



# Aurinkovoiman rooli ja mahdollisuudet Suomen reservimarkkinoilla

Arttu Puustinen

Opinnäytetyö, AMK  
Joulukuu 2024  
Energia- ja ympäristötekniikka

**Puustinen, Arttu**

## **Aurinkovoiman rooli ja mahdollisuudet Suomen reservimarkkinoilla**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Joulukuu 2024, 51 sivua

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### **Tiivistelmä**

Aurinkovoiman tuotantokapasiteetin oletetaan kasvavan paljon lähestyttäessä 2030-lukua. Tämä muutos tulee haastamaan sähköjärjestelmän säätökykyä tuoden samalla uusia mahdollisuuksia niin sähköjärjestelmälle kuin aurinkovoimalle. Aurinkovoima on tällä hetkellä hyvin alihyödynnetty resurssi, mutta kansainvälisesti on kuitenkin huomattavissa selkeitä trendejä, jossa aurinkovoiman liittäminen osaksi sähköjärjestelmiä on yleistymässä ja tämä trendi tulee väistämättä vaikuttamaan myös Suomessa. Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa oli sekä kvantitatiivisen että kvalitatiivisen tutkimuksen piirteitä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää aurinkovoiman mahdollisuuksia reservimarkkinoilla, mihin reservituotteisiin aurinkovoima sopii parhaiten, millaisia teknisiä vaatimuksia reservimarkkinoilla on sekä millaisia taloudellisia vaikutuksia tähän liittyy. Tutkimuksen tavoitteisiin kuului myös selvittää aurinkovoiman nykyinen rooli osana reservimarkkinoita sekä tulevaisuuden näkymät osana Suomen sähköjärjestelmää.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi raportti, jossa tarkasteltiin aurinkovoiman roolia ja mahdollisuuksia Suomen reservimarkkinoilla. Opinnäytetyössä tarkastellaan aurinkovoiman skaalautuvuutta eri reservituotteille ja vertaillaan tuotteiden teknisiä eroja sekä taloudellisia oletuksia. Tutkimuksen perusteella aurinkovoima soveltuu monille reservituotteille, mutta lähtökohtaisesti se soveltuu erityisesti reservituotteille, joissa on mahdollisuus osallistua ainoastaan alassäätöön, joko kapasiteettimarkkinoilta tai energiamarkkinoilta.

-

### **Avainsanat (asiasanat)**

Sähkömarkkinat, energiamarkkinat, aurinkovoima, uusiutuva energia

### **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

-

**Puustinen, Arttu**

**The role and possibilities of solar power in Finland's reserve markets**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, September 2020, 51 pages

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

**Abstract**

The production capacity of solar power is expected to grow significantly as we approach the 2030s. This change will challenge the balancing capabilities of the electricity system while also presenting new opportunities for both the electricity system and solar power. Currently, solar power is a highly underutilized resource, but clear international trends indicate that integrating solar power into electricity systems is becoming more common. This trend will inevitably influence Finland as well. The research was conducted as a literature review incorporating both quantitative and qualitative research elements.

The objective of the thesis was to analyze the potential applications of solar power in reserve markets, identify the reserve products best suited for solar power, examine the technical requirements of reserve markets, and evaluate the associated economic impacts. Additionally, the study aimed to assess the current role of solar power in reserve markets and its prospects within Finland's electricity system.

The outcome of the thesis was a report analyzing the role and opportunities of solar power in Finland's reserve markets. The thesis analyzed the scalability of solar power for various reserve products and compared the technical differences and economic assumptions of these products. Based on the research, solar power is suitable for many reserve products, but primarily for those involving the possibility of participating only in downward regulation, either in capacity or energy markets.

**Keywords/tags (subjects)**

Electricity markets, Energy markets, Solar power, renewable energy

**Miscellaneous (Confidential information)**

-

-

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>3</b>
1.1	Tutkimusmenetelmät ja -kysymykset .....	4
<b>2</b>	<b>Sähkömarkkinat Suomessa</b> .....	<b>6</b>
2.1	Fyysiset markkinat.....	8
2.2	Johdannaismarkkinat .....	9
2.3	Taseselvitys.....	10
<b>3</b>	<b>Reservimarkkinat Suomessa</b> .....	<b>12</b>
3.1	Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat mFFR.....	13
3.2	Nopea taajuusreservi FFR.....	14
3.3	Automaattinen taajuuden palautusreservi aFRR.....	15
3.4	Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi FCR.....	16
<b>4</b>	<b>Aurinkovoima Suomessa</b> .....	<b>17</b>
4.1	Aurinkovoiman heikkoudet ja vahvuudet .....	20
4.2	Aurinkovoiman tulevaisuus .....	22
<b>5</b>	<b>Aurinkovoima osana reservimarkkinoita</b> .....	<b>25</b>
5.1	Tekniset vaatimukset ja aurinkovoiman soveltuvuus .....	26
5.1.1	Nopea taajuusreservi FFR .....	28
5.1.2	Automaattinen taajuuden palautusreservi aFRR .....	30
5.1.3	Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat mFRR .....	32
5.1.4	Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi FCR .....	33
5.2	Markkinapotentiaali ja taloudellinen näkökulma .....	35
5.2.1	Reservimarkkinoiden korvaukset .....	36
5.2.2	Taloudellinen merkitys .....	38
<b>6</b>	<b>Yhteenveto</b> .....	<b>41</b>
	<b>Lähteet</b> .....	<b>44</b>
	<b>Liitteet</b> .....	<b>49</b>

## Kuviot

Kuvio 1.	Sähkömarkkinan markkinapaikat .....	6
Kuvio 2.	Nord Poolin tarjousalueet .....	7
Kuvio 3.	Spot-hinnan muodostuminen .....	8
Kuvio 4.	Havainnollistava kuva taseselvityksestä .....	11
Kuvio 5.	Reservituotteet .....	13

Kuvio 6. Suomen sähkön kokonaistuotanto lähteittäin.....	19
Kuvio 7. Aurinkosäteilyn määrä Euroopassa.....	20
Kuvio 8. Aurinkovoiman tuotanto vuonna 2023.....	21
Kuvio 9. Aurinkovoiman päiväprofiili.....	22
Kuvio 10. Sähkönkulutuksen ennuste.....	24
Kuvio 11. Sähköntuotannon ennuste.....	25
Kuvio 12. Reservimarkkinoiden hyväksymisprosessi.....	28
Kuvio 13. Automaattisen taajuuden palautusreservin säätökoe.....	31
Kuvio 14. aFRR-reservin aktivointinopeus.....	32
Kuvio 15. Staattinen FCR-D reservi.....	34
Kuvio 16. Negatiivisten Spot-hintojen määrä.....	36
Kuvio 17. Reservimarkkinoiden vuosituottoja.....	37
Kuvio 18. Reservituotteiden hankintamäärät.....	38
Kuvio 19. Negatiivisten säätöhintojen määrä Suomessa.....	39

## **Taulukot**

Taulukko 1. Aurinkovoiman määrä reservimarkkinoilla vuonna 2023.....	26
Taulukko 2. Nopean taajuusreservin aktivointitaajuus ja -nopeus.....	29
Taulukko 3. Nopean taajuusreservin aktivoinnin vähimmäiskesto.....	29

# 1 Johdanto

Energiasektori muuttuu yhä nopeammin ja nopeammin, mikä on osaltaan johtanut uusiutuvien energialähteiden nousuun osaksi keskeistä asemaa energijärjestelmissämme ympäri maailmaa. Lisäksi ilmastonmuutoksen torjuminen sekä fossiilisten polttoaineiden käytön lopettamiseen tähtäävät kansainväliset päätökset sekä toimenpiteet, kuten Pariisin ilmastosopimus luovat vahvaa kysyntää uusiutuvan energian tuotannolle, kuten aurinkovoimalle. Suomessa aurinkovoiman osuus sähkön kokonaistuotannosta on vielä melko vähäistä noin prosentin luokkaa, mutta se tulee kasvamaan vuosi vuodelta enemmän. Sääriippuvaisen tuotannon lisääminen aiheuttaa myös haasteita, kuten tuotannon vaihtelusta aiheutuvia taajuuden muutoksia sähköverkossamme. Tästä johtuva reservikapasiteetin tarve tulee kasvamaan arvioiden mukaan jopa 134 % seuraavan viiden vuoden aikana (Fingrid 1 2024, 10–11). Tämä opinnäytetyö käsittelee aurinkovoiman roolia ja mahdollisuuksia Suomen reservimarkkinoilla.

Reservimarkkinat ovat sähkön kulutuksen ja tuotannon tasapainottamista varten luotuja markkinoita. Reservimarkkinoilla toimijat pystyvät tarjoamaan omaa kapasiteettiaan esimerkiksi oman tuotannon tai kulutuksen vähentämistä tai lisäämistä sähköjärjestelmän taajuuden tasapainottamiseksi. Perinteisesti reservimarkkinoilla ovat toimineet voimalaitokset, suuret teollisuuslaitokset sekä vesivoima, mutta sääriippuvaisen tuotannon lisääntyessä myös näiden osallistumismahdollisuuksia on alettu tutkimaan. Aurinkovoiman osallistuminen reservimarkkinoille on vielä verrattain uusi ilmiö, mutta aurinkovoiman osuus reservimarkkinoilla tulee myös lisääntymään, mikä avaa uusia liiketoimintamahdollisuuksia monille toimijoille.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia aurinkovoiman nykyistä roolia sekä mahdollisuuksia osallistua Suomen reservimarkkinoille. Tavoitteena on tutkia, millaisia teknisiä vaatimuksia aurinkovoimalla on osallistuessaan reservimarkkinoille ja millaisia taloudellisia näkökulmia aurinkovoiman hyödyntämisellä osana reservimarkkinoita on. Tavoitteena on myös kartoittaa, minkälaisia haasteita sekä mahdollisuuksia tähän liittyy. Tämä työ keskittyy erityisesti aurinkovoiman skaalautuvuuden tarkastelemiseen eri reservituotteille. Opinnäytetyö tarjoaa mielenkiintoista tietoa muun muassa energiayhtiöille sekä muille alan toimijoille.

Aurinkovoiman osallistuminen reservimarkkinoille on ajankohtainen aihe, sillä aurinkovoima sekä muu sääriippuvainen tuotanto tulevat lisääntymään vuosi vuodelta, jolloin sähköjärjestelmämme

tarvitsee enemmän säätökapasiteettia. Suomen ja EU:n poliittiset sekä kansalliset päätökset tukevat myös hyvin laajasti aurinkovoiman lisäämistä osaksi maiden sähköntuotantoa. Aurinkovoiman osuus Suomen sähkö- ja reservimarkkinoilla on kuitenkin vielä vähäinen. Kansainvälisesti on kuitenkin havaittavissa selkeitä trendejä, joissa aurinkovoiman liittäminen osaksi sähköjärjestelmien reservimarkkinoita on yleistymässä ja tämä trendi tulee väistämättä vaikuttamaan myös Suomessa.

Aurinkovoiman mahdollisuuksien kartoittaminen reservimarkkinoilla on merkittävää, koska se on osa energiasektorin kehitystä kohti kestävämpää energiantuotantoa sekä vihreää siirtymää. Samalla opinnäytetyön aihe vastaa kasvavaan tarpeeseen liittyen uusien liiketoimintamallien sekä teknologioiden kehitystä, jotka mahdollistavat muun muassa aurinkovoiman laajemman hyödyntämisen osana sähköjärjestelmäämme. Opinnäytetyön rajaus keskittyy tarkasti aurinkovoiman osallistumiseen reservimarkkinoille, koska aurinkovoiman ominaisuudet, kuten tuotannon vaihtelu tuovat paljon uusia haasteita sekä mahdollisuuksia reservimarkkinoille.

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Gasum Oy. Gasum on pohjoismainen energiayhtiö sekä kaasualan asiantuntija. Gasum toimii Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla laajasti sekä fyysisillä markkinoilla että johdannaismarkkinoilla.

## **1.1 Tutkimusmenetelmät ja -kysymykset**

Tänä päivänä aurinkovoiman rooli Suomen sähkömarkkinoilla on hyvin pieni, mutta kasvava. Aurinkovoiman kasvu tuo paljon haasteita sekä mahdollisuuksia niin aurinkovoiman tuottajille kuin sähköverkon säätökyvyille, kuten edellisessä kappaleessa mainittiin. Tämän takia onkin hyvin olennaista ja ajankohtaista tutkia aurinkovoiman roolia ja mahdollisuuksia osana Suomen reservimarkkinoita, tuoden aurinkovoiman tuottajille lisätuloja sekä uusia liiketoimintamahdollisuuksia ja lisäämällä sähköverkon säätökykyä uusiutuvassa markkinassa.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia aurinkovoiman nykyistä roolia reservimarkkinoilla sekä kartoittaa aurinkovoiman mahdollisuuksia osana reservimarkkinoita ja näin ollen osana Pohjoismaista sähköjärjestelmää. Opinnäytetyön tutkimus pohjautuu seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Onko aurinkovoimalla mahdollisuuksia osallistua Suomen reservimarkkinoille?
- Millainen on aurinkovoiman nykyinen rooli reserveissä?
- Millaisia teknillisiä vaatimuksia aurinkovoimalla on osallistuessaan reservimarkkinoille?
- Mitkä reservituotteet ovat vaihtoehtoja aurinkovoimalle?

Opinnäytetyön lopputuloksena on raportti, jonka teoriaosuus on rakennettu sähkömarkkinoiden sekä reservimarkkinoiden toiminnan ympärille. Teoriaosuus koostuu myös aurinkovoiman nykyisen roolin kartoittamisesta sekä tulevaisuuden näkymien tutkimisesta osana Suomen sähkömarkkinoiden kehitystä. Työ tulee antamaan konkreettista tietoa, kuinka aurinkovoiman hyödyntäminen reservimarkkinoilla onnistuisi parhaiten.

Opinnäytetyön tietoperustan tutkimusmenetelmänä toimii kuvaileva kirjallisuuskatsaus, jonka tavoitteena on syventää ymmärrystä Suomen sähkö- ja reservimarkkinoista sekä aurinkovoiman roolia niissä. Opinnäytetyössä hyödynnetään laajasti sekä kvantitatiivisia että kvalitatiivisia tutkimusmenetelmiä. Kvalitatiivisen tutkimuksen tavoitteena on selventää lukijalle tutkimuksen ilmiöitä sekä teorioita ja näin auttaa lukijaa ymmärtämään mistä tutkimuksessa on kyse (Kananen 2010, 37). Tässä opinnäytetyössä kvalitatiivisen menetelmän tavoitteena on selventää lukijalle sähkömarkkinoiden sekä reservimarkkinoiden toimintaa ja aurinkovoiman yhteyttä tässä. Kvantitatiivinen menetelmä puolestaan perustuu numeeriseen ja tilastolliseen tarkasteluun tutkittavan kohteen osalta (Määrällinen tutkimus n.d.). Tämä näkyy opinnäytetyössä muun muassa Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin ylläpitämässä avoimen datan palvelusta saatavien tilastojen hyödyntämisessä.

Opinnäytetyön aineistonkeruussa ja tiedonhaussa hyödynnettiin hyviä tieteellisiä käytäntöjä sekä eettisyyttä. Tutkimuksen tiedonhaku pohjautui hyvin paljon kirjallisuuskatsaukseen, jossa käytettiin avoimia sekä saatavilla olevia avoimia tiedonlähteitä, joita tutkittiin kriittisesti. Tiedonhaku pohjautui suurilta osin alkuperäisten lähteiden hyödyntämiseen. Muiden lähteiden osalta pyrittiin etsimään samasta aiheesta tietoa useammasta lähteestä ja näin varmistamaan tiedon oleellisuus. Opinnäytetyössä käytettiin myös paljon dataa, mikä on peräisin Fingridin tuottamasta avoimen datan palvelusta, jolloin tiedot pohjautuvat toteutuneisiin tuloksiin. Tutkimuksessa on myös käytetty hieman tulevaisuuden skenaarioita esimerkiksi Suomen sähkönkulutuksen ja aurinkovoiman tulevaisuudesta. Nämä on huomioitu tekstissä ja tässä on käytetty lähdekriittisyyttä. Tiedonhaun sekä

aineistonkeruun eettisyys varmistettiin aina aineistonkeruusta sen analysointiin sekä johtopäätöksen tekemiseen. Alkuperäiset lähteet merkittiin tekstiin lähdeviittein.

## 2 Sähkömarkkinat Suomessa

Suomi kuuluu osaksi laajempaa Pohjoismaista sähköjärjestelmää, jonka tavoitteena on taata sähkön tarjonnan sekä kysynnän tasapaino ja sähkönsaanti vuorokauden jokaisella tunnilla. Sähkömarkkinat voidaan jakaa fyysisiin markkinoihin sekä finanssimarkkinoihin (kuvio 1). Fyysisiin markkinoihin kuuluvat vuorokausimarkkinat, jota kutsutaan myös Elspot-markkinaksi sekä päivänsisäiset markkinat (Elbas-markkina), joissa käydään kauppaa todellisen sähkön toimittamisesta, kun taas finanssimarkkinoihin puolestaan kuuluu muun muassa johdannaismarkkinat. Finanssimarkkinoiden tavoitteena on turvata sähkön hinta tietylle tasolle pidemmällä aikavälillä. Finanssimarkkinoiden tuotteita ovat muun muassa erilaiset optiot sekä futuurit. (Yleistietoa sähkömarkkinoista n.d.) Sähkökauppaa voi myös käydä Suomessa kahden välisellä OTC-kaupalla (Over The Counter), jossa kauppaa käydään suoraan yritysten välillä ilman sähköpörssin vaatimia vakuuksia. Tämä kuitenkin altistaa toimijat vastapuoliriskille. (Paasolainen 2024, 29.)



Kuvio 1. Sähkömarkkinan markkinapaikat (Markkinapaikat n.d.).

Pohjoismaisen sähkömarkkinan keskeinen toimija on sähköpörssi Nord Pool, jossa fyysiset markkinat tapahtuvat. Nord Poolin sähköpörssin toimintaperiaatteena on avoin kilpailu, jossa hinta määräytyy kysynnän ja tarjonnan mukaan. Pohjoismainen sähkömarkkina muodostaa myös yhtenäisen synkronialueen, jossa taajuus on sama (Kuvio 2). Tähän synkronialueeseen kuuluvat Suomen lisäksi Norja, Ruotsi ja Tanska sekä Baltian maat Viro, Latvia ja Liettua. Erona Suomen sähköalueeseen esimerkiksi Ruotsi on jakautunut neljään ja Norja viiteen tarjousalueeseen. Nämä alueet yhdistyvät

toisiinsa siirtoyhteyksillä (kuvio 2). (The power market n.d.) Nord Poolissa kaupankäynti tapahtuu anonymisti pörssin jäsenyhtiöiden välillä. Pörssikaupan etuuksia verrattuna aikaisemmin mainittuun OTC-kauppaan on sen turvallisuus. Pörssikauppa poistaa vastapuoliriskin vaatimalla osapuolilta vakuudet. (Collateral n.d.)

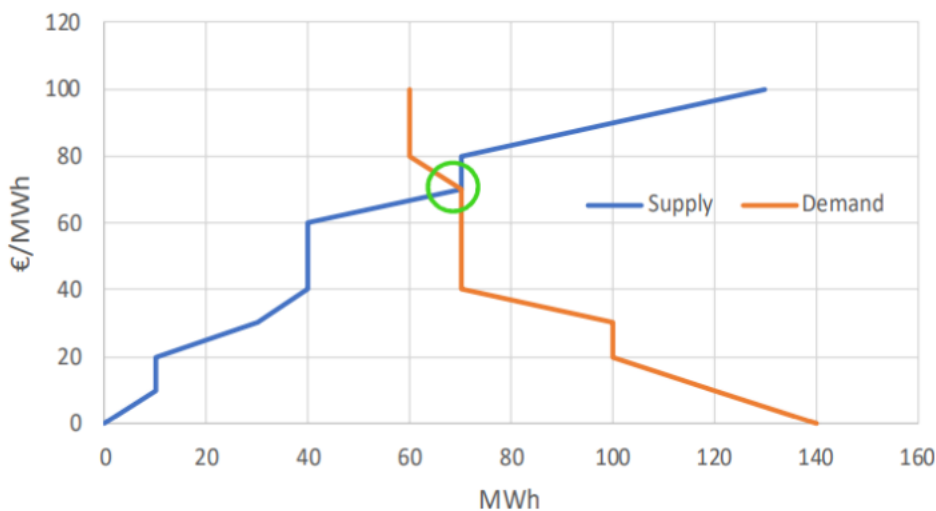


Kuvio 2. Nord Poolin tarjousalueet (Uski 2019, 5).

Yksinkertaistettuna sähkömarkkinat perustuvat kysynnän ja tarjonnan tasapainoon. Sähkön kulutuksen sekä tuotannon on oltava tasapainossa ja sähköverkon taajuuden tulee pysyä jatkuvasti  $50 \pm 0,1$  Hz:n taajuudessa. Tästä vastaa kunkin maan kantaverkkoyhtiö, joka on Suomessa Fingrid, Ruotissa Svenska Kraftnät, Norjassa Statnett. (Osa pohjoismaista sähköjärjestelmää n.d.) Sähkön kuluttajat sekä tuottajat jättävät omat tuotanto- tai kulutustarjouksensa Elspot-markkinalle seuraavalle päivälle Suomen aikaan kello 13.00 mennessä. Elspot-markkina muodostaa spot-hinnan seuraavan päivän jokaiselle tunnille. Päivänsisäisellä markkinalla eli Elbas-markkinalla, joka aukeaa seuraavalle päivälle heti spot-hintojen julkaisun jälkeen, voidaan korjata omaa sähkötasetta eli ennustetun kulutuksen tai tuotannon sekä toteutuneen kulutuksen tai tuotannon erotusta ja näin ollen vähentää oman tasesähkön määrää. Elbas-markkinalla voi käydä kauppaa tuntikohtaisesti. Sähkömarkkinoiden toimintaan liittyy lisäksi säätösähkö- ja reservimarkkinat. (Markkinapaikat n.d.)

## 2.1 Fyysiset markkinat

Fyysisiin markkinoihin kuuluvat vuorokausimarkkinat sekä päivänsisäiset markkinat. Vuorokausimarkkinoilla käydään kauppaa seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. Vuorokausimarkkinoiden osapuolina ovat tavallisimmin sähköntuottajat sekä vähittäismyyjät ja teollisuus. Vuorokausimarkkinoilla toimijat jättävät tarjouksensa kello 13.00 mennessä -500–4000 €/MWh hintarajoissa Nord Poolin sähköpörssiin. Tuntitarjoukset ovat luonteeltaan rajatarjouksia, mikä tarkoittaa, että tarjous tehdään tarjotun hinnan ja määrän mukaan ehdollisena. (Single hourly order n.d.) Toimijat voivat myös jättää esimerkiksi blokkitarjouksia markkinoille, jossa tarjous koostuu samasta hinnasta ja määrästä useammalle tunnille, kuitenkin vähintään kolmelle tunnille (Block order n.d.). Tarjousten jättämisen jälkeen Spot-hinta muodostetaan seuraavan päivän jokaiselle tunnille kysynnän ja tarjonnan ollessa tasapainossa.



Kuvio 3. Spot-hinnan muodostuminen (Paasolainen 2023, 30).

Spot tarjousten jättämisen jälkeen tulokset julkaistaan Suomen aikaan kello 14.00 mennessä. Samalla lasketaan siirtojen tarve eri tarjousalueille. Tilanne, jossa tarjousalueiden välillä olevan siirtokapasiteetin määrä on suurempi, kuin siirron tarve, muodostuu alueille sama hinta. Tätä kutsutaan systeemihinnaksi, joka on siis pohjoismaiden rajoittamaton hinta. (Berg & Randen 2022, 8–11.)

Normaalissa tilanteessa sähköä siirretään siirtoyhteyksien avulla halvemmalta tarjousalueelta kalliimmalle, jolloin sähköntuottajat saavat siitä paremman hinnan. Kuitenkin tilanteessa, jossa siirron tarve ylittää tarjousalueiden välisen siirtokapasiteetin muodostuu alueille sähkön yli- ja alijäämä,

jossa toisella alueella voi olla liikaa sähköä, jolloin hinta laskee ja toisella alueella liian vähän, jolloin puolestaan hinta nousee korkeammalle. Tätä tilannetta kutsutaan pullonkaulatilanteeksi, jossa hinnat erottuvat aluehinnoiksi. (Härkönen 2015, 15.)

Päivänsisäisellä markkinalla eli Elbas-markkinalla toimijat voivat tasapainottaa tasettaan eli Elspot-markkinoille myydyn tai ostetun sähkön ja todellisen sähkön erotusta. Tällä hetkellä kaupankäynti on mahdollista muualle Eurooppaan tuntia ennen toimitusta ja viroon 30 minuuttia ennen toimitusta sekä Suomen sisällä toimitushetkeen saakka. (Päivänsisäisten ja vuorokausimarkkinoiden kehityssuunta n.d.) Elbas-markkinalla on suuri rooli toimijoiden taseiden tasapainottamisen lisäksi myös sähköjärjestelmän tasapainottamisessa. Päivänsisäisessä markkinassa toimijat jättävät anonyymisti tarjouksensa haluamallaan hinnalla (€) ja määrällä (MW) Nord Poolin sähköpörssiin. Elbas-markkinan hinnat seuraavat hyvin pitkälti markkinatilannetta, onko esimerkiksi markkinalla ylössäätöä, jolloin hinta voi olla spot-hintaa korkeampi vai onko markkina alassäätöinen, jolloin hinta on puolestaan spot-hintaa matalampi. (Paasolainen 2023, 31.)

## 2.2 Johdannaismarkkinat

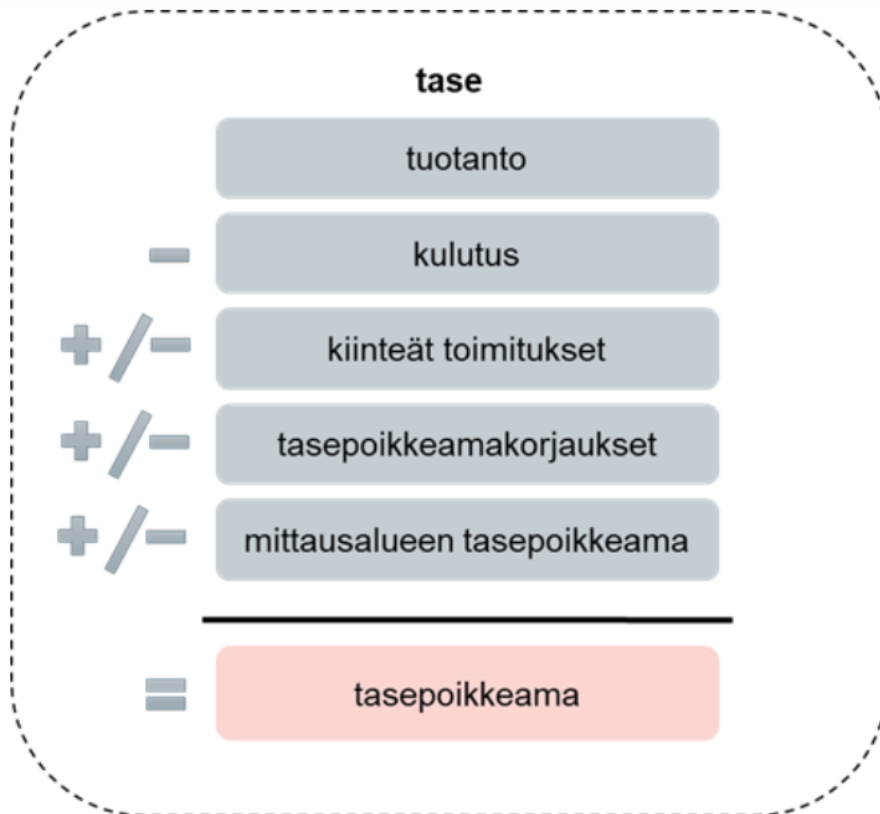
Toisin kuin fyysisillä markkinoilla, johdannaismarkkinoiden kaupankohteena ei ole fyysinen sähkö, vaan sähkön hintaan vaikuttavat johdannaistuotteet. Johdannaismarkkinoilla toimijat, kuten sähkön kuluttajat, tuottajat sekä välittäjät voivat suojautua sähkön hinnanvaihtelulta. Hinnanvaihtelut sekä hintaan vaikuttavat riskit ovat etenkin viimeisinä vuosina nostaneet päätään, mikä on johtunut muun muassa sääriippuvaisen tuotannon lisääntymisestä sekä polttoaineiden hintojen vaihtelusta ja toimijat haluavatkin turvata omaa toimintaansa tekemällä sopimuksia johdannaismarkkinoilla. (Markkinapaikat n.d.) Johdannaismarkkinoiden vastapuolena toimii muun muassa Nasdaq Commodities finanssipörssi (Valeri 2023, 34).

Johdannaismarkkinoiden kaupankäynnin kohteena on muun muassa futuurit ja optiot. Futuureilla osapuolet voivat sopia sähkön hinnasta pidemmälle aikavälille, jolloin hintariskin hallinta helpottuu molempien osapuolien välillä. (Markkinapaikat n.d.) Sähköfutuurisopimuksessa osapuolet sopivat tietyn sähkönhinnan pidemmälle aikavälille, kuten esimerkiksi vuodeksi tai kvartaaliksi eteenpäin. Sähköfutuurisopimuksessa tilitys tapahtuu toteutuneen systeemihinnan sekä sopimuksen

mukaisen hinnan erotuksena. Optiolla ostaja voi myös turvautua sähkön hinnan nousulta tai laskulta riippuen, onko kyseessä osto- vai myyntioptio. Option ostaja maksaa option myyjälle mahdollisuudesta ostaa tai myydä sähköä optiolla sovitulla hinnalla. (Valeri 2023, 34.)

## **2.3 Taseselvitys**

Toimivan sähköjärjestelmän takeena on kulutuksen sekä tuotannon tasapaino vuorokauden jokaisella tunnilla. Sähköjärjestelmän tehotasapainon varmistaa markkinoille tarjottavat reservituotteet ja säätövoima, joita aktivoidaan tarvittaessa esimerkiksi taajuuden alentuessa tai noustessa. Sähkömarkkinoiden taloudellinen tasapaino puolestaan luodaan taseselvityksessä. Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla taseselvitys on muuttunut vuonna 2021 alkaen yhden taseen malliksi, jossa tuotannot sekä kulutukset käsitellään yhtenä taseena. (Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja 2022, 7–10.) Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että jokaisen sähkömarkkinoilla toimivan tahon on huolehdittava oman taseensa tasapainosta eli esimerkiksi ostamansa sähkön sekä kulutuksen tasapainosta jokaisella tunnilla. (Taseselvitysmallin kuvaus n.d.) Suurella osalla toimijoista on kuitenkin avoin toimittaja, joka hoitaa käytännössä sähkötaseen tasapainottamisen. Tätä toimijaa kutsutaan tasevastaavaksi (BRP). (Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja 2022, 13.)



Kuvio 4. Havainnollistava kuva taseselvityksestä (Taseselvitysmallin kuvaus n.d.).

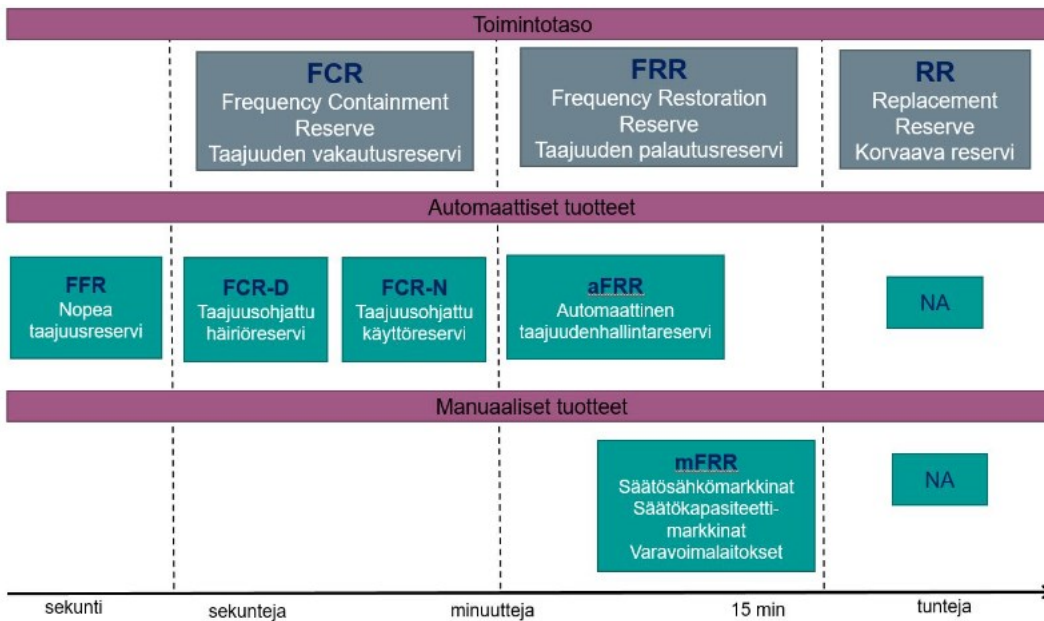
Toimittajan tase voi olla yli- tai alijäämäinen. Tilanteessa, jossa toimittaja tuottaa enemmän sähköä kuin myy tai ostaa enemmän kuin kuluttaa, tase on ylijäämäinen. Alijäämäinen tase puolestaan tarkoittaa, jos toimija kuluttaa sähköä enemmän kuin on ostanut tai tuottaa vähemmän kuin on myynyt vuorokausimarkkinoille. (Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja 2022, 58.) Taseselvitys tuo toimijoille kannustimia oman taseensa hallintaan esimerkiksi Elbas-markkinoilla, koska riippuen markkinatilanteesta tasesähkön hinta voi nousta moninkertaiseksi verrattuna sen tunnin spot-hintaan, jolloin kustannukset nousevat suuriksi. Tasesähkön hinta määräytyy säätösähkömarkkinoiden mukaan. Tasesähkö voi myös tuoda joissain tilanteissa tuloja tasevastaavalle. Esimerkiksi tilanteessa, jossa markkinalla on alassätöä ja tuottajan tasepoikkeama on positiivinen. Tällöin toimittaja saa korvauksen alassätöhinnan mukaisesti. Puolestaan tilanteessa, jossa sähkön toimittajan tase on alijäämäinen ja tunti on ylösätöinen, joutuu toimittaja korvaamaan tasesähkön määrän kyseisen tunnin ylösätöhinnan mukaan.

Aurinkovoiman ja muun sääriippuvaisen tuotannon taseselvitys ja sen aiheuttamat riskit ovat hyvin olennaisia. Tuotanto perustuu ennustamiseen seuraavan päivän olosuhteista, vaikkakin tuotannon ennustaminen on nykyään suhteellinen hyvällä tasolla, siinä aina riskit. Tämän takia aurinkovoiman lisäksi on hyvä suunnitella sähköakkuja, jotka tuotannon tasaamisen lisäksi kykenevät vähentämään taseriskejä.

### 3 Reservimarkkinat Suomessa

Sähkön tuotannon ja kulutuksen on oltava tasapainossa ja taajuuden pysyttävä vakaana 50 Hz:n taajuudessa. Reservimarkkinoiden tarve perustuu markkinaosapuolien edellisenä päivänä ennustetun tuotannon ja kulutuksen tasapainon heittelemiseen sähkön toimitushetkellä esimerkiksi tuotantolaitoksen tai kulutuskohteen vikaantumisen seurauksena. Tämä tarkoittaa, että sähköverkon taajuus voi muuttua epävakaaksi, jolloin sen normalisointiin tarvitaan erilaisia reservituotteita, joilla voidaan joko kulutusta nostamalla tai laskemalla sekä tuotantoa lisäämällä tai laskemalla palauttaa sähköverkon taajuus haluttuun 50 Hz:n taajuuteen. (Reservimarkkinat n.d.) Pohjoismaisella tasolla reservimarkkinoista vastaa kunkin maan kantaverkkoyhtiö eli Suomessa Fingrid, joka tarjoaa markkinoille monia eri reservituotteita.

Reservimarkkinoilla on monia tuotteita, joiden käyttötarkoitus on erilainen. Näitä tuotteita ovat muun muassa taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR), automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) ja säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR) sekä nopea taajuusreservi (FFR) (Reservimarkkinat n.d.). Osa reserveistä on myös jaettu ylös- tai alassäätöiseksi. Tämä siis tarkoittaa yksinkertaisesti halutaanko sähköverkon taajuutta nostaa, jolloin puhutaan ylösäädöstä vai halutaanko sitä laskea, jolloin puhutaan alassäädöstä. (Cygnel 2024.) Nämä reservituotteet eroavat toisistaan käyttötarkoituksensa sekä teknillisen toteutuksensa puolesta. Pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt ovat myös velvollisia ylläpitämään tietyn määrän reservejä (Reservimarkkinat n.d.).



Kuvio 5. Reservituotteet (Reservimarkkinat n.d.).

### 3.1 Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat mFRR

Pohjoismaisia säätösähkömarkkinoita ylläpidetään yhteistyössä kantaverkkoyhtiöiden ja toimittajien välillä. Reservitoimittajat voivat tarjota omaa kapasiteettiaan säätösähkömarkkinoille. Osallistuminen näille markkinoille edellyttää sopimusta Fingridin kanssa, joka vastaa Suomen säätökapasiteetin määrästä ja hankinnasta. Säättotarjouksien edellytyksenä on 15 minuutin aktivointiaika eli aktivoituneen reservin tulee kyetä toteuttamaan pyydetty tehonmuutos 15 minuutissa. Markkinoille voi jättää tarjouksia minimissään 5 MW koossa ja 1 MW tarkkuudella. Kuitenkin säättotarjouksen pystyessä aktivoitumaan elektronisesti voi markkinoille jättää viisi alle 5 MW säättotarjousta, jolloin minimitarjouskoko on 1 MW. (Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR) n.d.)

Säätösähkö- ja säätökapasiteettituotteita on molempiin suuntiin sekä alas- että ylös-säätöön. Säätökapasiteettimarkkinoilla toimijat jättävät tarjouksena ja sitoutuvat toteuttamaan tarjouksensa pyydettyä. Kapasiteettimarkkinoilla toimijoille maksetaan kapasiteetin ylläpitämisestä riippumatta, aktivoituaanko reserviä vai ei. Säätökapasiteettimarkkina varmistaa sen, että tarjouksia ja näin ollen säätövoimaa on riittävästi mFRR aktivointimarkkinalla. Säätösähkömarkkinoilla toimijat voivat jättää tarjouksiaan päivänsisäisesti, kuitenkin 45 minuuttia ennen toimitustuntia. (Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR) n.d.) Säätökapasiteettimarkkina puolestaan toteute-

taan viimeistään edellisenä päivänä kello 7.30 (CET/CEST), mutta tarjouksia voi jättää 7 vuorokautta ennen toimitustuntia. (Ehdot ja edellytykset manuaalisen taajuuden palautusreservin (mFRR) toimittajalle 2024, 10–11.)

Säätösähkön hinta määräytyy jokaiselle tunnille toteutuneiden säätöjen perusteella. Ylössäätöhinta muodostuu kalleimman tilatun tarjouksen mukaan, joka on kuitenkin suurempi kuin tunnin spot-hinta. Allassäätöhinnan muodostaa puolestaan halvin tilattu tarjous, joka on enintään Suomen spot-hinnan tasolla. (Ylös- ja alassäädön hinta n.d.) Säätökapasiteettimarkkinoilla hinta puolestaan muodostuu marginaalihintaperiaatteella eli kallein hyväksytty tarjous määrittää hinnan kaikille. Säätökapasiteettimarkkinoilla hintaan vaikuttaa myös säätökapasiteetin pysyvyys sekä mahdolliset sanktiot. Sanktioilla tarkoitetaan maksuja, jos kapasiteettimarkkinoilla toimija ei pysty toteuttamaan säätöä ilman pätevää syytä, kuten teknillistä vikaa. (Paasolainen 2022, 34.)

Fingridin avoimen datan mukaan vuonna 2024 toteutuneiden säätösähkön hintojen keskiarvo alassäädölle oli 33,01 €/MWh ja ylössäädölle 68,68 €/MWh. Vuonna 2023 hinnat ovat puolestaan olleet alassäädölle 43,08 €/MWh ja ylössäädölle 73,33 €/MWh. Säätökapasiteettimarkkinoilla hinnat ovat puolestaan olleet vuonna 2024 ylössäädölle 12 €/MWh ja alassäädölle 17 €/MWh. Vuonna 2023 hinnat ovat olleet ylössäädölle 15 €/MWh ja alassäädölle 17 €/MWh. (Fingrid Avoin Data n.d.)

### **3.2 Nopea taajuusreservi FFR**

Nopean taajuusreservin tarkoituksena on hallita pienten inertian tilanteita sähköverkossa. Nopea taajuusreservi FFR on nopein reservituote ja sen hankintatarve vaihtelee kausiluontoisesti ja esimerkiksi keväästä syksyyn tarve on suurimmillaan. (Nopea taajuusreservi FFR n.d.) FFR-reserviä hankintaan kansallisilla markkinoilla ja tämä vaihtelee maittain hieman. Suomessa Fingridin vastuulla on hankkia FFR-reserviä noin 0–60 MW tuntimarkkinoilta tai Virosta. Määrä vaihtelee tarpeen mukaan. (Reservimarkkinat n.d.) Uusiutuvien energiantuotantomuotojen lisääntyminen tulee vähentämään entisestään inertian määrää, jonka seurauksena verkossamme tapahtuu useammin suuria ja nopeita taajuudenmuutoksia. Tämä tulee lisäämään nopean taajuusreservi tarvetta ja määrää. (Wind and Solar... 2023, 25–27.)

Nopea taajuusreservi on otettu Suomessa käyttöön keväällä 2020. Fingrid hankkii nopeaa taajuusreserviä edellisenä päivänä järjestetystä tarjouskilpailusta, jonne FFR-markkinalle osallistuva toimija voi jättää tarjouksena kello 18.00 Suomen aikaan mennessä seuraavan vuorokauden tunneille. FFR-reservissä tarjouksien minimikoko on 1 MW ja maksimitarjous on puolestaan 10 MW. Fingrid ilmoittaa toteutuneet kaupat kello 22.00 mennessä. Nopean taajuusreservin tulot perustuvat reservikohteen ylläpidetyn reservikapasiteetin määrään, jonka ylläpidon Fingrid varmistaa reaaliaikamittauksen avulla. (Ehdot ja edellytykset nopean taajuusreservin (FFR) toimittajalle 2022, 8.)

Nopean taajuusreservin toimittajaksi päästäkseen toimijan on läpäistävä ennakkohyväksyntäprosessi, jossa reservikohteen on läpäistävä säätökoe säätöominaisuuksien todistamiseksi. FFR-reservi on nopein reservituotteista ja säädön on aktivoituessaan aktivoituttava 0,7–1,3 sekunnin aikana (Wind and Solar... 2023, 25). Vuonna 2023 nopeaa taajuusreserviä hankittiin yhteensä 1031 tuntia keskihinnalla 38 €/MWh. Vuonna 2022 reserviä hankittiin puolestaan noin 1500 tuntia keskihinnalla 29 €/MWh. (Fingrid Avoin Data n.d.)

### **3.3 Automaattinen taajuuden palautusreservi aFRR**

Automaattisen taajuuden palautusreservin tarkoituksena on palauttaa sähköjärjestelmän taajuus normaali taajuuteen eli 50 Hz:iin. Automaattisen taajuuden palautusreservin toteutuessa Fingrid lähettää toimijoille tehonmuutossignaalin, jonka vähimmäiskoko on 1 MW ja tehonmuutoksen aktivoitumisaika voi olla enintään 5 minuuttia. aFRR-reservin hankinta tapahtuu pohjoismaisilta kapasiteettimarkkinoilta, jossa hinta aFRR-kapasiteetille muodostuu marginaalihinnan mukaisesti eli kallein toteutunut tarjous määrittää hinnan kyseiselle tunnille. (Automaattinen taajuuden palautusreservi aFRR n.d.)

Pohjoismaiden järjestelmävastaavien mukaisen käyttösopimuksen perusteella Fingrid on velvollinen ylläpitämään tietyn määrän myös aFRR-reserviä tietylle ajalle. Tämä määrä on noin 46–62 MW:n välillä riippuen sen hetkisestä tarpeesta. Automaattista taajuuden palautusreserviä Fingrid hankkii tuntimarkkinoilta sekä Virosta. (Reservimarkkinat n.d.) Tällä hetkellä Pohjoismaisella tasolla hankintamäärä on 200–400 MW, josta Suomen osuus on 30–60 MW. Reserviä hankitaan tällä hetkellä lähtökohtaisesti kaikille vuorokauden tunneille. (Automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitotunnit viikoille 27–39/2024.) Automaattisen taajuuden palautusreservin markkinassa

reservitoimittaja jättää tarjouksena aikaisintaan seitsemän vuorokautta ennen tarjouksen käyttövuorokautta ja viimeistään kello 7.00 (CET/CEST) koskien seuraavan vuorokauden tarjouksia. (Ehdot ja edellytykset automaattisen taajuuden palautusreservin... 2024, 8–9.)

Automaattinen taajuuden palautusreservi on nimensä mukaan automaattinen reservi, joka aktivoidaan Suomessa Fingridin lähettämällä aktivointisignaalilla, joka perustuu sähköverkon taajuuteen. Nykyään aFRR-markkina on muutoksessa, koska se on siirtynyt Pohjoismaiselta tasolta Eurooppalaiselle PICASSO-markkinalle. Tämä tarkoittaa muutoksia esimerkiksi reservistä maksetulle hinnalle. Ennen aFRR-reservistä maksettiin mFRR-hinnan mukaisesti, mutta liittyttyään PICASSO-markkinalle aFRR-markkinalle tuli oma marginaalihintainen energian aktivointimarkkina, jonka mukaan maksetaan korvaukset aFRR-tuntimarkkinoiden toteutuneista tarjouksista marginaalihinnan mukaan. (Wind and Solar... 2023, 13–15.)

Automaattisen taajuuden palautusreservin ylösäättökapasiteetin marginaalihinnan keskiarvo on vuonna 2024 ollut 28,25 €/MWh ja alassäättökapasiteetin hinta puolestaan 25,57 €/MWh. Energiamarkkinoiden hinnat ovat puolestaan vuoden 2024 puolella olleet huomattavasti korkeammalla verrattuna kapasiteettimarkkinoihin. Vuoden 2024 toteutuneiden ylösäättöjen keskihinta on ollut 60,44 €/MWh ja alassäättöhinta on puolestaan -29,04 €/MWh. Huomioitavana asiana on kuitenkin aFRR-energian aktivointimarkkinan avautuminen vasta 12.6.2024. (Fingrid Avoin Data n.d.)

### **3.4 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi FCR**

Taajuusohjatut käyttö- ja häiriöreservit ovat luonteeltaan taajuuden vakautusreservejä, jotka aktivoituvat automaattisesti taajuudenmuutoksen seurauksena. Taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) tarkoituksena on ylläpitää taajuus normaalitilassa eli 49,9–50,1 Hz:n välillä. Taajuusohjatun käyttöreservin ollessa symmetrinen tuote edellytetään, että reservikohde kykenee osallistumaan sekä alas- että ylös-säätöön. Taajuusohjatun häiriöreservin (FCR-D) tehtävänä on puolestaan ylläpitää sähköverkon taajuus 49,5–50,5 Hz:n välillä. Taajuusohjattu häiriöreservi voi olla luonteeltaan staattista tai dynaamista. Staattisessa häiriöreservissä reservikohde ei pysty säätämään tehoaan jatkuvasti taajuuden mukaan. Dynaaminen FCR-D reservi puolestaan kykenee säätämään reserviään nopeasti taajuuspoikkeaman mukaan. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet) n.d.)

Kuten muillakin reservituotteilla kantaverkkoyhtiöillä on hankintavelvollisuuksia taajuusohjatulle käyttö- ja häiriöreserville. Fingridin osalta velvoite on taajuusohjatulle käyttöreserville 122 MW ja häiriöreserville puolestaan 290 MW (ylössäätö) + 250 MW (alassäätö). (Reservimarkkinat n.d.) Hankinta tapahtuu vuosimarkkinoilta sekä tuntimarkkinoilta. Vuosimarkkinat pidetään kerran vuodessa järjestettävässä tarjouskilpailussa, jossa kiinteä kapasiteettikorvaus määräytyy kalleimman hyväksytyin tarjouksen mukaan. Vuosimarkkinoille osallistuvien toimijoiden on ilmoitettava Fingridille edellisenä päivänä kello 18.00 mennessä seuraavaa päivää koskeva reservisuunnitelma, jossa tulee ilmi saatavilla oleva reservikapasiteetin määrä jokaiselle tunnille vuosimarkkinasopimuksen puitteissa. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet) n.d.) Tuntimarkkinoille osallistuminen puolestaan vaatii sopimuksen Fingridin kanssa ja markkinalle voi liittyä milloin vain. Tuntimarkkinoille osallistuvien toimijoiden on jätettävä tarjouksena seuraavalle päivälle kello 18.30 mennessä. Maksettava korvaus puolestaan määräytyy kalleimman käytetyn tarjouksen mukaisesti kullekin tunnille. (Paasolainen 2023, 38.)

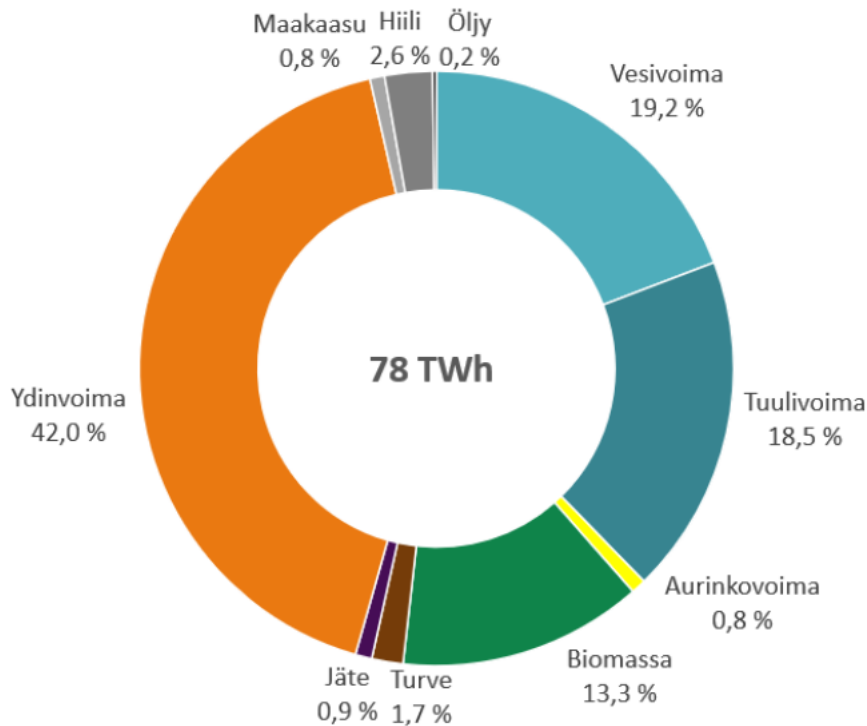
Taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin toteutuneita hintoja vuosimarkkinoilla on vuonna 2024 25,39 €/MWh (FCR-N), 4,00 €/MWh (FCR-D ylös) ja 9,50 €/MWh (FCR-D alas). Vuonna 2023 hinnat vuosimarkkinoilla ovat olleet puolestaan 19,10 €/MWh (FCR-N), 2,81 €/MWh (FCR-D ylös) sekä 9,99 €/MWh (FCR-D alas). Tuntimarkkinoilla taajuusohjatun käyttöreservin hinta on ollut paljon suurempi verrattuna tuntimarkkinoihin. Vuonna 2024 tuntimarkkinoiden hinnat ovat olleet keskiarvoltaan 50,74 €/MWh, kun puolestaan taajuusohjatulle häiriöreserville hinnat ovat olleet 19,96 €/MWh (ylös) sekä 4,42 €/MWh (alas). (Fingrid Avoin Data n.d.) Taajuusohjattuun käyttö- ja häiriöreserveihin kuuluu myös sanktiot toimittamatta jääneestä reservistä. Sanktioita ei kuitenkaan tarvitse maksaa, jos reservimarkkinoille myydyn kapasiteetin toteuttamatta jättäminen johtuu ylitsepääsemättömästä esteestä. (Ehdot ja edellytykset taajuuden vakautusreservin... 2024, 13.)

## 4 Aurinkovoima Suomessa

Aurinkovoiman osuus Suomen sähkön kokonaistuotannosta on vielä hyvin marginaalista eli noin prosentin luokkaa. Tarkemmin sanottuna aurinkovoimalla tuotettiin Suomen sähköstä vuonna 2023 0,8 % (Sähköntuotanto n.d.). Tämä vastaa aurinkosähkökapasiteettinä noin 1000 megawattia, josta suurin osa on vielä pientuotantoa. Aurinkosähkön pientuotannolla tarkoitetaan alle 1 MW kokoisia aurinkojärjestelmiä, kun taas sitä suuremmista puhutaan teollisen kokoluokan järjes-

telmistä. (Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti nousi... 2024.) Puhuttaessa aurinkovoiman osallistumisesta reservimarkkinoille on olennaisempaa tarkastella teollisen kokoluokan aurinkovoimaloiden kehittymistä sekä tulevaisuuden näkymiä osana Suomen sähköjärjestelmää. Vuonna 2023 teollisen kokoluokan aurinkovoimakapasiteetin määrä oli noin 50 MW, mutta sen oletetaan kasvavan valtavasti mentäessä 2030-luvulle. Jos kaikki tällä hetkellä suunnitteilla olevat aurinkovoimalat toteutuisivat nostaisi se teollisen kokoluokan tuotantokapasiteetin jopa 9500 megawattiin. Vuonna 2023 rakenteilla oli noin 310 megawatin edestä aurinkovoimaloita, joka itsessään jo kuusinkertaistaisi aurinkovoimakapasiteetin. (Suurten aurinkovoimaloiden... 2023.)

Kun tarkastelemme yleisesti Suomen sähköjärjestelmän ja tarkemmin tuotantomuotojen sekä käytön muutoksia viimeisimpinä vuosina huomataan hyvin mihin suuntaan tuotantoa ollaan viemässä. Vuonna 2023 sähkön kokonaiskulutus oli Suomessa 79,8 TWh, josta tuotettiin 92 % fossiilittomalla sähköntuotannolla. Tästä osuudesta ydinvoimalla tuotettiin 41 %, tuulivoimalla 18 % ja vesivoimalla 19 %. Verrattuna vuoteen 2022 nousua on ollut ydinvoimalla 35 %, tuulivoimalla 25 % ja vesivoimalla 13 % sekä aurinkovoimalla jopa 65 %. (Kotimaisella sähkön... 2024.) Luvuista huomataan selvästi uusiutuvien energiantuotantomuotojen vahva lisääntyminen vuosittain. Tätä muutosta ajaa takaa vihreä siirtymä, jonka tavoitteena on edesauttaa Suomen siirtymistä kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. (Vihreä siirtymä – elpymis- ja palautumissuunnitelma n.d.)

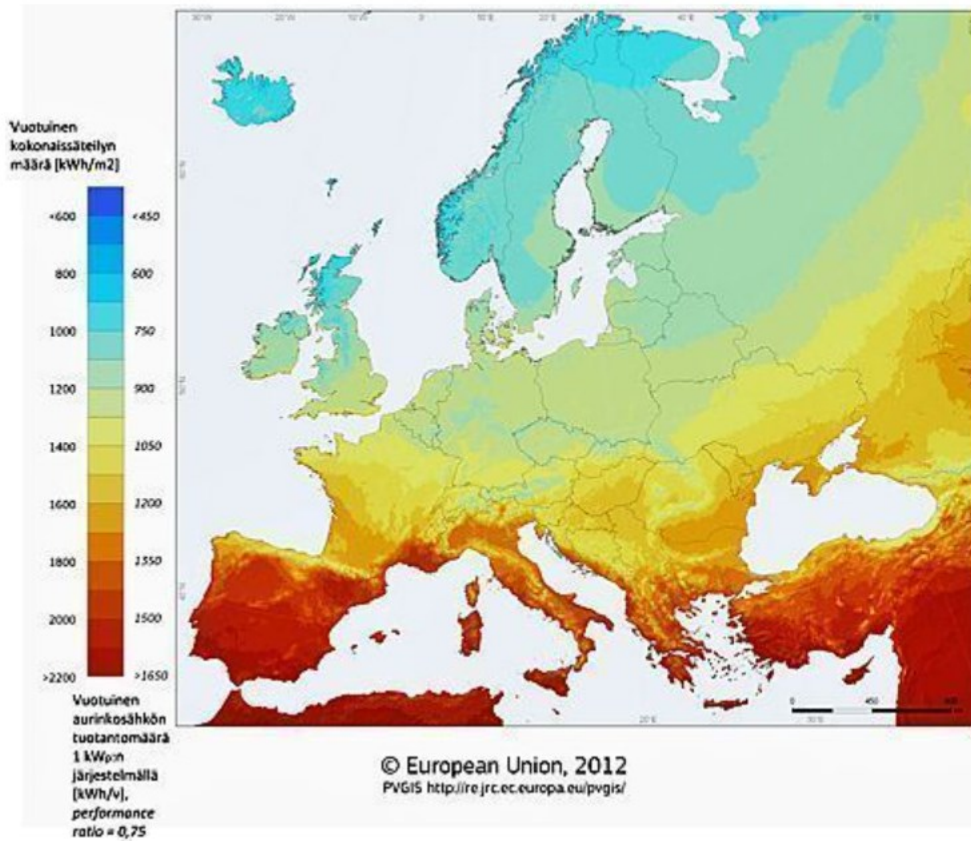


Kuvio 6. Suomen sähkön kokonaistuotanto lähteittäin (Sähköntuotanto n.d.).

Suomessa aurinkosäteilyn määrästä yli puolet on hajasäteilyä, jossa säteily heijastuu esimerkiksi ilmakehästä ja pilvistä sekä maasta, kun taas suora säteily kohdistuu suoraan auringosta. Tämä vaikuttaa lähinnä aurinkovoimaloiden rakenteeseen ja sijoittamiseen. Esimerkiksi kallistuskulman ja sijoittelun avulla voidaan hyödyntää paremmin hajasäteilyn määrää esimerkiksi lumesta ja vedestä, joka puolestaan nostaa kokonaissäteilyn määrää muutamalla prosentilla vuodessa ja näin ollen tasaa säteilystä johtuvia eroja maihin, joissa kokonaissäteilyn määrä on suurempaa. (Aurinkosäteilyn määrä Suomessa 2024.)

Suomessa aurinkosäteilyn määrä on Helsingin korkeudella noin 980 kWh/m<sup>2</sup> vaakasuoralla pinnalla. Tämä vastaa säteilymäärältään Pohjois-Saksan säteilymääriä, mutta Suomen korkeudella tuotannon vaihtelu on kuitenkin suurempaa. Sodankylän korkeudella vastaava lukema on puolestaan 790 kWh/m<sup>2</sup>. (Aurinkosäteilyn määrä Suomessa 2024). Suomessa marraskuun ja helmikuun välillä aurinkovoiman tuotanto on lähes olematonta, toisaalta valoisat ja pitkät kesäpäivät mahdollistavat pidemmän päivänvälisen hyödyntämisen. Suomen aurinkosäteilyn vuosittainen määrä on keskiarvoltaan noin 900 kWh/m<sup>2</sup>, kun taas päiväntasaajan kohdalla lukema on noin 2500 kWh/m<sup>2</sup>.

Säteilyn määrässä on siis selviä eroja verrattuna Suomeen, mutta Suomen kylmempi ilmasto itseasiassa parantaa aurinkopaneelien hyötysuhdetta ja näin ollen tasaa kokonaissäteilystä aiheutuvaa erotusta. (Nevalainen 2022, 16.)



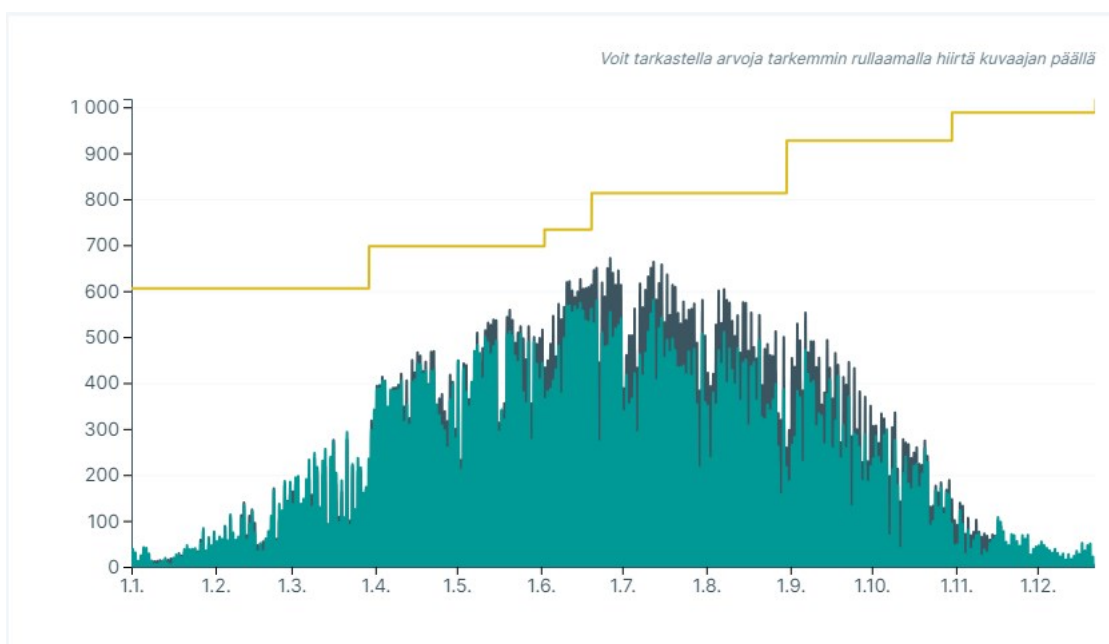
Kuvio 7. Aurinkosäteilyn määrä Euroopassa (Aurinkosäteilyn määrä Suomessa 2024).

#### 4.1 Aurinkovoiman heikkoudet ja vahvuudet

Aurinkovoiman suurin vahvuus piilee sen rajattomassa määrässä energiaa. Auringon säteily maapallolle tuottaa 14,5 sekunnissa saman määrän energiaa, mitä koko maapallolla käytetään yhdessä vuorokaudessa. Aurinkovoima on siis hyvin alihyödynnetty resurssi Suomessa sekä ympäri maailmaa. (Nevalainen 2022, 17.) Aurinkovoiman vahvuuksiin kuuluu myös sen huoltovapaus, aurinkovoimajärjestelmän elinikä kohoaa nykyään jopa 20–30 vuoteen ja sen huollot liittyvät lähes ainoastaan puhtaanapitoon sekä invertterien vaihtoon kerran aurinkovoimalan eliniän aikana. (Huolto ja kunnossapito n.d.)

Aurinkovoiman myös yksi suurimmista vahvuuksista on sen tuotannon päästöttömyys. Aurinkovoimalla sähkön tuottaminen ei tuota suoraan päästöjä ollenkaan, vaan päästöt ovat välillisiä, jotka johtuvat muun muassa aurinkovoiman materiaalien tuotannosta. Verrattaessa aurinkovoimaa muihin fossiilittomiin energialähteisiin ainoastaan tuulivoima sekä ydinvoima ovat kasvihuonekaasujen osalta parempia vaihtoehtoja. Aurinkovoiman osalta Euroopan olosuhteissa kasvihuonepäästöt ovat noin 37 g CO<sub>2</sub> ekv. /kWh, kun taas tuulivoimalla sama lukema on 12 g CO<sub>2</sub> ekv. /kWh ja ydinvoimalla 5,6 g CO<sub>2</sub> ekv. /kWh. (Carbon Neutrality in the UNECE... 2021, 24–43.)

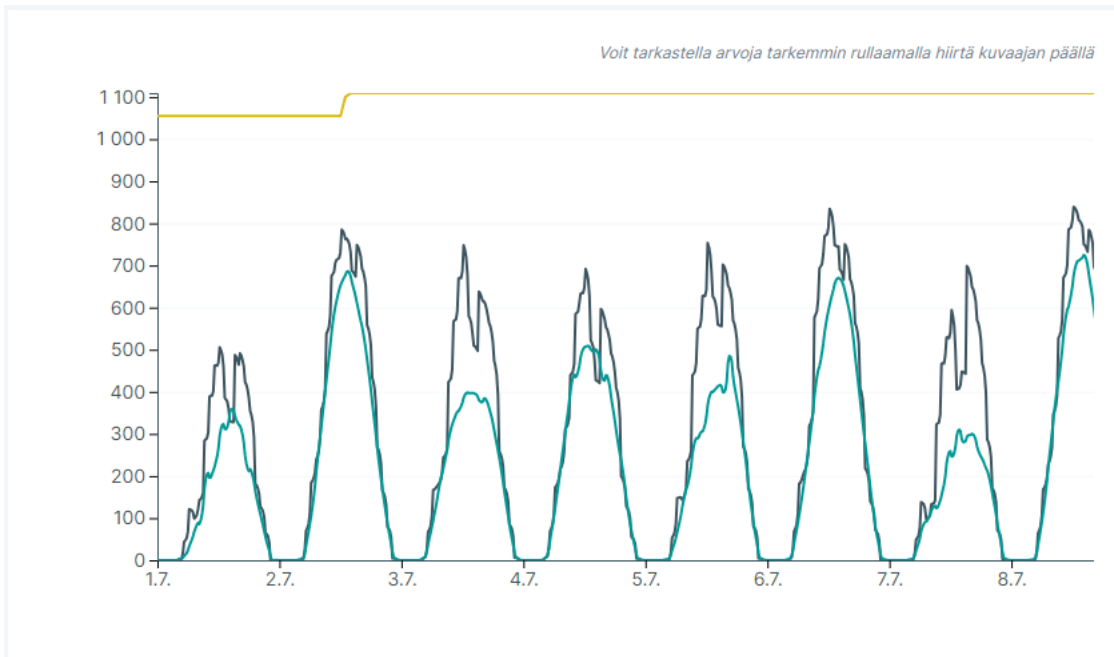
Aurinkovoiman suurimmista heikkouksista on sen epätasainen tuotanto. Suomen korkeudella aurinkovoiman tuotanto kohdistuu keväästä alkusyksyyn ja marraskuusta helmikuuhun tuotanto on hyvin pientä, ellei olematonta. Aurinkovoiman tuotantoprofiilin havainnollistaa hyvin kuviossa 8, jossa on vuoden 2023 toteutuneet tuotannot. (Aurinkovoima n.d.)



Kuvio 8. Aurinkovoiman tuotanto vuonna 2023 (Aurinkovoima n.d.).

Viikoittainen tuotantoprofiili on hyvin päiväpainotteista. Kuviossa 9 on hyvä esimerkki tuotantoprofiilista 1.-7.7.2024. Yksi suuri heikkous on myös tarvittavan pinta-alan suuruus teollisen kokoluokan aurinkopuistoille. Tämä ei kuitenkaan Suomessa ole suurin ongelma harvaan asuttuna maana, mutta muualla tiheimmin asutulla alueella tämä voi olla ongelma. Aurinkovoiman vuotui-

nen kapasiteettikerroin on Suomessa noin 10–15 %. Kapasiteettikerroin tarkoittaa lukua, joka kertoo, kuinka paljon tuotantomuoto tuottaa energiaa vuodessa maksimitehoonsa nähden. Aurinkovoimalla kapasiteettikerroin Suomen korkeudella on melko pieni ja esimerkiksi tuulivoimalla sama luku on noin 30 %. (Nevalainen 2022, 21.)



Kuvio 9. Aurinkovoiman päiväprofiili (Aurinkovoima n.d.).

## 4.2 Aurinkovoiman tulevaisuus

Aurinkovoima on yksi nopeimmin kasvavista tuotantomuodoista tällä hetkellä, kuten kappaleessa 4 mainittiin. Aurinkovoimaa suunnitellaan tällä hetkellä suuria määriä. Aurinkovoimakapasiteetti voikin kasvaa 190 kertaisesti seuraavan kuuden vuoden aikana, jos kaikki tällä hetkellä suunnitella olevat aurinkovoimalat toteutuvat. Tämä vastaisi noin 6 % koko Suomen sähköntuotannosta. (Suurten aurinkovoimaloiden... 2023.) Aurinkovoiman suosion selittää viime vuosina puhuttanut energiakriisi sekä vallitseva energiamurros. Toinen aurinkovoiman yleistymistä ajava seikka on vihreä siirtymä sekä aurinkopaneelien hintojen romahdus. Aurinkovoiman teollisen mittaluokan voimalat tulevat etenkin lisääntymään lähivuosina ja niiden tuotantokapasiteetit myös. Tälläkin hetkellä suurimpien suunnitteilla olevien aurinkovoimaloiden tuotantokapasiteetit ovat jopa 500 MW, ilmenee Motivan ja Energiaviraston ylläpitämässä aurinkosähkövoimalat karttapalvelussa (Aurinkosähkövoimalat n.d.).

Reservimarkkinoiden näkökulmasta aurinkovoiman lisääntyminen vaikuttaa myös merkittävästi reservimarkkinoiden toimintaan sekä reservituotteiden yleiseen kehitykseen. Nykyisten käytössä olevien reservien poistuessa markkinoilta ja sääriippuvaisen tuotannon lisääminen markkinoille kasvattaa entisestään reservien tarvetta sekä merkitystä markkinoille. Fingridin (2024, 10–11) ennusteen mukaan reservikapasiteetin tarve tulee kasvamaan 134 % seuraavan viiden vuoden aikana. Tämän takia onkin hyvin ajankohtaista tarkastella aurinkovoiman liittämistä osaksi reservimarkkinoita, tuoden uusia liiketoimintamahdollisuuksia sekä kassavirtoja toimijoille.

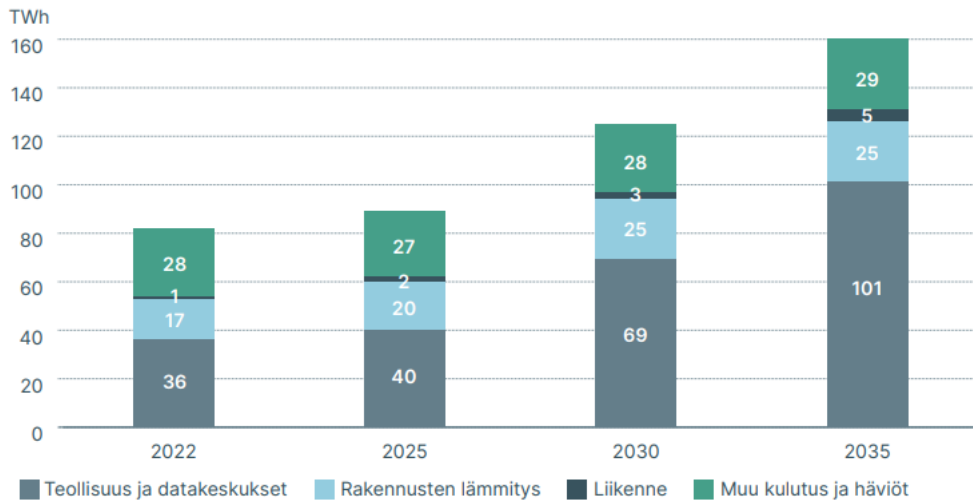
Yksi aurinkovoiman tulevaisuuden haasteista on Jouttijärven (2023) mukaan kannibalisaatio-ilmiö sekä sähköverkon säätökyky. Kannibalisaatio-ilmiöllä tarkoitetaan ilmiötä, jossa suurempi tuotanto alentaa markkinahintoja tietyillä tunneilla jopa negatiivisiksi hinnoiksi ja näin ollen vähentää aurinkovoimaloiden tuottoa ja kannattavuutta. Sama ilmiö näkyy vahvasti tuulivoiman tuotannossa, joka nykyään voi heilauttaa vuorokausimarkkinoiden hintoja merkittävästi. Tämä näkyy tuulisina päivinä negatiivisina hintoina ja tuulettomina päivinä korkeina hintoina. Aurinkovoiman lisääntyminen aiheuttaa tuulivoiman rinnalle sääriippuvaisena tuotantona sähköjärjestelmämme suuria tuotannon vaihteluita. Aurinkovoiman tuotannon ennustaminen on suhteellisen hyvällä tasolla, kun katsomme vuoden- tai vuorokaudenajasta johtuvaa tuotantoa ja sen vaihtelua. Päivän sisällä ja tuntikohtaisesti se ei aina olekaan niin helppoa. Tämä voi johtaa äkillisiin tuotannon vaihteluihin, joita paikataan reservituotteilla. (Jouttijärvi 2023.)

Tuoreimpien ennusteiden sekä tutkimuksien mukaan sähkön kulutus tulee kasvamaan vuoteen 2030 mennessä noin 35 terawattia. Tämä tarkoittaisi jopa noin 43 % kasvua seuraavan kuuden vuoden aikana sähkönkulutuksessa. Mentäessä vuoteen 2035 sähkönkulutus puolestaan kasvaisi toiset 30 terawattia verrattuna vuoteen 2030. Suurimmat tekijät sähkön kulutuksen kasvamiseen on muun muassa nykyisen teollisuuden sähköistyminen sekä sähköintensiivisen teollisuuden lisääntyminen ja liikenteen sähköistyminen (kuvio 10). Suurin yksittäinen tekijä sähkönkulutuksen lisääntymiseen on kuitenkin teollisuuden sähköistyminen sekä uusien sähköintensiivisen teollisuuden investoiminen Suomeen. Nämä uudet investoinnit liittyvät todennäköisesti muun muassa akkuteknologiaan, vetytalouteen sekä metalliteollisuuteen. Teollisuuden sähkönkulutuksen lisääntymiseen liittyy, kuitenkin epävarmuutta edellä mainittujen uusien investointien osalta. Tähän liittyy hyvin vahvasti Suomen kilpailukyky sekä vetovoima muun muassa puhtaan ja halvan sähkön tuotannossa. (Sähkön tuotannon ja kulutuksen... 2024, 5–10.)

### Sähkön kulutuksen kehitys (TWh)

Fingridin ennuste, syyskuu 2024.

FINGRID

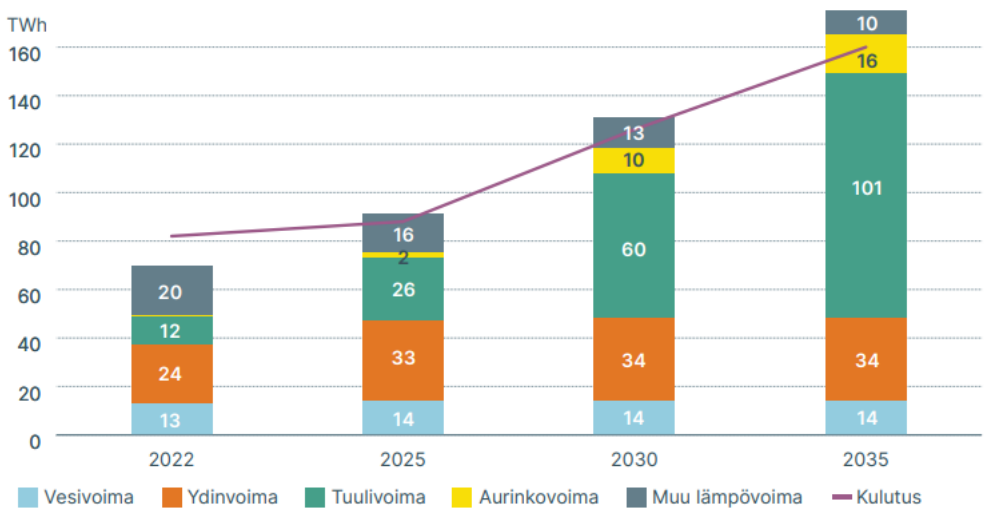


Kuvio 10. Sähkönkulutuksen ennuste (Sähkön tuotannon ja kulutuksen... 2024, 6).

Sähkön kulutuksen lisääntyminen ajaa myös vahvasti aurinkovoiman investointihalukkuutta Suomeen. Aurinkovoiman osuuden nousuun vaikuttaa myös vahvasti maaliskuussa 2024 hyväksytty Euroopan Unionin direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta. Päivitetyssä direktiivissä edellytetään aurinkovoiman lisäämistä kaikille uusille julkisille ja kaupallisille rakennuksille vuoteen 2026 mennessä sekä rakennuksille, jotka korjataan perusteellisesti vuoteen 2027 mennessä. Direktiivi edellyttää myös asennuksia kaikille uusille rakennuksille vuoteen 2029 mennessä. (EU/2024/1275.)

## Sähkön tuotannon ennustettu kehitys (TWh)

Fingridin ennuste, syyskuu 2024.



Kuvio 11. Sähkötötuotannon ennuste (Sähkön tuotannon ja kulutuksen... 2024, 8).

## 5 Aurinkovoima osana reservimarkkinoita

Sähkijärjestelmän on oltava tasapainossa. Aikaisemmin reservimarkkinoiden toimittajat ovat olleet pääasiassa kohteita, joiden aktiivitehoa voidaan hallita helposti. Näitä tuotantomuotoja ovat muun muassa vesivoima sekä voimalaitokset. (Reservimarkkinat n.d.) Nykyisen vihreän siirtymän johdattamana sähkömarkkinoiden mukana myös reservimarkkinoiden on kehityttävä. Säätökykyinen tuotanto lisääntyy tuuli- ja aurinkovoiman mukana sekä yhteiskunta sähköistyy entistä enemmän. Tämä tuo uusia haasteita sähköverkon vakaudelle, mutta se tuo myös uusia liiketoimintamahdollisuuksia toimijoille. Puhuttaessa aurinkovoiman liittymisestä reservimarkkinoille on huomioitava monia seikkoja, kuten teknillisiä vaatimuksia sekä taloudellisia näkökulmia.

Aurinkovoiman liittyminen reservimarkkinoille on hyvin uusi ilmiö. Reservimarkkinoille sopivaa tuotantoa eli teollisen kokoluokan tuotantoa on vielä verrattain vähän Suomessa sekä muualla pohjoismaissa, mutta, kuten edellisissä kappaleissa on mainittu, aurinkovoiman tuotantokapasiteetti tulee kasvamaan merkittävästi tulevina vuosina. Reservituotteita on monia ja niillä on eri käyttötarkoitukset ja näin ollen erilaiset teknilliset vaatimukset sekä käyttöaste. Osa reserveista on automaattisia ja osa manuaalisia, osa on symmetrisiä ja osa taas epäsymmetrisiä.

Aurinkovoimaa on tällä hetkellä reservimarkkinoilla hyvin vähän. Aurinkovoimaa on kuitenkin tällä hetkellä Ruotsissa sekä Tanskassa FCR-markkinoilla, kuten alla olevasta taulukosta huomataan. Tämä kuitenkin kuvaa vuoden 2023 tilannetta ja esimerkiksi Suomessa osallistutaan jo pienellä määrällä säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoille (mFRR) aurinkovoiman avulla. (Wind and Solar... 2023, 9.)

Taulukko 1. Aurinkovoiman määrä reservimarkkinoilla vuonna 2023 (Wind and Solar... 2023, 8).

	Svenska kraftnät	Fingrid	Statnett	Energinet
<b>Wind</b>				
FFR	0	0	0	9
FCR-D up	170	0	0	150
FCR-D down	320	0	0	150
FCR-N	150	0	0	120
aFRR up	0	0	0	224
aFRR down	250	0	0	224
mFRR energy up	10	290	100	410
mFRR energy down	1440	860	1200	2850
mFRR capacity up	-	0	0	150
mFRR capacity down	-	340	0	-
<b>Solar</b>				
FCR-D down	10	0	0	15
FCR-D up	0	0	0	5

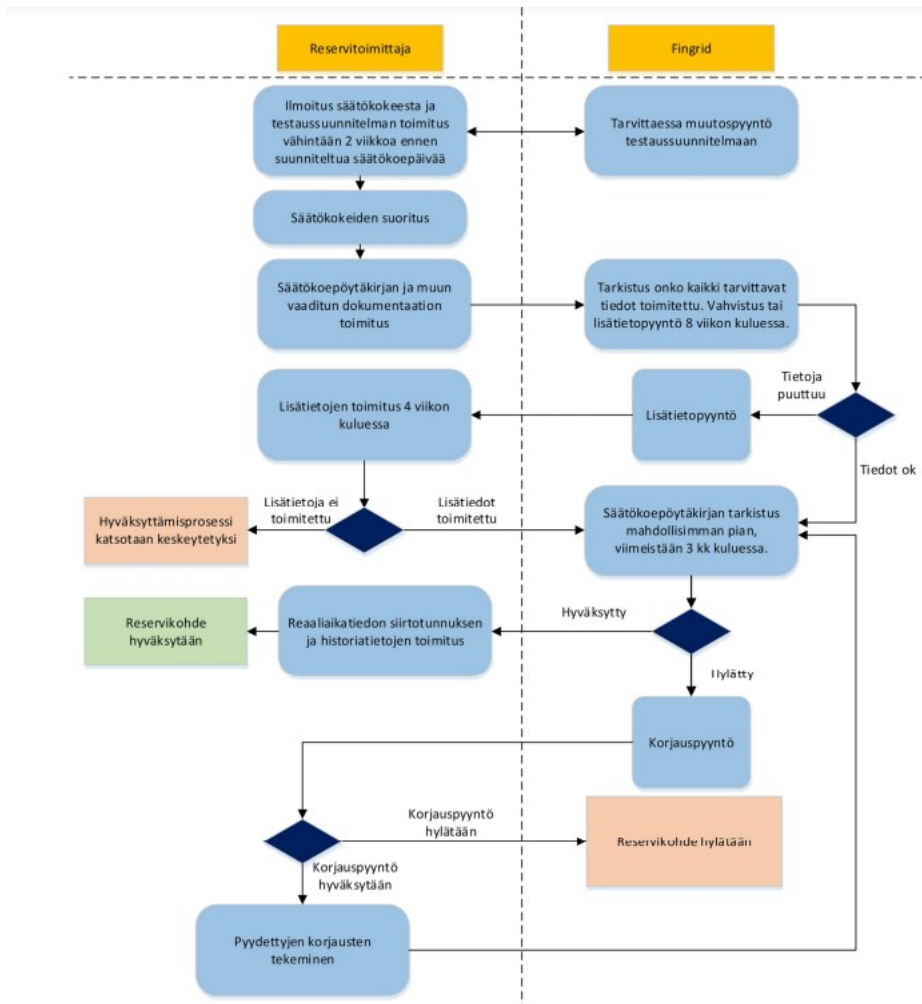
## 5.1 Tekniset vaatimukset ja aurinkovoiman soveltuvuus

Yleisesti riippumatta reservin tuotantomuodosta on reservikohteen täytettävä teknilliset vaatimukset sekä muut markkinapaikan edellytykset voidakseen osallistua reservimarkkinoille. Nämä edellytykset ja vaatimukset vaihtelevat hieman reservituotteiden välillä. Näihin liittyy muun muassa säätökoheet, jossa todetaan, että reservi kykenee haluttuun säätöön. (Reservimarkkinat n.d.)

Lähtökohtaisesti aurinkovoiman tarjoaminen alassäätöisiin reservituotteisiin olisi ensimmäinen askel sekä teknillisesti että taloudellisesti. Usein lähtökohtana on aurinkovoiman sekä esimerkiksi tuulivoiman tuotannon täysimääräinen myynti vuorokausimarkkinoille olosuhteiden salliessa. Spot-markkinoille täydellä kapasiteetilla osallistuminen poistaa vaihtoehdon ylössäätöön osallistumiselle. Kuitenkin lisääntyneet negatiiviset hinnat vuorokausimarkkinoilla voivat johtaa muun muassa aurinkovoiman tuotantorajoituksiin ja näin ollen avaa mahdollisuuden osallistua myös ylössäätöön tulevaisuudessa.

Hyväksymisprosessi eri reservituotteille on hyvin samankaltainen. Tämä prosessi on esitetty kuviossa 12. Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoille osallistuminen on puolestaan yksinkertaisempi verrattuna muihin reserveihin. mFRR-markkinalle osallistuvan toimittajan ei tarvitse tehdä säätökoetta vaan lähettää Fingridille tarvittava dokumentaatio. (Ehdot ja edellytykset manuaalisen taajuuden palautusreservin (mFRR) toimittajalle 2024, 7–10.) Reservimarkkinoille osallistuminen vaatii myös tietynlaista todennettua viestiliikennettä sekä tiedonvaihtoa Fingridin sekä reservitoimittajan välillä. VAKSI-järjestelmä on yksi olennainen osa tätä tiedonsiirtoa, jonne reservitoimittajat jättävät omat tarjouksensa pois lukien mFRR ja aFRR kapasiteettitarjoukset, joiden markkinapaikka on Fifty NMMS. Näihin myös tallentuu kaikki hyväksytyt tarjoukset. Reaaliaikainen tiedonsiirto toteutetaan esimerkiksi automaattisten reservien kohdalla muun muassa FEN/KoVa FEN-verkossa (ICCP- tai ELCOM-protokolla) ja webtiedonsiirto (IEC 60870-5-104-protokolla). (Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto n.d.)

Eri reservituotteet eroavat toisistaan käyttötarkoituksensa lisäksi myös teknillisten vaatimusten kautta. Näitä eroja teknillisissä vaatimuksissa on muun muassa aktivointinopeus eli kuinka nopeasti reservin on aktivoiduttava pyynnöstä tai taajuusmittauksen perusteella sekä vaatimukset tiedonsiirron osalta.



Kuvio 12. Reservimarkkinoiden hyväksymisprosessi (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämisen prosessi 2023, 3).

### 5.1.1 Nopea taajuusreservi FFR

Nopea taajuusreservi (FFR) kuuluu automaattisiin reserveihin. Jotta kohde voi toimia nopean taajuusreservin reservikohteena, sen on läpäistävä hyväksymisprosessi sekä täytettävä teknilliset vaatimukset. Reservoimittajan on myös tehtävä FFR-markkinasopimus Fingridin kanssa. Hyväksymisprosessiin ja markkinasopimukseen tarvittavaan dokumentaatioon on sisällytettävä tuottajan osalta:

- Maksimiteho MW
  - Nimellinen näennäisteho MVA
  - Tekninen kuvaus reservikohteen toiminnasta
  - Hitausvakio H (MWs/MVA)
- (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen... 2023, 4.)

Nopean taajuusreservin aktivoiminen tapahtuu itsenäisesti reservikohteessa olevan säätimen avulla, mikä ohjaa reservikohteen tehoa taajuusmittauksen perusteella. Taajuusmittauksen tarkkuus pitää olla vähintään 10 mHz sekä mittausvälin 0,1 sekuntia. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen... 2023, 7.) FFR-reserviä aktivoidaan kolmella aktivointiajalla (taulukko 2), joista reservitoimittajan on valittava yksi. Nopealla taajuusreservillä on myös vaatimukset aktivoinnin vähimmäiskestolle sekä valmiuteen uudelle aktivoimiselle. Aktivoidun reservin vähimmäiskesto on riippuvainen sekä taajuuden muutoksesta että reservikohteen deaktivoinnin nopeudesta (taulukko 3). Tämä tarkoittaa, että 30 sekunnin aktivoinnissa deaktivointi voi tapahtua välittömästi ilman rajoituksia ja teho voi pudota suoraan nolnaan. Puolestaan viiden sekunnin aktivoinnissa deaktivoinnin nopeus saa olla enintään 20 % reservikapasiteetin määrästä sekunnissa. Vaatimukseen kuuluu myös se, että reservikohteen teho ei saa laskea, kun kohde on aktivoitu eikä sen teho saa ylittää omaa markkinalle tarjottua kapasiteettia yli 20 %. (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen... 2023, 5–6.)

Taulukko 2. Nopean taajuusreservin aktivointitaajuus ja -nopeus (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen... 2023, 5).

Aktivointitaajuus (Hz)	Aktivointiaika (s)
≤ 49,70	≤ 1,30
≤ 49,60	≤ 1,00
≤ 49,50	≤ 0,70

Taulukko 3. Nopean taajuusreservin aktivoinnin vähimmäiskesto (Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen... 2023, 5).

Aktivoinnin vähimmäiskesto (s)	Deaktivoinnin maksiminopeus
30 s	ei rajoitettu
5 s	enintään 20 % reservikapasiteetista sekunnissa

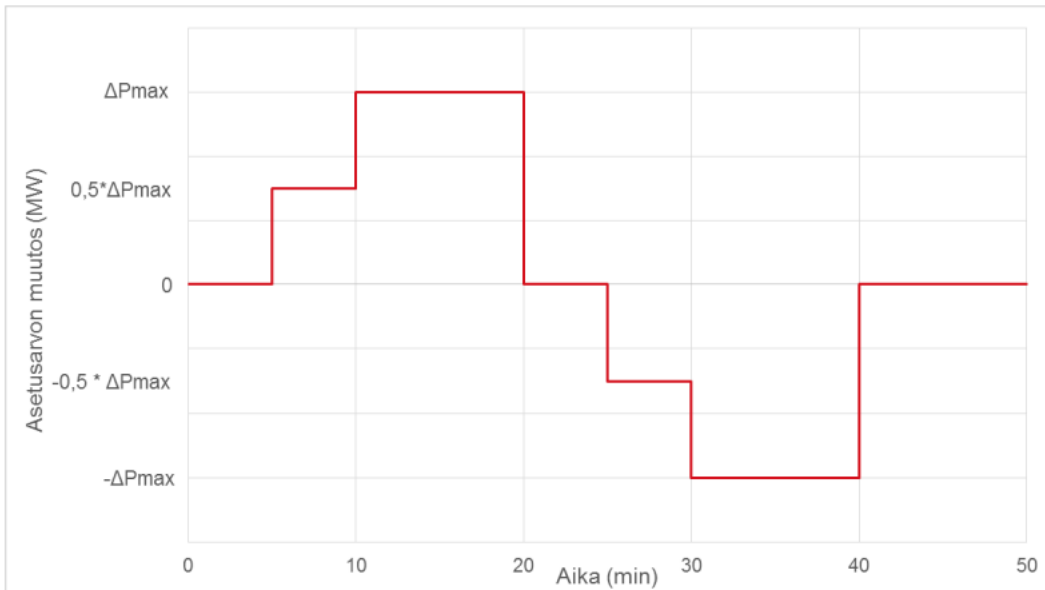
Nopea taajuusreservi FFR on hyvin uusi reservituote ja se on otettu käyttöön toukokuussa 2020 (Nopea taajuusreservi (FFR) n.d.). Kuten kappaleessa 3. mainittiin, FFR-reserviä hankitaan pienten inertian tilanteita varten. Inertia viittaa sähköjärjestelmän pyörievien massojen liike-energiaan, joka vastustaa taajuuden muutoksia. Inertia tulee lähtökohtaisesti nykyään pyörivistä koneista, kuten ydin- ja vesivoimaloista. Nopeaa taajuusreserviä hankitaan pääasiassa akuista sekä kulutuksesta. FFR-reservi on harmonisoitu tuote pohjoismaiden sisällä, tämä tarkoittaa sitä, että tuottaja voi tarjota reserviään, jotka sijaitsevat useilla eri tarjousalueilla. (Wind and Solar... 2023, 27.)

Aurinkovoiman osallistuminen FFR-markkinoille ei ole lähtökohtaisesti houkuttelevin tuote teknillisten vaatimusten eikä taloudellisten aspektien puolesta. Tämä johtuu siitä, että nopea taajuusreservi on ylössäätötuote, jolloin se vaatii aurinkovoiman tuotannon rajoittamista ennakkoon. Myös FFR-reservin hankintamäärät ovat vielä hyvin alhaisia. Toisaalta nopean taajuusreservin hankintamäärät voivat kasvaa tulevaisuudessa sääriippuvaisen tuotannon lisääntyessä ja näin ollen sen houkuttelevuus kasvaisi myös aurinkovoiman tuottajien silmissä.

### **5.1.2 Automaattinen taajuuden palautusreservi aFRR**

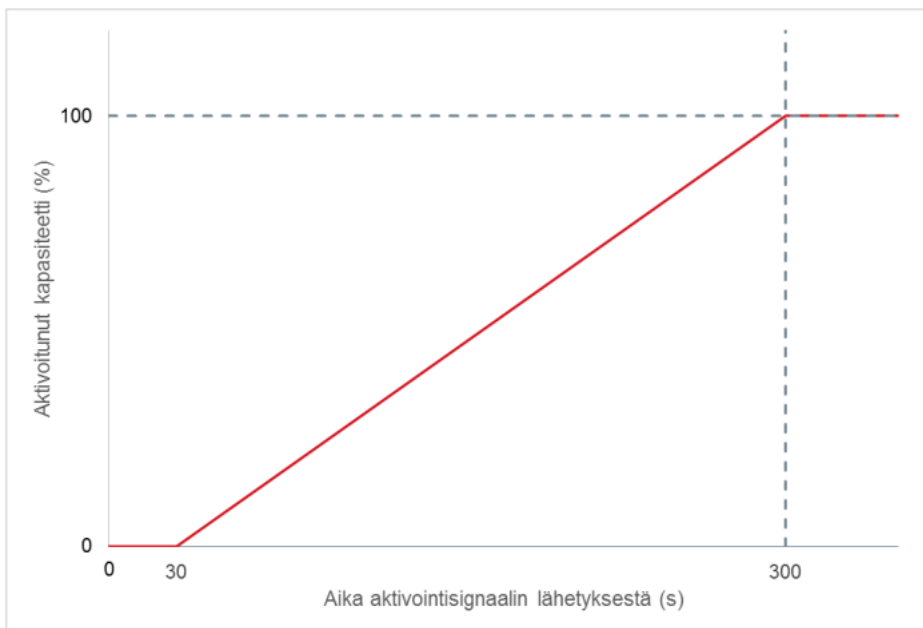
Automaattinen taajuuden palautusreservi aFRR on luonteeltaan epäsymmetrinen reservi, mikä tarkoittaa, että aFRR-reservi koostuu erikseen ylössäädöstä ja alassäädöstä. aFRR markkina on muutoksessa liittyttyään osaksi Eurooppalaista PICASSO markkinaa. Tämä tuo uusille reservintoi-  
mittajille uusia vaatimuksia, kuten signaalitesti, jonka hyväksyy TSO (Transmission System Operator) eli kunkin maan kantaverkkoyhtiö. (Wind and Solar... 2023, 13–15.) Signaalitestissä ohjaussignaali perustuu synkronialueen taajuuteen. Suomessa Fingrid lähettää aktivointisignaalia toimijoille 10 sekunnin välein, johon reservin on kyettävä reagoimaan tarvittaessa oikean aikamääreen sisällä. (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten... 2022, 4.)

Säätökokeen suorittaminen on yksi vaatimuksista päästäkseen aFRR-markkinalle. Säätökokeessa reservikohteen säätöominaisuudet todennetaan Fingridin toimesta. Säätökokeessa testataan reservikohteen suurin sekä pienin tehonmuutos, jonka kohde pystyy suorittamaan. Säätökokeessa Fingrid lähettää toimijalle testisekvenssin, joka näkyy kuviossa 13. (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten... 2022, 7.)



Kuvio 13. Automaattisen taajuuden palautusreservin säätökoe (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten... 2022, 7).

Osallistuessaan aFRR-reserviin reservitoimittajan on kyettävä aktivoimaan pyydetty määrä reserviä kokonaisuudessaan 5 minuutin kuluttua aktivointisignaalin tulosta. Reservikohteen on myös aloitettava reservin aktivoiminen 30 sekunnissa aktivointisignaalin saapumisesta (kuvio 14). Aktivoitun reservin tulee vastata 90–110 % pyydetystä tehonmuutoksesta eli myymästään kapasiteetista. (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten... 2022, 2–4.)



Kuvio 14. aFRR-reservin aktivointinopeus (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten... 2022, 6).

Aurinkovoiman osalta aFRR-markkina on teknillisten ominaisuuksien puolesta toteutettavissa. Osallistuminen vaatii reaaliaikaisen viestintäjärjestelmän, joko ELCOM tai ICCP tiedonvaihtojärjestelmän, jonka mukaan reservi aktivoidaan tarvittaessa. Reaaliaikainen viestintä on pystyttävä vastaanottamaan keskeytyksettä. (Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten... 2022, 4.) Kuten aiemmin mainittu reservin tulee kyetä aktivoimaan pyydetty tehonmuutos maksimissaan 5 minuutin aikana ja tehonmuutos on aloitettava 30 sekunnin aikana tehonmuutossignaalin saapumisesta. Aikaisemmin aFRR-markkina toimi vain kapasiteettimarkkinana, mutta kesäkuussa 2024 liittyminen PICASSO-markkinalle toi myös aFRR-markkinalle oman energiamarkkinan, joka tuo uusia mahdollisuuksia myös aurinkovoimalle.

### 5.1.3 Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat mFRR

Yleisimpiä vaatimuksia reservimarkkinoille osallistumisessa on säätökokeen suorittaminen. Osallistuessaan mFRR-markkinalle säätökokeen suorittaminen ei kuitenkaan ole tarpeellista. Reservikohteen tulee sijaita Fingridin järjestelmävastuualueella. mFRR-reserviä on molempiin suuntiin eli sekä ylös- että alas-säätöön. Säädot aktivoidaan TSO:n päätöksellä tarvittaessa. Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoilla erityistä verrattuna muihin reservituotteisiin on erikoissäädot. Erikoissäädot ovat säätöjä, joita käytetään muuhun tarkoitukseen, kuin tasehallintaan. Erikoissäädössä

marginaalihinnoittelu ei päde vaan hinta määräytyy tarjouksen mukaan (Pay as Bid). (Ehdot ja edellytykset manuaalisen taajuuden palautusreservin (mFRR) toimittajalle 2024, 7–10.) Osallistuminen mFRR-markkinalle vaatii toimijalta säätösähkömarkkinasopimuksen Fingridin kanssa sekä taseselvityssopimuksen.

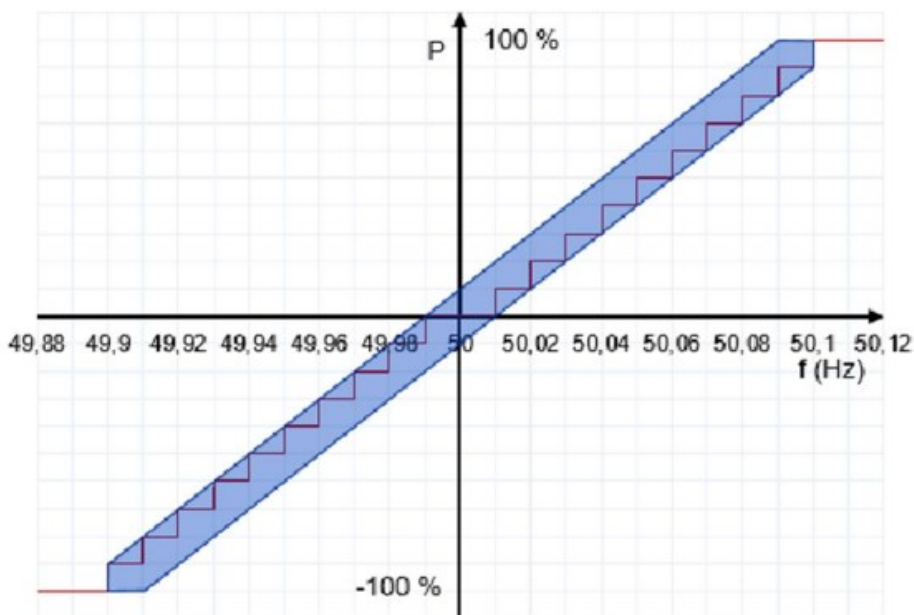
Aurinkovoiman osalta mFRR-markkina on hyvin houkutteleva niin taloudellisesti kuin teknillisen toteutuksen puolesta. Tehonmuutos on pystyttävä toteuttamaan 15 minuutin kuluessa TSO:n aktiivointipyyntöä. Jatkuva säätösähkömarkkina mahdollistaa toimijoille ajankohtaisten tuotantotoimien tekemisen sekä ennustevirheen minimoimisen. Säätösähkömarkkinoilla toimija voi jättää energiatarjouksia 45 minuuttia ennen toimitustuntia. Uusissa investoinneissa on hyödyllistä ottaa huomioon etäohjausmahdollisuus. Etäohjausominaisuuden avulla osallistuminen mFRR-markkinalle helpottuu entisestään ja antaa myös enemmän mahdollisuuksia toimia vuorokausimarkkinoilla tehokkaammin.

#### **5.1.4 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi FCR**

Taajuusohjattu käyttöreservi FCR-N on luonteeltaan symmetrinen reservituote, mikä tarkoittaa, että reservikohteen on kyettävä säätämään sekä ylöspäin että alaspäin. Taajuusohjatun käyttöreservin tarkoituksena on ylössäädön osalta pitää taajuus 49,9–49,99 Hz:n välillä ja alassäädön osalta 50,01–50,1 Hz:n välillä. Taajuusohjatulla käyttöreservillä reservikapasiteetin määrä on suoraan verrannollinen taajuuden poikkeaman suuruuteen. Tämä tarkoittaa sitä, että käyttöreservin on kyettävä säätämään tehoaan dynaamisesti taajuuden mukaan joko ylös tai alaspäin. Reservikohteen on kyettävä toteuttamaan säädöstä 63 % minuutin aikana ja 95 % kolmen minuutin aikana 0,10 Hz:n askelmaisessa taajuusmuutoksessa. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten... 2023, 6–11.)

Päästäkseen taajuusohjatulle käyttö- ja häiriöreserville on reservitoimittajan suoritettava Fingridin hyväksymisprosessi sekä tehtävä FCR-sopimus osallistumisesta FCR-tunti tai vuosimarkkinoille. Hyväksymisprosessin yksi olennaisimmista asioista on säätökoe, jossa määritellään reservin kykyä säätää tehoaan teknillisten vaatimusten mukaan. Vuodesta 2019 alkaen säätökoe on ollut voimassa 5 vuotta, jonka jälkeen se pitää uusia. (Salonen 2023, 25.)

Taajuusohjattu häiriöreservi FCR-D varmistaa taajuuden hallinnan häiriötilanteissa ja pitää sen 49,5–50,5 Hz:n taajuudessa. Toisin kuin FCR-N on symmetrinen tuote, FCR-D on jaettu erikseen ylös- ja alassäätötuotteiksi. Taajuusohjattu häiriöreservi eroaa myös FCR-N-reservistä paljon teknisten vaatimusten mukaan. Taajuusohjatussa häiriöreservissä reservikohteen aktivoitu kapasiteetti on verrannollinen taajuuspoikkeaman suuruuteen siten, että taajuuden ollessa 49,5 Hz aktivoituu reservikapasiteetti täysimääräisesti. Alassäädössä puolestaan reservin on aktivoituttava täysimääräisesti, kun taajuus ylittää 50,5 Hz. (Salonen 2023, 29.) Taajuusohjattu häiriöreservi on tyypiltään joko dynaaminen tai staattinen. Dynaaminen häiriöreservi pystyy säätämään kapasiteettiaan portaattomasti ja jatkuvasti taajuuden mukaan, kun puolestaan staattinen reservi ei tähän kykene. Staattisen FCR-D-reservin tulee aktivoitua portaittain ja keskittyä mahdollisimman lähelle todellista tavoitevastausta. (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten... 2023, 31–37.) Staattisesti säätävä FCR-D reservin säätökäyrän näyttää esimerkiksi tältä:



Kuvio 15. Staattinen FCR-D reservi (Taajuuden vakautusreservien (FCR) teknisten vaatimusten... 2023).

Taajuusohjattu käyttöreservi soveltuu teknisesti hyvin aurinkovoimalle, koska aktivoinnit perustuvat paikalliseen taajuusmittaukseen. FCR-N-reservin ollessa symmetrinen tuote eli aurinkovoiman on kyettävä sekä leikkaamaan tuotantoaan että nostamaan sitä taajuuden mukaan. Tämä vaatisi

ylössäädön osalta tehonrajoitusta etukäteen. Tämä ei ole houkuttelevin vaihtoehto aurinkovoimalle sekä muille sääriippuvaiselle tuotannolle, koska tässä menetettäisiin tuloja vuorokausimarkkinoilta. Taajuusohjattu häiriöreservi puolestaan on epäsymmetrinen tuote eli siinä on erikseen ylös- ja alassäätötuotteet. FCR-D-reservin aktivoiminen perustuu myös paikalliseen taajuusmitaukseen eli myös tämä on helposti toteutettavissa aurinkovoiman osalta. Taajuusohjatun häiriöreservin alassäätötuote on siis houkuttelevin vaihtoehto, koska tämä ei vaadi tuotannon rajoittamista etukäteen.

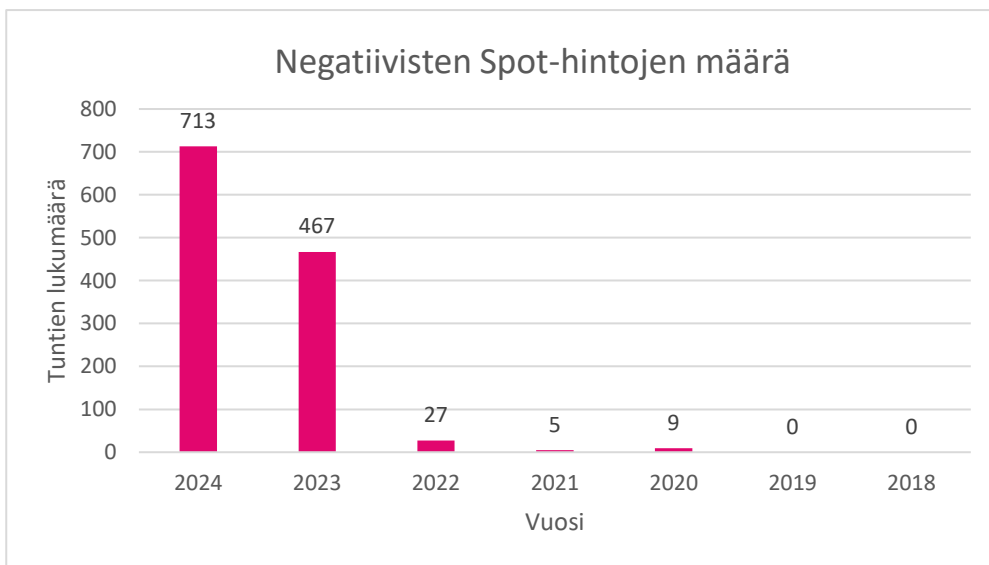
## 5.2 Markkinapotentiaali ja taloudellinen näkökulma

Aurinkovoiman liittäminen osaksi reservimarkkinoita lisää sekä sähköjärjestelmämme säätökykyä sekä tuo lisäansioita aurinkovoiman tuottajille. Päästäkseen reservitoimittajaksi on aurinkovoimalan täytettävä teknilliset vaatimukset sekä tehtävä markkinasopimus Fingridin kanssa. Teknilliset vaatimukset eroavat toisistaan eri reservituotteiden välillä, kuten edellisessä kappaleessa käytiin läpi. Teknillisten vaatimusten lisäksi myös taloudellisessa mielessä reservituotteissa on paljon eroja toisiinsa nähden. Reservimarkkinoilta saataviin tuottoihin vaikuttavat muun muassa eri reservien hankintamäärät eli kuinka monelle tunnille reserviä hankintaan vuodessa, vuosi- ja tuntimarkkinoiden hinnat ja kapasiteettimarkkinahinnat sekä mahdolliset sanktiot.

Yleisesti ottaen aurinkovoiman tarjoaminen ylösäättöisiin ja symmetrisiin reservituotteisiin, kuten nopeaan taajuusreserviin (FFR) sekä taajuusohjattuun käyttöreserviin (FCR-N) ei ole taloudellisesti kannattavinta. Lähtökohtaisesti aurinkovoimalan täyden kapasiteetin myyminen vuorokausimarkkinoille on kannattavinta ja näin ollen se vie pois mahdollisuuden osallistua ylösäättömarkkinoihin. Toisaalta viimeisimpinä vuosina negatiiviset spot-hinnat ovat yleistyneet merkittävästi (kts. kuvio 16), jolloin myös ylösäättömarkkinoille avautuu uusia mahdollisuuksia. (Fingrid avoin data n.d.) Tässä huomion arvoista on, että vuoden 2024 luvut ylettyvät joulukuun 13. päivään saakka. Negatiivisten tuntien lisääntyessä on järkevää ja olennaista miettiä kannattaako aurinkovoimalla osallistua vuorokausimarkkinoille ollenkaan. Tällöin vaihtoehtona on esimerkiksi, että tuotanto jätetään myymättä ja osallistutaan joko kapasiteettimarkkinoilla tai energian aktivointimarkkinoilla ylösäättöön, jolloin tuotot voivat kasvaa verrattuna vuorokausimarkkinoilta saataviin tuottoihin.

Reservimarkkinoille osallistuessa voi myös osallistua monille reserveille samaan aikaan. Tällä hetkellä itsenäinen aggregointi on mahdollista nopeassa taajuusreservissä ja taajuusohjatulla käyttö-

ja häiriöreservissä. Aggregoinnilla tarkoitetaan, sitä että reservitoimittaja voi yhdistää omia resurssejaan ns.- yhdeksi reservikokonaisuudeksi. Tämän avulla toimijan on helpompi osallistua eri reservimarkkinoille, koska tällöin yksittäisen resurssin ei tarvitse täyttää kaikkia teknillisiä vaatimuksia, kunhan kokonaisuus täyttää nämä. (Kuinka osallistua reservimarkkinoille n.d.) Lisäksi toimittaja voi myös osallistua esimerkiksi taajuusohjattuun häiriöreserviin sekä mFRR-reserviin samaan aikaan. Tilanteessa, jossa tuotannolla ylitetään minimituotanto sekä FCR-D volyyymien summa, voidaan myös tarjota säätösähkömarkkinoille allassäätöä samanaikaisesti. (Wind and Solar... 2023, 12.)



Kuvio 16. Negatiivisten Spot-hintojen määrä (Fingrid Avoin Data n.d.).

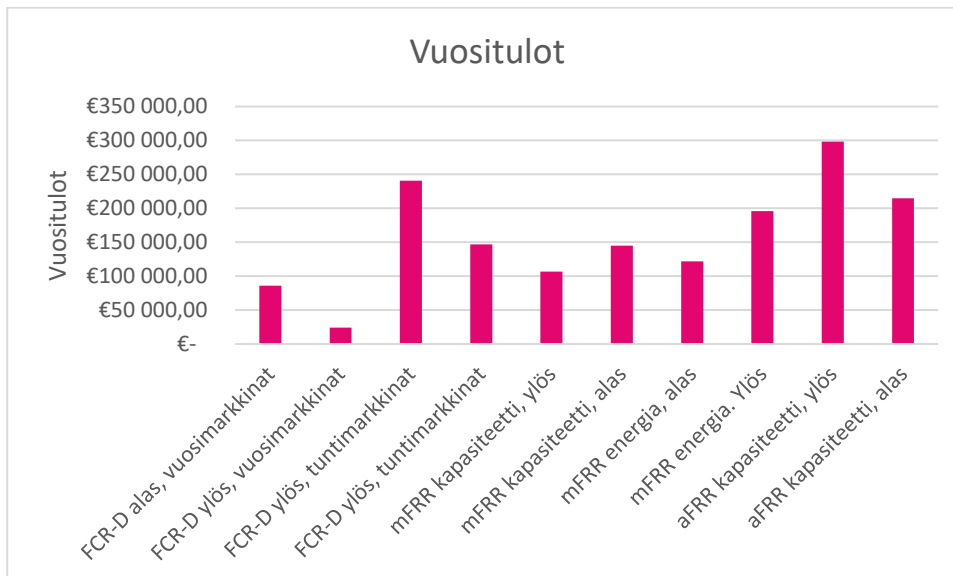
### 5.2.1 Reservimarkkinoiden korvaukset

Kuten aiemmin mainittiin, aurinkovoiman liittäminen osaksi säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoita (mFRR) ja taajuusohjattua häiriöreserviä (FCR-D) sekä automaattista taajuuden palautusreserviä (aFRR) ovat mielenkiintoisia vaihtoehtoja aurinkovoimalle, koska edellä mainitut reservit tarjoavat mahdollisuuden osallistua allassäätöön ja ylössäätöön erikseen ja näin ollen niiden markkinapotentiaalin tarkastelu on olennaista. Näistä reservituotteista maksetaan joko kapasiteetin ylläpitämisestä tai energian aktivoitumisesta.

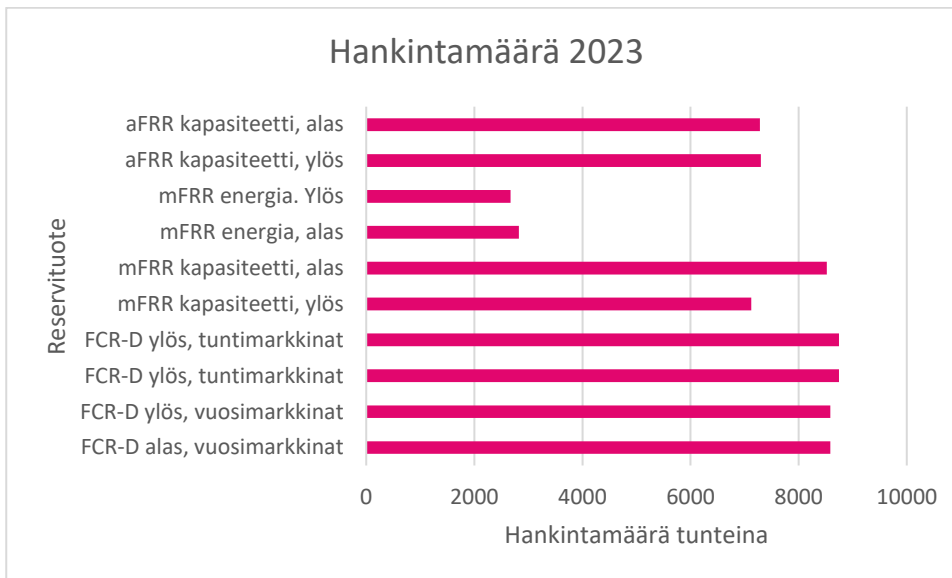
Reservimarkkinoiden mahdollisia vuosituloja voidaan arvioida hyvin yksinkertaisella laskentakavalla:

$$\text{Vuosituotto } \text{€} = \text{Hyväksytyt reservikapasiteetti MW, h} * \text{keskiarvo hinta } \text{€} * \text{hankintamäärä} \quad (1)$$

Reservituotteista maksettavien korvausten suuruuteen vaikuttavat reservien hankintamäärät, kapasiteettimarkkinoiden hinnat, vuosimarkkinoiden hintatasot sekä tuntimarkkinoiden hinnat ja mahdolliset sanktiot. Reservimarkkinoiden tulojen suuruuksia voidaan arvioida edellisten vuosien perusteella ja Fingridin avoimen datan avulla. Näiden tietojen mukaan vuonna 2023 saatavien tulojen suuruus nähdään kuviossa 17, jossa on FCR-D vuosi- ja tuntimarkkinoiden ja mFRR kapasiteetti- sekä energiakorvaukset sekä aFRR-kapasiteettikorvaukset, jos kullekin reserville osallistutaan yhden megawatin suuruisella resurssilla ja kaikki aktivoidut tunnit voidaan toteuttaa. Kuviossa 18 puolestaan on vuoden 2023 toteutuneet hankintamäärä jokaiselle reserville.



Kuvio 17. Reservimarkkinoiden vuosituloja (Fingrid Avoin Data n.d.).



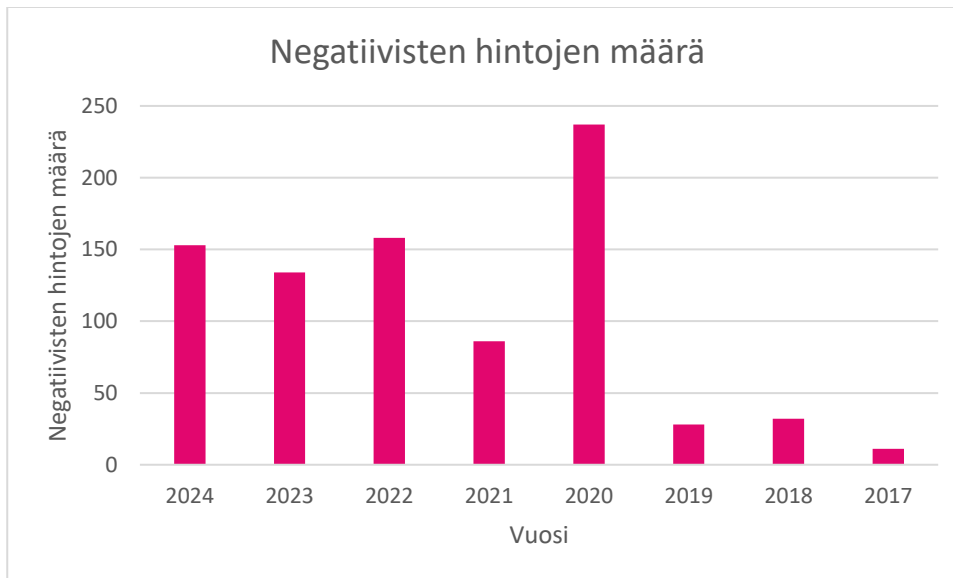
Kuvio 18. Reservituotteiden hankintamäärät (Fingrid Avoin Data n.d.).

### 5.2.2 Taloudellinen merkitys

Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat on teknillisesti hyvin toteutettavissa. Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoilla säädön aktivoitumisaika on yleensä 15 minuuttia. Tämä yleensä toteutetaan hyödyntämällä etäohjausmahdollisuutta, jonka avulla aktivointi voidaan toteuttaa helposti ympäri vuorokauden. Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoiden tulot koostuvat monista eri lähteistä ja niihin vaikuttavat moni eri asia. Saatavia tulon lähteitä mFRR-markkinalta ovat muun muassa kapasiteettikorvaukset osallistuessaan kapasiteettimarkkinoille sekä energianaktivointimarkkinoilta saatavat säätöön liittyvät korvaukset. Myös sanktioiden huomioiminen on olennaista.

Aikaisemmin säätösähkömarkkinoiden alassäätöihin osallistuminen ei ole ollut houkuttelevin vaihtoehto sen energiansäätöhintojen seurauksena. Harvemmin mFRR-alas suuntaiset energiansäätöhinnat ovat olleet negatiivisia, mikä on tehnyt osaltaan mFRR-aktivointimarkkinasta kannattamattomaa muun muassa tuuli- ja aurinkovoimalle. (Wind and Solar... 2023, 12.) Tähän on kuitenkin tullut muutosta viimeisten vuosien aikana, kuten kuvio 19. osoittaa, kun oletettuna rajahintana on ollut 0.0 €. Tässäkin huomion arvoista on, että vuoden 2024 luvut ovat vain marraskuun alkuun. Negatiivisten hintojen määrä on ollut kasvussa ja kasvaa edelleen sääriippuvaisen tuotannon lisääntyessä. mFRR-aktivointimarkkinat mahdollistavat myös uusien ja ajankohtaisten ennusteiden

hyödyntämisen, mikä edesauttaa tarjousten optimointia sekä ennustevirheiden minimoimista (Wind and Solar... 2023, 12).



Kuvio 19. Negatiivisten säätöhintojen määrä Suomessa (Fingrid Avoin Data n.d.).

Säätökapasiteettimarkkina on hyvin potentiaalinen markkinapaikka myös aurinkovoimalle. Suomessa mFRR-kapasiteettimarkkina avautui alassäätöä varten vuonna 2023 (Wind and Solar... 2023, 12). Säätökapasiteettimarkkinoilta saatavat tulot perustuvat ylläpidetyn reservikapasiteetin määrään sekä marginaalihinnan mukaiseen korvaukseen. Säätökapasiteettimarkkinat toimivat tunti-markkinoina, joka toteutetaan edellisenä päivänä tarjouskilpailulla, jossa määritellään hinnat seuraavalle päivälle. Säätökapasiteettimarkkinalta saatavat tulot voidaan laskea yksinkertaistellulla kaavalla, jossa ei ole huomioitu mahdollisia sanktioita:

$$\text{Kapasiteettikorvau} \text{ €} = \text{ylläpidetty reservikapasiteetti MWh} * \text{kapasiteettimarkkinoiden hinta €} \quad (2)$$

Sanktio mukaan otettuna:

$$\text{Kapasiteettikorvaus €} = \text{Kapasiteettikorvaus €} \times \text{pysyvyyskerroin} - \text{sanktiot €} \quad (3)$$

Sanktioiden suuruus riippuu muun muassa Suomen vuorokausimarkkinoiden hinnasta, toimittamattomasta reservikapasiteetin määrästä sekä reservituotteesta. Sanktioiden määrä lasketaan seuraavilla kaavoilla ja sovelletaan suurempaa hintaa. Sanktioita ei kuitenkaan tarvitse maksaa, jos reservikapasiteettia ei pysty ylläpitämään ylivoimaisen esteen (force majeure) takia, jolla tarkoitetaan esimerkiksi toimittajasta riippumatonta tapahtumaa, kuten laiterikkoa, joka estää reservien ylläpidon. (Ehdot ja edellytykset nopean taajuusreservin (FFR) toimittajalle 2022, 9–11.)

$$\text{Sanktio } \text{€} = \text{Toimittamaton reservikapasiteetti } \text{MW}, h * 3 * \text{reservin hinta } \text{€ MW}, h \quad (4)$$

$$\text{Sanktio } \text{€} = \text{toimittamaton reservikapasiteetti } \text{MW}, h * \text{Suomen tarjousalueen hinta } \text{€}/\text{MW}, h \quad (5)$$

, missä reservin hinnalla tarkoitetaan esimerkiksi aFRR tai mFRR-kapasiteettimarkkinan hintaa tai FCR-vuosimarkkinahintaa, riippuen missä reservimarkkinalla toimija on. Suomen tarjousalueen hinnalla tarkoitetaan sen tunnin spot-hintaa, jossa reservikapasiteettia ei ylläpidetty riittävää määrää.

Aurinkovoimalle ominaista on sen tuotannon sääriippuvuus, joka vaikuttaa olennaisesti myös reservimarkkinoilta saataviin tuloihin. Kuten kuvioista 8. huomataan, että aurinkovoiman tuotanto alkaa nousemaan huhtikuussa ja laskemaan alkusyksyllä syyskuun aikoina. Tämän seurauksena esimerkiksi mFRR-markkinoille osallistumisen ajankohdan miettiminen on tärkeää. Vuonna 2023 sääntökapasiteetin hinta oli keskiarvoltaan 17 €/MWh alassäätöön sekä ylössäätöön 15 €/MWh. Sääntösähkön hinnat ovat puolestaan olleet 43,08 €/MWh alas sekä 73,33 €/MWh ylös. (Fingrid avoin data n.d.)

Automaattinen taajuuden palautusreservi on myös mielenkiintoinen vaihtoehto aurinkovoimalle. aFRR-reservistä saatavat korvaukset tulevat kapasiteettimarkkinoilta tai energian aktivointimarkkinoilta. Alassäätökapasiteetistä maksettiin vuonna 2023 29,45 €/MWh ja aFRR-reserviä hankittiin 7285 tuntia kyseisenä vuonna. (Fingrid avoin data n.d.) Kapasiteettimarkkinoiden lisäksi aFRR-markkinalta maksetaan myös korvausta säädetyn energian perusteella taseselvityksen yhteydessä. Tästä energiasta saatava taloudellinen korvaus muodostuu sääntösähkömarkkinoiden mukaan. aFRR-energiamarkkinoiden ylössäätöhinta on vähintään Suomen spot-hinta ja se määräytyy aina

korkeimman aktivoitun tarjouksen perusteella, jolloin kaikki hyväksytyt tarjoukset saavat korvauksen korkeimman aktivoitun tarjouksen mukaan. Ennen PICASSO markkinalle liittymistä energiamarkkinassa energiaa aktivoitiin suhteessa tarjouskokoihin, jolloin pienemmällä tarjouksella aktivoiteja tulisi vähemmän ja näin ollen tuotot perustuisivat lähinnä kapasiteettikorvauksiin. Nykyään, kuitenkin aktivoinnit tehdään hintajärjestyksessä. aFRR-aktivointimarkkinan saapumisen jälkeen aFRR-energian hinnat ovat olleet todella korkeita.

Taajuusohjatulla häiriöreservillä voidaan osallistua vuosimarkkinoille ja tuntimarkkinoille. Vuosimarkkinat järjestetään kerran vuodessa yleensä syksyllä, jossa määritetään toimittajakohtainen sopimusmäärä ja vuosimarkkinoiden hinta tulevalle vuodelle. Vuosimarkkinoiden hinta määräytyy marginaalihinnittelun mukaan, jossa korkein hyväksytty tarjous määrää hinnan. Tuntimarkkinoilla Fingrid hankkii tarvitsemansa määrän FCR-D reserviä. Tuntimarkkinoiden korvauksen ovat yleensä olleet suurempia, kuin vuosimarkkinoilla, mutta määrät ovat olleet puolestaan pienempiä. Alasäädön hinta on ollut vuosimarkkinoilla vuonna 2023 9,99 €/MWh ja vuonna 2024 9,5 €/MWh. (Fingrid avoin data n.d.) FCR-D alassäätömarkkinoilla hinnat ovat olleet korkeat, mutta alassäätömarkkina on ollut käytössä vasta muutaman vuoden, jolloin hintatasot eivät välttämättä ole löytäneet tasoaan, kuten ei myöskään aFRR-aktivointimarkkinan hinnat.

## 6 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella aurinkovoiman nykyistä roolia sekä mahdollisuuksia Suomen reservimarkkinoilla. Energiajärjestelmämme on murroksessa, jonka seurauksena uusiutuvat tuotantomuodot ovat jyrkässä kasvussa. Yksi näistä kasvavista tuotantomuodoista on aurinkovoima, jonka oletetaan kasvavan suuria määriä lähestyttäessä 2030-lukua. Tämän lisäksi tuulivoiman osuus tulee kasvamaan ja näin ollen sääriippuvainen tuotanto onkin suuressa roolissa osana pohjoismaista sähköjärjestelmää. Tämä tuo uusia mahdollisuuksia sekä haasteita sähköjärjestelmälle, aurinkovoiman tuottajille sekä sähkömarkkinoille. Reservien tarve tulee kasvamaan ja sähköverkon säätökyky on koetuksella ilman uusia reservitoimittajia. Tämän takia onkin olennaista tarkastella aurinkovoiman mahdollisuuksia reservimarkkinoilla. Opinnäytetyön tavoitteisiin lukeutui alla oleviin tutkimuskysymyksiin vastaaminen.

- Onko aurinkovoimalla mahdollisuuksia osallistua Suomen reservimarkkinoille?
- Millainen on aurinkovoiman nykyinen rooli reserveissä?
- Millaisia teknillisiä vaatimuksia aurinkovoimalla on osallistuessaan reservimarkkinoille?
- Mitkä reservituotteet ovat vaihtoehtoja aurinkovoimalle?

Aurinkovoimalla voidaan osallistua Suomessa reservimarkkinoille. On hyvin tärkeää valita reservituote oikein, koska teknillisten vaatimusten erot ovat eri tuotteilla huomattavia ja näin ollen osallistumismahdollisuudet vaihtelevat. Teknillisten vaatimusten puolesta aurinkovoima sopii monelle reserville, kuten säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinalle mFRR ja automaattiselle taajuuden palautusreserville sekä taajuusohjatulle käyttö- ja häiriöreserville FCR. Näistä reserveistä, kuitenkin esimerkiksi taajuusohjattu käyttöreservi on symmetrinen tuote, jossa reservikohteen pitäisi pystyä säätämään taajuuden perusteella sekä ylös että alas eli aurinkovoiman osalta suurentamaan tuotantoaan ja pienentämään sitä. Kuitenkin yleensä lähtökohtana aurinkovoiman osalta on täyden tuotantokapasiteetin myyminen vuorokausimarkkinoille, joka poistaa mahdollisuuden osallistua ylössäätöön. Näin ollen aurinkovoiman tarjoaminen alassäätöisiin reserveihin, kuten mFRR ja aFRR sekä FCR-D-reserveihin on järkevintä. Tulevaisuudessa kuitenkin voi olla myös olennaista tarkastella ylössäädön mahdollisuuksia esimerkiksi negatiivisten spot-hintojen lisääntyessä. Tällöin voi olla olennaisempaa miettiä onko järkevämpää myydä tuotantokapasiteetti vuorokausimarkkinoille vai myydä kapasiteetti ylössäätöön.

Aurinkovoiman rooli reservimarkkinoille on hyvin pientä vielä Suomessa sekä Pohjoismaisella tasolla, koska yksinkertaisesti vielä reservimarkkinoille soveltuvaa teollisen kokoluokan aurinkovoimaa on vielä hyvin vähän. Aurinkovoimaa, kuitenkin löytyy jo reservimarkkinoilta ja esimerkiksi Ruotsissa ja Tanskassa sitä on taajuusohjatulla häiriöreservillä FCR-D.

Reservituotteiden teknilliset vaatimukset eroavat paljon toisistaan. Eroja on muun muassa reservien aktivointinopeudessa ja esimerkiksi FFR-reservissä aktivointi tapahtuu sekunneissa, kun taas mFRR-reservissä tehonmuutoksen on tapahduttava 15 minuutin kuluessa aktivoinnista. Muita teknillisiä eroja on esimerkiksi reservien aktivointitavassa. mFRR-reservi aktivoidaan TSO:n päätöksellä ja esimerkiksi FFR ja FCR-reservit aktivoituu paikallisen taajuusmittauksen perusteella. Reservituotteiden eroihin lukeutuu myös reservituotteiden säätösuunnat. Säätösähkö- ja säätökapasiteetti mFRR ja taajuusohjattu häiriöreservi FCR-D sekä automaattinen taajuuden pa-

lautusreservi aFRR ovat kaikki jaettu erikseen ylössäätöön ja alassäätöön, kun taas nopea taajuusreservi on ylössäätötuote ja taajuusohjattu käyttöreservi on symmetrinen tuote eli kohteen täytyy kyetä säätämään molempiin suuntiin.

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin pintapuolisesti myös reservimarkkinoilta saatavia korvauksia. Tarkkojen laskelmien tekeminen on hyvin haastavaa, koska siihen tarvitsisi oikean aurinkopuiston dataa, jonka avulla voidaan vertailla mahdollisuuksia reservimarkkinoille osallistumisesta. Tämän lisäksi emme tiedä etukäteen esimerkiksi aktivointimarkkinoiden hintoja. Aurinkovoiman liittämien osaksi reservimarkkinoita vaatii myös toimijalta tarkkaa suunnittelua ja vaikka reservimarkkinoilta saatavat tulot houkuttelevat varmasti on myös huomioitava mahdollisten sanktioiden määrä. Tämä onkin yksi olennainen asia miettiessä aurinkovoiman liittämistä osaksi reservimarkkinoita, koska esimerkiksi pilvisen sään takia toteutumattomasta reservistä toimija joutuu maksamaan sanktioita riippuen säädön koosta sekä hinnasta.

Aurinkovoima on hyvin potentiaalinen tuotantomuoto niin Suomessa kuin muualla Euroopassa. On kuitenkin hyvin mahdollista, että suurimmat aurinkovoimahakkeet eivät toteudu ja aurinkovoimakapasiteetti ei kasvakaan niin suureksi, kuin on ennustettu tai toivottu. Opinnäytetyö, kuitenkin vastaa osittain kasvavaan kysymykseen reservimarkkinoiden sekä säätövoiman kehityksestä sekä lisäämisestä. Lisäksi aurinkovoiman liittäminen osaksi reservimarkkinoita riippuu hyvin pitkälti esimerkiksi aurinkovoimalan teknillisistä ratkaisuista esimerkiksi etäohjausominaisuuksien osalta. Työn kehittämiseksi voisi tarkastella oikean aurinkovoimalan toteutuneita tietoja ja vertailla niitä reservimarkkinoihin sekä vuorokausimarkkinoihin. Näin saisi laskettua tarkemmin taloudellisia höytyjä reservimarkkinoilta.

On myös hyvin mielenkiintoista seurata aurinkovoiman kehitystä tulevina vuosina yhdessä akku-tekniologioiden kanssa. Näiden avulla saataisiin entistä tehokkaampia aurinkovoimaloita rakennettua, joiden avulla myös reservimarkkinoille osallistuminen helpottuisi merkittävästi. Lisäksi on mielenkiintoista seurata, kuinka sähkömarkkinat sekä reservimarkkinat kehittyvät tulevaisuudessa esimerkiksi siirryttäessä tuntitaseesta varttitaseeseen ja sieltä aina eurooppalaisille markkinoille.

## Lähteet

Auringonsäteilyn määrä Suomessa. 2024. Julkaisu Motivan verkkosivuilla. Viitattu 25.9.2024.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon\\_perusteet/auringonsateilyn\\_maara\\_suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa)

Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti nousi 1000 megawattiin. 2024. Julkaisu Energiaviraston verkkosivuilla. Viitattu 24.9.2024. <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-nousi-1000-megawattiin>

Aurinkosähkövoimalat. N.d. Motiva ja Energiavirasto. Viitattu 26.9.2024. <https://aurinkosahkovoimalat.fi/voimala/22/>

Aurinkovoima. N.d. Fingrid avoin data. Viitattu 26.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/aurinkovoima/>

Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR). N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 16.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>

Automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely. 1.1.2022. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 29.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/uusi-automaattisen-taajuuden-palautusreservin-afrr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvaksyttamismenettely.pdf>

Automaattisen taajuuden palautusreservin ylläpitotunnit viikoille 27–39/2024. Tiedote Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 16.9.2024. <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2024/automaattisen-taajuuden-palautusreservin-yllapitotunnit-viikoille-27-392024/>

Berg, C. & Randen H. 2022. Nordic System Price. Julkaisu Nord Poolin verkkosivuilla. Viitattu 11.9.2024. <https://www.nordpoolgroup.com/49b878/globalassets/download-center/day-ahead/methodology-for-calculating-nordic-system-price---may-2022-.pdf>

Block order. N.d. Julkaisu Nord Poolin verkkosivuilla. Viitattu 11.9.2024. <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Day-ahead-trading/Order-types/Block-bid/>

Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources. 2021. UNECE. Viitattu 26.9.2024. [https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA\\_3\\_FINAL%20March%202022.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf)

Collateral. N.d. Julkaisu Nord Poolin verkkosivuilla. Viitattu 11.9.2024. <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Clearing/Collateral/>

Cygnel, S. 2024. Tervetuloa reservimarkkinoille – lisäansioita sähköjärjestelmän tasapainottamisesta. Artikkelit Fingrid-lehdessä. Viitattu 13.9.2024. <https://www.fingridlehti.fi/tervetuloa-reservimarkkinoille-lisaansioita-sahkojarjestelman-tasapainottamisesta/>

Direktiivi EU/2024/1275. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta (uudelleenlaadittu). Euroopan unioni. Viitattu 9.10.2024. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-102-2023-INIT/fi/pdf>

Ehdot ja edellytykset automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR) toimittajalle. 2024. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 17.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-1-afrr-ehdot-2024-3-saatoominaisuuksien-tarkistaminen-voimaantulo-1.9.2024.pdf>

Ehdot ja edellytykset manuaalisen taajuuden palautusreservin (mFRR) toimittajalle. 1.9.2024. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 29.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-1-mfrr-ehdot-2023-1-sopimuksellinen-reservitoimittaja-voimaantulo-1.9.2024.pdf>

Ehdot ja edellytykset nopean taajuusreservin (FFR) toimittajalle. 2022. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 17.11.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservitoimittajien-ffr-ehdot-ja-edellytykset.pdf>

Ehdot ja edellytykset taajuuden vakautusreservin (FCR) toimittajalle. 2024. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 17.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservitoimittajien-fcr-ehdot-ja-edellytykset-voimaantulo-29.5.2024.pdf>

Fingrid 1. 2024. Fingrid-Lehti. Viitattu 26.9.2024. [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/fingrid\\_1\\_2024.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/fingrid_1_2024.pdf)

Fingrid Avoin Data. N.d. Datasivusto Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 26.11.2024. <https://data.fingrid.fi/>

Huolto ja kunnossapito. N.d. Julkaisu Motivan verkkosivuilla. Viitattu 26.9.2024. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman\\_kaytto/huolto\\_ja\\_kunnossapito](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/huolto_ja_kunnossapito)

Härkönen, J. 2015. Sähkömarkkinoiden tulevaisuus. Opinnäytetyö, AMK. Karelia ammattikorkeakoulu, sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 11.9.2024. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/95239/Harkonen\\_Jarno.pdf;jsessionid=5E09C1D8A238B4DBEBA4BOCA0116D687?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/95239/Harkonen_Jarno.pdf;jsessionid=5E09C1D8A238B4DBEBA4BOCA0116D687?sequence=1)

Jouttijärvi, S. 2023. Aurinkoenergialla on Suomessakin valoisa tulevaisuus. Uutinen Turun yliopiston verkkosivuilla. Viitattu 26.9.2024. <https://www.utu.fi/fi/ajankohtaista/uutinen/aurinkoenergi-alla-on-suomessakin-valoisa-tulevaisuus>

Kananen, J. 2010. Opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammatti-korkeakoulu.

Kotimaisella sähkön tuotannolla katettiin 98 % Suomen sähkön tarpeesta vuonna 2023. 2024. Tiedote Tilastokeskuksen verkkosivuilla. Viitattu 25.9.2024. <https://stat.fi/julkaisu/cln2zc9wg8fgb0cut7vm9hil8>

Kuinka osallistua reservimarkkinoille. N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 6.11.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/>

Manuaalisen taajuuden palautusreservin (mFRR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely. 20.11.2023. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 29.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/saatosahko/liite-2-manuaalisen-taajuuden-palautusreservin-mfrr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyv-2023-id-422321.pdf>

Markkinapaikat. N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 10.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyt/johdanto-sahkomarkkinoihin/#saatosahko--ja-reservimarkkinat->

Määrällinen tutkimus. N.d. Artikkelijyväskylä yliopiston verkkosivuilla. Viitattu 21.11.2024. <https://sites.app.jyu.fi/mehu/fi/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/maarallinen-tutkimus>

Nevalainen, M. 2022. Suuren kokoluokan aurinkovoimalan suunnittelu ja kustannusten laskenta. Diplomityö. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 25.9.2024. [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164466/diplomityo\\_nevalainen\\_markus.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164466/diplomityo_nevalainen_markus.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Nopea taajuusreservi FFR. N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 16.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/#hankinta>

Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämismenettely. 22.5.2023. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 29.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/nopean-taajuusreservin-ffr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvaksyttamisprosessi.pdf>

Osa Pohjoismaista sähköjärjestelmää. N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 18.11.2024. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/pohjoismaisen-sahkojarjestelma-ja-liitynnat-muihin-jarjestelmiin/>

Paasolainen, V. 2023. Sähkövaraston hyödyntäminen tuuli- ja aurinkovoimapuistossa. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 11.9.2024. [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/166042/S%c3%a4hk%c3%b6varaston%20hy%c3%b6dynt%c3%a4minen%20tuuli-%20ja%20aurinkovoimapuistossa Paasolainen.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/166042/S%c3%a4hk%c3%b6varaston%20hy%c3%b6dynt%c3%a4minen%20tuuli-%20ja%20aurinkovoimapuistossa%20Paasolainen.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja. 2022. Ohjekirja eSett:in sivulla. Viitattu 17.10.2024. <https://www.esett.com/app/uploads/2022/12/NBS-Kasikirja-Suomi-4.2.pdf>

Päivänsäisten ja vuorokausimarkkinoiden kehitysuunta. N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 11.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyssahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/paivansaisaisten-ja-vuorokausimarkkinoiden-kehityssuunta/>

Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto. N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 8.11.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservikaupankaynti-ja-tiedonvaihto/>

Reservimarkkinat. N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 13.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>

Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. 26.9.2023. Julkinen esitysmateriaali Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 8.11.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>

Salonen, E. 2023. Kysyntäjoustojärjestelmien toimivuuden varmistaminen. Opinnäytetyö, AMK. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Viitattu 5.11.2024. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/800211/Opinnaytetyo\\_Salonen\\_Elmo.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/800211/Opinnaytetyo_Salonen_Elmo.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Single hourly order. N.d. Julkaisu Nord Poolin verkkosivuilla. Viitattu 11.9.2024. <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Day-ahead-trading/Order-types/Hourly-bid/>

Suurten aurinkovoimaloiden tuotantokapasiteetti voi olla jopa 190-kertainen vuoteen 2030 mennessä. 2023. Julkaisu Energiaviraston verkkosivuilla. Viitattu 24.9.2024. <https://energiavirasto.fi/-/suurten-aurinkovoimaloiden-tuotantokapasiteetti-voi-olla-jopa-190-kertainen-vuoteen-2030-mennessa>

Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät. 2024. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 1.10.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/ajankohtaista/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q3-2024-fingrid.pdf>

Sähköntuotanto. N.d. Julkaisu Energiateollisuuden verkkosivuilla. Viitattu 25.9.2024. <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/>

Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR). N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 24.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/#saatosahkon-hinnoittelu>

Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet). N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 23.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/#hankinta>

Tasepalvelut. N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 27.11.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/>

Taseselvitysmallin kuvaus. N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 17.10.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/tasemallin-kuvaus/>

The power market. N.d. Julkaisu Nord Poolin verkkosivuilla. Viitattu 10.9.2024. <https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/>

Uski, K. 2019. Muutokset pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla vuosina 2019–2023 ja niiden vaikutus Suomen Elspot-hintaan. Opinnäytetyö, AMK. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 12.9.2024. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/167049/Uski\\_Kaisa.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/167049/Uski_Kaisa.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Vaheri, O. 2023. Sähköautojen latausoperaattorin mahdollisuudet sähkön reservimarkkinoilla. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 15.11.2024. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/151681/VaheriOlli.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Vihreä siirtymä – elpymis- ja palautumissuunnitelma. N.d. Artikkelit Valtiovarainministeriön verkkosivuilla. Viitattu 25.9.2024. <https://vm.fi/vihrea-siirtyma>

Wind and Solar in the Nordic Reserve Markets. 2023. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 16.9.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/ajankohtaista/julkaisu-wind-and-solar-in-the-nordic-reserve-markets-id-431541.pdf>

Yleistietoa sähkömarkkinoista. N.d. Julkaisu Fingridin verkkosivuilla. Viitattu 10.9.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/?tag=3462&page-Size=5&page=1&language=fi>

Ylös- ja alasäädön hinta. N.d. Artikkelit Fingridin sivuilla. Viitattu 28.11.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/ylos--ja-alassaadon-hinta/>

## Liitteet