

Jiri Pyykkönen

# TUULIVOIMAN VAIKUTUKSET SUOMEN SÄHKÖMARKKINAAN

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Professori Sami Repo  
Joulukuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Jiri Pyykkönen: Tuulivoiman vaikutukset Suomen sähkömarkkinaan  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatinohjelma  
Joulukuu 2022

---

Pohjoismaiset sähkömarkkinat sekä sähköenergiajärjestelmä ovat muuttumassa nopeaa vauhtia. Muutosta on vauhdittanut kansainväliset ja kansalliset ilmastotavoitteet, joista yksi on EU:n hiilineutraalisuus vuoteen 2050 mennessä. Suomi on asettanut yhdeksi ilmastotavoitteeksi sen, että 2020-luvun loppuun mennessä sähkön loppukulutuksesta yli 50 prosenttia on tuotettu uusiutuvilla energialähteillä. Kyseinen ilmastotavoite vaatii lisää uusiutuvilla energialähteillä tuotettua sähköenergiaa, ja tätä on pyritty toteuttamaan tuulivoimalla sekä aurinkovoimalla tuotetulla sähköllä, koska uusiutuvista energialähteistä aurinko- ja tuulivoimalla on suurimmat kasvupotentiaalit.

Tutkimuksen tavoitteena on ymmärtää, miten kasvavan tuulivoimakapasiteetin määrä on vaikuttanut ja vaikuttaa tulevaisuudessa sähkömarkkinoihin. Tarkemmin perehdytään sähkön aluehinnan muutoksiin Suomessa ja siihen, kuinka se korreloi Suomen tuulivoiman tuotannon kanssa. Suomen aluehinnan muutoksia tarkastellaan päivänsisäisillä- sekä vuorokausimarkkinoilla. Ymmärtääkseen vaikutuksia sähkömarkkinoilla tutkimuksessa perehdytään pohjoismaisiin sähkömarkkinoihin.

Sähkömarkkinoista siirrytään tarkastelemaan Suomen nykyistä tuulivoiman tuotannon tilannetta ja kuinka se on kehittynyt nykyiseen tilaan. Tuulivoiman kehittymistä ei tarkastella teknisestä näkökulmasta, vaan kuinka tuet ja erilaiset rahoituskeinot ovat vauhdittaneet tuulivoimakapasiteetin nopeaa kasvua. Tuulivoiman ennustamisen tuomat haasteet ja sen yhteys sähkömarkkinoihin on myös kolmannessa osiossa ja kuinka ennustaminen vaikuttaa muuhun tuotantoon.

Tuulivoiman ennustamisesta ja sen haasteista jatketaan tuulivoiman tuotannon ja Suomen aluehinnan korrelaatioon. Korrelaatiota tutkitaan avoimen datan avulla, joka on haettu Fingridin sekä Nord Poolin internet-sivuilta. Datan avulla saaduista tuloksista nähdään se, että Suomen aluehinta korreloi negatiivisesti tuulivoiman tuotannon kanssa. Lisäksi tuulivoiman ennustevirhe korreloi vahvasti päivänsisäisten markkinoiden hinnan kanssa.

Tutkimuksen yhteenvedona on se, että tuulivoima tulee siirtämään markkinoita enemmän päivänsisäisiä markkinoita kohti ja siten tuulivoima vaikuttaa entistä enemmän markkinahintaan sekä energiajärjestelmän toimintaan. Erityisesti tuulivoiman ennustetun ja todellisen tuotannon ero eli ennustevirhe tulee olemaan tuulivoiman osuuden kasvaessa entistä suurempi tekijä hinnan määrittämisessä, koska sen suuruus korreloi vahvasti päivänsisäisen aluehinnan kanssa.

Avainsanat: Tuulivoima, sähkömarkkinat, sähköpörssi, aluehinta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Tutkimuksen tausta .....	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset .....	2
1.3 Tutkimusmetodologia ja tutkimuksen rakenne .....	2
2. SÄHKÖMARKKINAT .....	3
2.1 Sähkön tukkumarkkinat .....	4
2.1.1 Elbas- ja Elspot-markkinat .....	5
2.1.2 Johdannaismarkkinat .....	6
2.1.3 OTC-markkinat .....	7
2.2 Suomen sähkömarkkina .....	7
2.3 Vähittäismarkkinahinnan muodostuminen Suomessa .....	8
2.4 Tasehallinta sähkömarkkinoilla .....	9
3. TUULIVOIMA SUOMESSA .....	11
3.1 Tuulivoiman tukeminen sähkömarkkinoilla .....	14
3.2 Tuulivoiman tuotantokustannukset ja sähkösopimukset .....	15
3.3 Tuotannon ennustamisen luomat haasteet .....	16
3.4 Epätasaisen tuotannon tasoittaminen sähkömarkkinoilla .....	17
4. TUULIVOIMA SÄHKÖMARKKINOILLA .....	19
4.1 Suomen aluehinnan ja tuulivoiman tuotannon välinen korrelaatio .....	19
4.2 Tulokset .....	22
5. PÄÄTELMÄT .....	24
LÄHTEET .....	26

LIITE A: Luvun neljä kuvissa käytetyt arvot

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

STY	Suomen Tuulivoimayhdistys
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
CHP	Combined heat and power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Uusiutuvien energialähteiden tuottama sähkön osuus Suomessa ja kansainvälisesti on kasvanut jo pitkään. Tähän syynä ovat erilaiset energia- ja ilmastostrategiat. EU on asettanut omassa ilmastostrategiassaan tavoitteeksi olevansa hiilineutraali 2050 mennessä (TEM 2022). Suomessa tavoitteeksi on asetettu, että uusiutuvilla energialähteillä tuotettaisiin yli 50 prosenttia energian loppukulutuksesta 2020-luvun loppuun mennessä. (Motiva 2022a) Uusiutuvista energialähteistä aurinko- ja tuulivoimalla on suurimmat kasvupotentiaalit. Suomessa on paljon käyttämätöntä tuulivoimapotentiaalia. Tuulivoimalahankkeiden määrä kasvaa joka vuosi. Tuulivoimaloiden tuotantokapasiteetin määrä tulee eri arvioiden mukaan moninkertaistumaan vuoteen 2030 mennessä Suomessa (STY 2022a).

Tuulivoima tuo haasteitakin mukanaan, koska tuulivoima on riippuvainen sääolosuhteista, muodostuu suureksi haasteeksi kysynnän mukainen jousto. Tuulivoiman tehojousto on vain yksipuolista. Tuulivoimatuotantoa voidaan aina rajoittaa kysynnän mukaan, mutta ei usein lisätä kysynnän kasvaessa ylöspäin. Tuulivoimakapasiteetin lisääntyessä tullaan tarvitsemaan lisää säätövoimaa. Säätövoimalla tarkoitetaan säätösähkömarkkinoita, josta ostetaan puuttuva teho kysynnän vastaamiseksi. Suomessa tuulivoiman määrä ei kuitenkaan lähivuosina tule ylittämään sellaista määrää, että säätövoimaa jouduttaisiin rakentamaan lisää. Säätövoimana toimii yleisimmin vesivoima tai naapurimaista ostettu sähkö. Pohjoismaiden runsas vesivoimatuotanto on tärkeässä roolissa säätövoimana uusiutuville energiamuodoille. (STY 2022b)

Pohjoismaiset sähkön tukkumarkkinat ovat myös tärkeässä roolissa kysynnän ja tarjonnan tasaamisessa. Kuitenkin vuoden 2022 maailman tilanteen takia, säätövoiman riittävyys on herättänyt epäilyjä. Erityisesti esimerkiksi Keski-Euroopassa on suurta riippuvuutta maakaasun tuontiin Venäjältä, jossa vuonna 2022 on erityisen epävakaa poliittinen tilanne vuoden alusta lähtien. Muun muassa tämä on aiheuttanut energiakriisin Euroopassa. Energiakriisin seurauksena tuulivoiman suosio on kasvanut entisestään ja se tulee merkittävästi vaikuttamaan sähkömarkkinoilla käytävään kaupankäyntiin. Tästä laajasta muutoksesta on käytetty termiä ”energiamurros”, joka kuvastaakin hyvin tätä käynnissä olevaan sähkön tuotantorakenteen muuttumista.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkimuksen tavoitteena on ymmärtää, miten kasvavan tuulivoimakapasiteetin määrä vaikuttanut ja vaikuttaa tulevaisuudessa sähkömarkkinahintaan Suomessa ja itse sähköenergiajärjestelmään. Erityisesti tutkimus perehtyy sähkön aluehintaan Suomessa ja siihen, kuinka se korreloi Suomen sisällä tapahtuvan tuulivoiman tuotannon kanssa. Suomen aluehinnan muutoksia tarkastellaan päivänsisäisillä- sekä vuorokausimarkkinoilla. Lisäksi tutkimuksen tavoitteena on ymmärtää, kuinka tuulivoiman ennustevirheet lisäävät tasehallinnan tarvetta sekä reservimarkkinoiden tarvetta. Muutoksia sähkömarkkinoilla tutkitaan käyttäen Fingrid Oy:n ja Nord Poolin avointa dataa.

Työssä ei tarkastella tarkasti tuulivoiman kustannusrakennetta, eikä tuulivoimaan toimintaa liittyviä teknisiä asioita. Ymmärtääkseen vaikutuksia sähkömarkkinoilla työssä perehdytään myös pohjoismaisiin sähkömarkkinoihin. Sähkömarkkinoista tärkein osa-alue on ymmärtää reservimarkkinat sekä tasehallinnan rooli sähkömarkkinoilla.

## 1.3 Tutkimusmetodologia ja tutkimuksen rakenne

Tämä kandidaatintyö toteutetaan kirjallisuuskatsauksena sekä tutkimalla avointa dataa. Pääasiallisina lähteinä toimivat tieteelliset artikkelit, kuin myös Fingridin ja STY:n internet-sivut. Artikkeleiden hakuun on käytetty pääosin Tampereen yliopiston hakupalvelua Andoria sekä Google Scholaria. Työssä käytetään Nordpoolin ja Fingridin verkkosivuilta löytyvää dataa. Tuulivoiman tuotantoennusteet ja todellisen tuotannon suuruuden tiedot haetaan Fingridin internet-sivuilta löytyvästä avoimen datan pankista. Nord Pool sen sijaan tarjoaa myös näitä dataa sekä työn kannalta tärkeät aluehinnat liittyen sähkön markkihintoihin.

Tutkimuksessa aluksi käydään läpi kirjallisuuskatsauksessa, mitä on sähkömarkkinat ja minkälainen rakenne pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla on. Luvussa kaksi perehdytään myös siihen, mikä on Suomen rooli pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla ja kuinka Suomen sisällä markkinoiden tasapainoa pyritään pitämään.

Pohjoismaisista sähkömarkkinoista siirrytään Suomen tuulivoiman nykytilanteeseen ja kuinka se on kehittynyt nykyiseksi. Luvussa kolme tarkastellaan myös tuulivoiman ennustamisen tuomat haasteet. Luvussa neljä käsitellään Fingridin ja Nord poolin internet-sivuilta haettua dataa tuulivoimasta sekä Suomen aluehinnasta. Luvussa viisi on yhteenveto tutkimuksesta.

## 2. SÄHKÖMARKKINAT

Yhteiset sähkömarkkinat ovat kustannustehokkain keino tasapainottaa kysyntä ja tarjonta sekä varmistaa yhteiskunnan sähkönsaanti. Sähkömarkkinat pitää sisällään kaiken, mitä liittyy sähköstä käytävään kauppaan. Sähkömarkkinat sisältävät erilaisia markkinoita, joissa käydään kauppaa erilaisilla tuotteilla kuten futuureilla. Niin sanottuja fyysisiä osia ei mielletä osaksi sähkömarkkinoita kuten sähköverkkoyhtiöiden mahdollistama sähkönsiirto. Sähköverkkoyhtiöt mahdollistavat kuitenkin sähkömarkkinoiden toimimisen, koska ne yhdistävät tuotannon ja kulutuksen konkreettisesti toisiinsa, jotta kaupankäynti onnistuu. (Fingrid 2022b) Kuvassa 1 on kuvattu sähkömarkkinoiden rakenne ja kuinka sen eri osat sijoittuvat toimituksesta katsottuna.



**Kuva 1:** Sähkömarkkinoiden rakenne (mukailten Fingrid 2022b)

Euroopan ensimmäisiä valtioita, jotka ovat avanneet sähkömarkkinansa vapaalle kilpailulle ovat olleet muun muassa Suomi, Norja, Iso-Britannia ja Ruotsi. Sähköverkon asiakkaat ovat jo yli 20 vuotta saaneet valita vapaasti oman sähkömyyjän Suomessa. Sähkömarkkinat alkoivat avautumaan vaiheittain Suomessa vuodesta 1995 lähtien. Sen seurauksena sähkönsiirto ja -jakelu erotettiin tuotannosta ja myynnistä. Vuodesta 1998 alkaen ovat sähköverkon asiakkaat tämän ansiosta voineet itse valita sähkönsä ja kilpailuttamaan oman sopimuksensa tämän ansiosta. Pohjoismaiden sähkömarkkinat ovat toimineet erityisen hyvin johtuen sähkönsä tuottajien ja myyjien suuresta määrästä. (Kauniskangas 2009) Suomi toimii osana pohjoismaisia sähkönsä tukkumarkkinoita, jossa Pohjoismaiden lisäksi markkinoilla toimivat myös Viro, Latvia ja Liettua. Noin 70 prosenttia sähkönsä tukkukaupasta käydään Norjassa sijaitsevan sähköpörssin kautta. (TEM

2022b) Suomi kuuluu myös osaksi eurooppalaisia sähkön tukkumarkkinoita (Fingrid 2022b).

Avoimuus on parantunut huomattavasti Euroopassa viime vuosina, ja se on huipentunut sähkömarkkinoita koskevien tietojen toimittamisesta ja julkaisemisesta kesällä 2013 EU:n antamaan asetukseen. Tämän asetuksen myötä Euroopan jäsenvaltioiden tietojen toimittajien ja omistajien on nyt pakko toimittaa sähköntuotantoon, kuormitukseen, siirtoon ja taseselvitykseen liittyviä perustietoja julkaistavaksi ENTSO-E:n avoimuusfoorummin kautta. Tämä foorumi mahdollistaa tarvittavien sähkömarkkinatietojen toimittamisen tulevaisuutta varten ja helpottaa edelleen tehokkaiden ja kilpailukykyisten energiamarkkinoiden kehittämistä kaikkialla Euroopassa. Tällainen kehitys tukee koko Euroopan sähkömarkkinoiden vakaata kehitystä integraation, kilpailun ja markkinoiden kilpailukyvyyn osalta. (ENTSO-E 2022)

Suurin osa tukkusähkökaupasta käydään Norjassa sijaitsevan sähköpörssin kautta. Tämän lisäksi tukkukauppaa käydään OTC-markkinoilla (Partanen et al. 2015). Kilpailun avaaminen sähkömarkkinoilla ja yhteiset sähkömarkkinat ovat lisänneet merkittävästi tehokkuutta sekä myös ympäristöhyötyjä. Tähän on syynä Pohjoismaissa runsaasti käytetty vesivoima. (TEM 2022) Norjassa tuotetaan noin 99 prosenttia sähköenergiasta vesivoimalla. Tuulivoiman määrä on myös kasvanut paljon viimeisen kymmenen viime vuoden aikana, mikä pystytään hyödyntämään myös tehokkaammin vesivoiman lailla yhteisten sähkömarkkinoiden avulla. Euroopassa katettiin sähkönkulutuksesta vuonna 2019 jo 15 prosenttia tuulivoimalla, mikä vastaa 417:ää terawattituntia (STY 2022e). Tästä seurauksena päivänsisäisillä- ja säätösähkömarkkinoilla on aikaisempaa tärkeämpi rooli sähkömarkkinoilla, koska säästä riippuvainen tuotanto usein eroaa ennusteista, eikä tuotanto näin välttämättä vastaa tarjontaa. (Spodniak et al. 2021)

## 2.1 Sähkön tukkumarkkinat

Pohjoismaissa sähkön tukkumarkkinat tapahtuvat sähköpörssissä sekä kahdenvälisillä OTC-markkinoilla. Sähköpörssissä tukkumarkkinahinta määräytyy kysynnän tarjonnan mukaan. Pohjoismaisilla sähkön tukkumarkkinoilla toimii osakeyhtiö Nord Pool, joka ylläpitää markkina-alustaa, jossa käydään kauppaa sähköpörssin fyysisillä tuotteilla. Nasdaq OMX Commodities ylläpitää markkina-alustaa johdannaistuotteille, jossa käydään kauppaa finanssijohdannaisilla. Finanssimarkkinoilla kaupankäynti ei yleensä sisällä fyysistä tuotetta. Johdannaismarkkinoille referenssihintana toimii systeemi hinta. Systeemi hinta muodostuu sähköpörssin Spot-markkinoilla. Sähköpörssi tuo monia etuja mukanaan muun muassa se, että kaupankäynnissä vastapuolena toimii itse sähköpörssi, minkä takia vastapuolista riskiä ei ole. (Partanen et al. 2015)

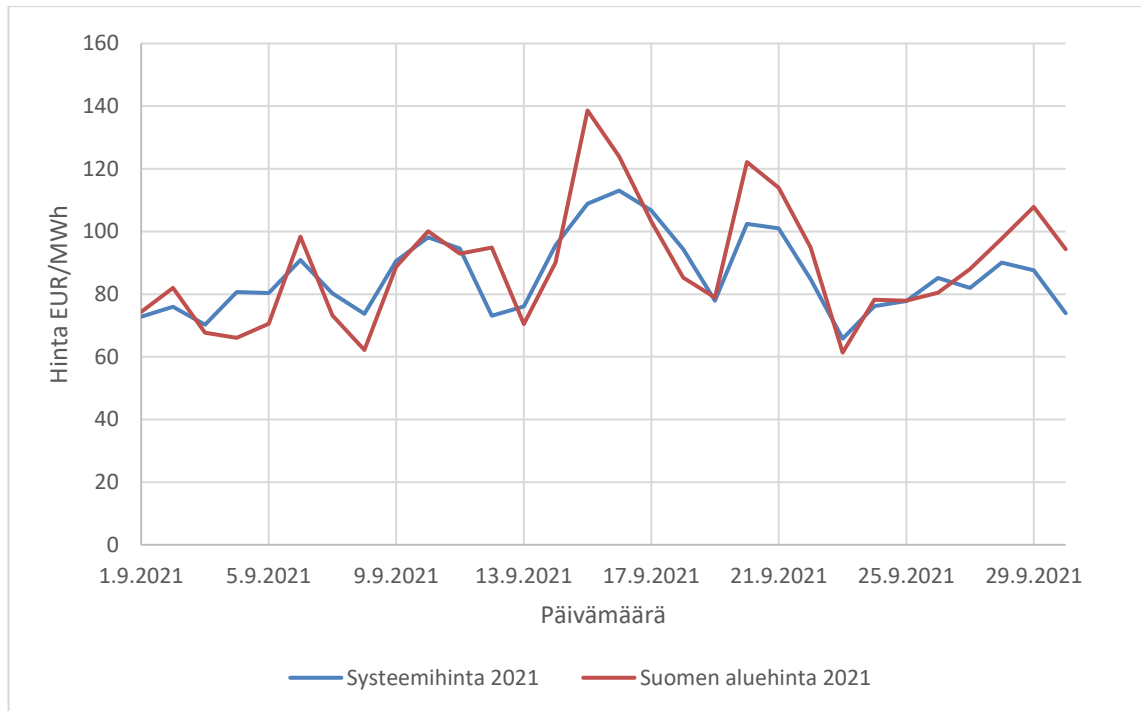
Toiminta Nord Pool Spot -markkinoilla yletty nimestään huolimatta useaan muuhun Euroopan valtioon eikä vain Pohjoismaihin. Nord Poolin toiminta laajeni Suomeen vuonna 1998. Nord Poolin omistus jakautuu muun muassa eri kantaverkkoyhtiöille esimerkiksi Suomesta Fingrid. Suurin omistus on kuitenkin pörssiyhtiö Euronextin, joka omistaa 66 prosenttia. Vuonna 2021 Nord Poolin kautta kaupattiin yhteensä 963 terawattituntia. Tästä Pohjoismaiden ja Baltian maiden osuus oli noin 75 prosenttia. (Nord Pool 2022a) Nord Poolin lisäksi markkinoilla toimii EPEX Spot (EPEX SPot 2022).

Nord Pool Spot -markkinoilla käydään kahdenlaista kauppaa. Sähköpörssin fyysisistä tuotteista eli Elbas- ja Elspot-markkinat. Elbas-markkinoilla käydään päivänsisäistä kauppaa. Elbas-markkinoilla käydään kauppaa jatkuvasti ja hinta usein poikkeaa Elspot-hinnasta. Seuraavan päivän hinta määritetään Elspot-markkinoilla seuraavan vuorokauden jokaista tuntia kohden. (Kauniskangas 2009) EPEX Spot on tarjonnut vuodesta 2020 lähtien Suomeen vuorokausi- ja päivänsisäisiämarkkinoita Nord Poolin lailla (EPEX Spot 2022). Nämä kaksi kaupankäyntimekanismia antavat joustoa asiakkaille, koska sähköenergian tarve saattaa äkillisesti muuttua esimerkiksi vikojen takia, eikä tämä ole usein ennustettavissa.

### **2.1.1 Elbas- ja Elspot-markkinat**

Elspot-markkinat toimivat vuorokausimarkkinoina sähkön tukkukaupalle. Elspot-markkinoilla kaupankäynnin kohteina on pienimmillään sadan kilowattitunnin sähköntoimitus, joka kohdistuu seuraavan päivän tunneille. Tarjoukset voivat koostua yhdestä tai useammasta tunnista. Tarjoukset ovat joko tuntikohtaisia tai blokkitarjouksia ja näiden tarjousten pitää pysyä -500–2000 €/MWh hintarajoissa. Osto- ja myyntitarjoukset täytyy toimittaa kello yhteen mennessä iltapäivällä päivittäin. Kaupankäyntikierron jälkeen tunneilla saadaan markkinahinnat, jotka ovat avoimia kaikille osapuolille. (Nord Pool 2022b) Sähkön markkinahinta eli systeemihinta muodostuu annettujen myyntitarjousten ja ostarjousten perusteella, eikä tähän huomioida siirtorajoitteita. Sähkön siirtorajoitteet huomioidaan aluehinnoittelussa. (Partanen et al. 2015)

Systeemihinnassa ei huomioida sähkön siirtokapasiteettia. Alituotantoalueella voidaan myös joutua rajoittamaan sähkön kulutusta, mikäli säätösähkömarkkinat, eivät pysty kattamaan tehovajetta. Kyseessä voi myös olla, että alueella ylituotantoa, milloin tuotantoa pitää rajoittaa. (Partanen et al. 2015) Kuvassa 1 on havainnollistettu systeemihinnan ja Suomen aluehinnan eroa.



**Kuva 2:** Systeemihinnan ja Suomen aluehinnan kehitys vuonna 2021 syyskuussa. (Nord Pool 2022c)

Kuvasta 1 on nähtävissä se, että systeemihinta on suurimmalta osin alhaisempi kuin aluehinta. Kuitenkin on myös nähtävissä, että aluehinta on myös systeemihintaa alhaisempi. Tämä on nähtävissä usein systeemihinnan putoamisen seurauksena. Systeemihinta ylittää monesti aluehinnan, mikäli kyseessä on ylituotantoalue. Systeemihinta myös pysyy tasaisempuna kuin aluehinta, mikä johtuu siitä, että siirtoyhteydet ja siirtokapasiteetti vaikuttavat aluehintoihin, joten aluehintojen vaihtelu ovat tästä syystä suurempia.

Elbas-markkinat eli päivänsisäiset markkinat taas toimivat ympäri vuoden jokaisena tunnina. Päivänsisäisten markkinoiden tarkoitus on toimia jälkimarkkinoina Elspot-markkinoille. Uudet Elbas-tuntisarjat avataan kello kolme iltapäivällä siis kaksi tuntia Elspot-tuntisarjojen julkaisemisen jälkeen. (Nord Pool 2022b) Päivänsisäisillä markkinoilla on myös mahdollista antaa blokkitarjouksia, jotka muodostuvat useasta tuntisarjasta. Blokkitarjouksien tuntisarjat täytyy olla peräkkäisiä. Elbas-markkinoilla kauppaa käydään jatkuvasti ja hinta määräytyy tarjousten perusteella toisin kuin Elspot-markkinoilla. (Partanen et al. 2015)

### 2.1.2 Johdannaismarkkinat

Johdannaismarkkinoilla ei kaupata fyysisiä tuotteita, vaan kaupankäynnin kohteina on finanssijohdannaisia, kuten sähkön hintaan liittyvät futuurit ja optiot. Johdannaistuottei-

den tarkoitus on toimia usealla markkinatoimijalle riskinhallinnan keinona hinnanmuutoksia vastaan. Sähkön tuottajapuolelta katsottuna johdannaisilla voidaan suojautua hetkelisistä sähkön madaltumisista. Sähkön myyjät taas tavoittelevat johdannaisten avulla turvaa korkeita sähkön hintoja vastaan, koska usein sähkön myyjät solmivat asiakkaiden kanssa kiinteähintaisia sopimuksia. Finanssijohdannaisten kaupankäynti tapahtuu Pohjoismaissa Nasdaq OMX Commodities -finanssimarkkinoilla. Sähkön tuottajat ja myyjät voivat etsiä johdannaistuotteille kaupankäytikumppania pörssin ulkopuolelta tekemällä kahdenkeskisen sopimuksen. (Fingrid 2022b)

Kaupatut johdannaiset keskittyvät tuleviin kuukausiin ja vuosiin. Kaupankäynti on jatkuva huutokauppa, jossa ostajat ja myyjät kohtaavat. Tämä lisää läpinäkyvyyttä ja markkinoiden hintataso on nähtävillä. Pörssissä toimijoilta vaaditaan vakuuksia ja raportointia, minkä takia toimijat ovat usein suuryrityksiä. Pörssistä näin muodostuu vähäriskinen markkinapaikka ja sujuvoittaa kaupankäyntiä. Vastapuolinen riski on näin minimaalinen verrattuna kahdenkeskeisiin kaappoihin. (Fortum 2022)

### **2.1.3 OTC-markkinat**

Kirjaimet OTC tulee englannin kielen sanoista "Over The Counter". Tällä viitataan sähkömarkkinoiden yhteydessä kahdenkeskeisiin kaappoihin. Kaikki sähköpörssin ulkopuolella tehty sähkön tukkukauppa luokitellaan osaksi OTC-markkinoita. OTC-markkinoilla pyritään saavuttamaan räätälöity sopimus omia tarpeita varten, mikä ei ole sähköpörssin kautta aina mahdollista. Kuitenkin OTC-markkinoilla pörssikaupasta eroten on vastapuolinen riski, joka vaikeuttaa riskienhallintaa. Sähköpörssi ja kahdenkeskeinen kauppa yhdessä pyrkivät luomaan toimivan markkinamekanismin sähkön tukkumarkkinoille. (Partanen et al. 2015)

## **2.2 Suomen sähkömarkkina**

Sähkömarkkinoiden avauduttua sähkön siirto jäi kilpailun ulkopuolelle, koska ei nähty järkeväksi alkaa rakentamaan vierekkäisiä siirtoverkkoja kilpailemaan toisia vastaan, koska tämä ei olisi taloudellisesti kannattavaa. Sähköverkkoyhtiö Fingrid Oyj omistaa Suomen kantaverkon. Kantaverkko on suurjänniteverkko, mistä sähkö siirtyy alueellisiin verkkoihin. Fingrid Oyj:n tehtäviin siis kuuluu siirtää sähkö Suomen rajojen yli eli sisään ja ulos Suomesta. Sähkönsiirron lisäksi tehtäviin kuuluu verkon kunnossapito ja kehittäminen. Loppukäyttäjille sähkön siirtää paikalliset sähköverkkoyhtiöt, jotka ovat vastuussa myös verkon kunnossapidosta ja kehittämisestä, lisäksi paikalliset verkon haltijat ovat vastuussa verkon liittämisestä Fingridin kantaverkkoon. Sähkösiirto ja sähkönjakelu

Suomessa on monopolitoimintaa. (Kauniskangas 2009) Tämä monopolitoiminta on kuitenkin säädeltyä. Säätelyn valvonnasta Suomessa vastaa Energiavirasto. Energiaviraston tehtäviin kuuluu sähkö- ja maakaasumarkkinoiden markkinavalvonta eli Suomen lakien ja EU:n lakien mukaan toiminnan valvominen. Energiaviraston toiminta pitää sisällään kilpailullisten maakaasu- ja sähkömarkkinoiden edistäminen valvontalain mukaisesti. Energiaviraston muut tehtävät ovat energiatehokkuuden edistäminen, päästökauppa sekä uusiutuvien energialähteiden käyttöä. (Energiavirasto 2022)

Sähkömarkkinajärjestelmän toimivuus vaatii siihen osallistujien välistä kommunikaatiota, koska sähköenergia kulkeutuu mahdollisesti useamman verkonhaltijan kautta loppukäyttäjälle. Sähkön myyjille näin asettuu vastuu tietojenvaihtoon sähkösopimuksen alkamisesta tai päättymisestä verkonhaltijoiden kanssa. Suomessa sähkön vähittäismyynnissä eli sähkömarkkinoilla sähkön myyjä myy sähköä loppukäyttäjälle. Suomessa on noin 3,5 miljoonaa sähkökäyttöpaikkaa, mikä tarkoittaa, että jokaisella näistä myös pitää olla ilmoitettuna avoin toimittaja, jonka tehtävä on varmistaa kohteen sähkön saaminen (Energiavirasto 2022). Vuonna 2022 helmikuussa käyttöön otettiin sähkön vähittäismarkkinoille yhteinen tietojärjestelmä Datahub, mikä pitää sisällään noin kahdeksankymmentä eri sähkönjakeluyhtiötä ja kahdeksankymmentä sähkömyyntiyhtiötä. Tietojärjestelmä kerää asiakas- ja kulutustietoa sähkökäyttöpaikalta sähkömarkkinalain mukaisesti. Tietojärjestelmä nopeuttaa tiedonvaihtoa osapuolien välillä ja luo mahdollisuuden kehittää uusia energiasäästö ja kulutuksen seuranta sovelluksia. (Fingrid 2022a)

### **2.3 Vähittäismarkkinahinnan muodostuminen Suomessa**

Sähkön hinta muodostuu kolmesta eri kokonaisuudesta, joita ovat verot, sähkönsiirron hinta ja itse sähköenergian hinnasta. Verot pitää sisältävät arvolisäveron sekä sähköveron. Sähköenergian hinta muodostuu tukkumarkkinahinnan lisäksi sähkönmyyjän ottamista myyntikustannuksista. Myyntikustannukset koostuvat myyntiin liittyvästä markkinoinnista, laskutuksesta ja asiakaspalvelusta. Sähkönmyyjä hankkii myymänsä sähköenergian tyypillisesti omistamiltaan voimalaitoksilta, sähköpörssistä tai myyjä on tehnyt kahdenvälisen sopimuksen sähkön tuottajan kanssa. (Energiateollisuus 2022b)

Sähkönsiirron hinnalla katetaan sähköyhtiöiden sähköverkkotoiminnan tarjoamat palvelut. Näitä palveluita lueteltiin edellisessä kappaleessa, joita muun muassa on kunnossapito ja kehittäminen sekä lisäksi verkkoon sitoutunut pääoma. Jakeluyhtiöiden lisäksi sähkönsiirron hintaan sisällytetään valtakunnallisen kantaverkon rakentamisen ja kunnossapidon kustannukset. Siirron kokonaishintaan kuuluu myös verot, joita ovat sähkövero ja arvolisävero. Sähkönsiirtohintaa kokonaisuudessaan kattaa hieman yli puolet asi-

akkaan sähkölaskusta. Tähän osuuteen ei voida vaikuttaa, koska sähkönsiirto on Suomessa valvottua monopolitoimintaa, mikä mainittiin edeltävässä luvussa. Sähkön hankintahinnan kilpailuttaminen vaikuttaa vain arvolisäveron ja sähköenergian hinnan suuruuteen. (Energiateollisuus 2022b)

## 2.4 Tasehallinta sähkömarkkinoilla

Sähköä täytyy tuottaa jatkuvasti kulutuksen verran, jotta sähkömarkkinat toimivat mahdollisimman tehokkaasti. Tämä on hankala saavuttaa ilman yhteisiä pohjoismaisia sähkömarkkinoita, koska yhteiset sähkömarkkinat luovat suuren verkoston sähkön tuottajia ja kuluttajia. Erityisesti uusiutuvien energioiden lisääntyminen sähkön tuotantorakenteessa on tehnyt tasehallista entistä haastavampaa. Pohjoismaisten yhteisten sähkömarkkinoiden tavoite on sähkön kysynnän ja tarjonnan tasapainotus. Sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainotuksesta on vastuussa kaikki sähkömarkkinaosapuolet. Yksittäisten tuottajien ja sähkön käyttäjien tasevastuu on avoimella toimittajalla. Tasevastaavana toimii se toimija, jonka avoimena toimittaja on kantaverkkoyhtiö. Tasevirhe on kuitenkin kulutuksen puolella melko pieni. (Fingrid 2022c) Pohjoismaissa säätösähkömarkkinoilla on historiallisesti ollut paljon tärkeämpi rooli ja päivänsisäisillä markkinoilla vähemmän tärkeä rooli, koska markkinaosapuolet voivat myydä epätasapainotilanteensa ylös- tai alasajona säätösähkömarkkinoilla lähellä toimintaa. Tasevirhe yleisimmin johtuu tuotannosta. Lisäksi koska Pohjoismaissa on runsaasti joustavaa vesivoimatuotantoa, riski suurista epätasapainokustannuksista on ollut suhteellisen pieni, mikä ei kannusta käyttämään päivänsisäisiä markkinoita. (Spodniak, P. et al. 2021)

Tasapainon tila on seurattavissa sähköverkon taajuudesta. Verkon taajuuden ollessa 50 Hz, on verkko tasapainotilassa. Verkon taajuuden alittaessa 50 Hz, merkitsee kulutuksen olevan suurempaa kuin tuotanto. Tasapainotilan taajuuden ylitys on päinvastoin eli tuotanto ylittää kulutuksen tason. Normaalitylanteissa verkon taajuuden sallittu vaihteluväli on 49,9 Hz-50,1 Hz. Sähkömarkkinaosapuolet suunnittelevat oman käyttönsä ja tuotantonsa etukäteen tasapainoon. Kuitenkin poikkeamien vuoksi tarvitaan reservitoimittajia, joilta hankitaan puuttuva sähköteho tai sen kulutus. Reservinä muun muassa toimii voimalaitokset, erilaisia kulutuskohteet ja energiavarastot. Reservitoimittajat muodostavat yhdessä säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat. Näitä markkinoita ylläpitää pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt yhdessä. Fingrid hankkii näiltä ylläpitämiltään markkinoilta tarvittavan säätökapasiteetin Suomeen tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseksi, jotta siirtoverkon käyttövarmuus on taattu. (Fingrid 2022c)

Tehotasapainoa ylläpidetään verkossa reserveilla, jotka toimivat manuaalisesti sekä taajuusohjauksella. Taajuusohjatut reservit reagoivat taajuuden muutoksiin automaattisesti.

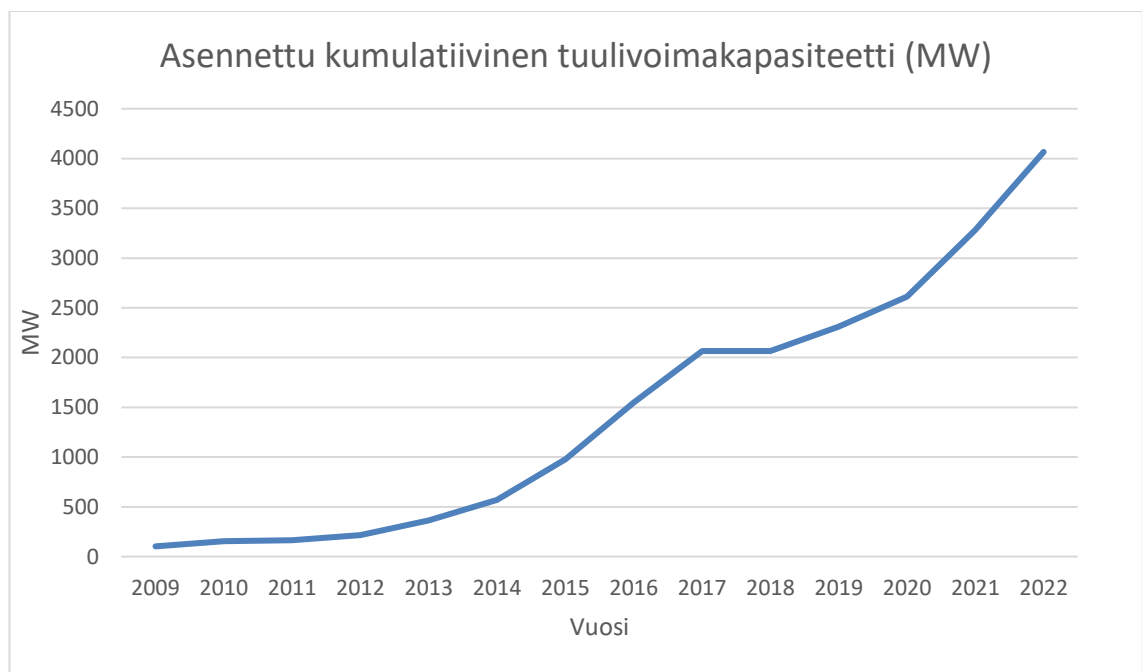
Vuonna 2020 käyttöön otettiin nopea taajuusreservi, jonka tarkoitus on toimia alle kahdessa sekunnissa taajuuden laskettua. Aktivoinnin minimi kestoksi vaaditaan viisi sekuntia. Taajuusohjattujen lisäksi on manuaaliset sen varalta, että automaattisesti aktivoidut reservit eivät ole riittäviä. Manuaalista lisätehoa saadaan säätösähkömarkkinoilta. (Fingrid 2022c)

Siirtoverkon siirtorajat haittaavat kaupallisen tehomasapainon luomista. Näitä sähkönsiirtoa rajoittavia kohtia verkossa kutustaan pullonkauloiksi. Pullonkaulatilanteita syntyy, kun hinta-alueiden välistä kysynnän ja tarjonnan välistä eroa ei pystytä tasoittamaan johdettujen siirtokapasiteeteista. Pullonkauloja pyritään poistamaan verkosta vastakauppojen, hinta-alueilla ja siirtoverkkoa vahvistamalla. Vastakaupalla vaikutetaan markkinaehtoisesti tuotannon alueelliseen jakautumiseen. Esimerkiksi jos Pohjois-Suomesta sähkönsiirto on liian suurta paljon Etelä-Suomeen niin kantaverkkoyhtiö Fingridin pyynnöstä tuotantoa lisätään Etelä-Suomessa, jotta siirtokapasiteetin kuormitus pienenee. Vastakaupan tarkoitus on toimia lyhyen ajan pullonkaulojen tasoittamiseksi. Vastakauppaa kustannetaan pullonkaulatuloilla ja verkkotariffilla. (Fingrid 2022d)

Pullonkaulatuloja syntyy siis pullonkauloista eli kun tarjousalueiden välinen siirtokapasiteetti on riittämätön tasoittamaan markkina-alueen kysynnän ja tarjonnan eron. Pullonkaulatulojen määrä saadaan, kun kerrotaan hinta-alueiden hintaero siirrettävällä sähkönmäärällä. Saatu tuotto maksetaan molemmin puolin markkina-alueiden kantaverkkoyhtiöille. Pohjoismaiset pullonkaulatuloja maksetaan neljälle kantaverkkoyhtiölle keskinäisten sopimusten mukaisesti. Suomen ja Viron välillä tuotot jaetaan puoliksi maiden kantaverkkoyhtiöille. Pullonkaulatuloja ensisijaisesti käytetään siirtokyvyn kasvattamiseen, mikä on vaadittu EU:n lainsäädännössä. (Fingrid 2022f)

### 3. TUULIVOIMA SUOMESSA

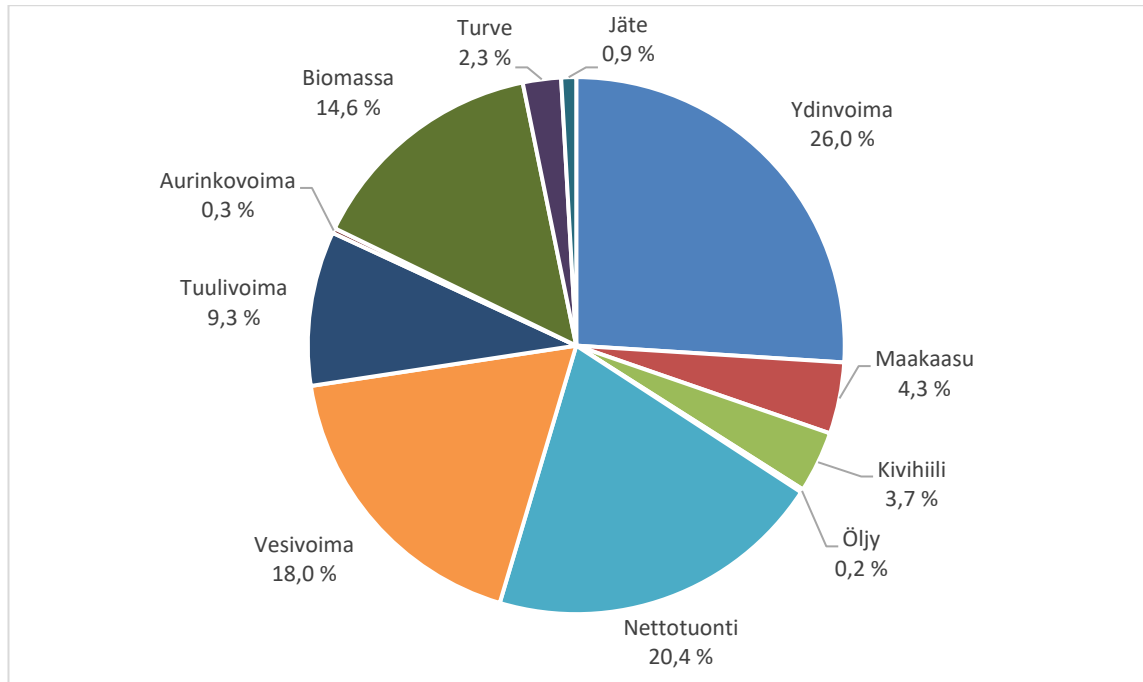
Tuulivoiman katsotaan alkaneen 1990-luvun vaihteessa Suomessa. Ensimmäinen sähköverkkoon kytketty tuulivoimala Suomessa tuli vuonna 1986. 1990-luvun alun ajan tuulivoimaloita rakennettiin Suomessa pienissä määrin ja pyrittiin kasvattamaan omaa tietoa tuulivoimasta. Vuonna 1996 Suomen Kauppa- ja teollisuusministeriö kehitti tukijärjestelmän energiainvestoinneille ja tuki tuulivoimahankkeita 40 prosentin tuella investointiin. Tästä eteenpäin tuulivoimaloiden määrä on ollut selkeässä nousussa. Kuitenkin vasta 2010-luvun alussa tuulivoimaloiden rakentaminen pääsi vauhtiin. Vuonna 2015 rikkoutui tuhannen megawatin raja tuulivoima kapasiteetilla ja kolme vuotta myöhemmin kahden tuhannen megawatin raja meni myös rikki. (STY 2022c) Vuoden 2021 lopussa tuulivoimaloiden kokonaismäärä oli 962 kappaletta ja kokonaiskapasiteetti näillä yhteensä oli 3257 MW. Vuoden 2022 kesäkuussa kokonaismäärä oli jo 1112 ja teho 4037 MW. Kuvassa 2 on esitetty graafisesti tuulivoimakapasiteetin kehitys vuodesta 2009 alkaen 2022 vuoden kesäkuuhun asti. (STY 2022d)



**Kuva 3:** Tuulivoimakapasiteetin vuosittainen kehitys Suomessa. (mukaillen STY 2022d)

Kuvasta näkyy selkeästi, kuinka 2010-luvun alussa muuttui tuulivoimaloiden rakentaminen. Syöttötariffijärjestelmän lisäksi valtion tarjoamat tuet ovat vauhdittaneet tuulivoima-

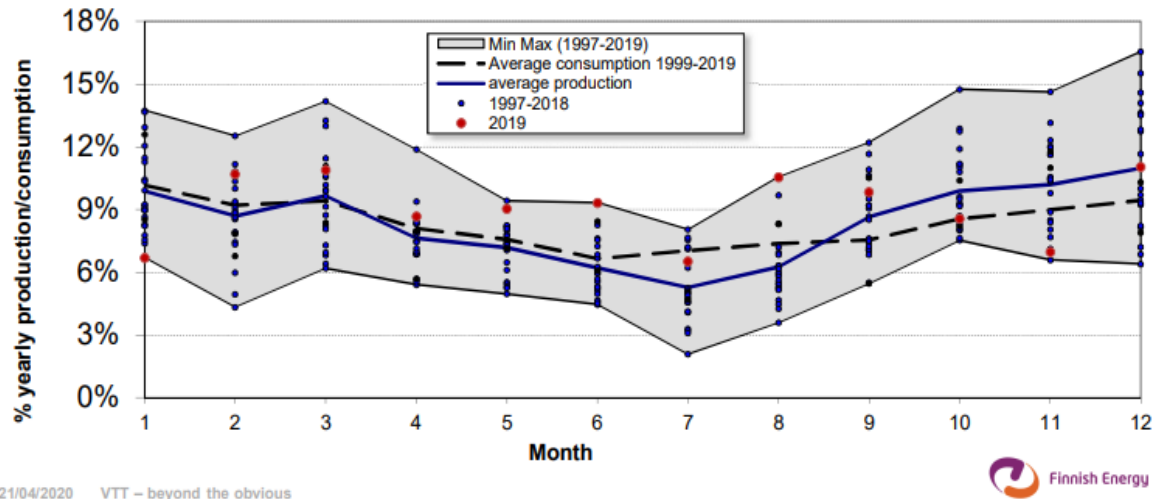
kapasiteetin lisääntymistä. Kasvun hetkellistä pysähtymistä vuonna 2018 selittää syöttötariffin lopetus tuulivoiman osalta vuoden 2017 lopussa. Tuulivoiman kapasiteetti kehityksessä on huomattavissa kasvun pysähdys ajanjaksolla 2017–2018, mikä johtaa edellä mainitusta syöttötariffin sulkemisesta uusien tuulivoimaloiden osalta. Syöttötariffi on uusiutuvalla energialla tuotetulle sähkölle maksettu tuotantotukea (Motiva 2022b)



**Kuva 4:** Sähköntuotantorakenne ja nettotuonti Suomessa 2021. (Mukailen *Energiateollisuus 2022a*)

Tuulivoimalla katettiin vuonna 2021 9,3 prosenttia Suomen sähkölukutuksesta, mikä vastaa 8,09 terawattituntia. Tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä on lähes kolminkertainen verrattuna vuoteen 2015. (Energiateollisuus 2022a) Tuulivoimaloiden määrä on kasvanut erityisen nopeaa vauhtia viimeisen kymmenen vuoden aikana. Tuulivoimakapasiteetin kasvuun on vaikuttanut usea eri tekijöitä, joita muun muassa ovat syöttötariffijärjestelmä sekä valtion ja EU:n asettamat ilmastotavoitteet. Vuoden 2017 marraskuusta alkaen syöttötariffijärjestelmä sulkeutui tuulivoimaloiden osalta. Vuonna 2018 julkaistiin ensimmäinen tuulivoimahanke ilman valtion tukea. Syöttötariffien lopettamisen jälkeen on suurin tuulivoimalahankkeista rakennettu ilman valtion antamaa tukea. Kuitenkin valtion tukea on edelleen mahdollista saada. Tämä toteutetaan suurimmilta osin erilaisten kilpailutuksien avulla. (Motiva 2022b) Kilpailutusten tekemisestä vastaa Suomessa Energiavirasto. Tuotantotuen kilpailutukset suosivat kuitenkin enemmän suurempia tuulivoimalahakkeita, koska suurissa hankkeissa usein tarjouksen hinta saadaan alemmas suu-

ren volyymin takia. Kilpailutukset ovat tehneet tuulivoimanrakentamisesta erittäin edullista verrattuna muihin uusiutuva energiamuotoihin. Tuulivoimalahankkeiden rahoitus tyypillisesti katetaan muun muassa PPA-sopimusten (power purchase agreement) avulla, mikä tarkoittaa pitkäaikaista sähkönostosopimusta (STY 2022f).



**Kuva 5:** Tuulivoiman osuus kokonaistuotannosta. (VTT 2019)

Kuvasta neljän nähdään, että suurin osa tuotannosta sijoittuu talvelle sekä loppusyksyyn, mikä on hyvä asia, koska sähkönkulutuksen huiput sijoittuvat talvelle johtuen muun muassa lämpökuormasta sekä suuresta valaisun tarpeesta. Vaihtelevaan sähkönkysyntään tuulivoima vastaan erittäin hyvin johtuen siitä, että kuukaudet talvella on tuulisempia ja talven aikana tuotetaan noin 60 prosenttia tuulivoimalla tuotetusta sähköstä. Osa syynä myös suurempaa energiatuotantoon talvella on se, että kylmä ilma on tiheämpää lämpimään verrattuna, joten samansuuruisen tuuli talvella tuottaa enemmän. (STY 2022d)

Tuulivoiman osuuden kasvu voi vaikuttaa sekä markkinoiden epävarmuuteen että kaupankäyntistrategioihin ja siten myös sähkön tukkumarkkinoiden välisiin hintaeroihin. Hintat erot osoittavat tällöin eri markkinapaikkojen merkityksen lisääntyneen ainakin lyhyellä aikavälillä. Pidemmällä aikavälillä markkinat voivat sopeutua hintaeroihin esimerkiksi uusilla investoinneilla, jotka voidaan tehdä esimerkiksi tasesähköön tai kysyntäjoustomenetelmiin. On nähtävissä, että reaaliaikaisemmat eli päivänsisäiset markkinat ovat tulosy yhä tärkeämmiksi tuulivoiman osuuden kasvaessa sähkötuotantorakenteessa, ja myös finanssituotteiden merkitys kasvaa, mitkä suojaavat hintariskeiltä. (Spodniak et al. 2021)

### 3.1 Tuulivoiman tukeminen sähkömarkkinoilla

Sähköntuotantoa tarvitaan jatkuvasti enemmän ja tätä tarvetta pyritään kansallisten ilmastotavoitteiden vuoksi kattamaan uusiutuvilla energiamuodoilla. Valtiot ovat tästä syystä pyrkineet tukemaan uusiutuvaa energiatuotantoa ja sen rakentamista. Suomessa käyttöön otettiin vuonna 2011 syöttötariffi eli takuuhintajärjestelmä. Syöttötariffin tarkoitus on toimia valtion ohjauskeinona sähkön tuotantorakenteelle ja erityisesti kannustaa uusiutuvien sekä kotimaisten energialähteiden käyttöön. Syöttötariffijärjestelmä takaa sähköntuottajalle tietyn ennalta sovitun hinnan tuotetusta sähköstä. (Motiva 2022b) Syöttötariffijärjestelmä on ollut käytössä jo maailmalla ennen Suomea. Esimerkiksi Tanskassa tuulivoiman määrä on kehittynyt huomattavasti aiemmin ja kattaa Suurimman osan sähkön tuotantorakenteesta.

Syöttötariffijärjestelmällä tuetaan tuulivoiman lisäksi biokaasulla, puupolttoaineella sekä metsähakkeella tuotettua sähköntuotantoa. Järjestelmä suljettiin uusien tuulivoimaloiden osalta vuonna 2017 marraskuun ensimmäisenä päivänä. Järjestelmään hyväksytyillä tuulivoimaloilla on taattu sähköntuotantohinta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että takuuhinnan ja sähkön markkinahinnan erotus maksetaan sähköntuottajalle, mikäli tavoitehinta on suurempi kuin sähkön markkinahinta. Takuuhinta tuotannolle on 83,5 €/MWh. Tuulivoimakapasiteetin nopean kasvun takaamiseksi tuulivoimalla tuotetun sähkön takuuhinnaksi asetettiin 103,5 €/MWh kolmelle ensimmäiselle vuodelle. Hintatakuu on voimalla voimassa kahdentoista vuoden ajan. Viimeisille syöttötariffin piiriin otetuille tuulivoimalahankkeille maksetaan tuotantotukea vuoteen 2029 asti. (Motiva 2022b)

Syöttötariffijärjestelmän sulkemisen jälkeen tilalle tuli tuotantotuen tarjouskilpailu, jota ylläpitää ja järjestää Energiavirasto. Kilpailu on avoin kaikille uusiutuvan energian tuotantomuodoille. Ensimmäinen kilpailutus järjestettiin vuonna 2018 loppuvuodesta, missä seitsemän hanketta 26 tarjouksesta hyväksyttiin tuotantotuen piiriin. Kaikki 26 tarjousta kilpailussa olivat tuulivoimalahankkeita. Hyväksytyjen tarjouksien yhteenlaskettu vuosituotanto oli 1,36 terawattituntia. Hyväksytyjen tarjouksien enimmäismäärä oli 1,4 terawattitunnin sähkön vuosituotannolle. Tuen piiriin valittiin tarjouksista halvimmat. Kyseisessä kilpailutuksessa hyväksytyjen keskiarvo hinnaksi muodostui 2,49 €/MWh. Tuotantotukea maksetaan tuen saaneille hankkeille kahdentoista vuoden ajan. (Energiavirasto 2019)

Tuotantotuen kilpailutuksen avauduttua ja syöttötariffin sulkemisen jälkeen Suomessa rakennettiin ensimmäinen tuulivoimalahanke ilman valtion antamaa tukea eli markkinaehtoisesti. Tuulivoimaloiden suuren alkuinvestoinnin takia yleiseksi rahoitustavaksi

tuulivoimalahankkeille syntyi PPA-sopimukset (power purchase agreement), jotka helpottivat tuulivoimalahankkeiden rahoitusta. Ensimmäinen PPA -sopimus koskien tuulivoimatuotantoa Suomessa solmittiin kesällä 2018. PPA-sopimukset takaavat ennustettavuutta sähköntuottajille sekä -kuluttajille. (STY 2022f)

PPA-sopimus tarkoittaa pitkäaikaista sähkönostosopimusta. PPA-sopimukset ovat nykyään yleinen tapa rahoittaa uusia tuulivoimainvestointeja. Sopimuksessa tyypillisesti suuri joukko pienempiä sähkönkuluttajia tai suuri sähkönkuluttaja sopii ostavansa sähköä sovitun määrän tietyllä hinnalla esimerkiksi kymmenen vuoden ajan. Sopimukset tuovat hyötyjä ja haittoja kuluttajille sekä tuottajille, koska markkinahinnan ollessa korkea ei sähkön tuottaja hyödy tästä. Tietysti päinvastaisessa tilanteessa markkinahinnan tippuessa kuluttaja joutuu maksamaan sopimuksessa sovittua hintaa, joka voi olla markkinahintaa korkeampi. Sopimukset voivat olla erilaisia niissä, mutta tyypillisesti niissä on sovittu kiinteä sähkönhintaa tai tuotantomäärä voi olla kiinteä. PPA-sopimusten määrää odotetaan kasvavan Suomessa niin kuin muualla Euroopassa on jo tapahtunut. Sopimus voi toisaalta myös olla sopimus valmiiden voimaloiden myynnistä ostajayritykselle. Tässä mallissa siis ostaja sijoittaa hankkeeseen ja sitoutuu ostamaan nämä omakseen. (STY 2022f)

PPA-sopimus tuo myös mukanaan riskejä. Riskit tyypillisesti syntyvät tuotannon ennustevirheistä tai kulutuksen suuruuden muuttumisesta. Aliennuste ei pidä yhtä suurta riskiä kuin yliennuste, koska ylimääräisen energian voi myydä hyvin todennäköisesti muille kuluttajille tai PPA-sopimuksen toiselle osapuolelle. Yliennuste taas pakottaa ostajapuolen PPA-sopimuksessa hankkimaan sähkö muualta ja näin mahdollisesti syntyvät lisäkustannuksia ostajalle. Pitkäaikaisen sähkönhankintasopimuksen epätasapainoriski voi olla joko myyjällä tai ostavalla yrityksellä riippuen markkinoista ja sähkönhankintasopimuksen järjestelyistä. Taseriski on kuitenkin ostopuolella tyypillisesti, koska kustannukset riippuvat myös uusiutuvien energialähteiden osuudesta markkinoilla. Uusiutuvien energialähteiden hallitsemilla markkinoilla hinnat ovat yleensä korkeammat silloin, kun uusiutuvien energialähteiden tuotanto on vähäisempää. Niinpä niinä tunteina, jolloin sähkönhankintasopimus ei kata ostajan kysyntää, markkinahinta voi olla keskimääräistä korkeampi, mikä johtaa korkeampiin kustannuksiin ostettaessa lisäsähköä. (WBCSD 2019)

### **3.2 Tuulivoiman tuotantokustannukset ja sähkösopimukset**

Tuulivoiman tuottaja voi myydä kaiken tuottamansa sähkömarkkinalle, omistajayhtiölleen tai omistajayhtiöille omakustannehintaan niin sanotun Mankala-toimintamallin mukaisesti tai sähkön myynti tapahtuu pitkäaikaisella sähkönmyyntisopimuksella eli PPA-

sopimuksella. Mankala-toimintamalli tarkoittaa sitä, että useampi yhtiö perustaa osakeyhtiön ja tämän varallisuuden avulla rahoittaa esimerkiksi tuulivoimaloiden rakentamista ja ylläpitokustannukset. Hyötynä osakeyhtiön jäsenille tässä mallissa on se, että he ostavat esimerkiksi tämän tuulivoimaloiden tuottamaa energiaa omakustannushinnalla. Kustannuksia tuulivoiman tuottajalle syntyy alkuinvestoinnista sekä käyttö- ja ylläpitokustannuksista. Tässä tutkimuksessa ei perehdytä ylläpitokustannuksiin. (STY 2022g)

Käyttökustannuksia eli tuotantokustannuksia tuulivoiman tuottajalle syntyy sähköverkkoon liittymisestä sekä sähkönsiirrosta. Verkkoon liittymisestä sekä sähkönsiirrosta voimalan tai voimaloiden omistaja tekee sopimuksen paikallisen verkonhaltijan kanssa. Liittymismaksut ovat erisuuruisia riippuen verkkohaltijasta. Liittymismaksun lisäksi sähköntuottajalta veloitetaan siirtotariffia verkonhaltijan toimesta, mikä muodostuu kiinteästä maksusta sekä energiamaksusta, joka riippuu vuorokauden ajankohdasta ja vuodenaajasta. Siirtotariffit ovat erisuuruisia tuottajilla kuin kuluttajilla. Näistä kustannuksista syntyy tuulivoimalla tuotetun sähkönhinta, jonka sähkönostaja maksaa.

### **3.3 Tuotannon ennustamisen luomat haasteet**

Sähkön kulutusta ja tuotantoa pyritään aina ennustamaan mahdollisimman tarkasti, mutta uusiutuvien energioiden lisääntyessä tulee tuotannon ennustamisesta haasteellisempaa, koska uusiutuvat energiamuodot ovat sääolosuhteista riippuvaisia. Tuulivoimaa pyritään ennustamaan mahdollisimman tarkasti, koska se kattaa valtakunnallisesti Suomessa jo yli yhdeksän prosenttia sähköntuotantorakenteesta. Kysyntä- ja tuulivoimaennusteiden virheiden lisäksi odottamattomat voimalaitoshäiriöt, vesivoima, aurinkovoima ja aaltovoima aiheuttavat ennustevirheitä. Kuitenkin merkittävin näistä on tuulivoima, koska se kattaa pohjoismaissa jo merkittävän osan sähkön tuotantorakenteesta sekä sen ennustettavuus on hankalampaa esimerkiksi kuin vesivoiman. Kun tuulivoimaennusteen virhe on samansuuntainen kuin kysyntäennusteen virhe, tasesähkön tarve kasvaa. Vastaavasti, kun tuulivoimaennusteen virhe on vastakkaiseen suuntaan kuin kysyntäennusteen virhe, tasesähkön tarve vähenee - paitsi jos tuulivoimaennusteen virhe on suurempi kuin kysyntäennusteen virhe. Tällöin tuulivoimaennusteen virhe muuttaa ensin järjestelmän kokonaisvirheen merkkiä ja alkaa sitten lisätä virhettä uuteen suuntaan. Samoin kuin vaihtelu, tuulivoiman osuuden kasvaessa ennustevirheiden korjaustarve kasvaa. Hyvin korkeilla levinneisyysasteilla tuulivoima hallitsee päivänsisäisiä ja säätövoimamarkkinoita, koska kysyntä on ennustettavampaa kuin tuulivoima. (Kiviluoma 2013)

Aliennusteiden vaikutus on suurempi kuin yliennusteiden vaikutus sähkön hintaan päivänsisäisillä markkinoilla. Toisin sanoen sähkönhintojen aleneminen, kun tuulivoimaa

ennustetaan liian vähän, on suurempi kuin sähkönhintojen nousu, kun tuulivoimaa ennustetaan liikaa. Pääsyy tähän on se, että kun tuulivoimaennusteet ovat liian alhaiset, sähkön hinta voi laskea nollaan tai negatiivisiin arvoihin pitkäksi aikaa. Jos taas tuulivoima ennustetaan liian suureksi, sähkön hinta nousee lyhyinä ajanjaksoina suurelta osin käynnistyskustannusten vuoksi. Kun tavanomaiset voimalaitokset ovat käynnistyneet tai niiden tuotantotasoa on suurelta osin nostettu, sähkön hinta pysyy korkeana, mutta paljon alhaisempana kuin silloin, kun tuotantoyhdistelmää on nostettu tuulivoiman yliennusteesta selviytymiseksi. Tuotantoyhdistelmän käynnistämässä kuluja tulee muun muassa käynnistyskustannuksista sekä kalliista polttoainekuluista. Tavanomaisen voimalaitosten käynnistäminen on siis taloudellisempaa, mutta mahdollisesti hidasta ja tuotantoa on riittämättömästi. (Brancucci Martinez-Anido et al. 2016)

### **3.4 Epätasaisen tuotannon tasoittaminen sähkömarkkinoilla**

Mikäli EU:n kunnianhimoiset uusiutuvaa energiaa koskevat suunnitelmat kuitenkin toteutuvat, on vaihtoehto supistaa tai siirtää ylimääräinen sähkö joustaviin tarkoituksiin, kuten sähkölämmityksen tiettyihin muotoihin. Vahva siirtoverkko tasoittaa tuulivoiman tuotannon alueellista vaihtelua. Kuitenkaan tämä ei ratkaise ongelmaa täysin, koska Pohjois-Euroopan laajalla maantieteellisellä alueella esiintyy huomattavaa korrelaatiota tuulivoimakuvioissa, joten yhteen liitetyt verkot eivät ratkaise tasapainottamista tasapainotusongelmaa täysin. (Rinne & Syri 2015) Vaihtoehtoja on useita sähköenergiajärjestelmän joustavuuden parantamiseksi, mutta tässä kappaleessa tarkastellaan muutamia niistä työn laajuuden puitteissa.

Sähköjärjestelmässä kysynnän ja tuotannon välillä on aina oltava tasapaino. Sähkön kysyntä muuttuu sähkön kuluttajien tarpeiden mukaan. Tasapainoa ylläpidetään pääasiassa säätämällä tuotantoa, vaikka myös kysyntää voidaan säätää joissakin muodoissa. On olemassa myös tuotantomuotoja, joissa käytetään ohivirtaavia energiavirtoja, joita ovat tuulivoima, vesivoima ja aurinkosähkö. Näitä sähköntuotanto muotoja ei yleensä kannata säätää, koska se merkitsisi käytännössä ilmaisen sähkön menetystä energiatuotannon kannalta. Tuulivoiman lisääntyminen vaikeuttaa tasapainon säilyttämistä, varsinkin jos sähköjärjestelmän toimintatapoihin ei tehdä muutoksia. (Kiviluoma 2013)

Lisääntyvän tuulivoiman vuoksi on tärkeää, että tuulivoiman epätasaiselle tuotannolle on käytettävissä riittävästi säätövoimaa, jotta tarjonta ja kysyntä kohtaa toisensa. Säätövoiman tavoite myös on toimivan nopeasti ja taloudellisesti. Tärkein keino kompensoida tuulivoiman vaihtelua ja ennustevirheitä sähköjärjestelmässä ovat perinteiset voimalaitokset, mukaan lukien vesivoima. Myös CHP:n käyttö tuulivoiman tuotannon tasoittamisessa lisääntynyt. Kuluttajia tarkasteltaessa järjestelmän ramppauksissa nähdään, että

kysyntäjousto on myös keskeisessä osassa. Tärkeänä osana kysyntäjousto kulutuksen siirtäminen niille tunneille, milloin kulutusta on vähemmän. (Kiviluoma 2013) Sähköä ei voida varastoida itsessään, mutta erilaisia energiamuotoja voidaan muun muassa potentiaalienergia, joka on vesivoimassa käytetty energiamuoto. Energiamuotojen varastointi voisi olla mahdollinen ratkaisu, mutta kuitenkin vielä ei ole keksitty hyötysuhteeltaan tehokasta suuren mittakaavan energian varastointi keinoa vesivoimavarastojen lisäksi, joka olisi myös kustannustehokasta sekä ympäristöystävällistä (Rinne & Syri 2015). Lämmön varastointi on monissa tapauksissa osoittautunut onnistuneeksi, mutta hyötysuhteeltaan heikko muunnettuna takaisia sähköksi.

Yksi tapa vähentää tuulivoiman tuottajien ennustevirheitä on käydä kauppaa päivänsisäisillä markkinoilla sen jälkeen, kun spot-markkinat on suljettu. Jos vuorokausimarkkinoiden epätasapainokustannukset ovat pienet ja tuulivoiman markkinaosuus on alhainen, aktiivisen kaupankäynnin kustannukset ovat helposti suuremmat kuin siitä saatava hyöty. Tämäkin johtuu siitä, että epätasapainosta aiheutuva rangaistus on melko pieni, eikä ylimääräistä rangaistusta ole tuntien osalta, jolloin tuulivoiman epätasapaino ei ole samalla puolella kuin säätöhinnat (ylös säätöä tarvitaan tunnilla, kun säätöhinta on alhaalla, tai alasäätöä tarvitaan, kun säätöhinta on ylhäällä). Kun tuulivoiman osuus on suurempi ja tuulivoima hallitsee järjestelmän epätasapainoa, päivänsisäinen kaupankäynti on kustannustehokasta. (Holtinen & Koreneff 2012)

Yhtenä vaihtoehtona tuulivoimatuotannon tasoitukselle on ollut lämmön ja sähkön yhteistuotanto eli CHP (Combined heat and power). Kolmasosa Suomen sähköstä tuotetaan CHP:llä, eli lämmön sekä sähkön yhteistuotannolla ja suuri määrä ydinvoimaa toimii jatkuvasti peruskuormana. Pohjois-Euroopan laajalla maantieteellisellä alueella on merkittäviä korrelaatioita tuulivoimakuvioissa, joten yhteen liitetyt verkot eivät ratkaise tasapainotusongelmaa kokonaan. Kasvava tuulivoimatuotanto altistaa siirtoverkkoja näin pullonkauloille. Tuulivoima ei kuitenkaan ole ainut syy pullonkauloille, vaan ne syntyvät tuulivoiman lisäksi muun muassa vesivoimasta, ydinvoimaista ja alhaisesta kulutuksesta. Varovaisuusperiaatteena on, että sähköntuotanto ja -kulutus pystytään tasapainottamaan kansallisella tasolla. Lämpövarastoihin yhdistetty sähkön ja lämmön yhteistuotanto voisi olla taloudellinen ja teknisesti helppo vaihtoehto tasapainottamiseen. Tämä vaihtoehto on jäänyt suurelta osin huomiotta eurooppalaisissa tutkimuksissa. (Rinne & Syri 2015)

## 4. TUULIVOIMA SÄHKÖMARKKINOILLA

Stokastisen tuulivoimatuotannon kasvava osuus aiheuttaa suurempia poikkeamia reaaliaikaisen sähköntuotannon ja ennakkoon ennustetun sähköntuotannon välillä. Tämän odotetaan lisäävän tasehallintapalvelujen tarvetta ja siten sähköjärjestelmän tasapainossa pitämisestä aiheutuvia kustannuksia. Säästä riippuvaisen uusiutuvan energian tuotannon kasvava osuus on myös muuttanut sähkömarkkinoiden eri markkinapaikkojen suhdetta ja merkitystä. Lähempänä toimitusta olevien markkinoiden - päivänsisäisten markkinoiden ja säätösähkömarkkinoiden - odotetaan tulevan entistä tärkeämmiksi kaupankäynnin ja hinnanmuodostuksen kannalta. (Spodniak et al. 2021)

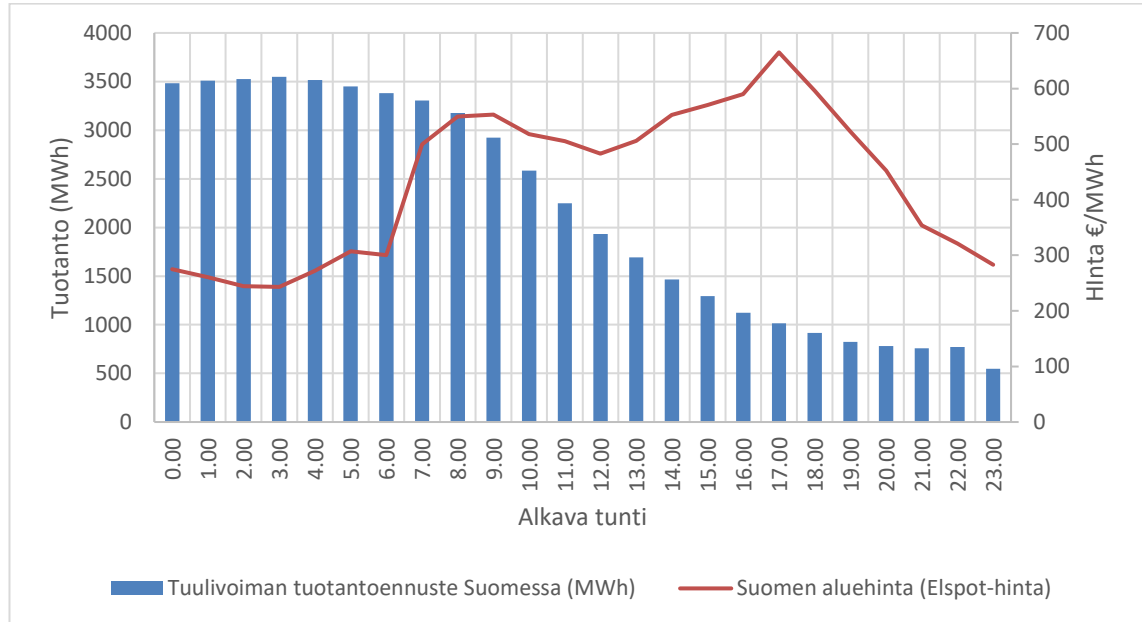
On tärkeää ymmärtää tätä muutosta, koska tähän asti vuorokausimarkkinat eli Elspot-markkinat ovat olleet määräävässä asemassa. Tämän perusteella on hyvä tutkia, että kuinka paljon tuulivoiman tuotanto vaikuttaa sähkönhintaan ja kuinka paljon ennustevirhe vaikuttaa tarvittavaan säätövoimaan? Luvussa tutkitaan Suomen aluehinnan korrelaatiota tuulivoiman tuotannon kanssa.

### 4.1 Suomen aluehinnan ja tuulivoiman tuotannon välinen korrelaatio

Tuulivoimalla on useita eri vaikutuksia sähkömarkkinoilla, mutta kuitenkin työn laajuuden puitteissa perehdytään tarkemmin, kuinka paljon Suomen tuulivoiman tuotanto vaikuttaa Suomen aluehintaan, mikä määritetään Nord Pool sähköpörssissä. Tarkastelun kohteena on päivänsisäiset eli Elbas-markkinat sekä vuorokausimarkkinat eli Elspot-markkinat.

Luvussa kolme on todettu, että tuulivoiman kasvava määrä tulee kääntämään sähkömarkkinoiden painoa enemmän päivänsisäistä kauppaa kohti. Kuvissa 5 ja 6 on mallinnettu sähköenergian aluehinta Suomessa sekä sen hetkinen tuulivoiman tuotanto tai sen ennustettu tuotanto. Kuvien mallinnuksen lisäksi lasketaan myös korrelaatiokerroin, jonka tarkoitus on todentaa kuvissa huomattuja asioita tai kumota nämä huomiot. Kuvassa 5 on käytetty tuulivoiman tuotantoennustetta, koska vuorokausimarkkinahinnat (Elspot) lukitaan ja pörssi sulkeutuu edellisenä vuorokautena kello 13.00. Tuulivoimaennusteen arvot ovat kerran vuorokaudessa kello 12:00 päivitettyt. Nämä arvot ovat valittu, koska Elspot-markkina sulkeutuu, joten jatkuvasti päivitetty tuotantoennuste ei vaikuta vuorokausimarkkinoiden hintaan. Kuvien ennusteet, todellinen tuotanto ja aluehinnat si-joittuu 13.12.2022 päivämäärälle. Liitteessä A on kuvaajien piirtämiseen käytetyt arvot

kerättyinä sekä esimerkkiarvot ennustevirheen suuruudesta sekä samanaikaisesta tarpeesta tasesähköä. Kuvassa 6 on mallinnettu yhden päivän tuotantoennuste Fingridin avoimesta datasta saatavilla arvoilla sekä Elspot-hinta samalla ajankohdalle Nord Poolin internet-sivuilta saaduista arvoista.

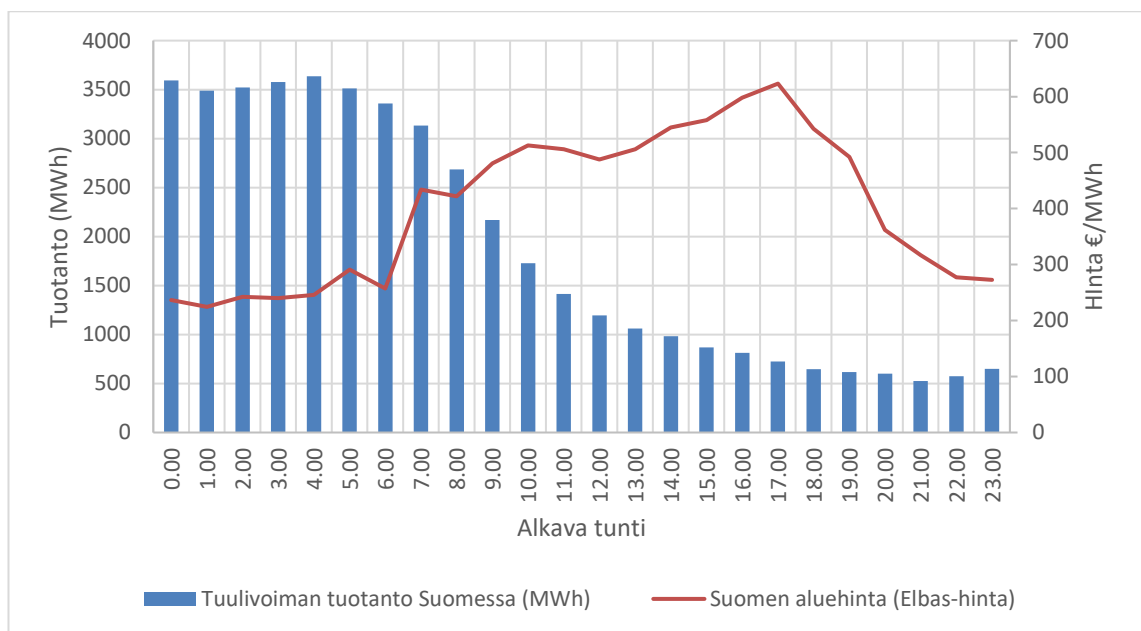


**Kuva 6:** Tuulivoiman tuotantoennuste Suomessa sekä Suomen vuorokausimarkkinoiden aluehinta mallinnettu. (Nord Pool 2022c & Fingrid 2022e)

Kuvasta 5 näkyy, että tuulivoiman ennusteen ollessa korkea aluksi on myös hinta alhaalla. Täytyy kuitenkin huomata, että kyseessä on yön alkutuntien hinnat, milloin sähkön kulutus on huomattavasti vähäisempää kuin keskipäivällä ja iltapäivällä. Aamulla aikaa 6.00 sähkön hinta on suhteellisin alhaalla, mutta jo seuraavalla alkavalla tunnilla sähkön hinta on melkein kaksinkertainen, vaikka tuulivoiman tuotannossa ei ole tapahtunut suurta muutosta. Tämän takia tätä korrelaatiota on hyvä vielä tutkia korrelaatiokertoimen avulla. Korrelaatiokertoimen laskentaan käytetään Microsoft Excel sovellusta, josta se saadaan käyttämällä Excelin sisään rakennettua KORRELAATIO-funktiota. Funktio tarvitsee syötteen kaksiksi matriisiksi. Toisena matriisina toimii 1.-28.2022 keran päivässä päivitetty tuulivoiman tuntikohtaiset tuotantoennusteen arvot ja toisena matriisina aluehinta samalla aikavälillä. Molemmat matriisit sisältää 672 datapistettä. Tulokseksi funktiosta saadaan korrelaatiokertoimeksi 0,3536. Kertoimen suuruus on hie-man yllättävä, mutta kuitenkin huomioon pitää ottaa, että Suomen tuulivoima tuottaa vasta noin kymmenyksen Suomessa tuotetusta sähköstä. Kertoimen etumerkki on positiivinen, joka ei olisi kuvasta 6 ollut arvattavissa. Kuitenkin otos on vain neljä viikkoa, ja sähkönhinta on tyypillisesti seurannut enemmän kulutusta. Tämä tarkoittaa sitä, että sähkönhinta usein yöllä tippuu pienen kulutuksen takia ja tämän takia tuulivoimatuotan-

toakin mahdollisesti pienennetään. Lisäksi kuvassa 6 on poikkeuksellinen suuri tuulituotanto, joka myös saattaa ajaa johtopäätöksiä helposti vääräksi. Tuntikohtaisten arvojen lisäksi on hyvä tarkastella päiväkohtaisia arvoja eli funktioon syötetään Elspot-hinnan keskiarvo ja tuotantoennuste yhteenlaskettu jokaiselta päivältä. Korrelaatioksi näin saadaan 0,4082. Korrelaatio eroaa hieman aikaisemmasta, mutta ei kuitenkaan merkittävästi.

Kuvassa 7 on mallinnettu todellinen tuotanto sekä päivänsisäisenmarkkinan hinta. Tuotannon data on haettu Fingridin internet-sivuilta ja kyseessä on sama ajankohta kuin kuvan 6 ennusteessa. Päivänsisäisenmarkkinan aluehinta on käytetty Elbas-hinnan keskiarvoa, joka on saatavilla Nord Poolin internet-sivuilta myös.



**Kuva 7:** Tuulivoiman todellinen tuotanto Suomessa ja Suomen päivänsisäisten markkinoiden aluehinta mallinnettu. (Nord Pool 2022c)

Kuva 6 näyttää samalta kuin kuva 5, mutta eroa kuitenkin on. Yleisesti hinta on pienempi verrattuna Elspot-hintaan. Erityisesti aamun tunteilla sähkön hinnan nousu ei ole yhtä nopeaa kuin vuorokausimarkkinoilla. Tämä on huomattavissa erityisesti vertaamalla kuvien alkavia tunteja kello 6.00 eteenpäin. Aluehinta kuvassa 6 pääpiirtein seuraa samaa kaavaa kuin kuvan 5 hintakäyrä, joten on hyvä laskea myös tästä kuvasta korrelaatiokerroin samalla tavalla käyttämällä KORRELAATIO-funktiota Excelissä. Myös tässä laskussa on käytetty datana neljän viikon ajalta tuntukohtaisia arvoja. Syöttämällä toteutuneen tuotannon sekä Elbas-hinnan funktioon saadaan korrelaatiokertoimeksi 0,2715. Kertoimen arvo on pienempi kuin Elspot-hinnalle, joten tämän datan perusteella voidaan sanoa, että Suomessa tuotettu tuulivoima ei vielä merkittävästi vaikuta sähkönmarkkina-

hintoihin. On hyvä selvittää vielä kuitenkin päivien kokonaistuotantojen korrelaation päivän keskiarvo Elbas-hintaa. Tulokseksi tästä saadaan  $-0,5316$ . Korrelaatiot viittaavat siihen, että tuntikohtainen tuulivoimatuotanto ei juurikaan korreloi päivänsisäisen hinnan kanssa. Päivänkokonaistuotannolla on merkittävää korrelaatiota kuitenkin aluehinnan kanssa. Tämä kerroin on negatiivinen eli tuotannon kasvaessa Elbas-hinta mahdollisesti laskee. Tärkeää tulosten tarkastelussa on ottaa huomioon kuitenkin datan laajuus.

Liitteessä A on kuvien arvot sekä yhden vuorokauden aikaiset ennustevirheet ja Suomessa tarvittu ylös- ja alassäätö. Korrelaatio on hyvä vielä laskea tarvittun säädön ja tuulivoiman ennustevirheen välillä. Datana tälle laskulle käytetään päivän yhteenlasketua säätö sekä ennustevirhettä neljän viikon ajalta. Eli yhden päivän arvot saataisiin summaamalla liitteen A ensimmäinen sekä neljäs sarake vasemmalta katsottuna. Tämä summaus tehdään neljän viikon ajalta. Korrelaatioksi saadaan  $-0,3285$ .

## 4.2 Tulokset

Luvun tarkoituksena oli selvittää aluehintojen eli Elbas- sekä Elspot hintojen korrelaatiota Suomen tuulivoiman tuotannon kanssa. Mallinnettujen kuvien perusteella korrelaatiota olisi voinut olettaa negatiiviseksi sekä merkittävämmäksi, mutta kuitenkin kuvissa kyseessä oli vain yhden vuorokauden data, joten kyse on enemmänkin tilastollisesta otoksesta. Vaikuttava tekijänä on myös se, että tuulivoiman osuus sähköntuotantorakenteesta on vasta noin kymmenys Suomessa, joka Tanska tuotantorakenteeseen verrattuna on erittäin vähän. Tanskan sähköntuotantorakenteessa tuulivoimalla on noin 50 prosentin osuus.

Elspot-hinnan korrelaatiokerroin on molemmat positiivisia, joten näiden mukaan tuulivoimatuotannon kasvaessa on datan perusteella hinnassakin havaittavissa kasvua. Edelleen kuitenkin täytyy huomioda, että kertoimien suuruudet tässä eivät olleet merkittävällä tasolla, joten tuotantoennusteella ei ole suurta vaikutusta päivänsisäiseen kaupankäyntiin hinnan osalta. Tämä toki selitettävissä sillä, että Suomessa tuulivoiman osuus tuotannosta ei ole vielä merkittävä vuorokausimarkkinoiden kannalta.

Korrelaatiokerroin Elbas-hinnalla ja tuntikohtaisen tuotannon välillä on kaikista pienin itseisarvoltaan, mikä saattaa hieman yllättää, koska aliennusteet tuulivoimatuotannossa voivat saada aikaiseksi erittäin alhaisia hintoja, koska muuten tuulivoimalla tuotettu niin sanottu ilmainen energia menee hukkaan. Päiväkohtaisen ja päivänsisäisen aluehinnan keskiarvon välinen korrelaatiokerroin itseisarvoltaan on suurin saaduista kertoimista. Voidaan tämä tuloksen perusteella päätellä, että tuulivoimatuotanto Suomessa tulee vai-

kuttamaan tulevaisuudessa päivänsisäisiin markkinoiden hintaan entistä enemmän, mikäli tuulivoimahankkeiden määrä kasvaa nykyistä vauhtiaan. Laskuista voidaan päätellä myös, että hintojen tarkastelu tuntitasolla pelkästään ei anna hyviä arvoja. Tähän syyksi muun muassa on, että Elbas-hinta ei välttämättä reagoi merkittävästi hetkellisiin tuulivoimatuotannon kasvuihin.

Lopuksi korrelaatiokerroin selvitettiin tuulivoimatuotannon ennustevirheen ja samanlaisesti tarvittun säätövoiman välillä. Tulokseksi saatiin  $-0,3285$ . Tulos on yllättävän pieni, mutta kuitenkin jälleen huomioon täytyy ottaa datan laajuus sekä tuulivoiman suhteellisen pienet ennustevirheet, jotka aiheutuvat tuulivoimatuotannon kokonaismäärästä sekä jatkuvasti päivitettävistä ennusteista. Kertoimen negatiivisuus merkitsee tuloksen osalta sitä, että ennustevirheen kasvaessa tarvittu säätövoima pienenee eli tarvitaan mahdollisesti alassäätöä, mikä on loogista, koska ennustevirhe laskettiin todellinen tuotanto vähennyttynä tuotantoennuste eli ennustevirheen kasvu merkitsee aliennusteen kasvua.

## 5. PÄÄTELMÄT

Tässä kandidaatintyössä pyrittiin tarkastelemaan yleisesti lisääntyvän tuulivoiman tuomiin muutoksiin energiajärjestelmässä. Tarkemmin pyrittiin selvittämään, miten tuulivoiman lisääntynyt määrä muuttaa kaupankäyntiä sähkömarkkinoilla, ja kuinka aluehinta korreloi tuulivoiman tuotannon suuruuden kanssa. Tutkimuksen aineistoina käytettiin kirjallisuutta liittyen aiheeseen sekä Fingridin ja Nord Poolin internet-sivuilta löytyvää dataa.

Tuulivoiman tuotannon sääriippuvuus on tehnyt tuotannosta erittäin stokastista ja tätä varten on hyvä olla vahva siirtoverkko. Energiajärjestelmän joustavuus sekä pohjoismaiset yhteiset sähkömarkkinat ovat tärkeässä roolissa stokastisessa tuulivoimatuotannossa. Muun muassa Holttinen & Koreneff (2012) tutkimuksen mukaan satunnaisen tuotannon kasvavan osuus sähköntuotantorakenteessa tulee vähentämään vuorokausimarkkinoiden roolia sähköenergian kaupankäynnissä. Vuorokausimarkkinoiden rooli sähkömarkkinoilla on kuitenkin toistaiseksi merkittävä ja lähitulevaisuudessakin.

Aikaisemmassa luvussa on esitetty väitettä, että tuulivoima tulee siirtämään markkinoita enemmän päivänsisäisiä markkinoita kohti ja näin tuulivoima tulee vaikuttamaan entistä enemmän markkinoilla käytävään kaupankäyntiin. Erityisesti tuulivoiman ennustetun ja todellisen tuotannon ero tulee olemaan tuulivoiman osuuden kasvaessa entistä suurempi tekijä hinnan määräytymisessä. Tästä tulee hyötymään ne kuluttajat, jotka pystyvät ostamaan sähkönsä päivänsisäisiltä markkinoilta eli pystyvät muuttamaan omaa kulutusta tarjonnan mukaan, minkä avulla voivat hyödyntää Elbas-markkinoiden alhaiset hinnat, jotka usein seuraavat aliennusteista. Lisäksi suuret aliennusteet tulevat vaikuttamaan muuhun tuotantoon, koska aliennusteiden seurauksena tarvitaan usein allassäätöä.

Päivänsisäisen aluehinta korreloi merkittävästi päiväkohtaisen tuulivoimatuotannon kanssa, mikä oli yksi tutkimuksen tavoitteista. Kuitenkin tästä johtopäätöksen tekeminen, että vuorokausimarkkinoiden rooli on vähenemässä ei ole järkevä. Lisäksi ennustevirheen vaikutus tarvittavaan säätövoimaan tulevaisuudessa todennäköisesti tulee kasvaamaan. Saadut tulokset ovat osittain selkeitä, vaikka tutkimuksessa otettiin huomioon vain Suomen tuulivoiman tuotannon ennuste sekä todellinen tuotanto, joten saadut korrelaatiot olivat yllättäviä.

Suomi ostaa edelleen paljon sähköä muista Pohjoismaista sekä myös pieniä määriä Baltian maista. Näin ollen laajemman tutkimuksen tekeminen, huomioimalla Pohjoismaiden ja Baltian maiden tuulivoimatuotannon saataisiin vielä merkittävimpiä tutkimustuloksia.

Kuitenkin työn tutkimustavoitteisiin päästiin ja saatiin yleiskuva sähkömarkkinoista sekä ymmärrys siitä, mitkä syyt ovat johtaneet tuulivoimatuotannon nopeaan lisääntymiseen työn laajuuden puitteissa.

# LÄHTEET

- Brancucci Martinez-Anido, C. et al. (2016) The impact of wind power on electricity prices. Renewable energy. [Online] 94474–487.
- Energiateollisuus. (2022a) Sähkön hankinta energialähteittäin 2007–2021. Viitattu: 19.10.2022, Saatavissa: [https://energia.fi/uutishuone/materiaali/pankki/sahkon\\_hankinta\\_energialahteittain\\_2007-2021.html#material-view](https://energia.fi/uutishuone/materiaali/pankki/sahkon_hankinta_energialahteittain_2007-2021.html#material-view)
- Energiateollisuus. (2022b) Sähkön hinta koostuu kolmesta osasta. Viitattu 5.11.2022, Saatavissa: [https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon\\_hinta](https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_hinta)
- Energiavirasto. (2022) Sähkön vähittäismarkkinat. Viitattu: 20.10.2022, Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/sahkomarkkinat>
- Energiavirasto. (2019) Uusiutuvan energian tarjouskilpailusta tukea seitsemälle hankkeelle - hyväksytyjen tarjousten keskihinta 2,5 euroa/MWh. Viitattu 5.11.2022, Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/-/uusiutuvan-energian-tarjouskilpailusta-tukea-seitsemalle-hankkeelle-hyvakskytyjen-tarjousten-keskihinta-2-5-euroa-mwh>
- ENTSO-E. (2022) Transparency platform. Viitattu: 22.11.2022. Saatavissa: <https://www.entsoe.eu/data/transparency-platform/#the-entso-e-transparency-platform>
- EPEX Spot. (2022) Viitattu: 27.10.2022, Saatavissa: <https://www.europex.org/members/epex-spot/>
- Fingrid. (2022a) Datahub tuo tiedot sähkökäyttöpaikoista yhteen järjestelmään. Viitattu: 20.10.2022, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/datahub/>
- Fingrid. (2022b) Johdanto sähkömarkkinoihin. Viitattu: 27.10.2022. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/>
- Fingrid. (2022c) Reservit ja säätösähkö, Viitattu: 11.11.2022, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>
- Fingrid. (2022d) Vastakaupat. Viitattu: 11.11.2022, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/tilastoja-sahkomarkkinoiden-yhtenaisyydesta/vastakaupat/>
- Fingrid. (2022e) Avoin data. Viitattu: 16.11.2022, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/fingrid-avoin-data/>

- Fingrid. (2022f) Pullonkaulatuotot. Viitattu: 19.11.2022, Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pullonkaulatulot/>
- Fortum. (2022) Sähkön johdannaismarkkinat. Viitattu: 27.10.2022, Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/uutiset-ja-julkaisut/tietopaketti-medi-alle/sahkon-johdannaismarkkinat>
- Holttinen, H. & Koreneff, G. (2012) Imbalance Costs of Wind Power for a Hydro Power Producer in Finland. *Wind engineering*. [Online] 36 (1), 53–67.
- Kauniskangas, M. (2009) Hyvä tietää sähkömarkkinoista. Viitattu: 19.10.2022, Saatavissa: [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/uusi-versio\\_sahkomarkk.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/uusi-versio_sahkomarkk.pdf)
- Kiviluoma, J. (2013) Managing wind power variability and uncertainty through increased power system flexibility. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Motiva. (2022a) Energia- ja ilmastostrategia. Viitattu: 9.10.2022, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/energia-ja\\_ilmastostrategia](https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/energia-ja_ilmastostrategia)
- Motiva. (2022b) Syöttötariffi. Viitattu: 5.11.2022, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/uusiutuva\\_energia\\_suomessa/uusiutuvan\\_energian\\_tuet/syottotariffi](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuvan_energian_tuet/syottotariffi)
- Nord Pool. (2022a) About us. Viitattu: 20.10.2022, Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/en/About-us/>
- Nord Pool. (2022b) Rules and regulations. Viitattu: 25.10.2022, Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Rules-and-regulations/>
- Nord Pool. (2022c) Marked data. Viitattu 14.12.2022, Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/>
- Partanen, J. et al. (2015) Sähkömarkkinat – opetusmoniste. Viitattu: 24.10.2022, Saatavissa: <https://docplayer.fi/3719734-Sahkomarkkinat-opetusmoniste.html>
- Rinne, S. & Syri, S. (2015) The possibilities of combined heat and power production balancing large amounts of wind power in Finland. *Energy (Oxford)*. [Online] 821034–1046.
- Spodniak, P. et al. (2021) The impact of wind power and electricity demand on the relevance of different short-term electricity markets: The Nordic case. *Applied energy*. [Online] 283116063–.

- STY. (2022a) Tuulivoima ennusteita. Viitattu: 12.10.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoimaennusteita>
- STY. (2022b) Tuulivoiman vaikutukset sähköverkkoon. Viitattu: 12.10.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/tuulivoiman-vaikutukset-sahkoverkkoon>
- STY. (2022c) Tuulivoima Suomessa. Viitattu: 12.10.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa>
- STY. (2022d) Talvella tuulee eniten Viitattu: 28.12.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/talvella-tuulee-eniten>
- STY. (2022e) Tuulivoima Euroopassa. Viitattu: 12.10.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-euroopassa>
- STY. (2022f) Mikä PPA? Viitattu: 16.11.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/ppa-pitkaaikaiset-sahkonostosopimukset-2/ppa-pitkaaikaiset-sahkonostosopimukset>
- STY. (2022g) Sähkö sopimukset. Viitattu: 28.12.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/sahkosopimukset>
- TEM. (2022a) Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. Viitattu: 12.10.2022, Saatavissa: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164321/TEM\\_2022\\_53.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164321/TEM_2022_53.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- TEM. (2022b) Sähkömarkkinat. Viitattu: 20.10.2022, Saatavissa: <https://tem.fi/sahkomarkkinat>
- VTT. (2019) Tuotantotilastot. Viitattu: 28.12.2022, Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/talvella-tuulee-eniten>
- World Business Council for Sustainable Development. (2019) How multi-technology PPA structures could help companies reduce risk. Viitattu: 28.12.2022, Saatavissa: <https://docs.wbcsd.org/2019/03/How-multi-technology-PPAs-could-help-companies-reduce-risk.pdf>

## LIITE A: LUVUN NELJÄ KUVISSA KÄYTETYT ARVOT

Tarvittu tase-sähkö Suomessa (MWh)	Tuulivoiman tuotanto Suomessa (MWh)	Tuulivoiman tuotantoennuste Suomessa (MWh)	Todellinen tuotanto - ennustettu tuotanto	Keskiarvo Elbas-hinta €/MWh	Elspot-hinta €/MWh
-60	3595	3483,5	111,5	236,82	275,01
-35	3489	3509,5	-20,5	224,44	260,53
-35	3522	3524,3	-2,3	242,44	244,59
-66	3579	3548	31	240,23	243,09
-16	3636	3515,2	120,8	246,03	272,15
-81	3511	3448,9	62,1	291,18	306,91
-20	3360	3382,4	-22,4	257,48	300
0	3134	3306,9	-172,9	433,92	499,7
0	2684	3176,8	-492,8	421,69	549,93
55	2169	2924,3	-755,3	481,05	553,29
83	1728	2585,3	-857,3	512,58	518,08
0	1413	2250,1	-837,1	505,78	505,16
0	1195	1933,5	-738,5	487,67	482,78
0	1060	1693,1	-633,1	505,94	506,03
0	982	1464,7	-482,7	544,95	552,71
0	868	1294,7	-426,7	558,11	570,25
0	814	1123,6	-309,6	597,88	590
9	725	1015,1	-290,1	623,19	665,01
-15	648	917	-269	542,6	595,94
-35	618	822,6	-204,6	492,08	522,58
-58	602	782,1	-180,1	361,71	452,47
-10	525	758,5	-233,5	316,48	353,79
0	575	770,4	-195,4	277,26	321,03
0	649	548,6	100,4	272,46	283,08

Kuvissa käytetyt arvot sekä esimerkki ennustevirheestä ja tarvitusta tasesähkön suuruudesta. (Fingrid 2022e & Nord Pool 2022c)