran sähköpörssin

spot-hinta laski miinukselle 10.2.2020, johtuen tavallista lämpimämmästä ajanjaksosta, lisääntyneestä tuulivoimatuotannosta sekä hyvistä pohjoismaisista vesioloista (Fingrid 2020a). Negatiivisten tuntihintojen lukumäärä on lisääntynyt vuosi vuodelta. Vuonna 2020 Suomen aluehinta oli negatiivinen yhdeksänä tuntina, kun vuonna 2022 hinta oli negatiivinen 27 tuntia vaikka koko vuoden 2022 keskimääräinen tuntihinta oli poikkeuksellisen korkea. Vuonna 2023 syyskuun loppuun mennessä Suomen aluehinta oli ollut negatiivinen jo 314 tuntia. (Entso-e 2023a.) Pidemmällä aikavälillä kuluttajien sähkön hinta voi myös kääntyä nousuun, jos säädettävien tuotantomuotojen uusinvestoinneista tulee kannattamattomia. Sähköpörssin hinnat tulevat vaihtelevaan ainakin entistä enemmän sään mukaan vaihtelevan tuotannon lisääntyessä. Suomen suuret tuulivoimainvestoinnit eivät ole ainut tekijä tuulivoiman profiilikustannuksissa, vaan kasvaviin tuulivoiman profiilikustannuksiin vaikuttavat myös Tanskan ja Ruotsin suuri tuulivoimakapasiteetti. Tuuliolot ovat ison osan ajasta hyvin samanlaiset kaikissa Pohjoismaissa, ja tuulivoimantuotanto painottuu samoille ajoille kaikissa Pohjoismaissa (KUVIO 6).



KUVIO 6. Tuulivoiman tuotanto Pohjoismaissa kuukausittain 2022 (mukaihen IEA 2023)

## 4.2 Markkinakustannukset

Tuotantokustannukset ovat vain osa sähkön kunkin tuotantomuodon kokonaiskustannuksista. Lisäksi sähköntuotannosta aiheutuu niin sanottuja integrointikustannuksia. Sähkö tuotetaan yleisesti hyvinkin kaukana varsinaisesta kulutuksesta. Esimerkiksi tuulivoimaa on Suomessa rakennettu viime vuosina voimakkaasti Pohjois-Pohjanmaan alueelle. Vuonna 2021 Suomen kokonaissähkönkulutuksesta Pohjois-Pohjanmaa käytti vain 7,6 % ja Suomen tuulivoiman kapasiteetista vuonna 2022 oli 41 % Pohjois-Pohjanmaalla (Energiateollisuus2022b; Tuulivoimayhdistys 2023d). Sähköverkkoa joudutaan laajentamaan ja vanhaa verkkoa päivittämään, jotta lisääntynyt kapasiteetti saadaan siirrettyä sinne, missä sähkö käytetään.

Sään mukaan vaihtelevan sähköntuotannon kuten tuulivoiman kasvaminen lisää säätövoiman tarvetta aiheuttaen myös kustannuksia muille verkossa oleville voimalaitoksille. Muiden voimalaitosten käyttötunnit huipputeholla laskevat halvemman tuulivoiman tullessa markkinoille, joten niiden tuotantokustannukset tuotettua energiayksikköä kohden nousevat. Tuuli- ja etenkin aurinkovoiman tuotanto saattaa vaihdella hyvinkin paljon lyhyenkin ajan sisällä ja ennustettu tuotanto saattaa poiketa toteutuneesta tuotannosta. Tuotannon ennustevirheiden ja paljon vaihtelevan tuotannon takia tarvitaan säätövoimaa, jolla saadaan pidettyä tuotanto ja kulutus tasapainossa. Tästä aiheutuu kustannuksia verrattuna säästä riippumattomiin voimalaitoksiin. (Suokko 2023.)

## 4.3 Tuotantokustannukset

Yleisesti sähköntuotannon kustannusten vertailemisessa käytetään LCOE-menetelmää (Levelized Cost Of Energy, tasoitetut tuotantokustannukset), joka perustuu kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin sekä annuiteetilaskentaan. LCOE-menetelmällä lasketaan sähköntuotannon omakustannushinta laitoksen koko elinkaaren aikana ja laskelman tulos ilmoitetaan valuuttana energiayksikkö kohti, kuten €/MWh. LCOE-menetelmä ottaa huomioon vain sähköntuotannosta aiheutuvat kustannukset eikä huomioi integrointi- tai profiilikustannuksia.

LCOE-tunnusluku saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$LCOE = \frac{FCR \cdot ICC}{AEP} + \frac{LRC + O\&M + LLC}{AEP}, \quad (1)$$

missä

FCR = Fixed Charge Rate (annuiteettitekijä),

ICC = Initial Capital Cost (alkupääoma),

AEP = Annual Electricity Production (vuotuinen sähköntuotto),

LRC = Levelized Replacement Cost (tasoitetut korjauskustannukset),

O&M = Operation & Management Cost (käyttökulut) ja

LLC = Land Lease Cost (maanvuokrat, kiinteistöverot).

Annuiteettitekijä (FCR, Fixed Charge Rate) on voimalaitoksen alkuperäisen pääomakustannuksen osuus yhtä vuotta kohden kattaen lainapääoman ja sen kulut, kuten koron. Korkoprosentin väärin arvioiminen vääristää lopputulosta huomattavasti, koska takaisinmaksuajat ovat yleisesti varsin pitkiä. Suomessa tuulivoimahankkeen kokonaiskustannuksista rahoituskustannukset voivat olla jopa 30–40 % (Tuulivoimayhdistys 2023c). Annuiteettikertoimen määrittämiseen on olemassa valmiita taulukoita, mutta se saadaan laskettua myös seuraavalla kaavalla:

$$FCR = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}, \quad (2)$$

missä

$i$  = korkoprosentti desimaalilukuna ja

$n$  = laina-aika vuosina.

Alkupääoma (ICC, Initial Capital Cost) on voimalaitoksen ja tarvittavan infrastruktuurin rakentamiseen tarvittava pääoma. Se sisältää kaikki voimalan rakentamisesta ja sähköverkkoon liittymisestä aiheutuneet kustannukset sekä ennen käyttöä aiheutuneista kuluista kuten suunnitteluun, kaavoitukseen ja luvituksiin liittyvistä kuluista. Uuden tuulivoimalaitoksen osuus kokonaisinvestoinnista Suomessa on 65–80 % maalla ja merelle rakennettaessa 50–60 %. Suomessa maatuulivoiman investointikustannus on karkeasti 1,2–1,5 miljoonaa euroa megawattia kohden ja merituulivoiman investointikustannukset ovat 20–50 % maatuulivoimaa suuremmat. (Tuulivoimayhdistys 2023c.)



Vuotuinen sähköntuotto (AEP, Annual Electricity Production) on arvioitu sähköntuotanto vuodessa (MWh) ja se saadaan laskettua arvioidun kapasiteettikertoimen tai huipunkäyttöajan mukaan.

Annuiteettitekijän ja alkupääoman tulo muodostaa LCOE-menetelmässä kiinteät kustannukset. Jakamalla nämä kiinteät kustannukset vuotuisella sähköntuotolla saadaan tulokseksi kustannus euroina tuotettua megawattituntia kohden.

Kiinteät kustannukset:

$$\frac{FCR*ICC}{AEP} \quad (3)$$

Eri tuotantomuodon voimalaitoksilla on hyvin eripituinen käyttöikä. Lisäksi voimalaitoksen tekninen käyttöikä voi olla eri kuin taloudellinen käyttöikä. Tuulivoimalle yleisesti käytetään 25 vuoden ja esimerkiksi ydinvoimalle 40 vuoden taloudellista käyttöikää. Ydinvoiman tekninen käyttöikä voi kuitenkin olla hyvin pienillä päivityksillä 60 vuotta. (Vakkilainen & Kivistö 2017, 9.)

Muuttuvat kustannukset muodostuvat tasoitetuista korjauskustannuksista (LRC, Levelized Replacement Cost), käyttökuluista (O&M, Operation & Management Cost) sekä maanvuokrauskuluista (LLC, Land Lease Cost). Nämä kustannukset sisältävät voimalaitoksen arvioidut korjaus- ja polttoainekulut sekä maanvuokrista ja kiinteistöveroista aiheutuneet kustannukset koko voimalaitoksen elinkaaren aikana yhtä vuotta kohden. Jakamalla muuttuvat kustannukset vuotuisella sähköntuotolla tulokseksi saadaan kustannus euroina tuotettua megawattituntia kohden.

Muuttuvat kustannukset:

$$\frac{LRC+O\&M+LLC}{AEP} \quad (4)$$

Muuttuvat kustannukset vaihtelevat hyvin paljon eri tuotantomuotojen välillä. Esimerkiksi tuulivoimalla, jossa ei ole polttoainekustannuksia lainkaan, ovat muuttuvat kustannukset hyvin pienet verrattuna muihin tuotantomuotoihin. Kun tuulivoimalle lasketaan muuttuvia kustannuksia, niin muuttuvina kustannuksina käytetään yleisesti 20–25 % osuutta kiinteistä kuluista. Aurinkovoimalla muuttuvat kustannukset ovat huomattavasti tuulivoimaa korkeammat, koska niissä käytetyt sähköiset komponentit vanhenevat ja vaativat uusimista niiden elinkaaren aikana. (Vakkilainen & Kivistö 2017, 9.)

### 4.3.1 Tuulivoiman tuotantokustannukset

Esimerkkilaskennassa tuulivoiman tuotantokustannukseksi käytettiin avoimista lähteistä saatuja tietoja. Tuulivoimapuiston kokonaistehona on käytetty 250 MW, joka on melko tyypillinen tänä päivänä rakennettava puisto, jossa on 25 kappaletta 10 MW:n voimalaa. Vuonna 2019 Teknologian tutkimuskeskus VTT:n keräämien tilastojen mukaan tuulivoimaloiden keskimääräinen kapasiteettikerroin oli 33 % (Tuulivoimayhdistys 2019b). Nykyään uusissa voimaloissa kapasiteettikerroin voi olla reilusti yli 40 %, joten tässä laskelmassa kapasiteettikertoimena on käytetty 0,4. Vuotuiseksi sähköntuotannoksi 250 MW:n voimalalle saadaan 0,4 kapasiteettikertoimella 876000 MWh. Investointikustannuksena on käytetty Tuulivoimayhdistyksen arvion keskiarvoa maatuulivoimalle, 1,35 M€/MW, korkona 5 % ja takaisinmaksuaikana 25 vuotta (Tuulivoimayhdistys 2023c).

Annuiteettitekijäksi 5 %:n korolla saadaan:

$$\frac{0,005(1+0,005)^{25}}{(1+0,005)^{25}-1} = 0,0709 \quad (2)$$

Kiinteiksi kustannuksiksi saadaan:

$$\frac{0,0709 \cdot 1,35 \text{ M€}}{876000 \text{ MWh}} * 250 \text{ MW} = 27,3 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \quad (3)$$

Muuttuvana kustannuksena käytettiin 23 %:n osuutta kiinteistä vuosikuluista:

$$0,23 * \frac{0,0709 \cdot 1,35 \text{ M€} * 250 \text{ MW}}{876000 \text{ MWh}} = 6,3 \text{ €/MWh} \quad (4)$$

LCOE-tuotantokustannukseksi tuotettua megawattituntia kohti saadaan:

$$27,3 \text{ €/MWh} + 6,3 \text{ €/MWh} = 33,6 \text{ €/MWh} \quad (1)$$

## 5 TUULIVOIMAN PROFIILIKUSTANNUKSET VUONNA 2022

Tuulivoiman profiilikustannusten suurin aiheuttaja on tuulisuuden vaihtelu. Tuulisella säällä muidenkin tuulivoimaloiden tuotanto kasvaa. Voimakas tuulivoiman lisärakentaminen syö profiilikustannuksen nousun myötä siis itseltään kannattavuutta. Jotkut käyttävätkin oman kannattavuutensa tuhoamisesta termiä *kannibalisaatiovaikutus*. (Suokko 2023). Profiilikustannus tuulivoimalle saadaan laskettua kaavalla:

$$E_{\text{profiilikustannus}} = \frac{E_{\text{keskihinta}}}{E_{\text{tuulivoima}}}, \quad (5)$$

missä

$E_{\text{keskihinta}}$  = volyymilla painotettu sähköenergian keskihinta vuoden aikana ja

$E_{\text{tuulivoima}}$  = tuulivoimatuotannolla painotettu sähköenergian keskihinta vuoden aikana.

Volyyymilla painotettu sähköenergian keskihinta vuoden ajalle saadaan laskettua kaavalla:

$$E_{\text{keskihinta}} = \frac{1}{8760} \sum_{t=1}^{8760} H(K), \quad (6)$$

missä

$t$  = aika,

$H$  = tuntikohtainen aluehinta (€) ja

$K$  = tuntikohtainen sähkönkulutus (MWh).

Tuulivoimatuotannolla painotettu sähköenergian keskihinta vuoden ajalle saadaan laskettua kaavalla:

$$E_{\text{tuulivoima}} = \frac{\sum_{t=1}^{8760} (T(t) * H(t))}{\sum_{t=1}^{8760} (T(t))}, \quad (7)$$

missä

$T$  = tuntikohtainen tuulivoimatuotanto (MWh).

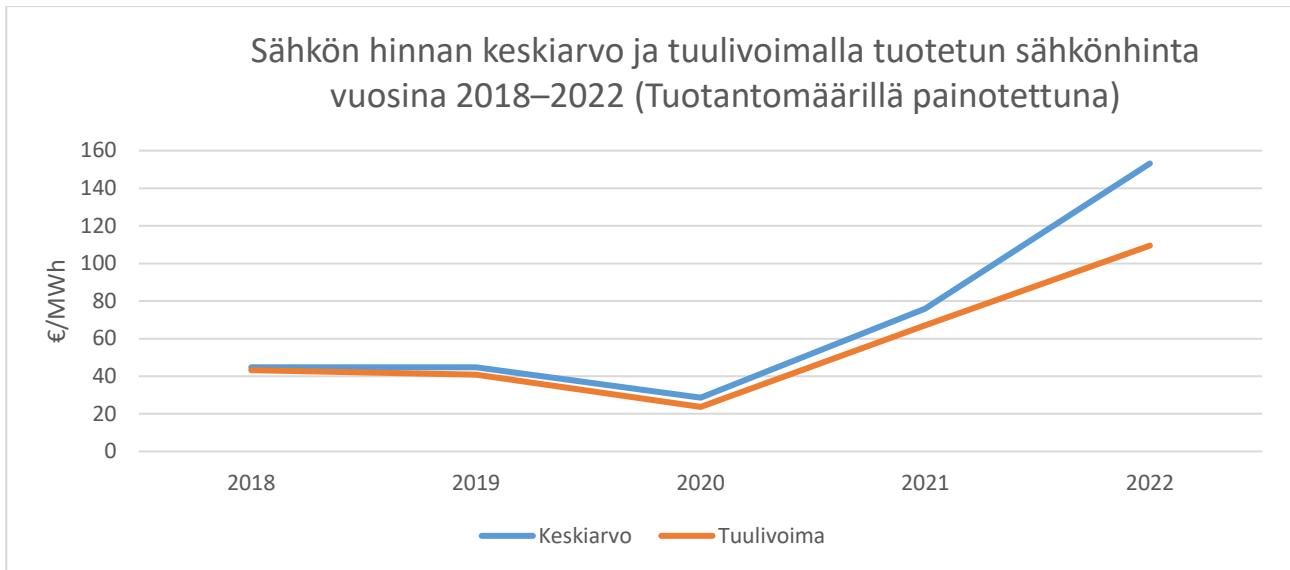
Kaavalla 5 tuulivoiman profiilikustannukseksi saadaan kustannus €/MWh, minkä verran vähemmän tuulivoimalla tuotetun sähkön arvo on suhteessa muuhun sähkөөn.

Tässä opinnäytetyössä esitettyjen laskelmien tuntikohtaiset aluehinnat ja kulutustiedot on haettu avoimesta datasta. Kulutustiedot on haettu Energiateollisuus ry:n tuntidatatilastoista ja tuntikohtaiset aluehinnat entso-e:n hintahistoriasta (Energiateollisuus 2023c; ensto-e 2023a). Energiateollisuus ry on suomalainen energia-alan elinkeino ja työmarkkinapoliittinen järjestö. Järjestöllä on 270 jäsentä, jotka ovat energia-alalla toimivia yrityksiä ja suuria energiankuluttajia. (Energiateollisuus 2023b.) Entso-e on eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden yhdistys, johon kuuluu 39 jäsentä 35 eri maasta. Yhdistyksen toimintaa säätelee EU:n sähkömarkkina-asetus (EU) 2019/943 ja sen tehtävänä on edistää sähkömarkkinoiden toimintaa sekä taata siirtoverkon optimaalista käyttöä Euroopassa. Entso-e:n tavoitteena on hyödyntää entistä enemmän uusiutuvaa energiaa Euroopan sähköntuotannossa, jotta Eurooppa voisi olla hiilineutraali maanosa sähköntuotannossa vuoteen 2050 mennessä. (Ensto-e 2023b.)

Datassa saattaa esiintyä pieniä virheitä ja Energiateollisuus ry:n tilasto vuodelle 2022 oli vielä opinnäytetyön kirjoitushetkellä alustava, mutta nämä eivät vaikuttane laskelmien lopputuloksiin oleellisesti. Satunnaiset virheet satunnaistavat dataa eli ne eivät ainakaan liioittele profiilikustannuksia.

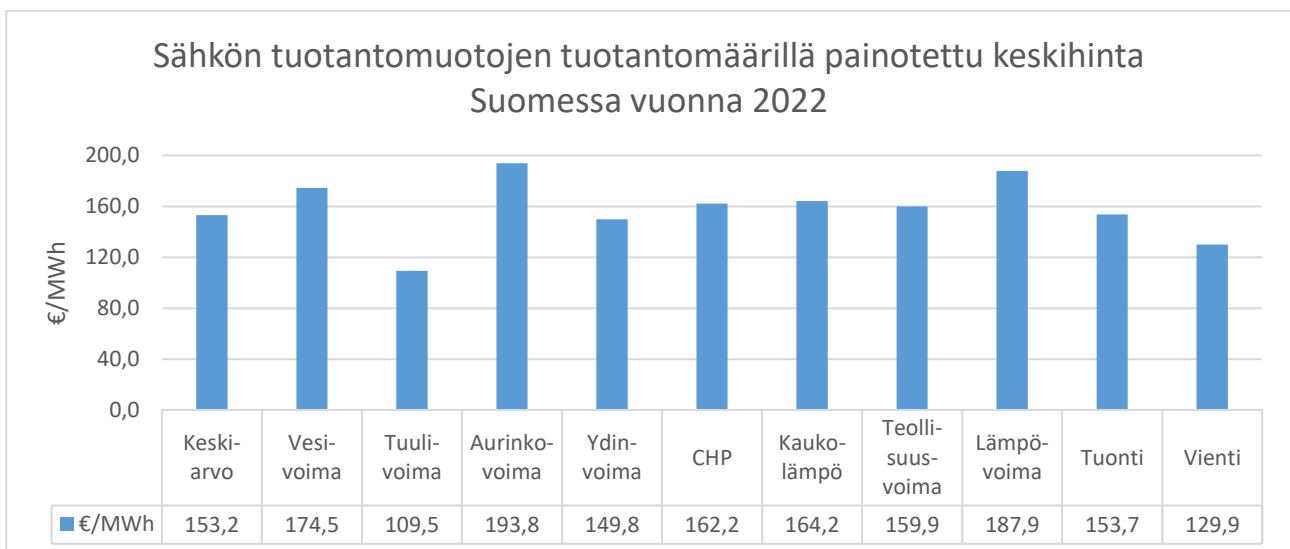
## **5.1 Sähkön hinta vuonna 2022**

Vuoden 2022 sähkön keskihinta Suomessa tuotantomäärillä painotettuna oli 153,2 €/MWh. Kuviosta 7 käy hyvin ilmi, että vuosi 2022 oli hyvin poikkeuksellinen sähkönmarkkinahinnan osalta. Vuoden 2022 keskihinta oli noin kaksinkertainen vuoteen 2021 verrattuna, vaikka sähkön hinta oli huomattavasti aikaisempia vuosia korkeampi myös vuonna 2021. Joulukuussa 2021 Suomen aluehinnan kuukauden keskiarvo oli ensimmäistä kertaa koskaan yli 100 €/MWh, joka kuvaa hyvin sitä miten kallista sähkö oli Suomessa vuonna 2022. Vuoden 2022 erityisen korkeisiin sähkön hintoihin oli useita syitä. Muun muassa polttoaineiden hintojen sekä päästöoikeuksien kallistuminen vaikuttivat sähkön hintaan. (Tilastokeskus 2022.)



KUVIO 7. Sähkön hinnan keskiarvo ja tuulivoimalla tuotetun sähkönhinta vuosina 2018–2022 (mukailien Entso-e 2023b; Energateollisuus 2023c)

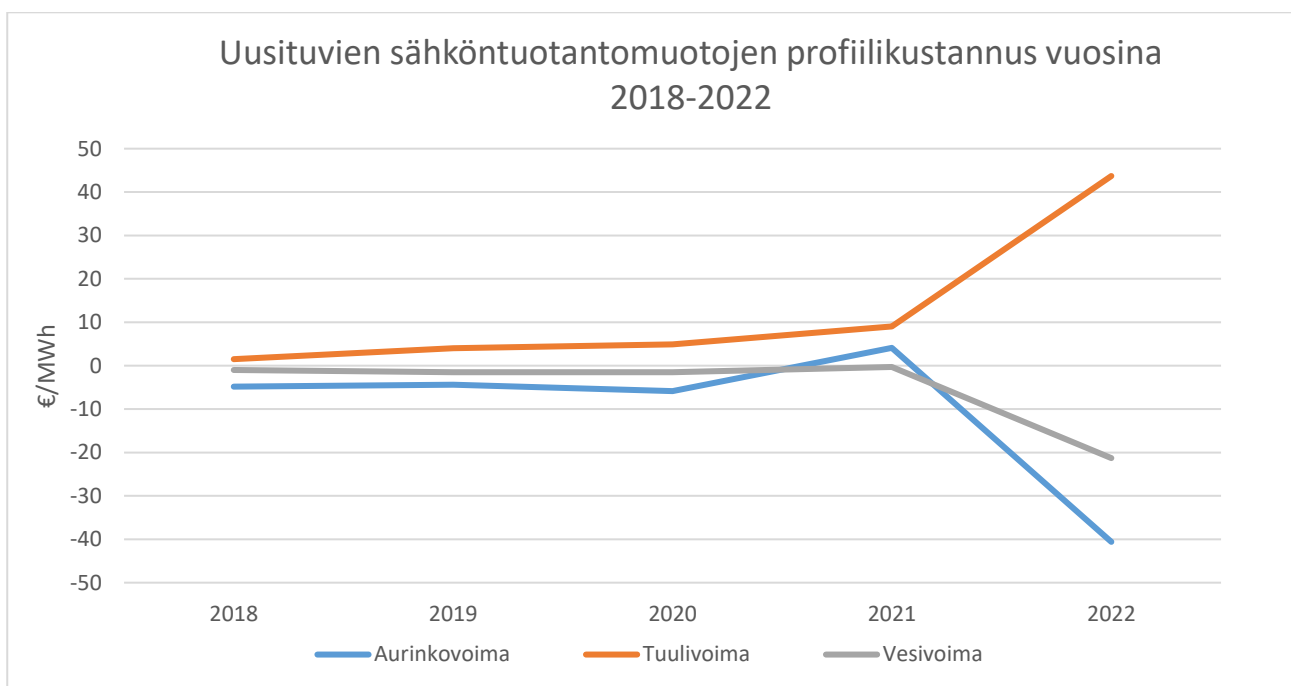
Tuotetusta sähköstä saatu hinta vaihtelee tuotantomuotojen välillä hyvin paljon. Kuviosta 8 nähdään, että korkeinta hintaa vuonna 2022 saatiin aurinkovoimalla tuotetusta sähköstä. Kesällä 2022 sähkön markkinahinta oli poikkeuksellisen korkealla, mikä selittää aurinkovoiman hyvän tuoton. Tavallisesti korkein sähkön hinta on kohdistunut lämpövoimaan johtuen siitä, että yleensä talvella, kun sähkönkulutus on korkeimmillaan lämpölaitokset pääsevät sähkömarkkinoille mukaan.



KUVIO 8. Sähkön tuotantomuotojen tuotantomäärillä painotettu keskihinta Suomessa vuonna 2022 (mukailien Entso-e 2023b; Energateollisuus 2023c)

## 5.2 Tuulivoiman profiilikustannukset vuonna 2022

Vuonna 2022 Tuulivoiman profiilikustannus oli 43,7 €/MWh. Kasvanut tuulivoimatuotanto laskee siis tuulisena aikana Suomen aluehintaa keskimäärin 43,7 €/MWh. Vuonna 2018 tuulivoiman profiilikustannus oli 1,5 €/MWh, eikä se silloin juurikaan poikennut muista uusiutuvista tuotantomuodoista. Tuulivoimatuotannon profiilikustannus on noussut siitä joka vuosi, kun aurinko- ja vesivoimalla se on ollut laskusuuntainen, kuten kuviossa 9 on nähtävissä. Kuviossa 9 miinusmerkkinen profiilikustannus tarkoittaa profiiliarvoa eli tilannetta, jossa sähköntuotanto on kyseisellä tuotantomuodolla painottunut suuren kysynnän ja siten korkeamman hinnan sähkömarkkinantunteihin.



KUVIO 9. Uusiutuvien tuotantomuotojen profiilikustannus 2018–2022 (mukailien Entso-e 2023b; Energiategollisuus 2023c)

Vesivoimalla profiilikustannus on ollut hyvän säätyvyyden takia tyypillisesti lähellä nollaa, mutta vuonna 2022 vesivoimankin profiilikustannus oli – 21,3 €/MWh. Aurinkovoimalla vuonna 2021 oli profiilikustannusta 4,1 €/MWh, mutta vuonna 2022 aurinkovoimalla oli profiiliarvoa jopa 40,6 €/MWh. Tulevaisuudessa aurinkovoiman voimakkaan kasvun ja mahdollisesti tasaantuvien markkinoiden myötä profiilikustannus aurinkovoimalle voi kääntyä kasvuun. Tämä tapahtunee siinä vaiheessa, kun aurinkosähköä on markkinoilla enemmän kuin sen kanssa korreloivaa jäädytys- ym. sähkönkulutusta.

### 5.3 Arvokertoimet vuonna 2022

Arvotekijä eli arvokerroin kuvaa kullakin tuotantomuodolla saadun volyymipainotetun sähkön hinnan suhteellista arvoa keskimääräiseen volyymipainotettuun markkinasähkön hintaan. Tuotetusta sähköstä saadun hinnan suuren vaihtelun vuoksi arvokertoimella voidaan helposti verrata eri tuotantomuotojen suhteellista arvoa. Arvokerroin saadaan laskettua kaavalla:

$$AT = \frac{\text{Etuotantomuoto}}{\text{Ekeskihinta}}, \quad (8)$$

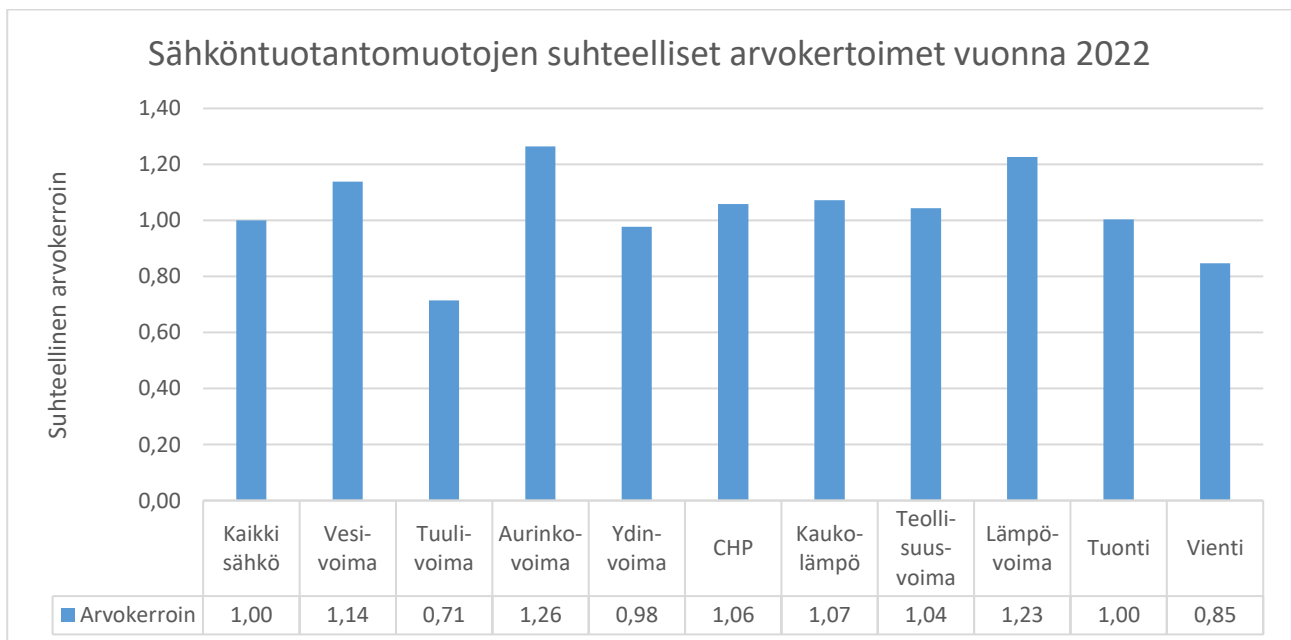
missä

AT = arvotekijä,

Etuotantomuoto = Kyseisen tuotantomuodon volyymilla painotettu keskihinta ja

Ekeskihinta = Volyymilla painotettu sähköenergian keskihinta.

Vuonna 2022 alhaisin arvokerroin eri tuotantomuodoista oli tuulivoimalla. Tuulivoimalla tuotetusta sähköstä sai 0,71-kertaisen hinnan koko tuotannon keskiarvoon nähden. Eri tuotantomuotojen arvokertoimet vuonna 2022 on esitetty kuviossa 10.



KUVIO 10. Sähköntuotantomuotojen suhteelliset arvokertoimet vuonna 2022 (mukaien Entso-e 2023b; Energiateollisuus 2023c)

Arvokertoimet poikkeavat hyvin paljon eri tuotantomuotojen välillä. Arvokertoimeen vaikuttava seikka on kysynnän ja tarjonnan kohtaaminen. Tuulivoiman heikoimman arvokertoimen selittää se, että tuulivoiman tuotanto riippuu täysin vallitsevista tuulioloista eikä se välttämättä vastaa kysyntään. Lisäksi voimakas tuulivoimatuotannon lisärakentaminen laskee tuottoa entisestään. Myös sähköntuonti on voimakasta silloin, kun Pohjois-Atlantilla tuulee laajalla rintamalla eli verraten usein. Kuviosta 10 voikin havaita, että tuontisähkön arvo on keskimäärin korkeampi kuin vientisähkön. Tämä ei välttämättä ole suuri ongelma, mutta on hyvä huomata, että sähkömarkkinat ikään kuin ottavat palkkion siitä, että sähköä viedään ja tuodaan. (Suokko 2023.)

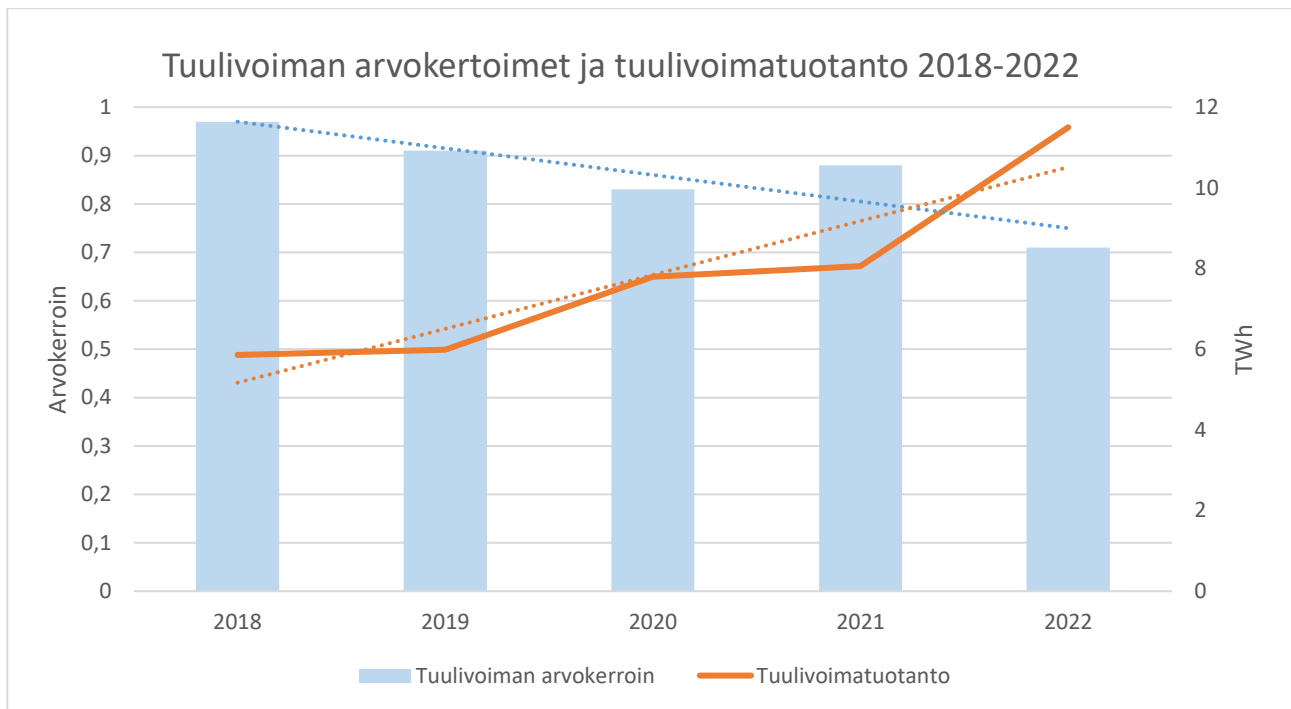
Suurin arvokerroin oli vuonna 2022 aurinkovoimalla, arvokertoimen ollessa 1,26. Toisin sanoen aurinkosähkön arvo oli 26 % suurempi kuin kaiken sähkön vuonna 2022. Kesällä 2022 sähkön hinta oli poikkeuksellisen korkealla energiakriisin myötä, mikä selittää osin aurinkovoiman korkeaa arvokerrointa. Aurinkovoiman osuus Suomen sähköntuotannosta on vielä niin vähäistä, ettei se aiheuta aurinkoisina päivinä ylituotantoa eikä ”kannibaliso” omaa arvoaan. Lisäksi aurinkovoima vastaa jossain määrin profiililtaan kysyntään, koska tuotto painottuu päiväsaikaan, jolloin on yöaikaa enemmän sähkönkulutusta, ja kesäkuukausiin, jolloin aurinkovoiman tuotannon ollessa suurimmillaan tuulivoiman tuotanto on vähäisimmillään. Tuulivoiman kasvava tuotanto tulee silti syömään myös jonkin verran aurinkovoiman kannattavuutta kesäaikaan samoin, kun aurinkovoiman kasvava tuotanto tuulivoiman kannattavuutta. Vaikutuksen suuruutta ei vielä voi ennakoida ja sen vaikutus tulee riippumaan myös siitä, kuinka korkeaksi sähkön hinta muodostuu sähkömarkkinoilla pidemmällä aikavälillä.

Vesivoiman arvokerroin vuonna 2022 oli 1,14. Vesivoimaa on varastoaltaiden ja tekojärvien ansiosta helppo säädellä, joten sen tuotanto saadaan hyvin vastaamaan kulutusta. Lisäksi vesivoima on hyvää säätövoimaa säästä riippuvaisille tuotantomuodoille. Vesivoiman juoksutusta voidaan pienentää tuulisena aikana, jolloin sähkön hinta on alhainen ja vastaavasti juoksuuttaa silloin kun tuulivoimatuotantoa ei ole ja sähkön hintakin on mahdollisesti korkeampi. Voikin sanoa, että vesivoima ainakin jossain määrin hyötyy tuuli- ja aurinkovoiman kasvusta.

Ydinvoimaa on Suomessa paljon ja se on niin sanottua perusvoimaa. Ydinvoimassa polttoainekustannus on varsin pieni osa kokonaiskustannuksista, minkä takia niiden tuotantoa ei kannata juurikaan rajoittaa. Ydinvoimalat tuottavat tyypillisesti tasaisesti sähköä ympäri vuoden lukuun ottamatta lyhyitä huoltoseisakkeja kesäaikaan. Vuonna 2022 ydinvoimalat kattoivat 35 % Suomen sähköntuotannosta ja arvokerroin ydinvoimalle oli 0,98.

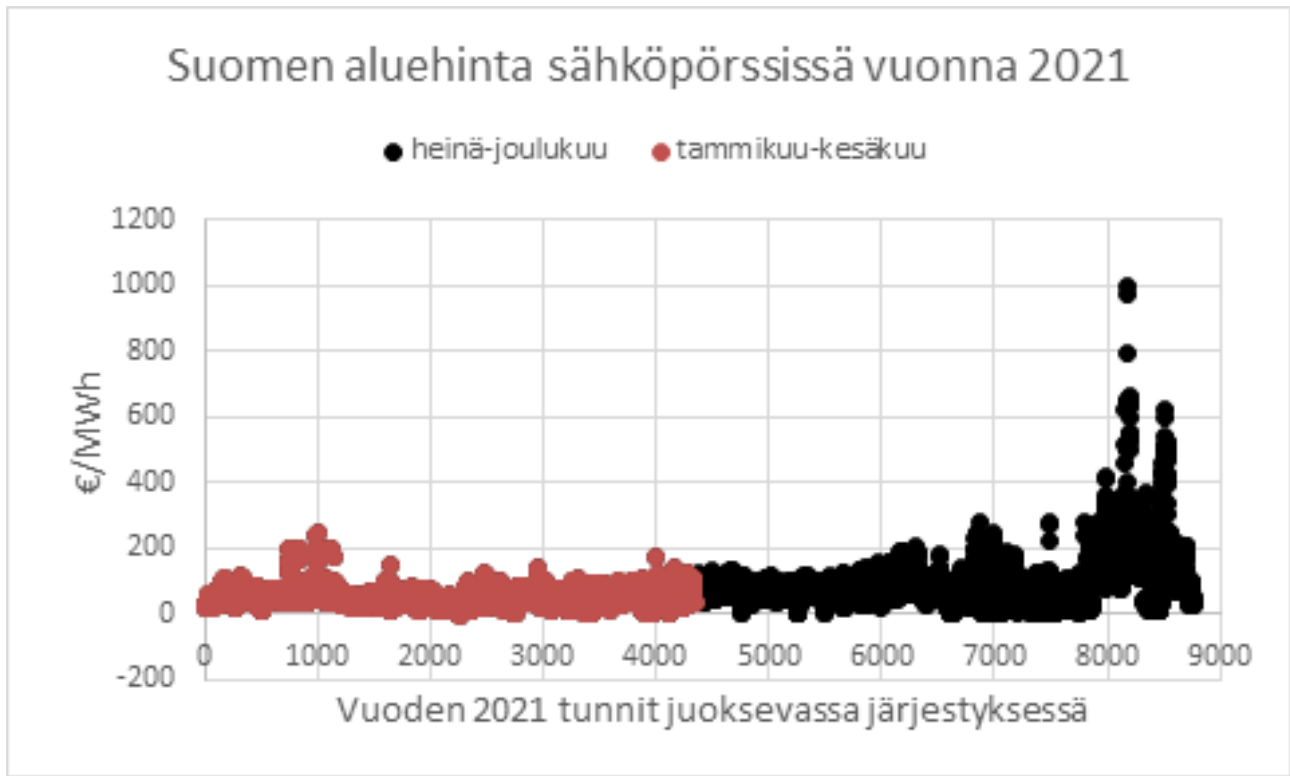


Eri lämpövoimaloiden sähköntuotannot vastaavat hyvin kysyntään. Ne tuottavat eniten sähköä silloin kun lämpövoimaa tarvitaan paljon. Samanaikaisesti sähköä kysytään myös lämmittämiseen paljon ja sähkön kokonaiskulutuskin on suurinta. Kaikilla eri lämpövoimaloiden sähköntuotantomuodoilla oli vuonna 2022 profiiliarvoa, arvokertoimien ollessa tuotantomuodosta riippuen 1,06–1,23.



KUVIO 11. Tuulivoiman arvokertoimet ja tuulivoimatuotanto 2018–2022, katkoviivat edustavat sovitus suoraa (mukaillen Entso-e 2023b; Energiateollisuus 2023c)

Tuulivoiman arvokerroin on pienentynyt viiden vuoden tarkastelujaksolla vuotta 2021 lukuun ottamatta joka vuosi seuraten lisääntyntä tuulivoimalla tuotetun sähkön markkina osuutta kuten kuviosta 11 käy ilmi. Lisääntyvä tuulivoimatuotanto näyttää siis lisäävään sen profiilikustannusta lähes samassa suhteessa. Vuoden 2021 poikkeama trendistä näyttää ainakin osin selittyvän Venäjän ”energia-aseen” käytöstä, minkä johdosta sähkön hinta nousi voimakkaasti vuoden 2021 jälkimmäisellä puoliskolla (KUVIO12). (Suokko 2023b.)



KUVIO 12. Sähkön tuntihinta vuonna 2021 (A. Suokko mukaillen Energiateollisuus ry:n keräämästä datasta)

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia tuulivoimalla tuotetun sähkön arvoa suhteessa muihin tuotantomuotoihin. Pääasiallinen tarkastelukohde työssä oli tuulivoiman profiilikustannukset ja niiden kehittyminen voimakkaan tuulivoiman lisärakentamisen myötä. Työn tulokset vahvistavat aikaisempia tutkimuksia, joissa on todettu tuulivoiman kasvavan markkinaosuuden syövän sen itsensä kannattavuutta, juuri profiilikustannusten kasvun takia.

Sähkön aluehinta Suomessa oli poikkeuksellisen korkea vuonna 2022, minkä takia eri sähköntuotantomuotojen euromääräiset hinnat eivät ole vertailukelpoisia edellisten vuosien hintoihin. Euromääräiset profiilikustannukset eivät suoraan ole verrannollisia edellisiin vuosiin, mutta arvokertoimet kertovat selvästi sen, miten tuulivoiman suhteellinen arvo on laskenut merkittävästi tuulivoimatuotannon kasvun myötä. Jos sähkön hinta palaa vuoden 2020 tasolle, on riskinä, että uusien tuulivoimapuistojen kannattavuus on uhattuna, jolloin investoinnit tuulivoimatuotantoon hiipuvat. Uusien tuulipuistojen investointipäätökset ovat vähentyneet viime aikoina Suomessa merkittävästi. Tämänkin opinnäytetyön esimerkkilaskelman mukaan tuulivoiman tuotantokustannuksista voi tehdä johtopäätöksiä, että uuden tuulivoiman rakentaminen ei välttämättä ole enää aina taloudellisesti kannattavaa.

Esimerkkilaskelmassa tuulivoiman tuotantokustannukseksi saatiin 33,6 €/MWh, ja arvokertoimen ollessa 0,7 se tarkoittaa, että keskimääräisen aluehinnan tulisi olla yli 48 €/MWh, jotta uuden maatuulivoiman rakentaminen olisi kannattavaa. Viimeisen viiden vuoden keskimääräinen volyyymilla painotettu sähkön aluehinta on ollut Suomessa 69,5 €/MWh. Jos ei ota huomioon poikkeuksellisen kallista vuotta 2022, niin vuosien 2018–2021 aikana keskihinta on ollut 48,5 €/MW, eli hyvin lähellä laskelmissa esiin tullutta kannattavuusrajaa.

Lähipuosina Suomen tuulivoimatuotanto tulee vielä kasvamaan merkittävästi jo rakenteilla tai investointipäätöksen saaneiden voimaloiden myötä. Jos tuulivoiman profiilikustannus jatkaa kasvuaan, kuten se viime vuodet on tehnyt tuulivoimatuotannon lisääntymisen mukana, uusien tuulivoimaloiden rakentamisen taloudellinen kannattavuus heikkenee entisestään. Tulevaisuudessa runsas tuulivoiman lisärakentaminen vaatisi Suomeen lisää sähkönkulutusta ja mielellään vielä sellaista, joka pystyisi sääntymään tuulivoiman tuotannon mukaan.

Tuulivoiman kannattavuus ei ole pelkästään sen systeemikustannusten ja sähköpörssin hintojen varassa. Tuulivoimatuottajan näkökulmasta PPA-sopimus takaa ennustettavan tulon jopa koko voimalan elinkaaren ajalle ja PPA-sopimusten myötä myös uusien tuulivoimaloiden rakentaminen voi olla taloudellisesti kannattavaa.

Opinnäytetyössä esitetyt laskelmat perustuvat avoimeen dataan eikä niiden perusteella voi tehdä varmoja johtopäätöksiä tuulivoiman kannattavuudesta. Esimerkiksi uuden voimalan investointikustannukset voivat vaihdella varsin paljon eri puistojen välillä ja näin vaikuttaen merkittävästikin sen kannattavuuteen. Tuulivoiman profiilikustannusten nousua ei kuitenkaan voi väheksyä tuulivoiman kannattavuutta tarkasteltaessa. Vuonna 2022 tuulivoimalla tuotetun sähkön arvo oli lähes 30 % heikompi suhteessa muuhun Suomessa tuotettuun sähkөөn. Jos trendi jatkuu samanlaisena tuulivoimatuotannon lisääntyessä, korostuu profiilikustannusten merkitys entisestään. Tuulivoimatuotanto ei ole ainakaan vielä merkittävästi syönyt muiden tuotantomuotojen tuotantoa, vaan sillä on saatu vähennettyä tuontisähkön osuutta, ja huomioitavaa viime vuosien kehityksessä on ollut se, että muiden sähköntuotantomuotojen suhteellinen arvo on kasvanut tuulivoimatuotannon kustannuksella.

## LÄHTEET

Byman K. 2023. *Tässä paikassa tuotetaan eniten aurinkoenergiaa koko Suomessa: pian samalta näyttää yhä useammissa paikoissa*. Saatavilla: <https://yle.fi/a/74-20039263>. Viitattu 14.9.2023.

Energiateollisuus. 2022a. *Sähkönkäyttö maakunnittain 2007–2021*. Saatavilla: [https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/sahkonkaytto\\_maakunnittain\\_2007-2021.html#material-view](https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/sahkonkaytto_maakunnittain_2007-2021.html#material-view). Viitattu 27.9.2023.

Energiateollisuus. 2023a. *Kuukaustilasto, elokuu 2023*. Saatavilla: [https://energia.fi/files/3922/pikati-lasto\\_kesakuu.pdf](https://energia.fi/files/3922/pikati-lasto_kesakuu.pdf). Viitattu 7.10.2023

Energiateollisuus. 2023b. *Meistä*. Saatavilla: <https://energia.fi/meista/>. Viitattu 1.10.2023

Energiateollisuus. 2023c. *Sähkön tuntidata*. Saatavilla: [https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/sahkon\\_tuntidata.html#material-view](https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/sahkon_tuntidata.html#material-view). Viitattu 1.10.2023.

Energiavirasto. 2022a. *Tehoreservi turvaa sähkön toimitusvarmuutta*. Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/-/tehoreservi-turvaa-sahkon-toimitusvarmuutta>. Viitattu 25.9.2023.

Energiavirasto 2022b. *Sähkön tehoreservin hankinta keskeytyy*. Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/-/sahkon-tehoreservin-hankinta-keskeytyy>. Viitattu 4.11.2023.

Energiavirasto. 2023a. *Aurinkosähkön pientuotanto kasvoi voimakkaasti vuonna 2022*. Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-pientuotanto-kasvoi-voimakkaasti-vuonna-2022>. Viitattu 14.9.2023.

Energiavirasto 2023b. *Tehoreservin määrä kaudelle 2023–2024*. Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12872579/P%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s+tehoreservin+m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4st%C3%A4+kaudelle+1.11.2023-31.10.2024.pdf/ecb924ee-669a-56ad-f09e-88c87b815593/P%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s+tehoreservin+m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4st%C3%A4+kaudelle+1.11.2023-31.10.2024.pdf?t=1682511619401>. Viitattu 4.11.2023.

Entso-e. 2023a. *Transparency platform*. Saatavilla: <https://transparency.entsoe.eu/>. Viitattu 1.10.2023.

Entso-e. 2023b. *ENTSO-E Mission Statement*. Saatavilla: <https://www.entsoe.eu/about/inside-entsoe/objectives/>. Viitattu 1.10.2023.

Fingrid. 2020a. *Sähkön spot-hinta käväisi pakkasella*. Saatavilla: <https://www.fingridlehti.fi/sahkon-spot-hinta-kavaisi-pakkasella/>. Viitattu 29.9.2023.

Fingrid. 2022a. *Pitkä yhteistyö on tullut tiensä päähän*. Saatavilla: <https://www.fingridlehti.fi/pitka-yhteistyö-on-tullut-tiensa-paahan/>. Viitattu 14.9.2023.

Fingrid. 2023a. *Merituuli- ja aurinkovoimalat vauhdinotossa*. Saatavilla: <https://www.fingridlehti.fi/merituuli-ja-aurinkovoimalat-vauhdinotossa/>. Viitattu 7.10.2023.

- Fingrid. 2023b. *Hyvä tietää sähkömarkkinoista*. Saatavilla: [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/uusi\\_versio\\_sahkomarkk.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/uusi_versio_sahkomarkk.pdf). Viitattu 23.9.2023.
- Fingrid. 2023c. *Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)*. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/#saatotarjoukset>. Viitattu 25.9.2023.
- Fingrid. 2023d. *Päivänsisäisten ja vuorokausimarkkinoiden kehityssuunta*. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/paivansisaisten-ja-vuorokausimarkkinoiden-kehityssuunta/>. Viitattu 27.9.2023.
- Fingrid. 2023e. *Varttitase eli 15 minuutin tase selvitysjakso*. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase/#taustaa>. Viitattu 25.9.2023.
- Fortum. 2023. *Ydinvoimalaitokset*. Saatavilla: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/energiantuotantomme/voimalaitoksemme/ydinvoimalaitokset>. Viitattu 21.9.2023.
- IEA. 2023. *Monthly Electricity Statistics*. Saatavilla: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/monthly-electricity-statistics>. Viitattu 29.9.2023.
- Motiva. 2023. *Vesivoima*. Saatavilla: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/vesivoima](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima). Viitattu 14.9.2023.
- Nordpool. 2023a. *About us*. Saatavilla: <https://www.nordpoolgroup.com/en/About-us/>. Viitattu 23.9.2023.
- Nordpool. 2023b. *Day-ahead overview*. Saatavilla: <https://www.nordpoolgroup.com/en/maps/#/nordic>. Viitattu 23.9.2023.
- STT info. 2022. *Glennmont Partnersin rahoittama Piiparinmäen tuulipuisto aloitti kaupallisen toiminnan*. Saatavilla: <https://www.sttinfo.fi/tiedote/69944720/glennmont-partnersin-rahoittama-piiparinmaen-tuulipuisto-aloitti-kaupallisen-toiminnan?publisherId=69819452>. Viitattu 7.10.2023.
- Suokko A. 2023. *Centria, Tuulivoimalat ja sähkömarkkinat – opintojakso*. Ei saatavilla verkossa.
- Suokko A. 2023b. *Centria, suullinen tiedonanto*.
- Tilastokeskus. 2022. *Pohjoismaisen pörssisähkön kuukausihinta kohosi ennätyskorkealle vuoden 2021 viimeisellä neljänneksellä*. Saatavilla: [https://www.stat.fi/til/ehi/2021/04/ehi\\_2021\\_04\\_2022-03-10\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/ehi/2021/04/ehi_2021_04_2022-03-10_tie_001_fi.html). Viitattu 3.10.2023.
- Tilastokeskus. 2023a. *Sähköntuotanto energialähteittäin ja kokonaiskulutus, 2000–2021*. Saatavilla: [https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_salatuo/statfin\\_salatuo\\_pxt\\_12b4.px](https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_salatuo/statfin_salatuo_pxt_12b4.px). Viitattu 13.9.2023.
- Tilastokeskus. 2023b. *Sähkön hankinta ja kokonaiskulutus, 1960–2022*. Saatavissa: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_ehk/statfin\\_ehk\\_pxt\\_12sv.px/table/table-ViewLayout1/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ehk/statfin_ehk_pxt_12sv.px/table/table-ViewLayout1/). Viitattu 14.9.2023.

Tilastokeskus. 2023c. *Sähkönhankinta energialähteittäin, 1990–2022*. Saatavissa: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_ ehk/statfin\\_ ehk\\_pxt\\_12vp.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ ehk/statfin_ ehk_pxt_12vp.px/). Viitattu 13.9.2023.

Tuulivoimayhdistys. 2019a. *Power purchase agreements – Pitkäaikaisetsähkönostosopimukset*. Saatavilla: [https://www.tuulivoimayhdistys.fi/media/sty\\_ppa\\_materiaalipaketti\\_final\\_20180211.pdf](https://www.tuulivoimayhdistys.fi/media/sty_ppa_materiaalipaketti_final_20180211.pdf). Viitattu 4.10.2023.

Tuulivoimayhdistys. 2019b. *Talvella tuulee eniten*. Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/talvella-tuulee-eniten>. Viitattu 2.10.2023.

Tuulivoimayhdistys. 2023a. *Tuulivoimatilastot 6/2023*. Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tilastot-2/tuulivoiman-rakentamisen-tahti-jatkuu-tasaisena-2>. Viitattu 13.9.2023.

Tuulivoimayhdistys. 2023b. *Tuulivoimavuosi 2022: Tuulivoimakapasiteetti kasvoi 75 % ja toi Suomeen yli 2,9 miljardin investoinnit*. Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimakapasiteetti-kasvoi-75-ja-toi-suomeen-yli-29-miljardin-investoinnit>. Viitattu 21.9.2023.

Tuulivoimayhdistys. 2023c. *Investoinnit*. Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/investoinnit>. Viitattu 27.9.2023.

Tuulivoimayhdistys. 2023d. *Tuulivoimatilastot 2022*. Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tilastot-2/tuulivoimatilastot-2022>. Viitattu 27.9.2023.

TVO. 2023. *Laitosyksiköt*. Saatavilla: <https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot.html>. Viitattu 21.9.2023.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2023a. *Tuettavat hankkeet ja tuen enimmäismäärät*. Saatavilla: <https://tem.fi/tuettavat-hankkeet>. Viitattu 14.9.2023.

Työ- ja elinkeinoministeriä. 2023b. *Sähkömarkkinat*. Saatavilla: <https://tem.fi/sahkomarkkinat>. Viitattu 23.9.2023.

Vakkilainen E. & Kivistö A. 2017. *Sähkön tuotantokustannusvertailu*. Saatavilla: <https://lut-pub.lut.fi/handle/10024/143861>. Viitattu 27.9.2023.

Vihanta A. 2023. *Tuulivoimarakentamisen kulta-aika on ohi: Suurin kysyntä on tyydytetty ja uudet investoinnit jäissä*. Saatavilla: <https://yle.fi/a/74-20048410>. Viitattu 21.9.2023.

WindEurope. 2021. *Wind energy in Europe, 2021 statistics and outlook for 2022-2026*. Saatavilla: [https://proceedings.windeurope.org/biplatform/rails/active\\_storage/blobs/eyJfcmFpbHMiOnsi-bWVze2FnZSI6IkJBaHBBbFFFEIwiZXhwIjpudWxsLCJwdXliOiJibG9iX2lkIn19--f507a22c9854863e01fd427239f10167d031cc66/Windeurope-Wind-energy-in-Europe-2021-statistics.pdf](https://proceedings.windeurope.org/biplatform/rails/active_storage/blobs/eyJfcmFpbHMiOnsi-bWVze2FnZSI6IkJBaHBBbFFFEIwiZXhwIjpudWxsLCJwdXliOiJibG9iX2lkIn19--f507a22c9854863e01fd427239f10167d031cc66/Windeurope-Wind-energy-in-Europe-2021-statistics.pdf). Viitattu 27.9.2023.

