Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Master's programme in Advanced Energy Solutions

Hintakannibalisaatio suomalaisessa tuulivoimassa: Sijainnin vaikutus tuulivoimalla tuotetun sähkön hintaan

---

Veera Hatulainen

Diplomityö
2025

Copyright ©2025 Veera Hatulainen

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Tekijä Veera Hatulainen

Työn nimi Hintakannibalisaatio suomalaisessa tuulivoimassa: Sijainnin vaikutus tuulivoimalla tuotetun sähkön hintaan

Koulutusohjelma Master's Programme in Advanced Energy Solutions

Pääaine Sustainable Energy Conversion Processes

Vastuuopettaja/valvoja Prof. Ville Vuorinen

Työn ohjaaja(t) FM Riku Suutari

Yhteistyötaho AFRY Finland Oy

Päivämäärä 28.04.2025 **Sivumäärä** 55 **Kieli** suomi

Tiivistelmä

Tämä tutkimus käsittelee sähkön hinnan kannibalisaatioilmiötä suomalaisessa tuulivoimassa. Kannibalisaatioilmiöksi kutsutaan tilannetta, jossa tuulivoima tai muu sääriippuvainen sähköntuotantomuoto tuottaa paljon sähköä samanaikaisesti, jonka seurauksena sähkön hinta on alhainen ja siitä saatava tulo jää pieneksi. Vuonna 2024 Suomessa oli 8358 megawattia tuulivoimaa. Suurin osa siitä on rakennettu Länsi-Suomeen Pohjois-Pohjanmaalle, Pohjanmaalle ja Etelä-Pohjanmaalle. Hankekehittäjillä on ollut kasvavaa kiinnostusta rakentaa tuulivoimaa myös muualle Suomeen, kuten Lappiin ja Itä-Suomeen.

Tässä työssä selvitettiin, millainen vaikutus tuulivoiman sijainnilla suhteessa tuulivoimatiheimpään alueeseen on kannibalisaatioilmiön esiintymiseen ja voisiko vähemmän tuulivoimatiheälle alueelle sijoitettu hanke välttyä kannibalisaatiolta kokonaan tai merkittäviltä osin. Työssä mallinnettiin yksi V172-7.2MW tuulivoimala 18 tarkastelupaikalle käyttäen windPRO-ohjelmistoa. Tarkasteluvuotena käytettiin vuotta 2024, jolla olemassa olevan tuulivoiman osuus sähkön tuotannosta oli suurimmillaan, 24 % kaikesta sähköntuotannosta.

Kunkin tarkastelukohteen mallinnetun tuotannon ajallinen vaihtelu kerrottiin sen hetken sähkönhinnalla ja se tulo jaettiin kohteen kokonaistuotannolla siten, että saatiin tuotetun sähkön keskihinta (nk. Capture price). Näitä hintoja verrattiin toisiinsa ja sähkön tukkuhinnan keskiarvoon.

Tuotetun sähkön keskihinta oli alimmillaan Länsi-Suomen tuulivoimatiheimmällä alueella. Matalin hinta oli pohjoiseen Keski-Suomeen Pihtiputaalle sijoitetulla tarkastelukohteella. Korkeimmat hinnat olivat Etelä-Suomessa, Lapissa ja Kainuussa. Matalimman hinnan ja korkeimman hinnan ero oli 36,3 prosenttia. Kaikkien tarkastelukohteiden hinnat jäivät alle tukkuhinnan keskiarvon eli kannibalisaatio vaikuttaa jossain määrin koko Suomen alueen tuulivoimatuotantoon. Matalimman hinnan tarkastelukohteen ja muiden tarkastelukohteiden välille laskettiin lisäksi tuotannon korrelaatio. Korrelaatio oli vahva (yli 0,7) alle ja noin 200 km etäisyyksillä ja väheni etäisyyden kasvaessa.

Avainsanat tuulivoima, hintakannibalisaatio, capture price

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Author Veera Hatulainen

Title of thesis Profit cannibalization in Finnish wind power: The impact of location on the price of electricity produced by wind turbines

Programme Master's Programme in Advanced Energy Solutions

Major Sustainable Energy Conversion Processes

Thesis supervisor Prof. Ville Vuorinen

Thesis advisor(s) Riku Suutari, MSc.

Collaborative partner AFRY Finland Oy

Date 28.04.2025 **Number of pages** 55 **Language** Finnish

Abstract

This thesis addresses the phenomenon of profit cannibalization in Finnish wind power. The profit cannibalization refers to a situation where wind power or other weather-dependent electricity production generates so much electricity simultaneously that the price of electricity is very low, and the resulting profit is very small.

In 2024, Finland had 8358 megawatts of wind power. Most of it is in Western Finland, in Northern Ostrobothnia, Ostrobothnia and Southern Ostrobothnia. Project developers have shown increasing interest in building wind power in other parts of Finland, such as Lapland and Eastern Finland. This study investigated the impact of the location of wind power relative to the densest wind power on the occurrence of the cannibalization and whether a project located in a less dense wind power area could avoid cannibalization entirely or to a large extent. In the study, one V172-7.2MW wind turbine was modelled at 18 calculation points using the windPRO software. The year 2024 was used as the reference year, during which the share of existing wind power in electricity production was the highest, 24 percent of all electricity production. The temporal variation of the modelled production at each calculation point was multiplied by the electricity price at that moment, and the income was divided by the total yearly production of the point to obtain the weighted average price of electricity, known as the capture price. These prices were compared to each other and to the average wholesale price of electricity.

The capture price was lowest in the densest wind power area of Western Finland. The lowest price was calculated at the point located in Pihtipudas, Northern Central Finland. The highest capture prices were in Southern Finland, Lapland and Kainuu. The difference between the lowest and highest capture prices was 36,3 percent. The capture price at all calculation points were below the average wholesale price, meaning that cannibalization was observed at all points. Additionally, the correlation of production between the lowest capture price calculation point and other points was calculated. The correlation was strong (over 0,7) at distances up to and around 200 km and decreased as the distance increased.

Keywords wind power, profit cannibalization, capture price

Sisällys

Esipuhe 7
Symbolit ja lyhenteet 8
Symbolit 8
Lyhenteet 8
1 Johdanto 9
2 Taustaselvitys 11
2.1 Ilmastotavoitteet 11
2.2 Tuulisuus 12
2.3 Tuulivoimatekniikka 16
2.4 Tuulivoima Suomessa 17
2.4.1 Tuulivoiman hankekehitys 20
2.4.2 Syöttötariffi ja teknologianeutraali tarjouskilpailu 21
2.4.3 Tuulivoiman tuotantokustannukset ja kulurakenne 23
2.4.4 PPA-sopimukset 24
2.5 Sähkömarkkina Suomessa 25
2.5.1 Markkinapaikat 25
2.5.2 Sähkön kulutus ja hinnan vaihtelu 27
2.6 Hintakannibalisaatioilmiö 28
3 Tutkimusaineisto ja -metodit 31
3.1 Tarkastelukohteet 31
3.2 Tuotantolaskelmamenetelmä 33
3.2.1 Tuotantoestimaattien vahvistaminen toteutunutta sähköntuotantoa vastaan 35
3.3 Kannibalisaation arviointimenetelmä 36
3.4 Tuotannon ajallisen vaihtelun arviointi 36
4 Tulokset 37
4.1 Tuotantotehoestimaatit 37
4.1.1 Tuotantoestimaattien vahvistaminen toteutunutta sähköntuotantoa vastaan 39
4.2 Paikkakohtaiset sähkön keskihinnat 40
4.2.1 Keskihintojen vaihtelun suuruus 43
4.3 Tuotannon ajallinen vaihtelu 45

5 Johtopäätökset 47
Lähteet 49
1 Lähdeluettelo 49

Esipuhe

Haluan kiittää professori Ville Vuorista ja ohjaajani Riku Suutaria neuvoista ja ohjauksesta, jotka auttoivat tämän opinnäytteen sisällössä ja aikataulussa pysymisessä.
Kiitos myös nykyisille ja entisille työkavereille kannustuksesta opinnoissa ja kiinnostavista keskusteluista tuulivoimasta ja muista energian tuotantomuodoista.

Espoossa 30.4.2025
Veera Hatulainen

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

μ	sähköntuotannon keskiarvo
σ	keskihajonta

Lyhenteet

EU	Euroopan Unioni
ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
LCOE	Levelized cost of energy, sähkön tuotantohinta
MWh	megawattitunti
PPA	Power purchase agreement, sähkön suoraostosopimus
TWh	terawattitunti
YK	Yhdistyneet kansakunnat
YVA	ympäristövaikutusten arviointi

1 Johdanto

Tämä opinnäyte tarkastelee sähkön hinnan kannibalisaatioilmiötä tuulivoiman suhteen ja sitä onko tuulivoimantuotannon sijainnilla Suomen sisällä vaikutusta kannibalisaatioilmiön voimakkuuteen. Sähkön hinnan kannibalisaatioksi kutsutaan sitä, kun sääriippuvainen sähköntuotantomuoto, kuten tuulivoima, tuottaa suotuisella säällä niin paljon sähköä, että runsaan tuotannon seurauksena sähkön hinta putoaa hyvin matalalle ja sähkön myynnistä tuleva tuotto jää alhaiseksi. Ilmiötä kutsutaan kannibalisaatioksi, koska tuotanto itse ikään kuin syö siitä saatavan tulon. Kannibalisaatioilmiö vähentää tuulivoimainvestointien kannattavuutta, ja saattaa siten hidastaa tai jopa estää uusien tuulipuistojen rakentamista. Tämä puolestaan saattaa vaikeuttaa ilmastotavoitteiden toteutumista.
Tuulivoimaa on viime vuosina rakennettu Suomeen runsaasti ja suurin osa siitä sijaitsee maan länsirannalla. Tuulivoimatoimijat ovat kiinnostuneet rakentamaan tuulivoimaa enemmissä määrin myös muualle Suomeen ja kiinnostavaa onkin, onko tuulivoiman sijainnilla vaikutusta kannibalisaatioilmiön esiintymiseen. Erityisesti keskustelua on ollut tuulivoiman rakentamisesta Itä-Suomeen, jonne toistaiseksi on sijoittunut vähän tuulivoimaa johtuen Puolustusvoimien aluevalvonnan tarpeista. Aluevalvonta eli tutkat ovat käytännössä estäneet tuulivoiman rakentamisen Itä-Suomeen, sillä tuulivoimalat aiheuttavat tutkille katvealueita ja heijastuksia ja siten häiritsevät aluevalvontaa. Itä-Suomen hyödyntäminen tuulivoimantuotantoon on haastavaa myös siksi, että sähköverkko on Itä-Suomessa heikko, eikä siellä olisi välttämättä riittävää siirtokapasiteettia tuulivoiman merkittävälle rakentamiselle.
Oletus on, että tuulisuus ja siten tuulivoiman tuotanto olisi ainakin jossain määrin eri aikaista eri alueilla Suomessa. Tässä opinnäytteessä selvitetään pitääkö tämä paikkansa ja voisiko tuulipuisto Itä-Suomessa, Etelä-Suomessa tai Lapissa välttyä sähkön matalimmilta tai jopa negatiivisilta hinnoilta ja siten olla näillä alueilla kannattavampaa kuin länsirannikolle sijoittuva tuulivoimatuotanto. Tämän opinnäytteen tutkimustavoitteet ovat:

- Selvittää taustatiedot tuulivoimasta Suomessa ja sähkön kannibalisaatioilmiöstä
- Selvittää sähkön kannibalisaatioilmiön voimakkuuden vaihtelu Suomen alueella
- Selvittää sähköntuotannon ajallista vaihtelua tarkastelukohteiden välillä
- Arvioida uuden tuulivoimatuotannon investointimahdollisuuksia

Tuulisuutta ja tuotantoa tarkastellaan tekemällä laskennallinen arvio sähköntuotannosta valitulla voimalalla eri puolilta Suomea valituissa tarkastelupaikoissa. Tuotanto mallinnetaan vuoden 2024 sääaineiston perusteella. Mallinnustuloksia verrataan toisiinsa sekä sähkön Day-ahead spot -hintaan

vastaavalta ajankohdalta. Sijantien paremmuutta toisiinsa verrataan käyttämällä apuna tuotetun sähkön keskihintaa (nk. Capture price). Mallinnukset rajataan vuoteen 2024 siksi, että silloin tuulivoiman määrä Suomessa on suurimmillaan historiassa ja siten myös tuulivoiman vaikutus sähkön hintaan on suurimmillaan. Matalimman hinnan tarkastelukohteen ajallista yhtenevyyttä muihin tarkastelukohteisiin arvioidaan korrelaation avulla ja johtopäätöksiä vedetään korrelaation voimakkuudesta suhteessa kohteiden välisiin etäisyyksiin.

Tämä opinnäyte koostuu taustaselvityksestä, tutkimusaineistojen ja metodien kuvauksesta, tuloksista ja johtopäätöksistä. Taustaselvityksessä perehdytään Suomen ilmastotavoitteisiin, tuulisuuteen ilmiönä, tuulivoimatekniikkaan, tuulivoiman historiaan ja nykytilaan Suomessa, sähkömarkkinoihin ja kannibalisaatioilmiöön. Tutkimusaineistossa ja metodeissa esitellään tarkemmin lähtötiedot ja mallinnuksien metodit. Tuloksissa esitellään mallinnusten tulokset ja verrataan eri alueille sijoittuneita tarkastelukohteita keskenään käyttäen apuna sähkön hinnan vaihtelua eri ajankohtina. Johtopäätöksissä tehdään päätelmiä mallinnuksista ja taustaselvityksestä tutkimustavoitteiden pohjalta.

2 Taustaselvitys

Tämän taustaselvityksen tarkoituksena on antaa kuva siitä, millaiset asiat ovat vaikuttaneet tuulivoiman rakentamiseen Suomeen historiassa ja mitkä asiat kannustavat rakentamaan lisää tuulivoimaa tulevaisuudessa.
Ilmastotavoitteiden esittelyn tarkoituksena on tuoda isomman kuvan kontekstia ja motivaatiota aiheeseen. Tuulisuutta ja tuulivoimatekniikkaa käsitellään, jotta lukija ymmärtää niiden yhteyden tuulivoiman kannattavuuteen. Tuulivoiman historian, kuten tariffi- ja preemiojärjestelmän kuvauksella, pyritään antamaan taustatietoa tuulivoimalla tuotetun sähkön hinnan kehityksestä. Tuulivoiman nykytilan kuvauksella pyritään tuomaan esille tuulivoiman syyt tuulivoimaloiden nykyiseen sijaintiin ja hankekehityksessä olevien tuulipuistojen sijantiin. PPA-sopimusten, hankekehityksen ja sähkömarkkinoiden kuvauksen tarkoituksena on avata tuulivoimatuotannon kannattavuuteen ja sähkön hinnan muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä. Tuulisähkön tuotantokustannuksiin tutustutaan, jotta kannibalisaatiovaikutuksen merkittävyyttä suhteessa tuotantokustannuksiin voidaan arvioida myöhemmin johtopäätöksissä. Lisäksi taustaselvityksessä esitellään kannibalisaatioilmiö ja tutustutaan sitä käsittelevään tieteelliseen tutkimukseen, jotta ymmärretään miten ja miksi ilmiötä esiintyy sekä kuinka laajasta ilmiöstä on kyse.

2.1 Ilmastotavoitteet

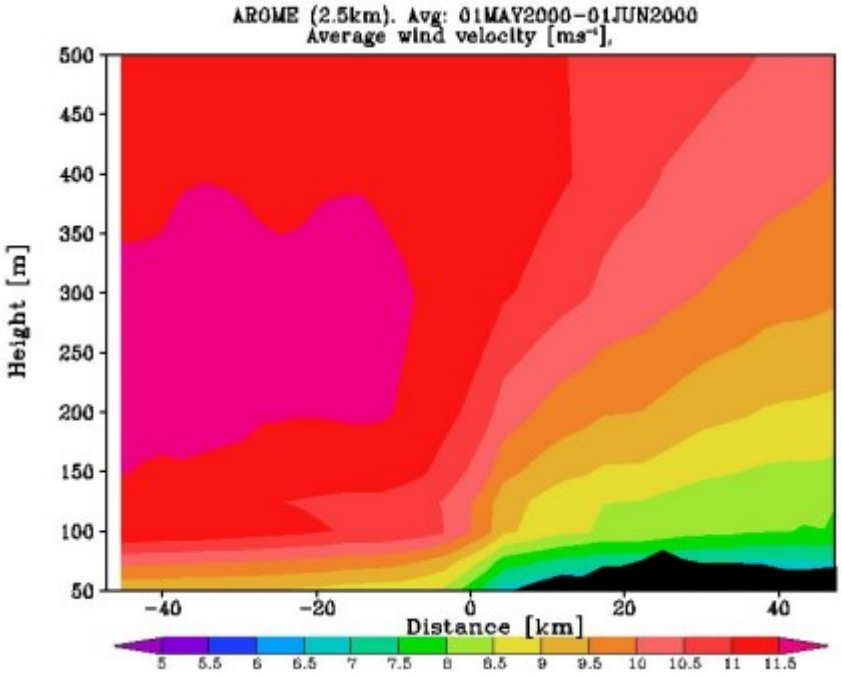
Yhtenä tuulivoiman rakentamisen motivaattorina on ilmastotavoitteiden saavuttaminen. Suomella on noudatettavanaan sekä omat kansalliset, että Euroopan Unionin asettamat ilmastotavoitteet. EU on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasujen nettopäästöään vähintään 55 prosentilla vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasosta. EU tavoittelee myös ilmastoneutraaliutta vuoteen 2050 mennessä, mikä tarkoittaa sitä, että EU:n lainsäädännössä säännellyt päästöt ja poistumat ovat tasapainossa vuoteen 2050 mennessä. EU:n ilmastopolitiikka perustuu YK:n ilmastosopimukseen, sitä täydentäviin Kioton pöytäkirjaan ja Pariisin ilmastosopimukseen. (Ympäristöministeriö, 2025a)
Suomen ilmastopolitiikka pohjaa ilmastolakiin, jossa on määritetty päästövähennystavoitteet vuosille 2030, 2040 ja 2050. Päästövähennystavoitteet ovat -60 % vuoteen 2030 mennessä, -80 % vuoteen 2040 mennessä ja -90 % (pyrkien kuitenkin -95 %) vuoteen 2050 mennessä verrattuna 1990 tasoon. Lisäksi lakiin on kirjattu, että Suomen on oltava ilmastoneutraali viimeistään vuoteen 2035 mennessä. (Ympäristöministeriö, 2025b)
Kasvihuonepäästöjen vähentämiseen liittyvät tavoitteet on jaettu kolmeen eri sektoriin; päästökauppasektori, taakanjakosektori ja maankäyttösektori (Ympäristöministeriö, 2025a). Päästökauppasektoriin kuuluvat suuret teollisuus- ja energiantuotantolaitokset sekä Euroopan sisäinen lentoliikenne. Päästökauppasektorin päästövähennyksiä ohjataan

päästökauppajärjestelmän kautta. Päästökauppasektorin osuus Suomen kokonaispäästöistä vuonna 2023 oli 38 %. Sen päästöt vähenivät 19 % edellisvuodesta. Päästöt vähenivät erityisesti, koska kivihiilen kulutus puolittui ja turpeen kulutus laski merkittävästi. Tilalle tuli tuulivoimaa ja ydinvoimaa. Taakanjakosektoriin kuuluvat päästökauppasektorin ulkopuoliset sektorit, kuten liikenne, maatalous, rakennusten erillislämmitys, jätehuolto, työkoneet, fluoratut kasvihuonekaasut ja päästökaupan ulkopuoliset pienet teollisuus- ja lämpölaitokset. Taakanjakosektorilla on suurin osuus Suomen päästöistä, 62 %. Sen suurimmat päästölähteet ovat liikenne ja maatalous. Vuonna 2023 taakanjakosektorin päästöt laskivat 5 % edellisestä vuodesta. Maankäyttösektori koostuu kuudesta maankäyttöluokasta: metsämaasta, viljelysmaasta, ruohikkoalueista, kosteikoista, rakennetusta alueesta ja muusta maasta sekä puutuotevarastosta. Maankäyttösektori on ollut päästölähde useana vuotena johtuen pienentyneistä metsien hiilinieluista. (Ympäristöministeriö, 2024)
Kunnat saattavat lisäksi asettaa omia ilmastotavoitteitaan. Niin kutsutut Hinku-kunnat ovat sitoutuneet tavoittelemaan 80 % päästövähennystä vuoteen 2030 mennessä vuoden 2007 tasosta. Suomessa on 99 Hinku-kuntaa. (Hiilineutraalisuomi.fi, 2024) Uudella tuulivoimalla mahdollistetaan ilmastotavoitteiden saavuttaminen sekä kunnallisella, kansallisella, että EU:n tasolla.

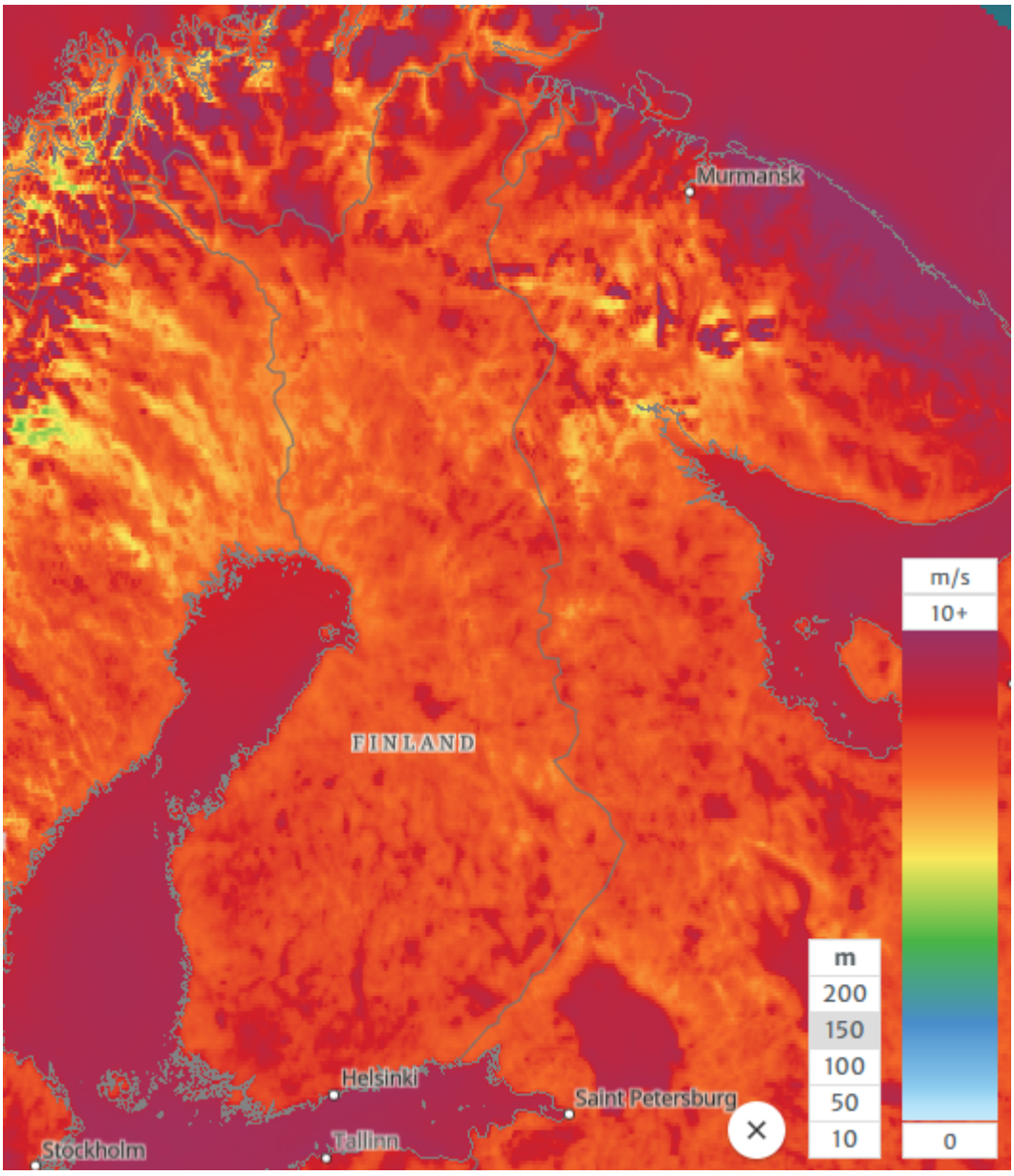
2.2 Tuulisuus

Tuulisuus on yksi määrittävä tekijä tuulipuiston kannattavuudesta. Mitä parempi tuulisuus hankealueella on, sitä todennäköisemmin hanke etenee toteutukseen. Tuulesta saatavan energian määrä riippuu turbiinin koosta ja sen lapojen pituudesta. Tuotanto on verrannollinen roottorin mittoihin ja tuulen nopeuden kuutioon. Teoreettisesti, kun tuulen nopeus kaksinkertaistuu, tuulivoiman potentiaali kasvaa kahdeksankertaiseksi. (IRENA, 2025)
Tuuli muodostuu ilmanpaineen vaihtelusta. Mitä nopeammin ilmanpaine muuttuu, sitä nopeammin tuulee. Tuuli virtaa korkeapainealueelta kohti matalapainetta. (Ilmatieteenlaitos, 2025) Tuulivoimaloiden tuotantokorkeudella talvella tuulee eniten ja kesällä vähiten. Suomessa noin kilometrin korkeudella oleva keskimääräinen tuulennopeus on verrattain suuri 9–9,5 km/s. Se on huomattavasti suurempi kuin eteläisemmässä Euroopassa (7–8,5 m/s), mutta vähemmän kuin lähempänä pohjoista Atlanttia sijaitsevilla alueilla kuten Brittien saarilla, Norjan rannikolla tai Tanskassa (10,5–11,5 m/s). (Ilmatieteen laitos, 2010)
Tuulisuus pienenee maanpintaa kohti tullessa, johtuen muun muassa maaston korkeuseroista, peitteisyydestä ja ilman termisestä tasapainotilasta. Maaston rosoisuus eroaa merkittävästi merellä, rannikolla ja maalla. Yleisesti ottaen tuuliolosuhteet ovat avomerellä paremmat kuin rannalla tai sisämaassa. Kuva 2-1 ilmenee, miten tuulisuus heikkenee siirryttäessä mereltä maalle. (Ilmatieteen laitos, 2010) Tuulisuus vaihtelee Suomessa maalla noin

6,5–8,5 m/s välillä 150 metrin korkeudella maanpinnasta (Global Wind Atlas, 2025). Tuulisuuden jakautuminen Suomessa on esitettynä kartalla (Kuva 2-2).



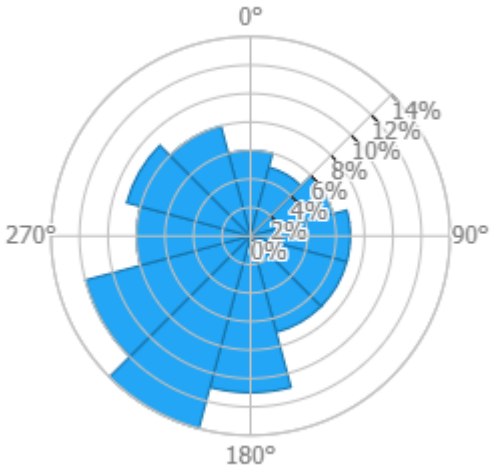
Kuva 2-1: Tuulen nopeuden jakautuminen rannikolla, Oulu toukokuu 2000. (Ilmatieteen laitos, 2010)



Kuva 2-2: Tuulisuus 150 metrin korkeudella Suomessa (Global Wind Atlas, 2025).

Tuulisuutta voidaan alustavasti arvioida erilaisten tuuliatlasten, kuten kuvassa (Kuva 2-2) edellä, ja säämallien avulla. Todellinen tuulisuus suunniteltavan tuulipuiston sijainnilta on kuitenkin varmistettava luotettavin tuulimittauksin. Tuulisuutta mitataan 1–2 vuoden mittauskampanjalla suunniteltavan tuulivoimapuiston paikalta. Mittaus tehdään mahdollisimman läheltä suunniteltavan tuulivoimalan napakorkeutta, tällä hetkellä noin 160–200 metrin korkeudesta. Mittauksella tavoitellaan vähintään vuoden mittaista aukotonta tuulisuustietoa, josta voidaan arvioida luotettavasti alueen tuulisuusresurssi. Luetettava mittauskampanja on välttämätön

tuulivoimapuiston odotettavissa olevan tuotannon luotettavaan arviointiin ja rahoituksen saamiseksi.
Tuulisuus on jossain määrin eriaikaista eri puolilla Suomea. Tuulisuuden ja tuulivoiman tuotannon ajallista jakautumista eri sijainneille on tutkittu muun muassa Hannele Holttisen toimesta vuonna 2005. Holttisen tutkimuksen mukaan tuulivoiman tuotanto korreloi kahden sijainnin välillä suuresti (korrelaatio yli 0,7), kun etäisyys pisteiden välillä on alle 100 km ja heikkenee (alle 0,5) kun etäisyys pisteiden välillä kasvaa 200–500 km (Holttinen, 2005).
Tuulisuus esitetään usein Weibull-jakaumana tai tuuliruusuna. Weibull-jakauma kuvaa tuulennopeuden todennäköisyyden jakaumaa. Weibull-jakaumaa ja tuuliruusua käytetään avuksi estimoitaessa tuulivoimaloiden tehokäyrän mukaista energiantuotantoa. Tuuliruusu esittää tuulen suunnan todennäköisyyttä. Tuuliruusua ja siitä tulkittavaa päätuulensuuntaa käytetään hyväksi tuulipuiston sijoittelusuunnitelmaa tehtäessä. Tuuliruusu Etelä-Suomesta on esitettynä kuvassa alla (Kuva 2-3). Lounas on tyypillinen päätuulensuunta Suomessa.

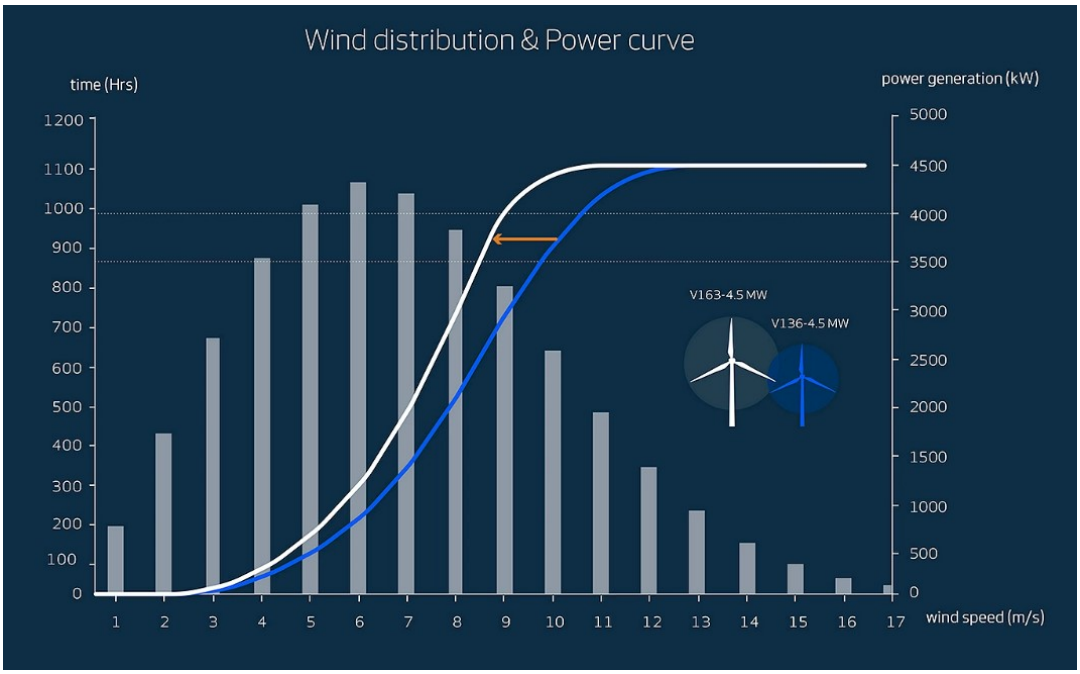


Kuva 2-3: Tuuliruusu Etelä-Suomesta (Global Wind Atlas, 2025).
Tuulivoimala siirtää tuulen energiaa sähköksi ja samalla hidastaa sen nopeutta. Samalla tuulivoimala synnyttää turbulenssia ilmavirtaukseen ja siksi alatuulessa oleva voimala saa tuulesta pienemmän tuuliresurssin. Tätä kutsutaan vanahäviöksi. Vanahäviön vaikutusta tuulipuistossa pyritään vähentämään sillä, että tuulivoimalat on sijoitettu riittävän kauaksi toisistaan, jolloin tuulen nopeus ehtii palautua riittävästi ennen seuraavaa tuulivoimalaa. Tuotannollisista syistä etäisyys kahden tuulivoimalan välillä asetetaan pidemmäksi päätuulensuunnassa, kuin muissa tuulensuunnissa.

2.3 Tuulivoimatekniikka

Tuulivoimala muuttaa tuulen sähköksi roottorin ja generaattorin avulla. Jokaisella tuulivoimalalla on tehokäyrä, joka kertoo kuinka suurella teholla milläkin tuulen nopeudella tuulivoimala tuottaa energiaa. Tuulisuusjakauma kerrottuna tuulivoimalan tehokäyrällä kertoo odotusarvoisen tuotantotehon kyseisessä tuuliolosuhteessa. Tuulivoimala alkaa tyypillisesti tuottaa sähköä, kun tuulennopeus on enemmän kuin 3 m/s ja pysähtyy turvallisuussyistä, kun tuulennopeus on yli 25 m/s. Näitä kutsutaan ”cut-in” ja ”cut-out” tuulennopeuksiksi. Tuulivoimala tuottaa sähköä nimellisteholla, kun tuulen nopeus on 10-15 m/s. (Suomen Uusiutuvat ry, 2025g)

Tuulivoimatekniikkaa on tuotekehitetty siten, että uudet tuulivoimalat ovat korkeampia kuin vanhat, jolloin niiden on mahdollista saada parempi tuuliresurssi etäämmällä maanpinnan virtausta jarruttavasta vaikutuksesta. Vuonna 2024 uusien tuulivoimaloiden keskimääräinen napakorkeus oli yli 150 metriä (Suomen Uusiutuvat ry, 2025c). Samaan aikaan tuulivoimaloiden roottorien halkaisija on kasvanut. Vuonna 2024 uusien rakennettujen tuulivoimaloiden keskimääräinen roottorin halkaisija oli yli 160 metriä (Suomen Uusiutuvat ry, 2025c). Isompi roottorin halkaisija saa energiaa suuremmasta ilmavolyymista ja siten mahdollistaa suuremman tuotannon, parantaen erityisesti matalimmilta tuulennopeuksilta saatavaa tuotantoa. Kuvassa (Kuva 2-4) on esitettynä kahden Vestaksen 4,5 MW tehoisen tuulivoimalan tehokäyrä tuulisuuden jakauman päällä. Kuvasta on havaittavissa kuinka isommalla roottorilla varustettu V163, roottori 163 metriä halkaisijaltaan, saa paremman tuotantotehon pienemmillä tuulennopeuksilla kuin V136, jonka roottorin halkaisija on 136 metriä.

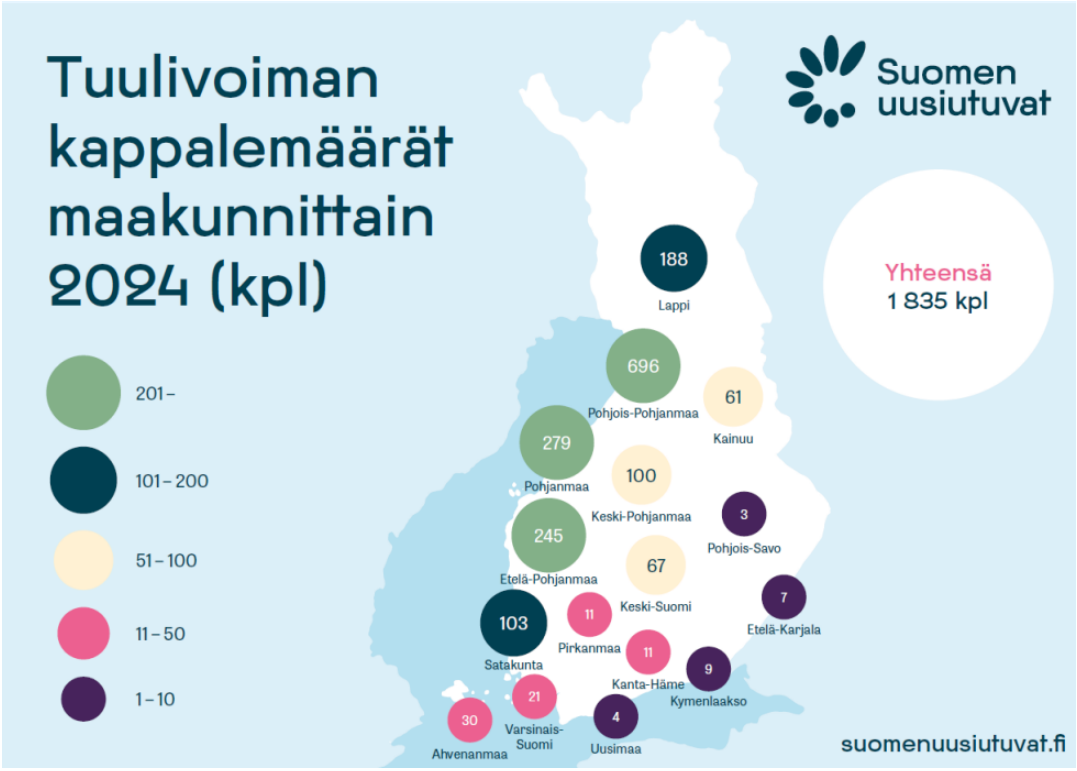


Kuva 2-4: V163-4.5MW ja V136-4.5MW voimaloiden tehokäyrät tuulisuusjakauman päällä (Vestas Wind Systems A/S, 2023).

Vuonna 2016 asennettujen tuulivoimaloiden keskimääräinen nimellisteho on ollut noin 3 MW, kun taas vuonna 2024 asennetun tuulivoiman keskimääräinen teho on ollut noin 6 MW (Suomen Uusiutuvat ry, 2025c). Tuulivoimalan tyypillinen kapasiteetti on siis kaksinkertaistunut vajaassa kymmenessä vuodessa. Tuulivoimalan tai tuulipuiston kannattavuutta arvioidaan joko huippukäyttötuntien tai kapasiteettikertoimen avulla. Huipunkäyttöaika tarkoittaa sitä aikaa, jossa tuulivoimala tuottaisi vuosituotantonsa, mikäli tuulivoimala tuottaisi koko ajan täydellä teholla. Hyvätuulisella sijainnilla olevan maatuulipuiston huipunkäyttöaika on 3000-4000 tuntia vuodessa. Kapasiteettikerroin on huipunkäyttöaika suhteessa vuoden tunteihin eli huipunkäyttöajan prosentuaalinen esitys. (Suomen uusiutuvat ry, 2025h)

2.4 Tuulivoima Suomessa

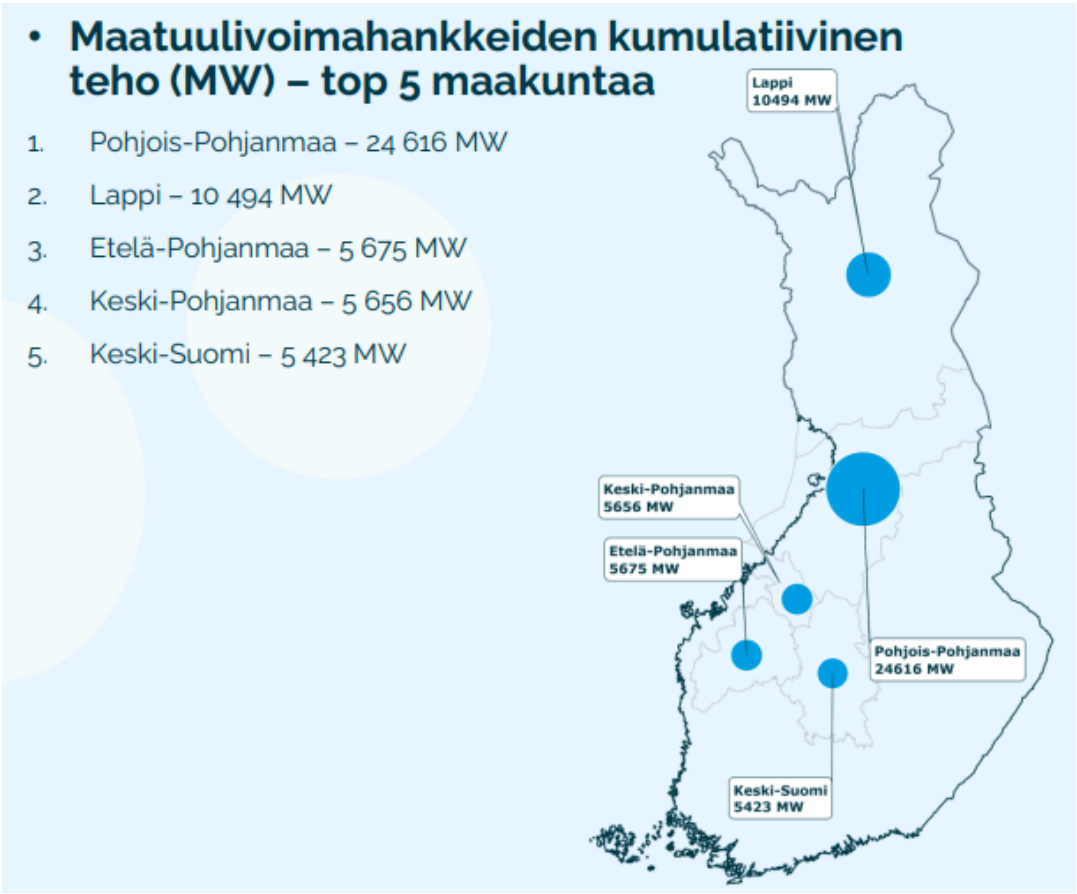
Suomessa on vuoden 2024 lopussa käytössä 8358 megawattia tuulivoimakapasiteettia, joka koostuu 1835 tuulivoimalasta. Siitä 1414 megawattia valmistui vuonna 2024. Tuulivoiman rakentaminen on painottunut Länsi-Suomeen ja eniten tuulivoimaa on Pohjois-Pohjanmaan maakunnassa, jossa sijaitsee 40 prosenttia kaikesta Suomen tuulivoimasta eli 696 tuulivoimalaa. Toiseksi eniten tuulivoimaa on Pohjanmaan (279 tuulivoimala) ja Etelä-Pohjanmaan (245 tuulivoimalaa) maakunnissa. (Suomen Uusiutuvat ry, 2025a) Tuulivoimaloiden kappalemäärät maakunnittain vuonna 2024 on esitetty kartalla alla (Kuva 2-5). 24 prosenttia sähkön tuotannosta vuonna 2024 oli tuulivoimaa, tehden tuulivoimasta toisiksi suurimman sähkön tuotantomuodon ydinvoiman jälkeen (Energiateollisuus ry, 2025a).



Kuva 2-5: Tuulivoiman kappalemäärät maakunnittain vuonna 2024 (Suomen Uusiutuvat ry, 2025c)

Tuulivoimaa on sijoitettu paljon Länsi-Suomeen johtuen hyvistä tuuliolosuhteista ja harvasta asumisesta. Alueella on lisäksi ollut hyvät mahdollisuudet liittää uutta tuotantoa sähköverkkoon johtuen vahvasta kantaverkosta. Nykyään alueella sähköverkkoon liittyminen ei ole enää helppoa, sillä olemassa oleva tuulivoima on pitkälti käyttänyt liittymiskapasiteetin ja vaikka alueen sähköverkkoa vahvistetaan uuden tuulivoiman mahdollistamiseksi, on kilpailu alueella liittymiskapasiteetista suurta. Verkon vahvistamisessa kestää lisäksi aikansa ja tällä hetkellä luvitettava tuulivoima saattaa joutua odottelemaan verkon kapasiteetin paranemista.
Tuulivoiman sijoittaminen Itä-Suomeen on toistaiseksi ollut vähäistä johtuen pääasiassa Puolustusvoimien aluevalvontajärjestelmästä eli tutkavalvonnan vaatimuksista. Tuulivoimalat häiritsevät tutkien näkyvyyttä ja jokaisen tuulivoimahankkeen on pyydettävä Puolustusvoimilta lausunto hankkeen hyväksyttävyydestä. Itä-Suomeen positiivisen lausunnon saaminen on harvinaista ja siksi sinne on yhtenä ratkaisuna esitetty kompensaatioaluetta. Kompensaatioalueelle saisi rakentaa tuulivoimaa maksamalla Puolustusvoimille tuulivoimamaksun, jolla he voisivat hankkia uutta valvontakalustoa tai siirtää olemassa olevia uusille sijainneille (Puolustusvoimat, 2023).
Etelä-Suomessa sijaitsee muutamia tuulipuistoja ja uusia tuulipuistoja on myös suunnitteilla. Etelä-Suomessa tuulivoiman merkittävin rajoittava

tekijä on asuin- ja lomarakennukset, joita on alueella tiiviimmin kuin pohjoisemmassa. Käytännössä esimerkiksi Uudellemaalle ei suunnitella uutta tuulivoimaa ollenkaan johtuen tiiviistä asumisesta. Etelä-Suomea pidetään hyvänä paikkana rakentaa tuulivoimaa siksi, että sähkön kulutus on sijoittunut suurelta osin maan eteläosiin ja sähköä ei silloin tarvitsisi siirtää pitkän matkan päästä.
Lapissa tuulivoiman rakentamista rajoittaa erityisesti laajat erämaa-alueet, joille ei voi rakentaa ollenkaan sekä porotalous ja matkailuelinkeino. Myös sähkönsiirtoverkko on Lapissa harvempi, sillä siellä ei ole sähköä tarvitsevia asuinkeskittymiä tai teollisuutta vastaavasti kuin eteläisemmässä Suomessa. Lapissa ja Itä-Suomessa harvempi asuminen kuitenkin mahdollistaisi uuden tuulivoiman rakentamisen, mikäli muut asiat eivät sitä estä.
Isoin osa hankekehityksessä olevasta tuulivoimasta sijaitsee niin ikään Suomen Länsirannalla. Eniten tuulivoimaa on suunnitteilla Pohjois-Pohjanmaalle, yhteensä 24616 MW (Suomen Uusiutuvat ry, 2025f). Yksin Pohjois-Pohjanmaalle on siis hankekehityksessä melkein kolminkertaisesti tuulivoimaa verrattuna tällä hetkellä käytössä olevaan (8358 MW). Kaikki kehityksessä oleva tuulivoima ei tule valmistumaan vaan keskeytyy eri kehitysvaiheissa. Viisi maakuntaa, johon tuulivoimaa on suunnitteilla eniten vuonna 2025, on esitetty kuvassa (Kuva 2-6) alla.



Kuva 2-6: Suunnitteilla olevan tuulivoiman kumulatiivinen teho, top 5 maakuntaa (Suomen Uusiutuvat ry, 2025f).

2.4.1 Tuulivoiman hankekehitys

Tuulivoiman hankekehitys alkaa sopivan sijainnin etsinnästä. Se tyypillisesti tehdään paikkatietoanalyysillä, jossa otetaan huomioon erilaisia etäisyyksiä tuulivoimaa rajoittavista asioista kuten esimerkiksi asutus, luonnonsuojelualueet, Natura 2000-alueet, arkeologiset kohteet, maisema-alueet ja arvokkaat kulttuuriympäristöt. Lisäksi paikkatietoanalyysissä otetaan huomioon kiinnostavan alueen etäisyys sähköverkkoon ja muuntoasemiin. Paikkatietoanalyysillä löydetyistä alueista suoritetaan tarkempia esiselvityksiä, joissa otetaan huomioon esimerkiksi erilaiset petolintujen pesäpaikat, tiettyjen lajien reviirit (maakotka, susi, metsäpeura), alueen tuuliolosuhteet, maaston rakennettavuus ja infrastruktuuri.

Jos esiselvitetty alue vaikuttaa tuulivoimalle suotuisalle, siirrytään maanvuokraneuvotteluihin alueen maanomistajien kanssa. Neuvotteluissa sovitaan maankäytöstä ja maksettavan vuokran tasosta. Vuokrasopimuksen tulee olla määräaikainen, tyypillisesti noin 30–40 vuotta, ja sen tulee olla siirrettävissä toiselle vuokralaiselle maanomistajaa kuulematta, jotta se voidaan kirjata Maanmittauslaitoksen rekisteriin. Vuokralainen saa maanvuokrasopimuksella tyypillisesti oikeuden rakentaa alueelle tuulivoimalan,

muuntoaseman, tuulimittausmaston, uusia teitä ja nostokentät, sekä oikeuden asentaa maakaapeleita ja ilmajohtoja ja käyttää olemassa olevia teitä. Sopimuksessa sovitaan lisäksi yleensä puiden kaadosta, vastuista erilaisissa tilanteissa ja tuulivoimaloiden purkuvakuudesta. Hankekehittäjä pyrkii saamaan maanvuokrasopimukset riittävän monen voimalapaikan maanomistajan kanssa ennen siirtymistä seuraaviin hankekehitysvaiheisiin. Teille sekä sähkökaapeleille tai -johdoille on mahdollista saada käyttöoikeus tai sijoittamislupa ilman vuokrasopimusta.
Kun hankekehittäjällä on riittävä määrä maanvuokrasopimuksia, se tekee kaavoitusaloitteen hankkeen kuntaan tai kaupunkiin. Samaan aikaan hankekehittäjä tekee myös ympäristövaikutusten arvioinnin tarveharkintapyynnön tai tekee aloitteen ympäristövaikutusten arviointimenettelystä ELY-keskukseen. Mikäli kunta hyväksyy kaavoitusaloitteen, alkaa kaavoitus osallistumis- ja arviointisuunnitelman tekemisellä. Samanaikaisesti tehdään ympäristövaikutusten arvioinnin ohjelma, mikäli hankkeelta edellytetään YVA:n tekemistä. Niiden nähtävillä olon jälkeen jatketaan kaavoitusmenettelyä tekemällä kaavaluonnos ja YVA-menettelyä tekemällä ympäristövaikutusten arviointiselostus, joissa huomioidaan nähtävillä olon aikana saatu palaute. Kaavan vireilletulon kanssa saman aikaisesti aloitetaan hankkeen erillisselvitykset, joita ovat mm. luontoselvitykset, arkeologinen selvitys, melu- ja välkemallinnukset, sekä näkymäalueanalyysi ja havainnekuvat. Luontoselvityksissä selvitettäviin lajeihin kuuluvat erilaiset päiväpetolinnut, muuttolinnut, kanalinnut, lepakot, viitasammakot, liito-oravat, metsäpeurat, saukot ja muut erityisen suojelun piirissä olevat nisäkkäät. Lisäksi selvitetään alueen kasvillisuutta. Erillisselvityksiä hyödynnetään YVA:n selostusta ja kaavan sisältöä työstettäessä. Kaavaluonnos ja YVA-selostus asetetaan samanaikaisesti nähtäville ja niistä saadun palautteen sekä ELY:n tekemän perustellun päätelmän pohjalta tehdään viimeiset mahdolliset muutokset kaavaan. Tämän jälkeen kaavasta tehdään kaavaehdotus, josta kunnan tai kaupungin valtuusto äänestää. Tyypillisesti kaavoista saatetaan jättää valituksia, jolloin ne käsitellään ensin hallinto-oikeudessa ja toisinaan tarvittaessa korkeimmassa oikeudessa. Oikeuskäsittelyn aikana hankekehittäjä voi hakea rakennuslupia kaavan perusteella, ja ne tulevat voimaan, jos kaava saa lainvoiman. Myös rakennusluvista voidaan valittaa oikeuteen.
Kun kaava ja rakennusluvat ovat lainvoimaisia, voidaan tuulipuiston rakentaminen aloittaa. Tätä ennen hankkeelle on hankittu rahoitus ja tyypillisesti PPA-sopimus. Rakennustyöt kestävät yleensä noin 1-2 vuotta.

2.4.2 Syöttötariffi ja teknologianeutraali tarjouskilpailu

Tuulivoimaa on teollisessa mittakaavassa alettu rakentamaan Suomeen 2010-luvun alkupuolella. Uutta tuulivoimaa tuettiin syöttötariffilla vuosina 2011–2017 (Motiva Oy, 2024), joka mahdollisti tuulivoiman rakentamisen aikana, jolloin se ei vielä ollut markkinaehtoisesti kannattavaa. Syöttötariffia maksetaan myöntämisestä alkaen 12 vuotta eli viimeisille mukaan päässeille

tuulipuistoille vuoteen 2030 asti (Energiavirasto, 2025a). Syöttötariffi takaa sähköä tuottavalle tuulipuistolle tavoitehinnan 83,50 €/MWh, josta maksettavaa valtiolle muodostuu sähkön tukkumarkkinahinnan ja tavoitehinnan erotus niin, että tukea maksetaan enimmillään 53,50 €/MWh (Energiavirasto, 2023a; Energiavirasto, 2023b). Syöttötariffijärjestelmän sulkeutumisen jälkeen Suomessa järjestettiin vuonna 2018 teknologianeutraali tarjouskilpailu (nk. preemiojärjestelmä), jonka perusteella maksetaan seitsemälle tuulipuistolle hintapreemiota 12 vuoden ajan (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2025). Hintapreemio muodostuu viitehinnasta 30 €/MWh ja tarjotun preemion summasta. Sitä maksetaan kolmen kuukauden tariffijaksoittain, siten että jokaiselle jaksolle lasketaan sähkön markkinahinnan keskiarvo, johon hintapreemiota verrataan. Sähkön hinnan keskiarvon ollessa yli tarjotun hintapreemion, tukea ei makseta. (Energiavirasto, 2024) Preemiojärjestelmään hyväksytyt tarjoukset ovat esitettynä taulukossa (Kuva 2-7) alla. Matalin tarjottu hintapreemio oli 1,27 €/MWh ja korkein hyväksytty tarjous oli 3,97 €/MWh (Magnusson, 2019).

Hyväksytyt tarjoukset

Voimalaitos tyyppi	Sähkön tuottajan nimi	Voimalaitos-hankkeen nimi	Tarjottu vuosituotanto MWh	Tarjottu preemio EUR/MWh
Tuulivoimala	Kestilän Kokkonevan Tuulivoima Oy	Kestilän Kokkonevan Tuulivoima	120 365	1,27
Tuulivoimala	CPC Finland Oy	Lakiakangas 3	215 000	1,89
Tuulivoimala	Puhuri Oy	Parhalahti	158 000	1,89
Tuulivoimala	Puhuri Oy	Hankilanneva	107 000	2,62
Tuulivoimala	VindIn Kalax Ab/Oy	Kalax	320 000	2,87
Tuulivoimala	Tuuliwatti Oy	Tuuliwatti Simo Leipiö III	370 000	2,94
Tuulivoimala	Tuulipuisto Oy Hirvineva	Hirvineva-Liminka	70 500	3,97

Kuva 2-7: Preemiojärjestelmään hyväksytyt tuulipuistot ja tarjottu preemio (Magnusson, 2019).

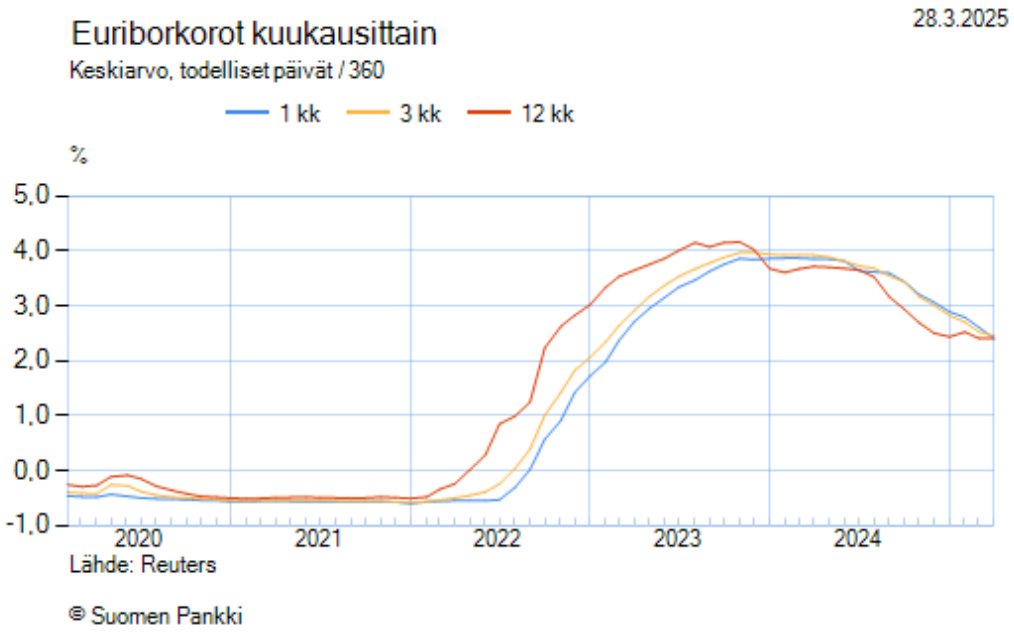
Kaikesta Suomen tuulivoimasta 70 prosenttia on rakennettu markkinaehtoisesti ilman tukia (Suomen Uusiutuvat ry, 2025d). Tuulipuistojen markkinaehtoisen rakentamisen on myös mahdollistanut tuulivoimaloiden teknisen kehitys. Teknisen kehityksen lisäksi lainojen korkotaso oli alhainen pitkään, joka oli tärkeä investointien mahdollistaja tuulivoimalle, jonka kulurakenne on hyvin alkuinvestointipainotteinen.

2.4.3 Tuulivoiman tuotantokustannukset ja kulurakenne

Suomen Uusiutuvat ry arvioi maatuulivoiman investointikustannukseksi 1,2-1,5 miljoonaa euroa per asennettu megawatti. Tästä investoinnista tuulivoimalat ovat 65-80 prosenttia kustannuksista ja loppu koostuu mm. maarakennustöistä (n. 13%), sähkötöistä ja kaapeloinnista (n. 8%) ja sähköverkkoon liitynnästä (n. 6 %). (Suomen Uusiutuvat ry, 2025e)

Tuulivoiman kannattavuutta suhteessa muihin sähkön tuotantomuotoihin ja tuulipuiston kannattavuutta verrattuna muihin tuulipuistoihin tarkastellaan yleensä tuotantokustannushinnan eli LCOE:n (Levelized cost of energy) avulla. LCOE lasketaan siten, että kaikki elinkaaren aikaiset tuotantokulut summataan yhteen ja se tulo jaetaan koko elinkaaren aikaisella sähkön tuotannolla. Vakkilainen & Kivistö (2017) tutkivat eri sähkön tuotantomuotojen kustannuksia ja arvioivat maatuulivoiman tuotantokustannukseksi (LCOE) 41,4 €/MWh. Vakkilainen & Kivistö tutkimuksesta on kulunut kahdeksan vuotta, joten sitä ei välttämättä voi pitää enää ajankotaisena hintana. Kansainvälisissä arvioissa tuulivoiman tuotantokustannuksista vaihteluvälit ovat suuria. Esimerkiksi Lazard -pankki (2024) arvioi maatuulivoiman tuotantokustannukseksi 27-73 $/MWh eli noin 24-64 €/MWh ja merituulivoiman tuotantokustannukseksi 74-139 $/MWh eli noin 65-122 €/MWh. Lazardin (2024) analyysi on tehty Yhdysvaltojen markkinatiedoilla. Tuoreempaa arviota Suomessa tuotettavasta tuulisähköstä ei ole saatavilla tutkimustietoa, mutta Lappeenrannan teknisen yliopiston tutkimusjohtaja Petteri Laaksonen arvioi Ylen artikkelissa (2023) tuulisähkön tuotantokustannukseksi 20-25 €/MWh. Arvio saattaa olla optimistinen, kun otetaan huomioon, että tuulivoiman tuotantokustannushintaan vaikuttaa suuresti investointikustannukset, jotka puolestaan ovat hyvin riippuvaisia lainojen koroista. Rahoituskustannukset eli mm. lainojen korot saattavat olla jopa 30-40 % tuotantokustannuksista (Suomen Uusiutuvat ry, 2025e). Lainojen korot olivat

pitkään hyvin alhaisia, mutta lähtivät nousuun vuonna 2022. Euriborkorkojen kehitys vuodesta 2020 alkaen on esitetty kuvassa (Kuva 2-8) alla.



Kuva 2-8: Euriborkorkojen kehitys vuosina 2020-2025 (Suomen Pankki, 2025).

Fingrid on käyttänyt uusimmassa sähköjärjestelmävisiossaan vuodelle 2040 maatuulivoimalle 32 €/MWh tuotantokustannushintaa (Fingrid Oyj, 2025d), joka asettuu määrältään Vakkilaisen & Kivistö (2017) ja Laaksosen (2023) arvion välimaastoon. Merituulivoimalle Fingrid käytti sähköjärjestelmävisiossaan 49 €/MWh tuotantokustannushintaa.

2.4.4 PPA-sopimukset

Vuodesta 2019 alkaen uusia tuulipuistoja on rakennettu markkinaehtoisesti muun muassa PPA-sopimusten (power purchase agreement) avulla (Suomen Uusiutuvat ry, 2025b). PPA-sopimuksella myydään sähkö kiinteään hintaan pitkälle ajalle (10–20 vuotta), jolloin tuulivoimapuiston tulo on vakaa ja sille voidaan saada pankkirahoitus. PPA-sopimus voi olla joko fyysinen tai synteettinen. Fyysisessä PPA-sopimuksessa sähkö siirtyy fyysisenä toimituksena tuottajan sähkötaseesta ostajan sähkötaseeseen. Synteettisessä PPA-sopimuksessa tuottaja myy sähkön markkinoille ja ostaja ostaa sähkön markkinoilta, ja PPA-osapuolien selvitettäväksi jää PPA-sopimuksessa sovitun sähkön hinnan ja toteutuneen sähkömarkkinahinnan välinen erotus. (Stanitsas & Kirytopoulos, 2023) (ÅF, 2019)
PPA-sopimuksille on erilaisia hinnoittelumalleja. ”Pay-as-produced” -mallissa maksetaan kiinteää hintaa joko koko tuulipuiston tuotannosta tai prosenttiosuudesta. Hinta pysyy samana riippumatta markkinahinnoista ja

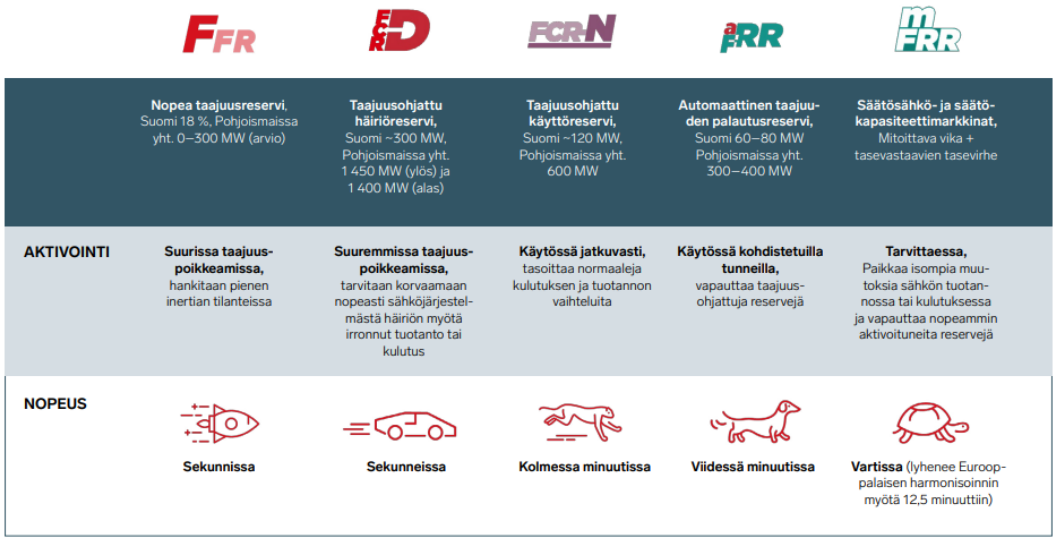
sähköstä maksetaan toteutuneen tuotannon mukaisesti. Tässä mallissa PPA-sopimuksen riskit (hinta, profiili ja kannibalisaatio) siirtyvät ostajalle, joka on vastuussa sekä lisäsähkön ostosta markkinoilta, että ylijäämän myymisestä markkinoille. (Stanitsas & Kirytopoulos, 2023) (ÅF, 2019)
”Baseload” PPA-sopimukseksi kutsutaan tilannetta, jossa PPA:ssa sovitaan sähkön toimitusmäärästä. Sähkön toimitusmäärä kiinnitetään joko kuukausittain tai vuositasolla. Toimitettavalle sähkölle saatetaan myös asettaa minimi- ja maksimitoimitusmäärä ja lattia- tai/ja kattohinnat. Tässä mallissa sähkön toimitukseen liittyvät riskit jäävät myyjälle, jonka on toimitettava sovittu määrä sähköä tuotannosta riippumatta. Myyjän täytyy siis joko ostaa puuttuva sähkö markkinoilta tai myytävä ylijäämä sähkö markkinoille. Baseload PPA:sta on mahdollista saada parempi sähkön hinta kuin Pay-as-produced-sopimustyypistä, joka saattaa tehdä siitä houkuttelevamman sopimustyypin. (Stanitsas & Kirytopoulos, 2023) (ÅF, 2019)
Huonosti hinnoiteltu baseload-sopimus saattaa johtaa jopa konkurssiin, kuten ruotsalaiselle Markbygden Ett -tuulipuistolle meinasi käydä, kun se ei pystynyt tuottamaan tarpeeksi sähköä täyttääkseen sopimusehdot ja joutui ostamaan kallista pörssisähköä sopimuksen täytöksi. (Helsingin Sanomat, 2024). Muun muassa edellä realisoituneen tuotantomäärä- ja profiiliriskien takia rahoittajat suosivat pay-as-produced-sopimustyyppiä (ÅF, 2019). Pay-ase-produced-sopimuksella maksettavan markkinahinnan arvioitiin olevan 50 €/MWh Seppälän & Syrin tutkimuksessa (2025). Markbygden Ett-tuulipuiston baseload-sopimuksen hinnaksi arvioitiin hyvin alhainen 25 €/MWh asiantuntija lähteissä, todellisen hinnan ollessa markkinasalaisuus (Bloomberg, 2025).

2.5 Sähkömarkkina Suomessa

2.5.1 Markkinapaikat

Suomi on osa pohjoismaista Nord Pool sähkön tukkumarkkinaa, joka toimii Suomen lisäksi Itävallassa, Belgiassa, Tanskassa, Ranskassa, Saksassa, Iso-Britanniassa, Irlannissa, Latviassa, Liettuassa, Luxemburgissa, Alankomaissa, Norjassa, Puolassa ja Ruotsissa (Nord Pool AS, 2025a).
Sähköpörssi Nord Poolissa sähköä myydään ja ostetaan niin kutsutuilla Day-ahead ja Intraday markkinoilla. Day-ahead markkinalla myydään ja ostetaan sähköä tuntikohtaisesti vuorokaudeksi kerrallaan (Nord Pool AS, 2025b). Day-ahead markkinalla muodostuvaa sähkön hintaa kutsutaan spot-hinnaksi. Sähkön spot-hinta muodostuu Day-ahead-markkinalle annettujen tarjousten perusteella kysyntä- ja tarjouskäyrien leikkauspisteessä (Fingrid Oyj, 2025a). Intraday markkinalla kauppaa käydään kesken päivän 15, 30 tai 60 minuutiksi kerrallaan (Nord Pool AS, 2025c). Suomi on Nord Poolin markkinoilla yksi hinta-alue, kun taas esimerkiksi Ruotsissa on neljä hinta-aluetta. Tämä johtuu erosta sähkön siirtokapasiteetissa maiden sisällä.
Sähköstä käydään kauppaa myös johdannaismarkkinoilla, jossa kauppaa käydään tulevaisuudessa tapahtuvasta sähköntuotannosta.

Johdannaismarkkinoita käytetään sähkön hintaan liittyvän riskin hallintaan. Johdannaissopimuksessa sovitaan tietyn sähkönmäärän toimituksesta tiettyyn hintaan tietyllä ajanjaksolla. Johdannaissopimus tehdään tuleville kuukausille tai vuosille, jopa viiden vuoden päähän tulevaisuuteen. (Fortum Oyj, 2025)
Näiden lisäksi Fingrid ylläpitää niin kutsuttua reservimarkkinaa, johon kuuluu eri aikajänteillä aktivoitavaa sähköntuotannon ylös- tai alassäätöä. Niiden tavoitteena on pitää sähköverkko tasapainossa, vaikka tuotannossa tai kulutuksessa kävisi äkillisiä muutoksia. Nopein reaktio (nopea taajuusreservi) reagoi muutoksiin sekunnissa ja hitain (Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat) vartissa. Kaikki Suomessa käytössä olevat reservituotteet on esitetty kuvassa (Kuva 2-9) alla. (Fingrid Oyj, 2022)

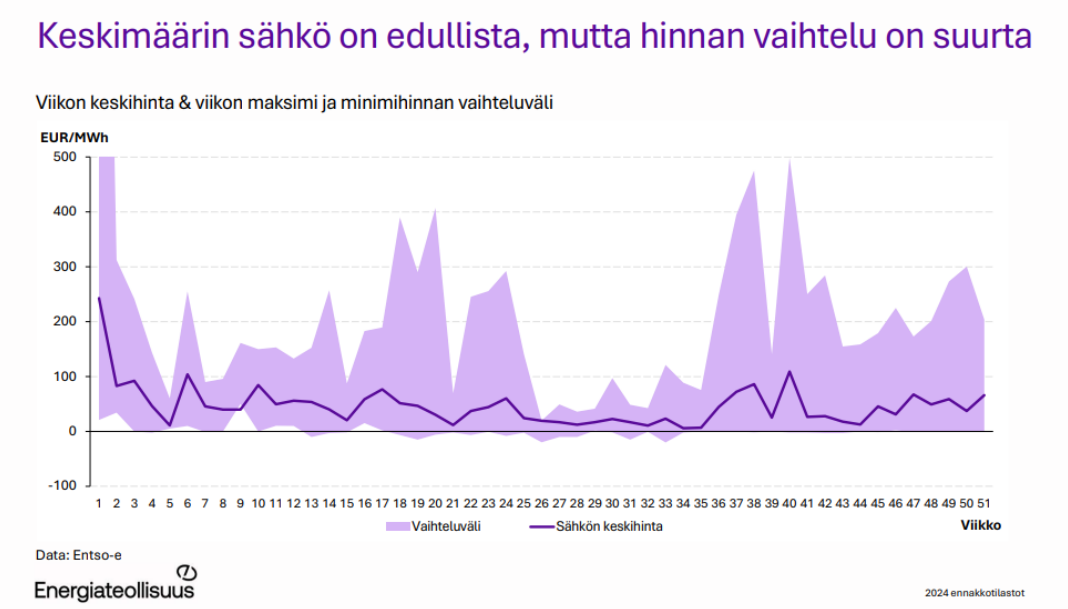


Kuva 2-9: Fingridin ylläpitämät reservimarkkinat (Fingrid Oyj, 2022).

Tukkumarkkinan, reservimarkkinoiden ja johdannaismarkkinan lisäksi sähkökauppaa käydään vähittäismarkkinalla, jossa sähkön myyjät myyvät sähköä kuluttajille. Kuluttajan maksama sähkön hinta riippuu sopimustyypistä. Myös kuluttajille myydään pörssisähköä, jonka pohjana on tukkumarkkinan spot-hinta, mutta silloin sähkön vähittäismyyjä ottaa hinnassa lisäksi välityspalkkion. Tyypillinen vähittäissähkösopimus on silti edelleen kiinteä hintainen sähkösopimus, vaikka pörssisähkön suosio onkin viime vuosina kasvanut. Pörssisähkön etuna on se, että se kannustaa niin sanottuun kulutusjoustoon, jolloin sähkönkäyttäjä ajoittaa kulutuksensa halvoille sähkön tunneille ja välttää kalliin sähkön tunteja.

2.5.2 Sähkön kulutus ja hinnan vaihtelu

Sähkön tukkukeskihinta oli 45,6 €/MWh vuonna 2024 (Energiateollisuus ry, 2025b). Sähkön hinta oli vuonna 2024 keskimäärin edullinen, mutta hintavaihtelu oli suurta (Energiateollisuus ry, 2025b). Sähkön hinnan vaihteluväli ja viikkokohtainen keskihinta on esitetty kaaviossa alla (Kuva 2-10).

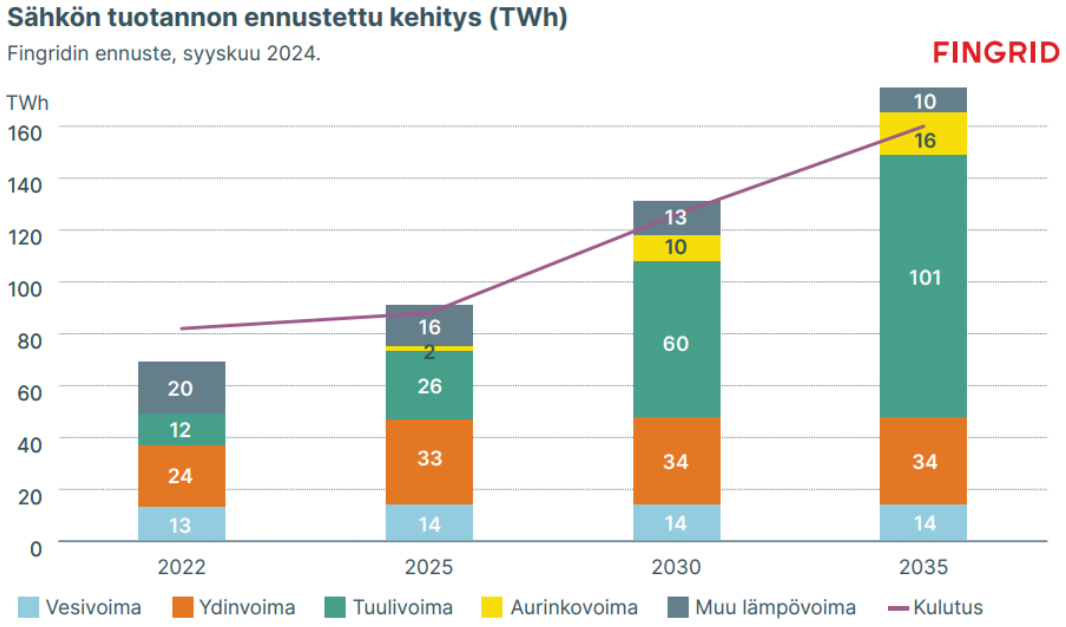


Kuva 2-10: Sähkön hinnan vaihteluväli ja sähkön keskihinta vuonna 2024 (Energiateollisuus ry, 2025b).

Sähkön hinnan vaihteluun vaikuttaa sekä tuotantoon, että kulutukseen liittyviä trendejä. Tuulisella säällä tuulivoima tuottaa paljon edullista sähköä ja sateisen ajan jälkeen tai keväällä lumien sulaessa vesivoiman vesistöaltaat täyttyvät, jolloin vettä on juoksutettava ja sähkö on halpaa. Kulutus on suurimmillaan arkisin päivällä, kun ihmiset ovat töissä, ja kylminä talvipäivinä, kun lämmitykseen kuluu paljon energiaa. Kylmänä talvipäivänä saattaa Suomen kokonaissähkön kulutus nousta 15 000 megawattiin. Matalan kysynnän aikana tarvittava sähkö voidaan tuottaa tuotantokustannuksiltaan edullisissa voimalaitoksissa, jolloin sähkön hinta pysyy maltillisena. (Fingrid Oyj, 2025a)

Sähkön hinnan vaihteluun vaikuttaa lisäksi isojen tuotantolaitosten vuosihuollot ja erilaiset vikatilanteet. Esimerkiksi Olkiluoto 3:sen poissaolo verkosta tarkoittaa 1600 MW eroa tuotantotehossa (Fingrid Oyj, 2025b). Sähkön hinnassa näkyy lisäksi maailman politiikka ja polttoaineiden hinnat. Ukrainan sota ja sen myötä nousseen maakaasun hinta nostivat myös Pohjoismaissa sähkön hintaa erityisesti vuosina 2022–2023. (Energiateollisuus ry, 2025c) Fossiilisia polttoaineita käyttävät polttolaitokset maksavat lisäksi hintaa päästöoikeuksista, joiden hintoja EU ohjaa kasvavaksi.

Päästöoikeuden keskimääräinen hinta vuonna 2023 oli 83,60 €/t CO2 (Energiavirasto, 2023b).
Sähkön hintaan vaikuttaa lisäksi sähkön siirtoyhteydet Suomesta muille markkina-alueille. Esimerkiksi uuden Aurora line -yhteyden odotetaan tasaavan sähkön hinnan vaihtelua Suomessa, kun siirtokapasiteetti Ruotsiin kasvaa. Linja tulee kasvattamaan siirtokapasiteettia 800 MW Ruotsista Suomeen ja 900 MW Suomesta Ruotsiin. Linjan odotetaan otettavan käyttöön vuoden 2025 loppupuolella. (Fingrid Oyj, 2025c)
Sähkön kulutus Suomessa vuonna 2024 oli 83 terawattituntia (Energiateollisuus ry, 2025a). Fingrid odottaa sähkön kulutuksen kasvavan tulevina vuosina, jopa 159 terawattituntiin vuoteen 2035 mennessä. Sähkön kulutuksen kasvua odotetaan tulevan erityisesti uusista datakeskuksista, vedyn ja sähköpolttoaineiden tuotannosta, metalliteollisuudesta, akkujen valmistuksesta sekä polttoaineiden korvaamisesta sähköllä lämmön ja höyryn tuotannossa. Sähkönkulutuksen kasvun odotetaan myös nostavan sähkön hintaa. Uuden sähköntuotannon Fingrid odottaa olevan pääasiassa tuulivoimaa. Sähkön kokonaistuotannon vuonna 2035 Fingrid odottaa olevan 175 terawattituntia, josta 101 terawattituntia olisi tuulivoimaa. (Fingrid Oyj, 2024)
Fingridin ennustus sähkön tuotannon kehityksestä on esitettynä kuvassa (Kuva 2-11) alla.

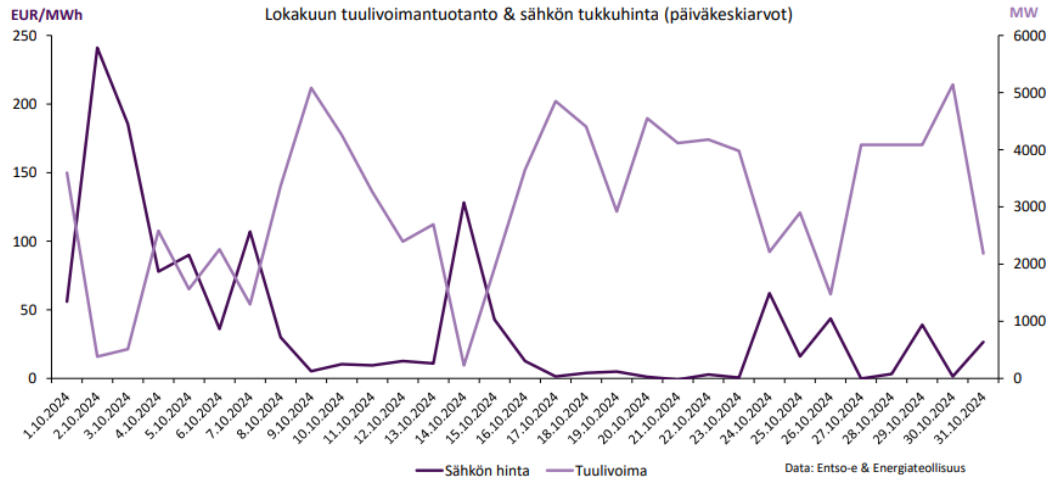


Kuva 2-11: Fingridin ennuste sähkön tuotannon kehityksestä. (Fingrid Oyj, 2024)

2.6 Hintakannibalisaatioilmiö

Tuulivoiman tuotanto on sääriippuvaista. Tuulivoimala tuottaa sähköä, kun tuulee. Tuulivoima ei käytä polttoainetta eli sillä ei ole juurikaan käyttökustannuksia, joten sen tuottama sähkö voidaan tarjota myytäväksi hyvin

edullisesti. Jos tuulivoiman tuotantoa on paljon, sähkön hinta voi olla hyvin edullinen tai jopa negatiivinen. Tätä kutsutaan hintakannibalisaatioilmiöksi, sillä tuulivoima ikään kuin syö oman tulonsa sähkön hinnan ollessa edullisimmillaan juuri silloin kun tuulivoimala tuottaa eniten sähköä. Tuulivoiman vaikutus sähkön tukkuhintaan on jo huomattavissa Suomessa. Matalimmat hinnat ovat, kun tuulivoiman tuotantoa on paljon ja kalleimmat sähkön hinnat ovat, kun ei tuule. Energiateollisuuden sähkön hintatilastoissa 2024 oli kaavio (Kuva 2-12) sähkön hinnan riippuvuudesta tuulivoimaan. Kaaviosta on huomattavissa, että sähkön hinta on matalalla (jopa lähellä nollaa), kun tuulivoiman tuotanto on suurta.



Kuva 2-12: Sähkön hinnan vaihtelu suhteessa tuulivoiman tuotantoon lokakuussa 2024 (Energiateollisuus ry, 2024)

Vuonna 2024 Suomessa oli 725 negatiivisen sähkön hinnan tuntia ja 175 nollahintaista tuntia, jotka vastaavat yhdessä noin 10 % vuoden tunneista (Energiateollisuus ry, 2024).

Myös aurinkovoima saattaa kärsiä kannibalisaatiosta, mutta Suomessa ei toistaiseksi ole vielä riittävästi aurinkovoimaa liitettynä verkkoon, että aurinkovoiman kannibalisaatiota ilmenisi.

Reichenberg ym. (2023) tutkivat tuloon ja uusiutuvan energian investointiin liittyvää riskiä markkinoilla, joissa on korkea uusiutuvan energian osuus. He laskivat, että kannibalisaatioilmiö vähentää ennakoitua voittoa suhteessa investointikustannuksiin 33 prosentista 13 prosenttiin ja -40 prosenttiin riippuen uusiutuvien energian tuotantomuotojen levittäytymistasosta.

Stewe ym. (2025) tutkivat kannibalisaatiovaikutusta Euroopan yhdistyneillä sähkömarkkinoilla. He tulivat tulokseen, että kansainväliset siirtoyhteydet vähentävät kotimaisen kannibalisaation vaikutusta, mutta pahentavat rajat ylittävää kannibalisaatiota. Tutkimus osoitti myös, että aurinkovoiman aiheuttama kannibalisaatio on voimakkaampaa kuin tuulivoiman sekä kotimaisilla, että kansainvälisillä markkinoilla.

Seppälä & Syri (2025) vertasivat tutkimuksessaan tuulivoiman, aurinkovoiman ja hybridivoimalan kannattavuutta Suomessa ja Ruotsissa. He laskivat hankkeiden taloudellista kannattavuutta kolmessa eri tilanteessa; sähkön myynti Day-ahead spot markkinalla, baseload-sopimuksella ja pay-as-produced -sopimuksella. Lisäksi akkujärjestelmän käyttöä sähkön myynnin ajalliseen siirtoon tutkittiin. Tutkimuksen tuloksena oli, että tuotantolaitokset eivät ole tällä hetkellä kannattavia investointeja johtuen kannibalisaatiosta ja pääoman kalliista hinnasta.

Ajanaku & Collins (2023) tutkivat tuulivoiman vaikutusta sähkön hintaan Pennsylvania-New Jersey-Maryland sähkömarkkinalla. Heidän mukaansa jokainen uusi gigawattitunti tuulisähköä alentaa tuulivoimasta saatavaa tuloa 0,01– 0,08 $/MWh. Lisäksi tuulivoiman aiheuttama kannibalisaatio laskee sekä kaasulla tuotettavan sähkön että peruskuormalaitosten tuottaman sähkön tuloa 0,02-0,06 $/MWh per uusi gigawattitunti tuulivoimaa.

Peña et al. (2022) tutkivat kannibalisaation vaikutuksia Espanjan sähkömarkkinalla vuosina 2014-2020. Tuulivoiman kannibalisaatiovaikutuksen havaitaan olevan epälineaarista ja kasvavan kovemmaksi, kun tuulivoima tuottaa 30-40 % sähköntuotannosta. Espanja tavoittelee 74 % uusiutuvan sähkön osuutta 2030 mennessä. Tutkimuksen mukaan, jos tämä tavoite toteutuu, kaikki sähköntuotantoteknologiat jäävät myyntituloiltaan alle niiden arvioitujen tuotantokustannusten.

Liebensteiner & Naumann (2022) tutkivat päästökaupan vaikutusta kannibalisaatioilmiöön Saksassa. He laskivat, että päästöoikeuden hinnan ollessa yli 40 €/tCO2, voi se vähentää kannibalisaatiovaikutusta korkean uusiutuvan energian osuuden markkinalla.

Hintakannibalisaatio vaikuttaa tuulivoiman investointihalukkuuteen. Uusien investointien kannattavuutta laskettaessa hintakannibalisaatiota ei voida jättää huomioitta. Kannibalisaatio ilmenee PPA-sopimuksissa niin kutsuttuna tuotantoprofiiliriskinä, joka tarkoittaa sitä, että tuotantoa on paljon, kun sähkön hinta on matala ja toisinpäin (ÅF, 2019). Lisäksi halvat tukkuhinnat sähkölle eivät kannusta isoja sähkön kuluttajia tekemään PPA-sopimuksia tuulivoimapuistojen kanssa, sillä halpaa sähköä on saatavilla suoraan pörssistä (Seppälä & Syri, 2025). Rahoituksen eli pääasiassa pankkilainan saamiseksi PPA-sopimus on edellytys ja jos tuulipuistojen hankeyhtiöt eivät saa sopimuskumppaneita PPA-sopimuksille, ne eivät pysty investoimaan tuulipuistoon.

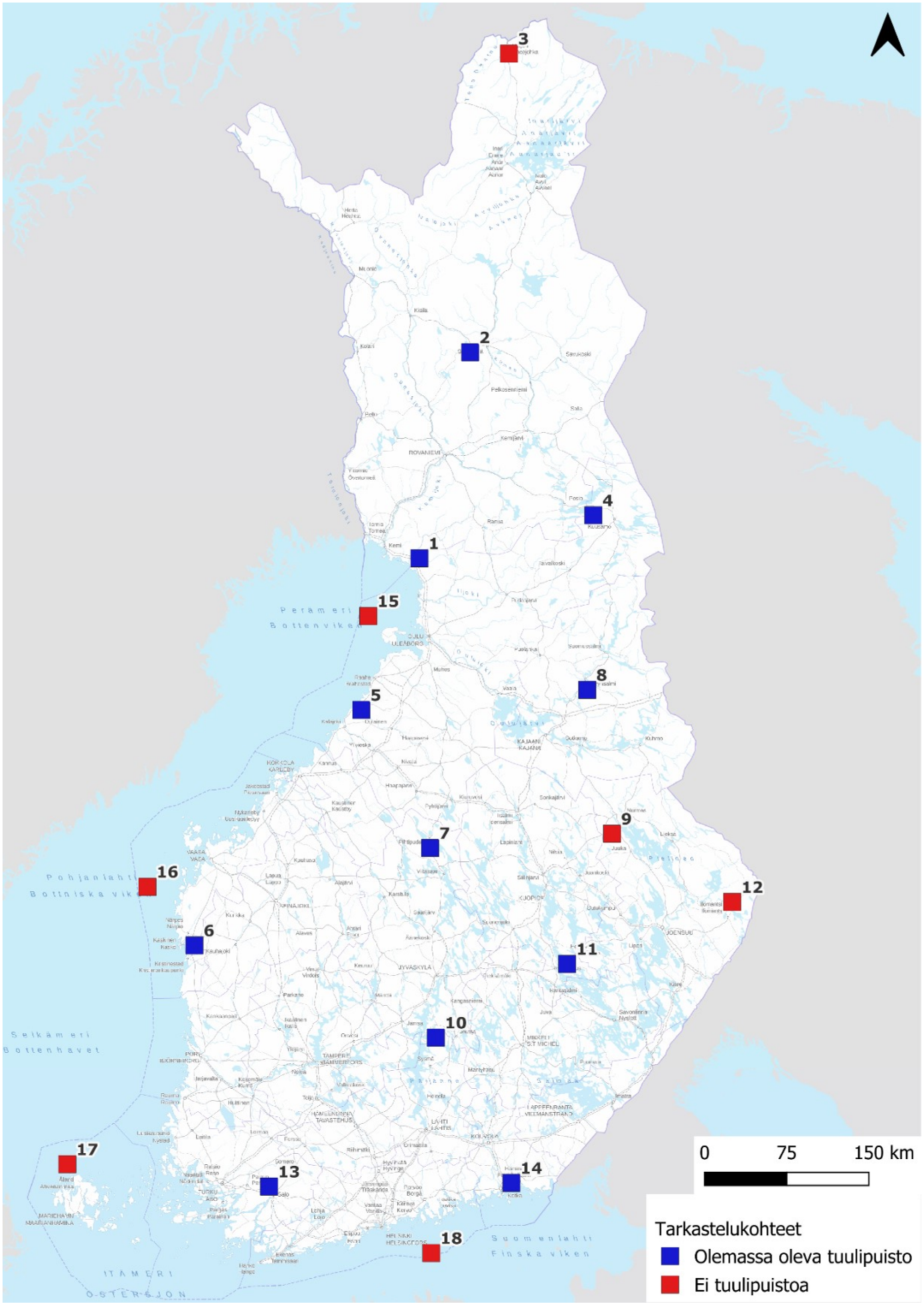
3 Tutkimusaineisto ja -metodit

3.1 Tarkastelukohteet

Kannibalisaatioilmiötä tutkittiin 18 tarkastelukohteen avulla. Tarkastelukohteet sijoitettiin eri puolille Suomea siten, että ne mahdollisimman edustavasti kuvaisivat eri alueiden eroja. Suurin osa tarkastelukohteista sijoitettiin olemassa olevien tuulipuistojen sijainneille (kohteet 1-2, 4-8, 10-11, 13-14). Loput tarkastelukohdesijainnit valittiin edustamaan alueita, joilla ei vielä ole tuulivoimaa eli Itä-Suomi (kohteet 9 ja 12), Lapin erämaa (kohde 3) ja merialueet (kohteet 15-18). Tarkastelukohteiden sijainnit on merkitty kartalle kuvassa (Kuva 3-1) ja niiden koordinaatit sekä sijaintikunta on esitetty taulukossa (Taulukko 3-2). Kaikille näille alueille ei välttämättä koskaan tule tuulivoimaa, kuten Lapin erämaa tai Suomenlahti, mutta ne haluttiin mukaan tieteellisestä kiinnostuksesta. Osa olemassa olevista tuulipuistojen paikoista sijaitsee lisäksi alueilla, joille ei juuri enää myönnetä positiivisia lausuntoja Puolustusvoimilta (kohteet 4, 8, 11 ja 14). Tarkastelukohteista kohteiden 1, 5, 6 ja 7 katsotaan edustavan aluetta, jossa on paljon olemassa olevaa tuulivoiman tuotantoa ja jossa kannibalisaatioilmiön odotetaan olevan vahvimmillaan. Tarkastelukohteiden etäisyys toisistaan on esitetty taulukossa (Taulukko 3-1) alla. Etäisyyden solu on sitä vihreämpi, mitä suurempi etäisyys on kyseessä.

Taulukko 3-1: Tarkastelukohteiden etäisyydet toisiinsa [km]

Kohde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0	194	469	164	148	409	265	195	307	438	395	425	590	577	71	390	640	635
2	194	0	275	187	342	598	455	327	459	627	566	557	784	760	258	571	828	824
3	469	275	0	429	615	864	730	586	719	902	834	802	1059	1032	530	830	1092	1099
4	164	187	429	0	277	536	339	160	292	499	411	376	682	615	225	531	763	691
5	148	342	615	277	0	264	141	207	256	307	299	382	444	454	86	254	494	501
6	409	598	864	536	264	0	233	429	395	236	341	493	231	362	340	67	231	355
7	265	455	730	339	141	233	0	204	167	174	164	281	343	315	219	261	440	370
8	195	327	586	160	207	429	204	0	133	347	251	235	539	456	211	441	643	534
9	307	459	719	292	256	395	167	133	0	246	126	126	450	332	299	428	582	417
10	438	627	902	499	307	236	174	347	246	0	138	298	204	150	390	297	356	197
11	395	566	834	411	299	341	164	251	126	138	0	161	340	207	366	390	492	292
12	425	557	802	376	382	493	281	235	126	298	161	0	497	327	423	535	653	423
13	590	784	1059	682	444	231	343	539	450	204	340	497	0	222	529	295	185	160
14	577	760	1032	615	454	362	315	456	332	150	207	327	222	0	534	429	406	97
15	71	258	530	225	86	340	219	211	299	390	366	423	529	534	0	319	571	585
16	390	571	830	531	254	67	261	441	428	297	390	535	295	429	319	0	263	423
17	640	828	1092	763	494	231	440	643	582	356	492	653	185	406	571	263	0	342
18	635	824	1099	691	501	355	370	534	417	197	292	423	160	97	585	423	342	0



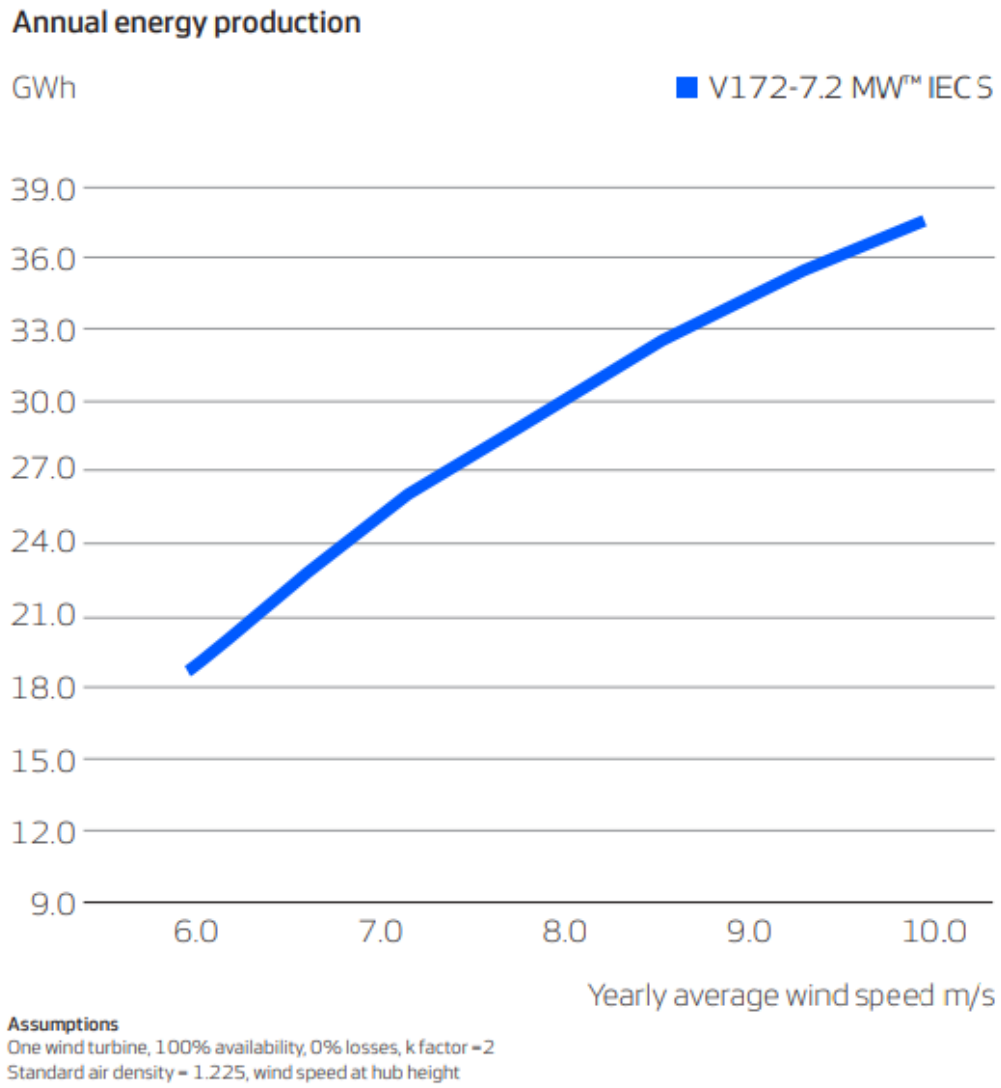
Kuva 3-1: Tarkastelukohteiden sijainnit

Taulukko 3-2: Tarkastelukohteiden sijainnit. Koordinaatisto on ETRS89-TM35FIN.

Kohde	E	N	Kunta
1	420328	7283193	Ii
2	466733	7471379	Sodankylä
3	502218	7744364	Utsjoki
4	579268	7322465	Posio
5	367178	7144634	Pyhäjoki
6	214534	6929381	Närpiö
7	430138	7018520	Pihtipudas
8	573740	7162928	Hyrynsalmi
9	596413	7031472	Juuka
10	435331	6845143	Luhanka
11	555372	6912385	Leppävirta
12	706326	6969077	Ilomantsi
13	282776	6709024	Salo
14	504342	6712366	Hamina
15	373518	7230391	Oulu
16	171593	6982858	Korsnäs
17	98331	6729409	Geta
18	431143	6648264	Porvoo

3.2 Tuotantolaskelmamenetelmä

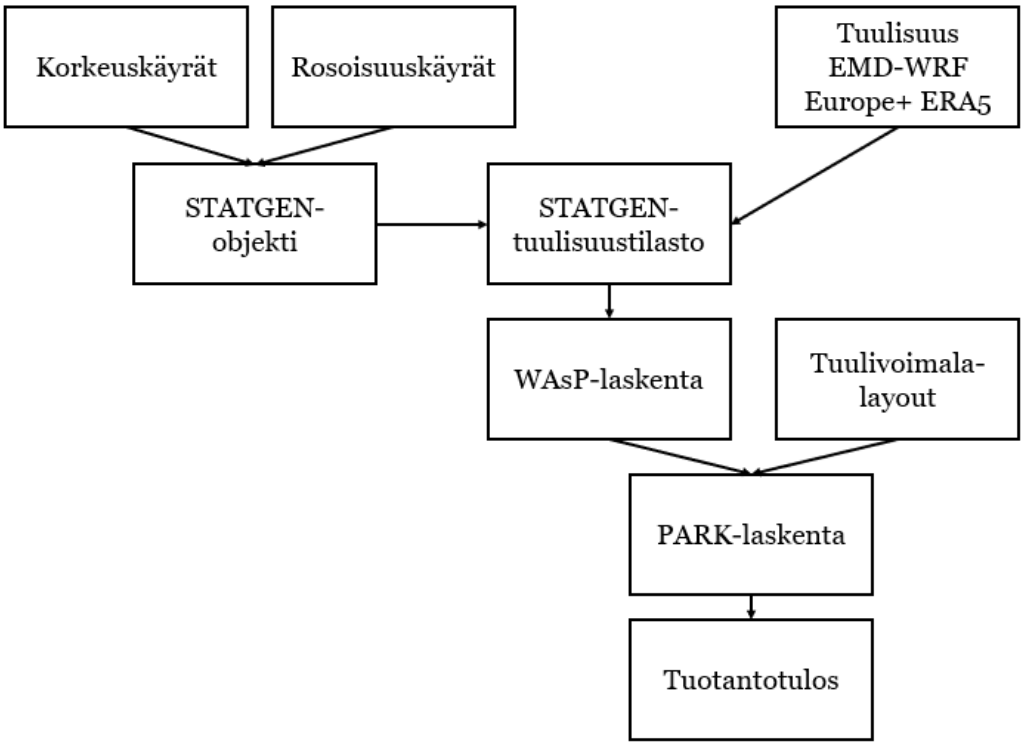
Tarkastelukohteille laskettiin tuntikohtainen sähköntuotantoestimaatti vuodelle 2024 käyttämällä kaupallista windPRO –ohjelmistoa. WindPRO on yleisesti tuulivoimahankkeiden kehityksessä käytetty mallinnusohjelmisto, jolla voidaan laskea mm. tuulivoiman tuotantoa ja melu- ja välkevaikutuksia. Vuosi 2024 valittiin tarkasteluvuodeksi, sillä silloin oli eniten tuulivoimaa liitettynä sähköverkkoon ja sen vaikutus sähkön hintaan oli suurimmillaan historiassa. Kullekin tarkastelukohteen sijainnille mallinnettiin yksi Vestas V172-7.2MW voimala napakorkeudella 175 metriä. V172-7.2MW voimala on yksi tämän hetken tehokkaimmista ja mallinnuksissa eniten käytetyistä voimaloista. V172-7.2MW vuosituotanto eri tuulennopeuksilla on esitetty kuvaajassa (Kuva 3-2) alla.



Kuva 3-2: V172-7.2MW voimalan vuosituotanto suhteessa keskimääräiseen tuulen nopeuteen (Vestas Wind Systems A/S, 2025)

Tuulisuuden lähtötietona käytettiin windPRO:ssa saatavilla olevaa EMD-WRF Europe+ ERA5 tietokantaa, joka päivittyy kuukausittain ja josta vuoden 2024 tuulisuus- ja muut säätiedot ovat saatavilla tuntikohtaisesti. EMD-WRF Europe+ ERA5 perustuu ERA5 uusanalyysidataan, joka hyödyntää säätietoja kahdeksalta vuosikymmeneltä. Uusanalyysi yhdistää historiallisia säämallien tietoja säähavaintoihin. WRF taas on lyhenne sanoista ”weather research and forecast” ja se viittaa mesometeoroligiseen sääennustusmalliin. Mesometeoroligiset mallit koskevat ilmiöitä, joiden kokoluokka on kymmenistä kilometreistä tuhansiin kilometreihin. EMD-WRF Europe+ ERA5 tietokanta on validoitu käyttämällä kolmensadan tuulimittauksen tietoja. Tietokannasta on saatavilla 127 eri parametria, joista relevanteimmat ovat tuulen keskinopeus, tuulen suunta, tuulennopeuden keskihajonta, ilmanpaine,

lämpötila, ja suhteellinen ilmankosteus. (Copernicus Climate Change Service, Climate data store, 2023) (EMD International A/S, 2020) (NCAR, 2025)
Mallinnuksen paikallisen tuulisuuden virtausprofiilin mallintamiseen käytettiin WAsP -ohjelmistoa, joka toimii osana windPRO:n laskelmia. WAsP-mallinnus ottaa huomioon maaston muodot ja maanpinnan rosoisuuden. Tuulivoimalan tuotanto laskettiin windPRO:n PARK-moduulilla. WindPRO-mallinnuksen vaiheet ovat esitettynä kuvassa (Kuva 3-3) alla.



Kuva 3-3: windPRO-mallinnuksen vaiheet

Mallinnuksissa ei ole huomioitu muita tuulivoimaloita tai häviöitä, kuten jäätämistä, koska mallinnuksen haluttiin olevan systemaattisesti samanlainen kaikilla tarkastelukohteilla. Todellisuudessa tuulivoimalaan kohdistuisi tuulipuiston muiden voimaloiden ja naapuripuistojen vanahäviöt sekä jäätämisestä ja sähkönsiirrosta tulevat häviöt.

3.2.1 Tuotantoestimaattien vahvistaminen toteutunutta sähköntuotantoa vastaan

Fingrid julkaisee 3 minuutin reaaliaikatietona tuulivoimatuotantoa Suomessa. Tuulivoimantuotannon historiatiedot ovat ladattavissa Fingridin avoimesta rajapinnasta. Tämän työn windPRO-mallinnetut tuotantoestimaatit vahvistettiin laskemalla korrelaatiota tarkastelukohteiden tuuliestimaattien ja Fingridin julkaiseman koko Suomen tuulivoimantuotannon historiatiedon väliltä (Fingrid Oyj, 2025e). Mikäli korrelaatio on suurimmillaan

Länsi-Suomen tuulivoimatiheimmällä alueella, voidaan tämän opinnäytteen tuotantotehoestimaatteja pitää luotettavina. Korrelaation laskukaava on esitetty kappaleessa 3.4.

3.3 Kannibalisaation arviointimenetelmä

WindPRO tuotantoestimaattimallinnustulokset tarkastelukohteilta koottiin yhteen taulukkoon, jossa tuotantoestimaattien ja Nord Poolin Day-Ahead spot–hintojen perusteella laskettiin tuntikohtaiset tulot ja niistä vuoden kokonaistulo kaikille tarkastelukohteille. Kunkin tarkastelukohteen kokonaistulo jaettiin sen kokonaistuotannolla, jolloin saatiin jokaiselle tarkastelukohteelle keskimääräinen painotettu tulo per megawattitunti eli niin kutsuttu ”Capture price” tai tuotetun sähkön keskihinta.
Tuulivoiman laskettiin tuottavan myös tunteina, joilla sähkön hinta oli negatiivinen. Toistaiseksi tuulivoiman tuotanto tunteina, joilla sähkön hinta on ollut negatiivinen, on ollut kannattavaa, sillä tuulivoimasta on maksettu vihreän sähkön alkuperätakuuta. Alkuperätakuun hinta on kuitenkin laskenut viime vuosina, eikä jatkossa ole odotettavissa, että tuulivoiman tuottaminen negatiivisen sähkön tunteina on kannattavaa. (Yle, 2025) Sähkön tuotannosta ei myöskään makseta syöttötariffin tuotantotukea tunneilta, joilla sähkön hinta on negatiivinen (Energiavirasto, 2025b). Siten voi olla, että todellisuudessa tuulivoimaloiden käyttöä rajoitettaisiin negatiivisen hinnan tunteina ja siten tuotetun sähkön keskihinnat olisivat hieman suurempia.

3.4 Tuotannon ajallisen vaihtelun arviointi

Tarkastelukohteiden tuotantoestimaattien ajallista riippuvuutta toisistaan arvioitiin lisäksi laskemalla korrelaatio matalimman tuotetun sähkön keskihinnan tarkastelukohteen ja muiden tarkastelukohteiden välillä. Korrelaatio ($r_{x,y}$) laskettiin seuraavalla kaavalla:

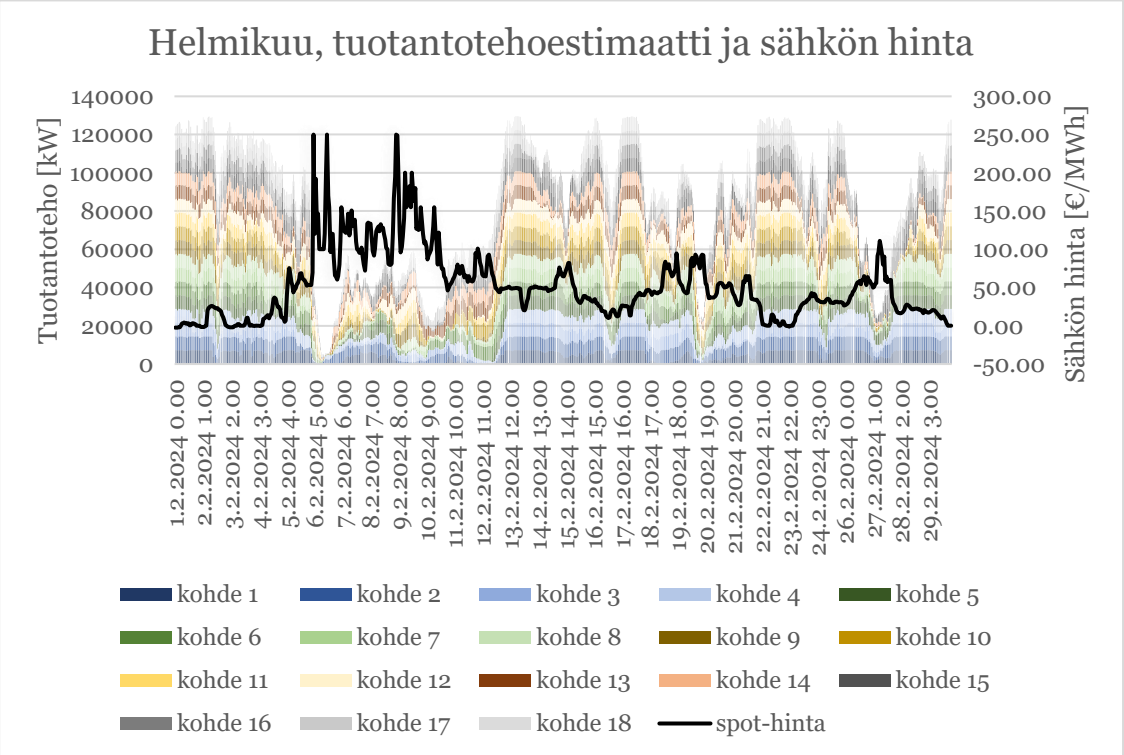
$$r_{x,y} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu_x)(y_i-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} \quad (1)$$

jossa μ on sähköntuotannon keskiarvo, σ on keskihajonta ja n on aikajanan lukujen lukumäärä. Korrelaatiota arvioitiin suhteessa tarkastelukohteiden välisiin etäisyyksiin ja verrattiin Holttisen (2005) tutkimuksen vastaaviin tuloksiin.

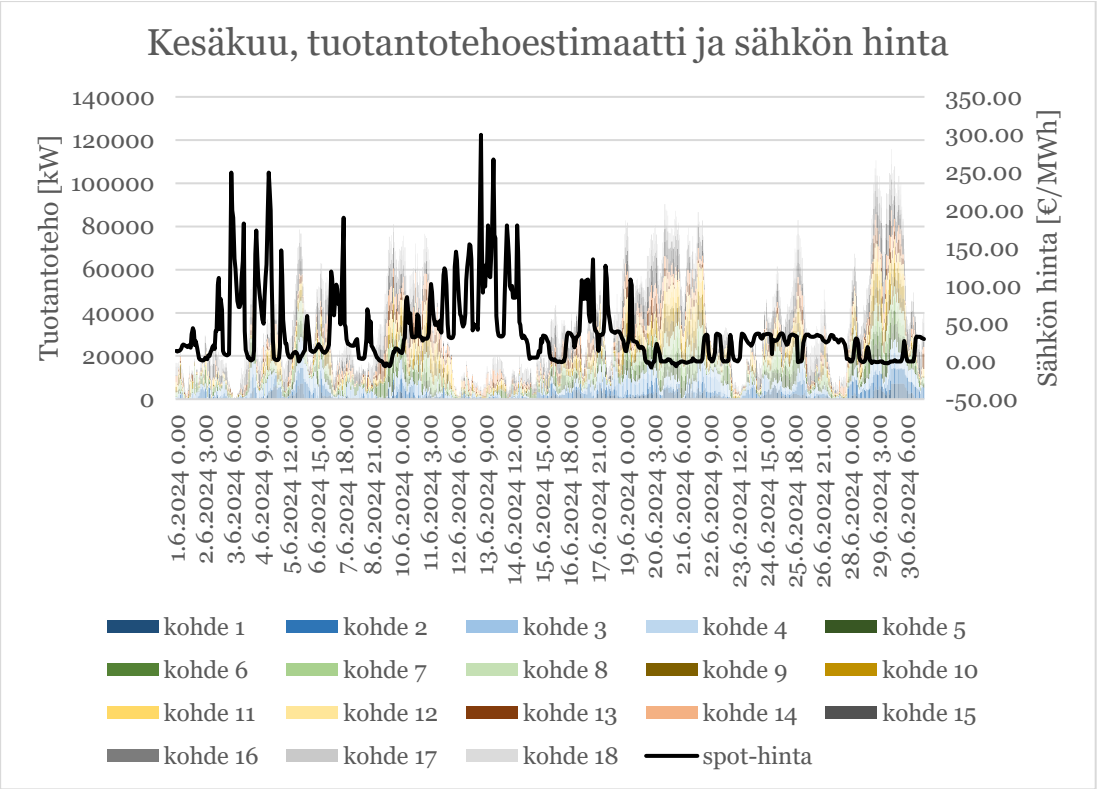
4 Tulokset

4.1 Tuotantotehoestimaatit

Isossa kuvassa, kun tarkastelukohteiden mallinnetut tuotantotehoestimaatit esitetään samassa kuvaajassa aikajanalla, näyttää siltä, että tuulisuus ja sähköntuotanto vaihtelee koko maassa melko samanaikaisesti eikä sijaintien välillä olisi isoja eroja tuulisuudessa. Lisäksi, kun kuvaajalle piirretään sähkön hinta, on havaittavissa, että sähkön hinta on korkeimmillaan, kun tuulivoiman tuotantoa on vähän ja matalimmillaan kun tuulivoiman tuotantoa on paljon. Nämä ovat voimakkaimmin havaittavissa talvikuukausilla, joilla sähkönkulutus on suurta ja tuuliresurssia on paljon. Sen sijaan kesäkuukausina tuuliresurssia on vähemmän, eikä tuulivoimantuotannon vaikutus sähkön hintaan ole yhtä merkittävää. Tarkastelukohteille mallinnettu sähkön tuotantoestimaatti ja sähkön hinta vuoden 2024 helmikuussa on esitetty kuvaajassa (Kuva 4-1) ja kesäkuussa kuvaajassa (Kuva 4-2).

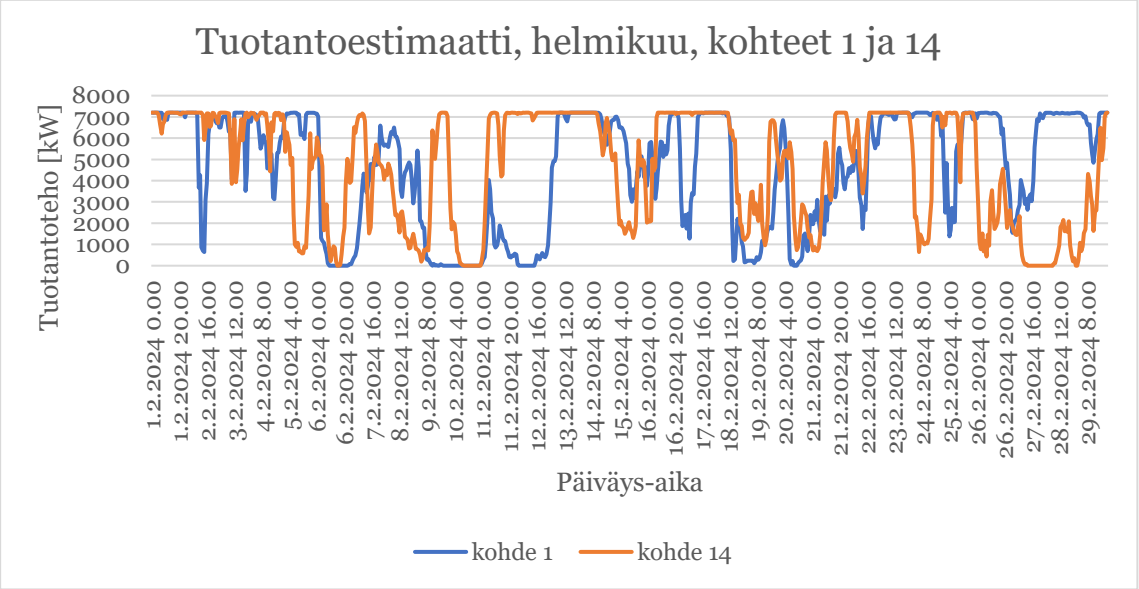


Kuva 4-1: Tarkastelukohteille mallinnettu tuotantoestimaatti ja sähkön spot-hinta helmikuussa 2024.

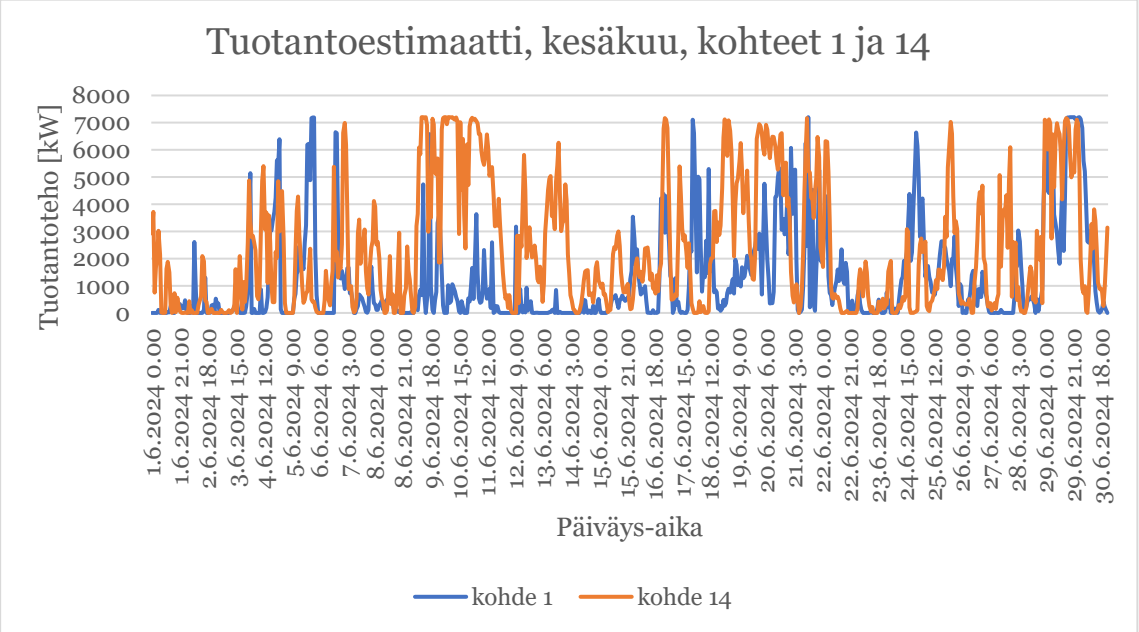


Kuva 4-2: Tarkastelukohteille mallinnettu tuotantoestimaatti ja sähkön spot-hinta kesäkuussa 2024.

Yksittäisiä kohteita keskenään verrattaessa tuotannossa on kuitenkin havaittavissa myös ajallisia eroja, jotka saattavat ajoittuessaan korkeammalle sähkön hinnalle olla merkittäviä tulon lähteitä. Kohteet 1 ja 14 sijaitsevat toisistaan 577 km etäisyydellä ja niiden tuotanto helmikuussa 2024 on esitetty kuvaajassa (Kuva 4-3) alla. Kuvaajasta on luettavissa, että esimerkiksi 10.2.-13.2.2024 välillä kohteella 14 tuotanto on miltei täydellä teholla (7200 kW), mutta kohteella 1 tuotanto on vähäistä. Toisaalta 27.2.-29.2.2024 kohteella 1 tuotanto on lähes täydellä teholla, kun taas kohteella 14 tuotanto on vähäistä. Samojen kohteiden (1 ja 14) tuotanto kesäkuussa 2024 on esitetty kuvassa (Kuva 4-4). Kummankin kohteen tuotanto on kesäkuussa vähäisempää eikä vastaavia pidempiä täyden tehon ajanjaksoja ole havaittavissa, mutta kohteella 14 on havaittavissa enemmän tuotantoa kuin kohteella 1 muutamilla ajanjaksoilla, kuten 9.6.-11.6.2024. Tuulivoiman tuotantoestimaatissa eri tarkastelukohteilla on siis myös ajallisia eroja ja siten oletus tuulisuuden eriaikaisuudesta eri puolilla Suomea pitää ainakin osittain paikkansa.



Kuva 4-3: Mallinnettu sähköntuotannon vaihtelu kohteilla 1 ja 14 helmikuussa 2024.



Kuva 4-4: Mallinnettu sähköntuotannon vaihtelu kohteilla 1 ja 14 kesäkuussa 2024.

4.1.1 Tuotantoestimaattien vahvistaminen toteutunutta sähköntuotantoa vastaan

Edellä esiteltyjen tuulivoiman tuotannonestimaattien pätevyyttä arvioidaan laskemalla korrelaatio tarkastelukohteiden tuotantoestimaattien ja Fingridin julkaiseman tuulivoimantuotannon historiatiedon välille. Korrelaatio on vahvimmillaan (yli 0,7) Länsi-Suomen tuulivoimatiheälle alueelle

sijoittuvilla tarkastelukohteilla (kohteet 5, 6, ja 7). Tuotantoestimaatteja voidaan pitää luotettavina.

Taulukko 4-1: Tarkastelukohteiden tuotantoestimaattien ja koko Suomen toteutuneen tuulivoimantuotannon välinen korrelaatio.

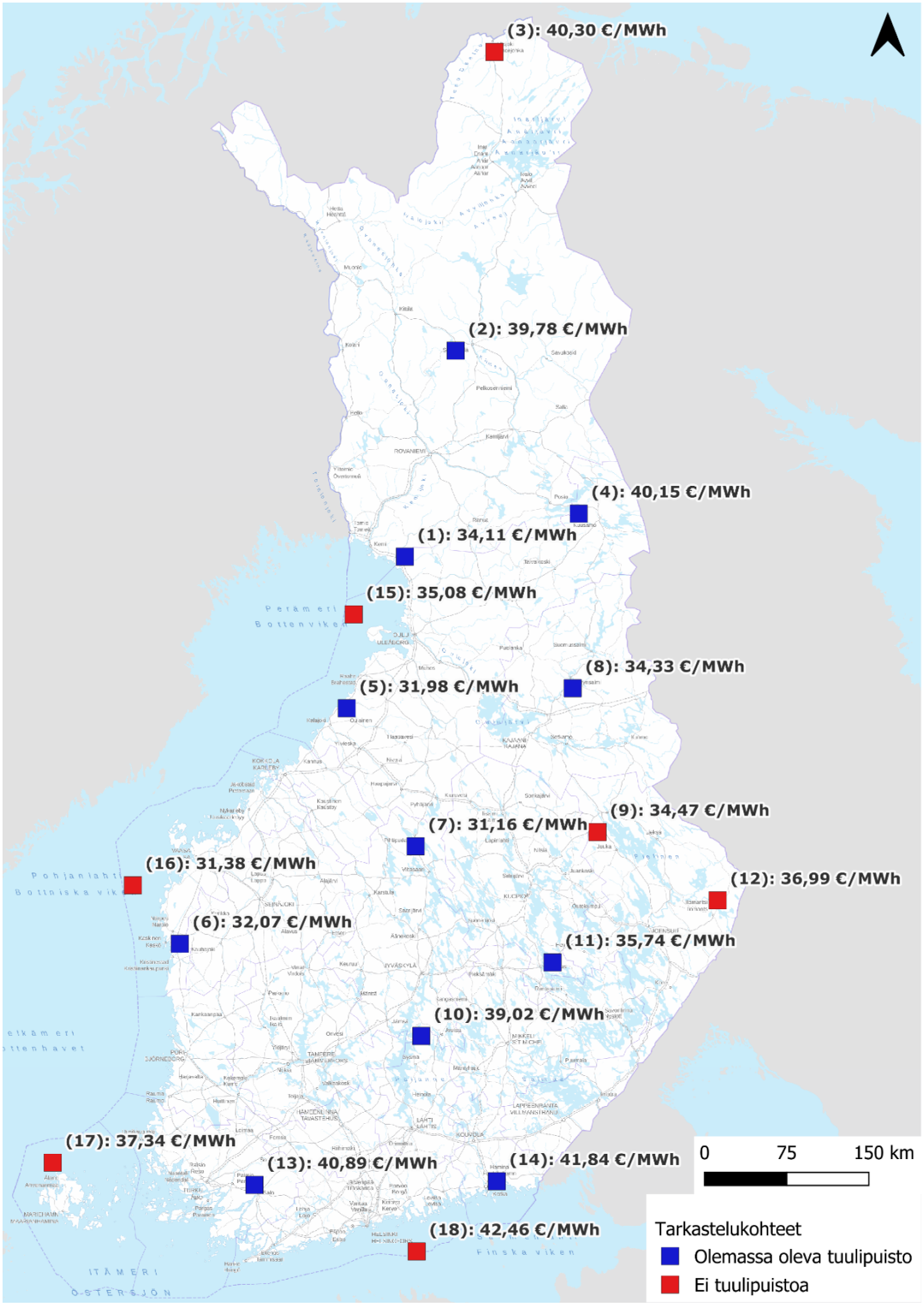
Tarkastelukohde	**Korrelaatio tuulivoimantuotannon historiatietoon**
kohde 1	0.66
kohde 2	0.53
kohde 3	0.36
kohde 4	0.55
kohde 5	0.77
kohde 6	0.72
kohde 7	0.74
kohde 8	0.64
kohde 9	0.63
kohde 10	0.65
kohde 11	0.62
kohde 12	0.52
kohde 13	0.56
kohde 14	0.51
kohde 15	0.65
kohde 16	0.65
kohde 17	0.50
kohde 18	0.47

4.2 Paikkakohtaiset sähkön keskihinnat

Tuotantoestimaatin ajallisten erojen merkittävyyttä kannibalisaation ilmenemiseen arvioidaan käyttämällä apuna tuntikohtaista sähkön Day-Ahead spot-hintaa. Tuntikohtainen tuotantoestimaatti kerrottiin vastaavan tunnin sähkönhinnalla ja niistä laskettiin koko vuoden tulo, joka jaettiin koko vuoden tuotannolla. Näin saatiin jokaiselle tarkastelukohteelle painotettu keskimääräinen sähkön hinta tai ”capture price”, jossa on edustettuna tuotannon ajoittuminen eri sähkön hinnoille. Hinnat on esitetty taulukossa (Taulukko 4-2) alla ja kartalla (Kuva 4-5).

Taulukko 4-2: Tuotantoestimaatin sähkön keskihinta tarkastelukohteilla.

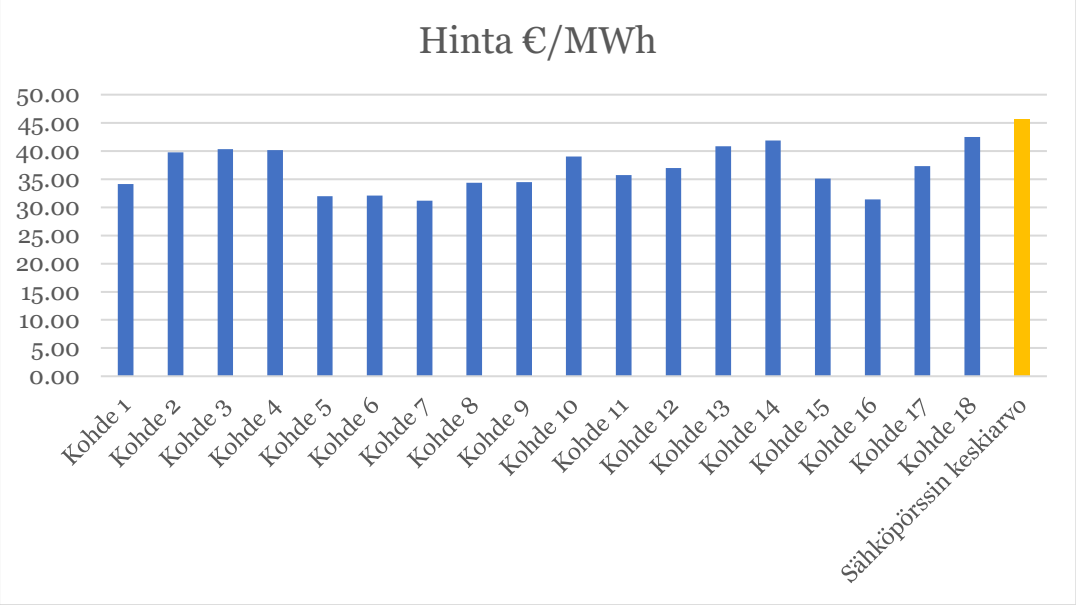
Tarkastelukohde	**Hinta €/MWh**
Kohde 1	34,11
Kohde 2	39,78
Kohde 3	40,30
Kohde 4	40,15
Kohde 5	31,98
Kohde 6	32,07
Kohde 7	31,16
Kohde 8	34,33
Kohde 9	34,47
Kohde 10	39,02
Kohde 11	35,74
Kohde 12	36,99
Kohde 13	40,86
Kohde 14	41,84
Kohde 15	35,08
Kohde 16	31,38
Kohde 17	37,34
Kohde 18	42,46



Kuva 4-5: Tuotantoestimaatin sähkön keskihinta tarkastelukohteilla.

Hinnat ovat alimmillaan maatuulivoimakohteilla 1, 5, 6 ja 7, joiden odotettiin edustavan länsirannan tuulivoimatiheintä aluetta, jolla myös teoriassa kannibalisaatioilmiö olisi merkittävintä, sekä merituulivoimakohteilla 15 ja 16.

Kohteet 15 ja 16 sijaitsevat lähellä (alle 100 km etäisyys) tuulivoimatiheintä (kohteet 1, 5, 6 ja 7) aluetta. Kalleimmat hinnat ovat sen sijaan eteläisimmillä, kohteet 10, 13, 14, 17 ja 18, sekä pohjoisimmilla, kohteet 2, 3 ja 4, sijainneilla. Näillä kohteilla on myös pisimmät etäisyydet tuulivoimatiheimmästä alueesta. Sen sijaan itä-länsi akselilla erot hinnoissa eivät ole yhtä merkittäviä kuin pohjois-etelä suunnassa, mutta myös etäisyydet kohteiden välillä ovat siinä suunnassa vähemmän merkittäviä.
Kaaviossa (Kuva 4-6) tarkastelukohteiden sähkön keskihinta verrattuna sähköpörssin tukkuhinnan keskiarvoon 45,6 €/MWh vuonna 2024. Kaikkien tarkastelukohteiden hinnat jäävät alle tukkuhinnan keskiarvon, joten kaikilla tarkastelukohteilla tavataan kannibalisaatiota.



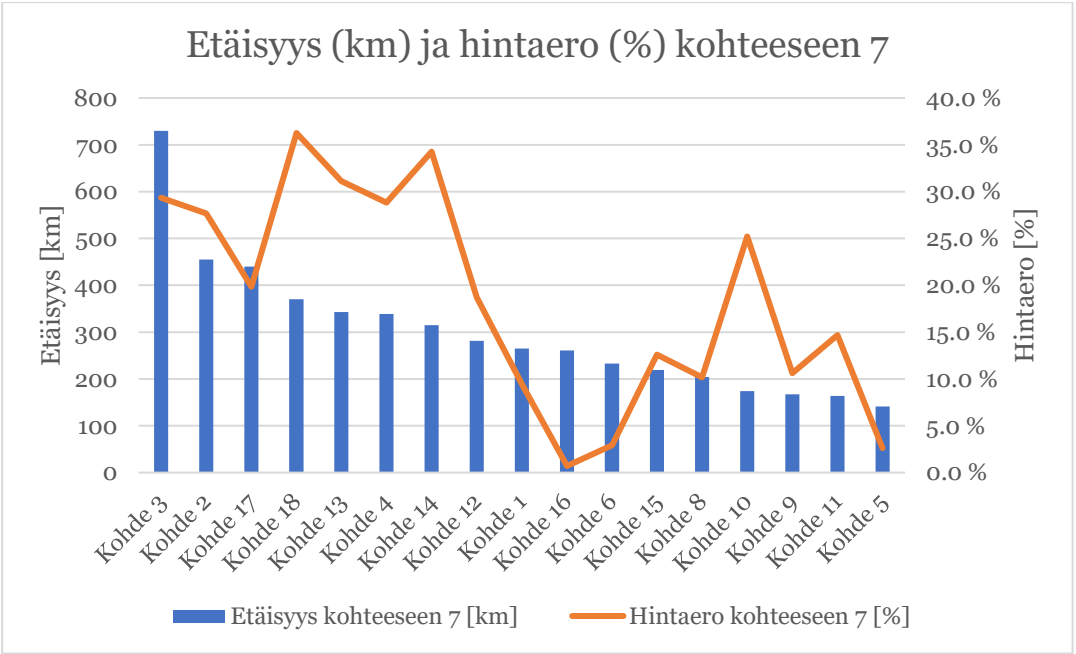
Kuva 4-6: Tarkastelukohteiden sähkön tuotannon keskihinta €/MWh verrattuna Day-Ahead pörssihinnan keskiarvoon vuonna 2024

4.2.1 Keskihintojen vaihtelun suuruus

Matalimman hinnan, tarkastelukohde 7, ja muiden tarkastelukohteiden hintaeroa siihen nähden voi tarkastella taulukossa (Taulukko 4-3) ja kaaviossa (Kuva 4-7). Isoin ero on kohteiden 7 ja 18 välillä 11,30 €/MWh. Kohteella 18 on siis 36,3 % suurempi hinta kuin kohteella 7. Pienimmät eroavaisuudet hinnassa kohteesta 7 ovat kohteilla 5, 6, ja 16, jotka sijaitsevat myös tuulivoimatiheällä Länsi-Suomen alueella.

Taulukko 4-3: Tarkastelukohteiden etäisyys ja tuotettavan sähkön keskihinnan erotus tarkastelukohteesta 7.

Tarkastelukohde	Etäisyys kohteeseen 7 [km]	Hintaero kohteeseen 7 [€/Mwh]	Hintaero kohteeseen 7 [%]
Kohde 1	265	2,95	9,5 %
Kohde 2	455	8,62	27,7 %
Kohde 3	730	9,14	29,3 %
Kohde 4	339	8,99	28,9 %
Kohde 5	141	0,82	2,6 %
Kohde 6	233	0,91	2,9 %
Kohde 8	204	3,17	10,2 %
Kohde 9	167	3,31	10,6 %
Kohde 10	174	7,86	25,2 %
Kohde 11	164	4,58	14,7 %
Kohde 12	281	5,83	18,7 %
Kohde 13	343	9,70	31,1 %
Kohde 14	315	10,68	34,3 %
Kohde 15	219	3,92	12,6 %
Kohde 16	261	0,22	0,7 %
Kohde 17	440	6,18	19,8 %
Kohde 18	370	11,30	36,3 %



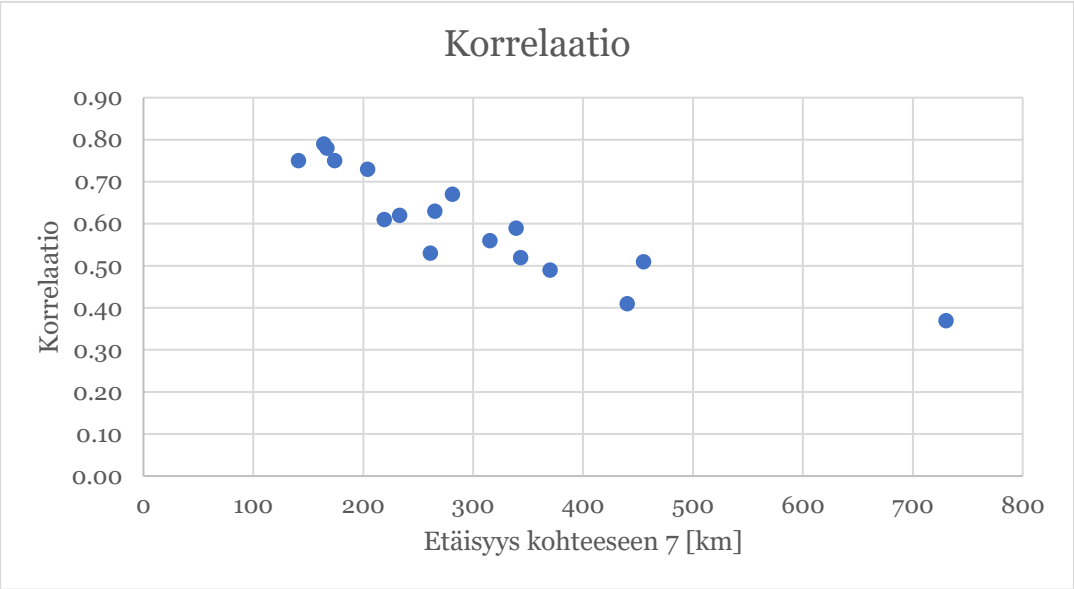
Kuva 4-7: Tarkastelukohteiden etäisyys ja prosentuaalinen hintaero kohteeseseen 7

4.3 Tuotannon ajallinen vaihtelu

Matalimman sähkön hinnan tarkastelukohteen 7 ja muiden tarkastelukohteiden tuotannon korrelaatio laskettiin, jotta tulosta voitaisiin verrata Holttisen (2005) tutkimukseen tuntikohtaisesta vaihtelusta. Lasketut korrelaatiot on esitetty taulukossa (Taulukko 4-4) alla ja kaaviossa (Kuva 4-8). Holttisen tutkimuksen mukaan tuntikohtainen korrelaatio on vahva (yli 0,7) alle 100 km etäisyyksille ja vähenee (alle 0,5) kun etäisyydet kasvavat 200–500 km (Holttinen, 2005).

Taulukko 4-4: Korrelaatio ja etäisyydet tarkastelukohteen 7 ja muiden tarkastelukohteiden välillä

Tarkastelukohde	**Etäisyys kohteeseen 7 [km]**	**Korrelaatio**
Kohde 1	265	0,63
Kohde 2	455	0,51
Kohde 3	730	0,37
Kohde 4	339	0,59
Kohde 5	141	0,75
Kohde 6	233	0,62
Kohde 8	204	0,73
Kohde 9	167	0,78
Kohde 10	174	0,75
Kohde 11	164	0,79
Kohde 12	281	0,67
Kohde 13	343	0,52
Kohde 14	315	0,56
Kohde 15	219	0,61
Kohde 16	261	0,53
Kohde 17	440	0,41
Kohde 18	370	0,49



Kuva 4-8: Tarkastelukohteiden tuotannon korrelaatio suhteessa etäisyyteen kohteesta 7.

Korrelaatio tulokset eivät ole täysin suoraan verrattavissa Holttisen (2005) tuloksiin, sillä lyhyimmätkin etäisyydet kohteiden välillä ovat yli 100 km. Lisäksi Holttisen tutkimuksen tuotantoluvut olivat peräisin olemassa olevista voimaloista ja tuulimittauskampanjoista, kun taas tämän diplomityön tuotantolaskelmat pohjautuvat säämallien uusanalyysidataan. Tämän diplomityön korrelaatiotuloksista on kuitenkin havaittavissa, että alle 200 km etäisyydellä korrelaatio on yli 0,7 ja se vähenee etäisyyksien kasvaessa. Korrelaatio olisi siis hieman vahvempi pidemmillä etäisyyksillä kuin Holttisen (2005) tutkimuksessa.

5 Johtopäätökset

Tämän opinnäytteen laskelmien mukaan hintakannibalisaation voimakkuus on suurimmillaan Suomen länsirannalla, jossa myös sijaitsee eniten tuulivoimaa. Kannibalisaation vaikutus vähenee etäisyyden kasvaessa länsirannan tuulivoimatiheästä alueesta.

Korkeimmat hinnat ja pienimmät kannibalisaatiovaikutukset ovat tarkastelukohteilla, jotka sijaitsevat aivan Etelä-Suomessa, Kainuussa ja Lapissa. Sen sijaan länsi-itä suunnassa kannibalisaation vaikutus ei vähene yhtä merkittävästi, todennäköisesti siksi, että etäisyydet länsirannan tuulivoimatiheästä alueesta eivät ole yhtä suuria kuin etelä-pohjoissuunnassa. Kaikilla tarkastelukohteilla tuotannosta saatava keskimääräinen hinta jäi alle sähköpörssin tukkuhinnan keskiarvon, eli kaikilla tarkastelukohteilla on havaittavissa jonkin verran kannibalisaatiosta johtuvaa hinnan alenemaa.

Tarkastelukohteiden väliset erot ovat kuitenkin merkittäviä. Halvimman hinnan, kohde 7, ja kalleimman hinnan, kohde 18, ero toisiinsa on 36,3 prosenttia. Yhdenkään tarkastelukohteen ei voi sanoa välttyvän kannibalisaatioilmiöltä kokonaan, sillä ne kaikki jäävät alle sähköpörssin keskimääräisen tukkuhinnan, mutta kannibalisaatio on huomattavasti vähemmän merkittävä asia aivan etelässä ja pohjoisessa. Halvimman hinnan kohteen 7 ja muiden kohteiden välille laskettu korrelaation tulokset vastaavat aiempaa tutkimusta tuotannon vaihtelusta etäisyyden kasvaessa tarkasteltavien kohteiden välillä.

Seppälän & Syrin (2025) tutkimuksen lopputulema oli, että uusi tuulivoima ei ole kannattavaa sähkön tuotantoa tämänhetkisillä pääomakustannuksilla ja sähkön hinnalla (PPA-hinnat tai tukkuhinta). Siitä huolimatta uuteen tuulivoimaan investoidaan, kuten (Helsingin Sanomat, 2025) artikkelissa kerrotaan. Tuulivoiman kannattavuus tämänhetkisillä tuotetun sähkönkeskihinnoilla voi siis olla mahdollista, kuten edellä mainitussa artikkelissa kerrottu investointipäätös Rajamäenkylän ja Honkakankaan tuulipuistoihin osoittaa. Molemmat tulevat tuulipuistot sijaitsevat Länsi-Suomen tuulivoimatiheällä alueella; Karijoella, Isojoella ja Halsualla eli Etelä-Pohjanmaalla ja Keski-Pohjanmaalla.

Jos tämän diplomityön tuloksena olevia tuotetun sähkön keskihintoja verrataan preemiojärjestelmän (2.4.2) toteutuneisiin tarjouksiin, vain alin hinta (kohde 7, 31,16 €/MWh) on alle halvimman tarjouksen 31,27 €/MWh. Preemiojärjestelmän tarjoukset on kuitenkin annettu ennen korkojen nousua, joten voi olla, etteivät hanketoimijat enää nykyään tarjoaisi yhtä matalia hintoja. Mikäli vuonna 2017 tehdyn tutkimuksen (Vakkilainen & Kivistö) sähkön tuotantokustannushinta, 41,4 €/MWh, pitäisi nykyään paikkansa, jäisi kuusitoista tarkastelukohdetta kahdeksastatoista sen alle. Jos Fingridin arvio tuotantokustannushinnasta, 32 €/MWh (Fingrid Oyj, 2025d), pitää paikkansa, vain kolme tarkastelukohdetta jää kannattavuuden alle. Toisaalta jos LUT:n tutkimusjohtajan Petteri Laaksosen arvio tuulivoiman

tuotantokustannuksesta, 20-25 €/MWh (Yle, 2023), pitää paikkansa, voi uuden tuulivoiman rakentaminen näillä hinnoilla olla edelleen kannattavaa kaikilla tarkastelukohteilla. Se kuitenkin edellyttää PPA-sopimusten saatavuutta, joka voi olla haastavaa, mikäli sähkön tukkuhinta pysyy alhaisena. Lisäksi on huomioitava, että osa tarkastelukohteista sijaitsee merellä, jossa tuotantokustannushinta on maatuulivoimaa korkeampi. Kaikkien merellä sijaitsevien tarkastelukohteiden keskihinta jää alle Lazardin 65-122 €/MWh (2024) ja Fingridin 49 €/MWh (2025d) arvion merituulivoiman tuotantokustannuksista.

On myös huomioitava, että tämän työn tarkastelu kohdistuu vain tuulivoimatuotannon ajalliseen vaihteluun ja sen vaikutukseen tuotettavasta energiasta saatavaan hintaan. Tuloksia voidaan käyttää alueiden väliseen vertailuun ja arviointiin hankevaihtoehtojen priorisoinnissa. Tuloksia ei voida kuitenkaan suoraan käyttää hankkeiden kannattavuuden arviointiin vaan jokaisen tuulipuiston kannattavuus ja oma tuotantokustannushinta muodostuu alueen paikallisesta tuulisuudesta, investointikustannuksista (tuulivoimalat, maarakennustyöt ym.) ja rahoituskustannuksista eikä kahta samanlaista sijaintia ole. Hankkeiden kannattavuuden arviointi tulee siis tehdä hankekohtaisesti, ottaen huomioon kaikki paikallisesti vaikuttavat tekijät kohteessa.

Kannibalisaatio vaikutuksen voidaan odottaa kasvavan tulevaisuudessa sitä mukaa kun uusia tuulipuistoja otetaan käyttöön. Tämän työn tuloksien perusteella vaikuttaa siltä, että kannibalisaation voimakkuus länsirannan tuulivoimatiheällä alueella on jo lähellä kipurajaa ja se todennäköisesti vaikuttaa jo jossain määrin uuden tuulivoiman investointihalukkuuteen. Toisaalta uudet investoinnit maiden välisiin sähkönsiirtolinjoihin, kuten Aurora line, saattavat vähentää sähkön hinnan vaihtelua ja siten helpottaa kannibalisaatiovaikutusta. Lisäksi sähkön kulutuksen odotetaan kasvavan voimakkaasti. Se saattaa aiheuttaa sähkön hinnalle nousupainetta, joka puolestaan saattaa kannustaa sähköntuotannon lisäinvestointeihin. Myös sähkön varastointia akkuihin ja edullisen sähkön käyttöä vedyn tuotantoon esitetään ratkaisuksi tuulivoiman aiheuttamiin halpoihin sähkön hintoihin. Akuilla ja vetylaitoksilla on kuitenkin myös omat investointi- ja käyttökustannuksensa, jotka on otettava huomioon niiden kannattavuutta arvioitaessa. Seppälä & Syri (2025) tutkivat myös akun käyttöä osana uusiutuvan energian tuotantoa ja totesivat, että akku lisää hybridilaitoksen vuosittaisia tuloja 1,6-2,6 %. Tutkimuksen mukaan akun käytöstä saatava tulo ei kattanut akuston investointiin ja käyttöön menevää hintaa eikä sitä voida siten pitää kannattavana investointina (Seppälä & Syri, 2025).

Lähteet

1 Lähdeluettelo

Ajanaku, B. A. & Collins, A. R., 2023. Does it matter when the wind blows? Differential impacts of wind generation on the PJM wholesale electricity market. *The Electricity Journal,* 36(6).

Bloomberg, 2025. *Investors Learn Brutal Lesson From Sweden's Wind Farm Woes*. [Online] Available at: https://www.energyconnects.com/news/renewables/2025/march/investors-learn-brutal-lesson-from-sweden-s-wind-farm-woes/ [Haettu 28 Maaliskuu 2025].

Copernicus Climate Change Service, Climate data store, 2023. *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. [Online] Available at: https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47 [Haettu 23 Huhtikuu 2025].

EMD International A/S, 2020. *Technical note: Validation of EMD-WRF Europe+ (ERA5) mesoscale dataset*. [Online] Available at: https://help.emd.dk/knowledgebase/content/TechNotes/TechnicalNote7_EMDWRF_EUROPE_Validation.pdf [Haettu 23 Huhtikuu 2025].

Energiateollisuus ry, 2024. *Sähkön hintatilastot 2024*. [Online] Available at: https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/12/Sahkon-hintatilastot-2024_20241230.pdf [Haettu 16 Tammikuu 2025].

Energiateollisuus ry, 2025a. *Sähkötilastot*. [Online] Available at: https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/ [Haettu 16 Tammikuu 2025].

Energiateollisuus ry, 2025b. *Sähkön hintatilasto*. [Online] Available at: https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/sahkon-hintatilasto/ [Haettu 16 Tammikuu 2025].

Energiateollisuus ry, 2025c. *Ajankohtaista sähkömarkkinoista*. [Online] Available at: https://energia.fi/energiapolitiikka/ajankohtaista-sahkomarkkinoista/ [Haettu 12 Maaliskuu 2025].

Energiavirasto, 2023a. *Ensimmäinen tuulivoimala tippui pois syöttötariffituelta*. [Online] Available at: https://energiavirasto.fi/-/ensimmainen-tuulivoimala-tippui-pois-syottotariffituelta [Haettu 15 Tammikuu 2025].

Energiavirasto, 2023b. *Päästökaupan huutokauppatulot kasvoivat 581,6 miljoonaan euroon*. [Online]

Available at: https://energiavirasto.fi/-/paastokaupan-huutokauppatulot-kasvoivat-581-6-miljoonaan-euroon
[Haettu 28 Maaliskuu 2025].

Energiavirasto, 2024. *Preemio-ohje, ohje preemiojärjestelmään hyväksytylle sähkön tuottajalle.* [Online]
Available at: https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12854466/Preemio-ohje/d0d71701-c9a3-122a-1f53-8ec1b97ab8ca/Preemio-ohje.pdf?t=1720094748710
[Haettu 19 Maaliskuu 2025].

Energiavirasto, 2025a. *Tuotantotuki.* [Online]
Available at: https://energiavirasto.fi/tuotantotuki
[Haettu 15 Tammikuu 2025].

Energiavirasto, 2025b. *Syöttötariffin tukiperusteet.* [Online]
Available at: https://tuotantotuki.emvi.fi/MarketPrice
[Haettu 19 Maaliskuu 2025].

Fingrid Oyj, 2022. *Fingridin sähköjärjestelmävisio 2022 - tulevaisuuden järjestelmän skenaarioluonnokset.* [Online]
Available at: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/ajankohtaista/fingrid_sahkojarjestelmavisio_2022_skenaarioluonnokset-final-korjattu-29.8.pdf
[Haettu 9 Huhtikuu 2025].

Fingrid Oyj, 2024. *Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät - Fingridin ennuste Q3/2024.* [Online]
Available at: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/ajankohtaista/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q3-2024-fingrid.pdf
[Haettu 26 Maaliskuu 2025].

Fingrid Oyj, 2025a. *Miten sähkön hinta muodostuu?.* [Online]
Available at: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/miten-sahkon-hinta-muodostuu/
[Haettu 24 Tammikuu 2025].

Fingrid Oyj, 2025b. *Olkiluoto 3 kantaverkossa.* [Online]
Available at: https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/olkiluoto-3-kantaverkkoon/
[Haettu 12 Maaliskuu 2025].

Fingrid Oyj, 2025c. *Aurora Line.* [Online]
Available at: https://www.fingrid.fi/kantaverkko/rakentaminen/hankkeet/aurora-line/
[Haettu 4 Huhtikuu 2025].

Fingrid Oyj, 2025d. *Fingridin sähköjärjestelmävisio vuodelle 2040.* [Online]
Available at:

https://www.fingrid.fi/contentassets/c0abbd8691bc41ad9bcb99fcfc7dffea/sahkojarjestelmavisio---skenaarioluonnosraportti-maaliskuu-2025.pdf
[Haettu 9 Huhtikuu 2025].

Fingrid Oyj, 2025e. *Tietoaineistot / Tuulivoiman tuotano - reaaliaikatieto*. [Online]
Available at: https://data.fingrid.fi/datasets/181
[Haettu 22 Huhtikuu 2025].

Fortum Oyj, 2025. *Sähkön johdannaismarkkinat*. [Online]
Available at: https://www.fortum.fi/tietoa-meista/uutiset-ja-julkaisut/tietopaketit-medialle/sahkon-johdannaismarkkinat
[Haettu 22 Tammikuu 2025].

Global Wind Atlas, 2025. *Global Wind Atlas*. [Online]
Available at: https://globalwindatlas.info/en/
[Haettu 19 Maaliskuu 2025].

Helsingin Sanomat, 2024. *Ruotsalainen jättituulipuisto uhkaa kaatua veronmaksajien niskaan*. [Online]
Available at: https://www.hs.fi/talous/art-2000010416217.html
[Haettu 24 Maaliskuu 2025].

Helsingin Sanomat, 2025. *Suomeen nousee jättimäinen 700 miljoonan euron tuulivoimahanke – ”Rohkaiseva viesti”*. [Online]
Available at: https://www.hs.fi/talous/art-2000011129825.html
[Haettu 1 Huhtikuu 2025].

Hiilineutraalisuomi.fi, 2024. *Hinku-kunnat*. [Online]
Available at: https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-fi/hinku/Hinkukunnat
[Haettu 25 Maaliskuu 2025].

Holttinen, H., 2005. Hourly Wind Power Variations in the Nordic Countries. *Wind Energy,* 8(2), pp. 125-249.

Ilmatieteen laitos, 2010. *Suomen tuulialtas - Yhteenvetoraportti*. [Online]
Available at: https://expo.fmi.fi/aqes/public/Tuuliatlas_yhteenvetoraportti.pdf
[Haettu 3 Helmikuu 2025].

Ilmatieteenlaitos, 2025. *Tuulet ja myrskyt*. [Online]
Available at: https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuulet
[Haettu 25 Maaliskuu 2025].

IRENA, 2025. *Wind energy*. [Online]
Available at: https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy
[Haettu 30 Huhtikuu 2025].

Lazard, 2024. *Levelized cost of energy+*. [Online]
Available at: https://www.lazard.com/media/xemfeyok/lazards-lcoeplus-june-2024-_vf.pdf
[Haettu 31 Maaliskuu 2025].

Liebensteiner, M. & Naumann, F., 2022. Can carbon pricing counteract renewable energies' cannibalization problem?. *Energy Economics,* 115(November 2022), p. 106345.

Magnusson, R., 2019. *Uusiutuvan energian tarjouskilpailun tulokset*. [Online]
Available at: https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12854466/Preemion%20tulosten%20info%202019-03-27.pdf/3cf624fd-e373-dd06-b4a0-e70cb5a46cfd/Preemion%20tulosten%20info%202019-03-27.pdf
[Haettu 19 Maaliskuu 2025].

Motiva Oy, 2024. *Syöttötariffi eli takuuhintajärjestelmä*. [Online] Available at: https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/syottotariffi_eli_takuuhintajarjestelma
[Haettu 15 Tammikuu 2025].

NCAR, 2025. *Weather Research & Forecasting Model (WRF)*. [Online] Available at: https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf
[Haettu 25 Huhtikuu 2025].

Nord Pool AS, 2025a. *Our business*. [Online] Available at: https://www.nordpoolgroup.com/en/About-us/our-business/
[Haettu 16 Tammikuu 2025].

Nord Pool AS, 2025b. *Day-ahead market*. [Online] Available at: https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/Day-ahead-market/
[Haettu 16 Tammikuu 2025].

Nord Pool AS, 2025c. *Intraday market*. [Online] Available at: https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/Intraday-market/
[Haettu 16 Tammikuu 2025].

Peña, J. I., Rodrígues, R. & Mayoral, S., 2022. Cannibalization, depredation, and market remuneration of power plants. *Energy Policy,* Osa/vuosikerta 167, p. 113086.

Puolustusvoimat, 2023. *Puolustusvoimat ja tuulivoimarakentaminen*. [Online]
Available at: https://puolustusvoimat.fi/-/puolustusvoimat-ja-tuulivoimarakentaminen
[Haettu 11 Helmikuu 2025].

Reichenberg, L., Ekholm, T. & Boomsma, T., 2023. Revenue and risk of variable renewable electricity investment: The cannibalization effect under high market penetration. *Energy,* Osa/vuosikerta 284, p. 128419.

Seppälä, S. & Syri, S., 2025. Wind, PV, and Hybrid Power Plant Operation in Competitive Nordic Electricity Market With High Profit Cannibalization. *International Journal of Energy Research,* 2025(1).

Stanitsas, M. & Kirytopoulos, K., 2023. Sustainable Energy Strategies for Power Purchase Agreements (PPAs). *Sustainability,* 15(8).

Stiewe, C., Xu, A. L., Eicke, A. & Hirth, L., 2025. Cross-border cannibalization: Spillover effects of wind and solar energy on interconnected European electricity markets. *Energy Economics,* Osa/vuosikerta 143, p. 108251.

Suomen Pankki, 2025. *Euriborkorot kuukausittain*. [Online] Available at: https://www.suomenpankki.fi/fi/tilastot/taulukot-ja-kuviot/korot/kuviot/korot_kuviot/euriborkorot_kk_chrt_fi/
[Haettu 1 Huhtikuu 2025].

Suomen Uusiutuvat ry, 2025a. *Tuulivoimavuosi 2024: Suomen tuulivoimakapasiteetti kasvoi 20 prosenttia*. [Online] Available at: https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoimavuosi-2024-suomen-tuulivoimakapasiteetti-kasvoi-20-prosenttia/
[Haettu 15 Tammikuu 2025].

Suomen Uusiutuvat ry, 2025b. *Miksi tuulivoimaa voidaan rakentaa nykyään ilman tukia?*. [Online] Available at: https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/faktapaperit-tuulivoimasta/miksi-tuulivoimaa-voidaan-rakentaa-nykyaan-ilman-tukia/
[Haettu 15 Tammikuu 2025].

Suomen Uusiutuvat ry, 2025c. *Tuulivoimatilastot 2024*. [Online] Available at: https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoimatilastot-2024/
[Haettu 16 Tammikuu 2025].

Suomen Uusiutuvat ry, 2025d. *Tuulivoima noisu Suomen toiseksi suurimmaksi sähköntuotantomuodoksi*. [Online] Available at: https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima-nousi-suomen-toiseksi-suurimmaksi-sahkontuotantomuodoksi/
[Haettu 22 Tammikuu 2025].

Suomen Uusiutuvat ry, 2025e. *Investoinnit*. [Online] Available at: https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/tuulivoiman-yhteiskuntavaikutukset/taloudellisuus/investoinnit/
[Haettu 31 Maaliskuu 2025].

Suomen Uusiutuvat ry, 2025f. *Tuulivoimahankkeet Suomessa*. [Online] Available at: https://suomenuusiutuvat.fi/media/2025.01_surf-tuulivoimahankkeet-suomessa-1.pdf
[Haettu 3 Huhtikuu 2025].

Suomen Uusiutuvat ry, 2025g. *Tuulivoimatuotannon vaihtelevuus*. [Online]
Available at: https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/tuulivoimatuotanto/
[Haettu 4 Huhtikuu 2025].

Suomen uusiutuvat ry, 2025h. *Vastauksia tuulivoimasta*. [Online] Available at: https://suomenuusiutuvat.fi/usein-kysyttya/tuulivoimasta/tuulivoimalat/
[Haettu 4 Huhtikuu 2025].

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2025. *Uusiutuvan energian tuet*. [Online] Available at: https://tem.fi/uusiutuvan-energian-tuet [Haettu 15 Tammikuu 2025].

Vakkilainen, E. & Kivistö, A., 2017. *Sähkön tuotantokustannusvertailu,* Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Vestas Wind Systems A/S, 2023. *Reducing wind energy production uncertainty: the power of high capacity factor wind turbines*. [Online] Available at: https://www.vestas.com/en/media/blog/technology/reducing-wind-energy-production-uncertainty [Haettu 4 Huhtikuu 2025].

Vestas Wind Systems A/S, 2025. *Enventus brochure*. [Online] Available at: https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/brochures/onshore/EnVentus_Platform_Brochure.pdf.coredownload.inline.pdf [Haettu 19 Maaliskuu 2025].

Yle, 2023. *Selvitimme, onko tuulivoiman rakennusbuumi todella hyytymässä*. [Online] Available at: https://yle.fi/a/74-20053695 [Haettu 31 Maaliskuu 2025].

Yle, 2025. *Pörssisähkön miinushinnat alkavat jäädä lopullisesti historiaan – tässä syyt*. [Online] Available at: https://yle.fi/a/74-20149558 [Haettu 19 Maaliskuu 2025].

Ympäristöministeriö, 2024. *Ilmastovuosikertomus 2024 - tiivistelmä*. [Online] Available at: https://ym.fi/documents/1410903/215256471/YM-ilmastovuosikertomus-2024-tiivistelma.pdf/eec3ef45-45a8-94cc-ab35-b446ad997701/YM-ilmastovuosikertomus-2024-tiivistelma.pdf?t=1719411740765 [Haettu 25 Maaliskuu 2025].

Ympäristöministeriö, 2025a. *Euroopan unionin ilmastopolitiikka*. [Online] Available at: https://ym.fi/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka [Haettu 10 Maaliskuu 2025].

Ympäristöministeriö, 2025b. *Suomen kansallinen ilmastopolitiikka*. [Online] Available at: https://ym.fi/suomen-kansallinen-ilmastopolitiikka [Haettu 10 Maaliskuu 2025].

ÅF, 2019. *Power purchase agreements – Pitkäaikaiset sähkönostosopimukset*. [Online] Available at: https://suomenuusiutuvat.fi/media/sty_ppa_materiaalipaketti_final_201

80211-pidempi.pdf
[Haettu 24 Maaliskuu 2025].