

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
School of Energy Systems
Energiatekniikka
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

**NEGATIIVISET SÄHKÖN HINNAT:
SYYT, SEURAUKSET JA TULEVAISUUS**

Negative Electricity Prices: Drivers, Consequences and Prospects

Savonlinnassa 18.12.2021
Tapio Loikkanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Tapio Loikkanen

Negatiiviset sähkön hinnat: syyt, seuraukset ja tulevaisuus

Kandidaatintyö 2021

Ohjaaja: Hannu Karjunen

Tarkastaja: Hannu Karjunen

33 sivua, 9 kuvaa

Hakusanat: negatiivinen sähkönhinta, sähkömarkkinat, uusiutuva energia

Tämä kandidaatintyö perehtyy negatiivisiin sähkön markkinahintoihin ilmiönä, sekä sen vaikutuksiin eurooppalaiselle sähkömarkkinalle. Työssä selvitetään sähkömarkkinan toimintaa, mekanismeja negatiivisen hinnanmuodostumisen takana ja niistä johtuvia seurauksia. Lisäksi työssä tarkastellaan tulevaisuuden kehityssuuntia. Tavoitteena oli tuottaa kirjallisuuskatsaus, jossa esitellään puolueettomasti ilmiön nykytilannetta, syitä ja tulevaisuuden kehitystä riittäväällä laajuudella.

Negatiiviset hintatunnit ovat Suomessa vielä harvinaisia ja normaalille kuluttajalle jopa utopistinen ajatus, mutta Saksassa jo osa normaalia sähkömarkkinaa. Energiamarkkinan osapuolille on tärkeää osata reagoida niihin oikein ilmastonmuutoksen vastaisen taistelun ajaessa markkinalle systeemimuutosta kohti 100 % uusiutuvaa energiantuotantoa. Reagoimiseen vaaditaan ymmärrystä negatiivisten hintojen syntymekanismeista, johon tässä työssä on erityisesti keskitytty.

Työn tärkeimpänä tuloksena on saavutettu ymmärrys negatiivisten hintatuntien taustatekijöistä ja niiden vaikutuksista energiemarkkinan toimijoihin. Historiallista dataa tutkimalla havaittu negatiivisten hintatuntien kasvavan trendin yhteys uusiutuvan energiantuotannon

lisääntymiseen mahdollisti tulevaisuuden kehityksen ennakoinnin. Uusiutuvan energiantuotannon lisääntyminen lisää negatiivisten sähkön hintojen esiintymistodennäköisyyttä. Tulevaisuudessa energiantuotannon volatilitteetti ja kysyntäjouston kehittäminen vastaamaan muuttuvaa tilannetta vaativat markkinatalouden lisäksi pitkäjänteistä ja suunnitelmallista kehittämistä viranomaistahoilta.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO.....	5
2	SÄHKÖN MARKKINAHINNAN MÄÄRÄYTYMINEN	6
2.1	Markkinaosapuolet.....	6
2.2	Sähköpörssi.....	7
2.2.1	Elspot ja hinnan muodostuminen	8
2.2.2	Aluehinta	9
2.2.3	Elbas	10
2.2.4	Johdannaismarkkinat	10
3	NEGATIIVISTEN HINTOJEN TAUSTATEKIJÄT.....	12
3.1	Historia ja esiintyvyys.....	12
3.2	Kuormitusennusteet	14
3.3	Uusiutuva energiantuotanto	15
3.4	Konventionaalinen energiantuotanto	19
3.4.1	Päästökauppa	19
3.5	Tukimekanismit	21
3.5.1	Kiinteä syöttötariffi	21
3.5.2	Tarjouskilpailutariffi.....	22
3.5.3	Syöttötariffien vaikutus	22
4	NEGATIIVISTEN HINTOJEN SEURAUKSET JA TULEVAISUUS	25
4.1	Ongelmat ja kehityssuunta.....	25
4.2	Investoinnit	26
4.2.1	Akkuvarastointi	27
4.2.2	Sähköautojen akkuvarasto	28
4.2.3	Hiilidioksidin talteenotto	28
4.2.4	Vetytuotanto	29
5	YHTEENVETO	30
	LÄHTEET	31

LIITTEET

LYHENNELUETTELO

CHP	Combined Heat and Power, voimalaitos, joka tuottaa sähköä ja kaukolämpöä samassa prosessissa
CCS	Carbon Capture and Storage, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi
CCU	Carbon Capture and Utilization, hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen
OTC	Over the Counter, pörssin ulkopuolinen kauppa osapuolten välillä
EEG	Environmental Energy Act, Saksan uusiutuvan energian laki
EPEX	European Electricity Exchange Market, eurooppalainen sähköpörssi
PPA	Power Purchase Agreement, sähkön suoramarkkinasopimus
MW	Megawatti, tehon yksikkö
MWh	Megawattitunti, energian yksikkö

1 JOHDANTO

Negatiiviset sähkön hinnat ovat säännöllisesti esiintyvänä tapahtumana nuori, mutta kasvava ilmiö. Kuluttajalle ajatus sähkön hinnan painumisesta negatiiviseksi kuulostaa oudolta ja nopeasti ajateltuna positiiviselta asialta. Negatiiviset hinnat ovat kuitenkin moniulotteinen poikkeustilanne, joka aiheuttaa haasteita ja mahdollisuuksia markkinatoimijoille. Poliittiset päätökset ohjaavat energiantuotannon rakentamista, ja valitulla kehityssuunnalla on valtava merkitys sähkön hinnan kehittymiseen. Euroopan nykyinen hiilineutraaliustavoite vuodelle 2050 tarkoittaa uusiutuvan energiantuotannon moninkertaistamista nykytasolta, jolloin markkinamekanismeihin tulee kohdistumaan ennennäkemätöntä painetta. Ensimmäisenä reagoi aina hinta, joten todennäköisyys suurelle hintavaihtelulle on jatkuvassa kasvussa.

Työssä käsitellään sähkömarkkinan toimintaa, sekä mekanismeja negatiiviseksi painuvan sähkön hinnan takana. Lisäksi tutkitaan negatiivisista hinnoista aiheutuvia seurauksia. Tarkastelualueena ovat Saksan ja Suomen sähkömarkkinat niiden sähkön tuotantojakauman eroavaisuuksien vuoksi, joista voidaan määritellä syitä maiden negatiivisten hintojen kehityksen eroihin. Ymmärrettäessä negatiivisten hintojen muodostumisen syyt ja seuraukset, voidaan ennakoita tulevaisuuden kehitystä ja mahdollisia toimenpiteitä, joilla varautua ja hyötyä ilmiöstä. Ilmastonmuutoksen torjunnan aiheuttama järjestelmämuutos vaatii kasvavassa määrin sähköä ja negatiiviset hinnat kertovat epätasapainosta markkinalla, joten ilmiön hallitsemiseksi tarvitaan toimenpiteitä.

Tämän työn tavoitteena on tarjota lukijalle katsaus sähkömarkkinan toimintaan ja negatiiviseen sähkön hintaan liittyviin kysymyksiin. Työn perusteella ymmärretään paremmin, kuinka uusiutuva energiantuotanto vaikuttaa sähkön hinnan muodostumiseen ja mistä negatiivinen sähkön hinta kertoo. Tutkittaessa sähkömarkkinoita, tulee ymmärtää mekanismeja, jotka ovat kaikki kytköksissä toisiinsa.

2 SÄHKÖN MARKKINAHINNAN MÄÄRÄYTYMINEN

Sähkö on ominaisuuksiltaan hankala tuote; sen laajamittainen säilöminen ei nykyisellään ole kustannustehokasta, joten tuotetun ja käytetyn sähkön määrän tulee kohdata jatkuvasti. Eurooppalainen sähköverkko toimii 50,0 Hz taajuudella, josta standardipoikkeama on ± 10 mHz. Tämän ylittävän taajuuspoikkeaman tapahtuessa verkon vakaus heikkenee ja häiriöt voivat näkyä loppukäyttäjille asti pahimmillaan sähkökatkoksina. (Partanen, 2020).

Toimitusvarmuuden takausta varten sähkömarkkinoilla on monimutkaiset mekanismit, joiden avulla kysyntä ja tarjonta kohtautetaan. Lisäksi löytyy varamekanismit, joilla poikkeustilanteisiin voidaan varautua. Itse asiassa negatiiviset sähköhinnat voidaan laskea yhdeksi varamekanismeista, mutta tässä työssä ei perehdytä tarkemmin muihin varamekanismeihin.

2.1 Markkinaosapuolet

Sähkömarkkinoiden toimitusketju koostuu useasta osapuolesta, joilla kaikilla on omat tavoitteensa. Sähkön tuottajat ja myyjät pyrkivät maksimoimaan tuottoensa, kuluttaja minimoimaan kulunsa ja kantaverkko-operaattorit (Transmission System Operator – TSO), sekä jakeluverkko-operaattorit (Distribution System Operator - DSO) varmistamaan toimitusvarmuuden ja sähkön laadun omien voittojen lisäksi. Sähköpörssin ylläpitäjä (Pohjoismaissa Nord Pool, Keski-Euroopassa EPEX) tuottaa markkina-alustan, jolla osapuolet voivat toteuttaa sähkön vaihdannan ja vaikuttaa sähkön pörssihinnan määräytymiseen. Koko toimitusketjua hallinnoi ja säätelee alueellinen viranomaistaho, joka määrittelee puitteet, joiden rajoissa toimijoiden tulee operoida. Suomessa tämä viranomainen on Energiavirasto ja Saksassa Bundesnetzagentur.

Sähköverkkojen hallinnasta vastaavat yhtiöt toimivat viranomaisen säätelemässä monopoli- asemassa. Monopolirakenne on oikeutettu, sillä rinnakkaisten verkkojen ylläpitäminen ja rakentaminen ei olisi kustannustehokasta. Sähköverkot ovat Suomessa jaettavissa kahteen osaan. Kantaverkko on valtakunnallinen suurjänniteverkko, johon voimalaitokset ovat yhdistettynä 400-, 220 ja 110 kV jännitetasoisilla voimalinjoilla. Kantaverkkoa operoi Suomessa valtio-omisteinen Fingrid Oyj, joka on myös järjestelmävastaavana vastuussa sähkönsiirron toimitusvarmuudesta, sekä valtakunnan rajojen yli tapahtuvasta siirrosta (Fingrid, 2021).

Jakeluverkot yhdistävät kantaverkon ja sähkön loppukäyttäjän 0,4–110 kV jännitetasolla toimivilla voimalinjoilla. Jakeluverkkoja hallinnoivat paikalliset jakeluverkkoyhtiöt, joita on Suomessa 86 kpl ja Saksassa 963 kpl (Eurelectric, 2020). Jakeluverkkoyhtiöt ovat veloitettuja ylläpitämään ja kehittämään hallinnoimaansa verkkoa toimitusvarmuuden parantamiseksi, josta hyvänä esimerkkinä toimii maakaapeloinnin yleistyminen. Jakeluverkkoyhtiön perimän siirtomaksun tulee myöskin olla kohtuuhintainen, eikä se saa olla riippuvainen asiakkaan maantieteellisestä sijainnista verkossa (Partanen, 2020).

Valvonta- ja säätelyviranomaisen tavoitteina on ylläpitää jatkuva tasapaino kulutuksen ja tuotannon välillä, varmistaa sähkön toimitusvarmuus ja hintojen kilpailukykyisyys. Suomessa säätelyviranomaisena toimii Energiavirasto ja Saksassa Bundesnetzagentur. Energiavirasto valvoo markkinaosapuolien lain noudattamista ja toteutuneita liiketoimia, sekä vastaa päästökaupasta ja sähkön alkuperätakuista (Energiavirasto, 2021).

Sähköpörssi ei ole ainoa paikka, jossa sähkönvaihdanta on mahdollista. Myös PPA-sopimus on vaihtoehto, kun tuottaja myy sähköä suoraan kuluttajalle kahdenkeskeisen sopimuksen mukaan. PPA-kaupassa hinta ja määrä eivät ole sidottuna sähköpörssiin, jolloin voidaan sopia kiinteä hinta pitkäaikaiselle toimitukselle. PPA-kaupat ovat yleisimpiä tuottajien ja isojen teollisuuden yritysten kesken (Partanen, 2020).

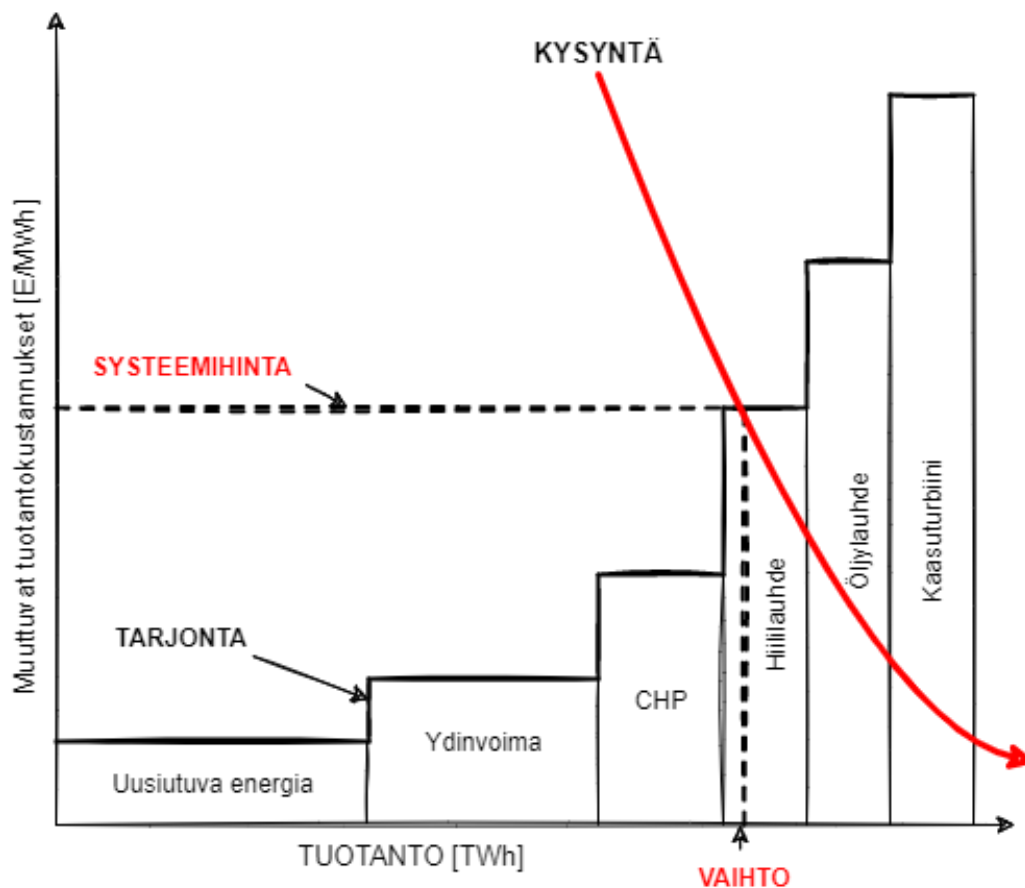
2.2 Sähköpörssi

Sähköpörssi mahdollistaa tehokkaan sähkömarkkinan luomalla vaihdanta-alustan tuottajille, vähittäismyyjille ja suurille sähkönkäyttäjille. Sähköpörssissä kauppaa käydessä vastapuolena toimii pörssi, jolloin vastapuoliriski poistuu ja tasapuolisuus varmistuu. Pohjoismaissa sähkön Spot-hinta eli sähkön pörssihinta määräytyy Nord Pool -sähköpörssissä kaksiosaisella Nord Pool Spot -markkinalla, jonka osat ovat Elspot ja Elbas. Spot-markkinoilla kaupankäynti johtaa aina sähkön fyysiseen toimitukseen. Fyysisen sähkökaupan lisäksi Nasdaq Commodities -finanssimarkkinoilla käydään Pohjoismaissa kauppaa sähköjohdannaisilla, joilla markkinaosapuolet voivat suojautua sähkön hintavaihtelua vastaan. Spot- ja finanssimarkkinoille osallistujan täytyy rekisteröityä pörssiin ja täyttää Nord Poolin tiukat osaamisa- ja vakuusvaatimukset, joten kyseessä ei ole perinteinen arvopaperipörssialusta, jolle yksityishenkilöt voisivat osallistua helposti (Partanen, 2020).

2.2.1 Elspot ja hinnan muodostuminen

Elspot on suljettuun kaupankäyntikierrokseen perustuva markkina, joka määrittää markkinahinnan eli systeemihinnan seuraavalle päivälle. Suljetulla tarkoitetaan järjestelmää, jossa ostajat ja myyjät jättävät kerran päivässä klo 13 mennessä osto- ja myyntitarjoukset seuraavan päivän sähkön toimituksesta tietämättä toistensa tarjouksia. Tarjoukset tehdään tunti-kohtaisesti, jolloin systeemihinta muodostuu tunneittain. Systeemihinnaksi muodostuu käytännössä kaikkein kallein tuotantotapa, jolla kysyntä saadaan tasapainotettua (Nord Pool, 2021a).

Systeemihinta määräytyy kysyntä- ja tarjontakäyrien leikkauspisteestä. Tällöin kalleimmat tarjoukset määrittävät systeemihinnan kuvan 1. mukaisesti.



Kuva 1. Hinnanmuodostus Elspotissa

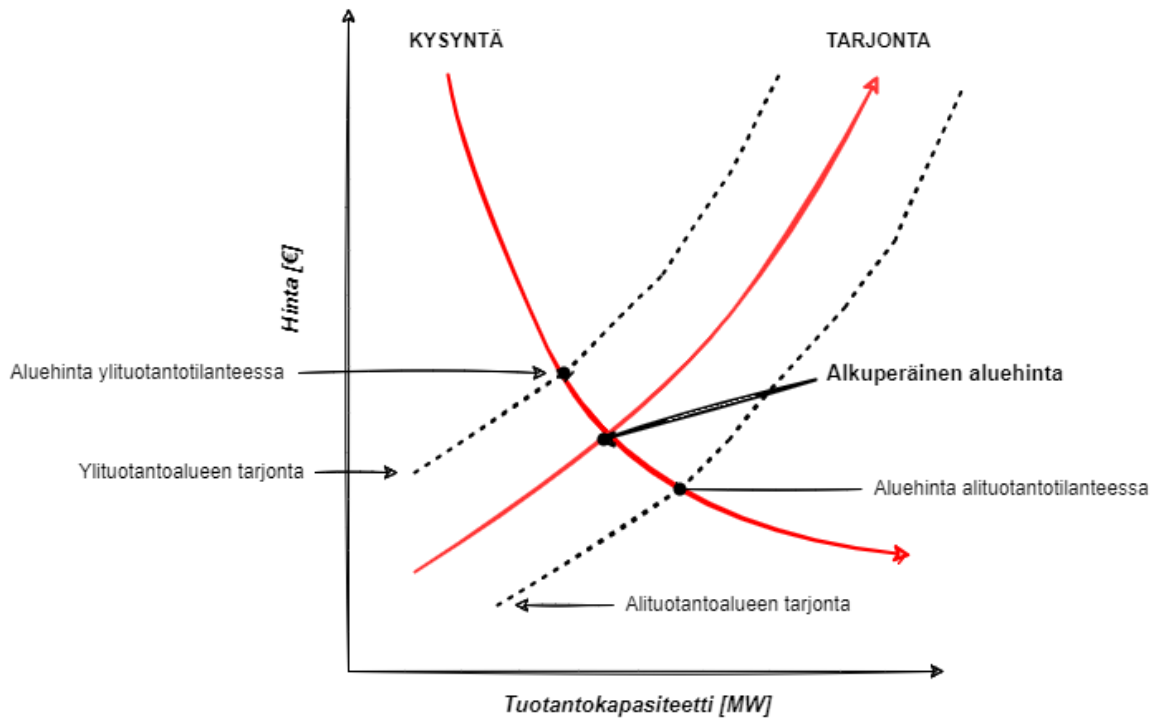
Tarjouksia tehdessä sähkön tuotantomuodon kustannukset vaikuttavat vahvasti, millä tuotantomuodolla sähkö lopulta tuotetaan. Tuulivoima ja aurinkovoima ovat kokonaiskustannuksiltaan edullisimmat, jonka jälkeen tulevat vesivoima ja ydinvoima, joissa rakennuskustannus on iso mutta käyttökustannukset edulliset. CHP ja lauhdevoimalaitokset ovat

riippuvaisia polttoaineen hinnasta, joten usein niiden tuotanto on kannattamatonta uusiutuvien tuotannon ollessa huipussaan, kysynnän ollessa matalaa tai päästöoikeuksien nostaessa polttoaineen hintaa ylös (Partanen, 2020).

2.2.2 Aluehinta

Systeemihinta ei ole kuitenkaan vielä lopullinen hinta, jolla loppukäyttäjä voi ostaa sähköä käyttöönsä. Systeemihinta ei ota huomioon siirtokapasiteetin aiheuttamia rajoitteita ja alueellisia vaihteluita sähkön tuotannossa ja kulutuksessa. Aluehinta ottaa nämä huomioon. Suomi on yksi markkina-alue, jolle määräytyy yhtenäinen aluehinta käytettävissä olevan siirtokapasiteetin mukaan. Samoin Saksassa on käytössä yksi alue, kun taas Norjassa 5 ja Ruotsissa 4 aluetta johtuen siirtokapasiteetin rajoitteista (Nord Pool, 2021a).

Siirtokapasiteetin rajoitteilla tarkoitetaan sähköverkon fyysisiä rajoitteita, joiden takia markkina-alueiden välillä voidaan siirtää vain tietty kapasiteetti sähköä. Tästä käytännön esimerkki on Norjan vesivoimalat, jotka sateisina vuosina tuottavat valtavat määrät edullista sähköä, jota ei kuitenkaan voida käyttää Suomessa rajattomasti siirtoverkon rajoitteiden takia. Tällöin tarjontakäyrät muuttuvat siirtokapasiteetin mukaan ja aluehinta määräytyy uuden leikkauspisteen mukaisesti. Käytännössä ylituotantoalueella aluehinta nousee myytessä kalliimmalla sähköä toiselle alueelle ja vastaavasti alituotantoalueella laskee tarjonnan lisääntyessä (Nord Pool, 2021a). Prosessia on kuvattu tarkemmin kuvassa 2.



Kuva 2. Aluehinnan määräytyminen tarjonnan mukaan.

2.2.3 Elbas

Elbas-markkina on Elspotin jälkimarkkina-alusta, jolla säädetään päivän sisäisesti kysyntä ja tarjonta kohtaamaan toisiaan tunneittain vuorokauden ympäri. Elbas-markkinalla kaupankäynti sulkeutuu tuntia ennen sähkön fyysistä toimitusta, jolloin tiedetään jo tarkasti toteutuva kulutus ja tuotanto ja voidaan tasapainottaa tase tarkasti kohdalleen (Nord Pool, 2021b).

2.2.4 Johdannaismarkkinat

Johdannaiskaupassa käydään kauppaa sähkön hintakehitykseen liitetyillä finanssijohdannaisilla, jotka eivät johda sähkön fyysiseen toimitukseen. Finanssi- eli johdannaismarkkinat toimivat sähkömarkkinoilla riskienhallintamekanismina, jolla myyjät ja tuottajat voivat suojata kaupankäyntiään korkealta volatilitteetilta. Sähkön myyjillä on tarve suojautua korkeilta hinnoilta, sillä heidän tekemänsä sopimukset loppukäyttäjien kanssa ovat yleensä kiinteähintaisia, jolloin sopimusta korkeammat hinnat aiheuttavat tappiota. Tuottajilla tilanne on vastakkainen. Hinnan painuessa matalaksi hyvin suojatulla tuotannolla saa katettua systeemihinnan ja suojaustason välisen erotuksen, kasvattaen voitto-osuutta (Partanen, 2020).

Johdannaisista futuurit ja DS-futuurit ovat maallikolle tutuimmat tuotteet, joiden sopimusehdoissa määritellään hinta, määrä ja toimitusaika. Sopimusten kesto vaihtelee yleensä päivästä kuukausiin tarpeen mukaan.

3 NEGATIIVISTEN HINTOJEN TAUSTATEKIJÄT

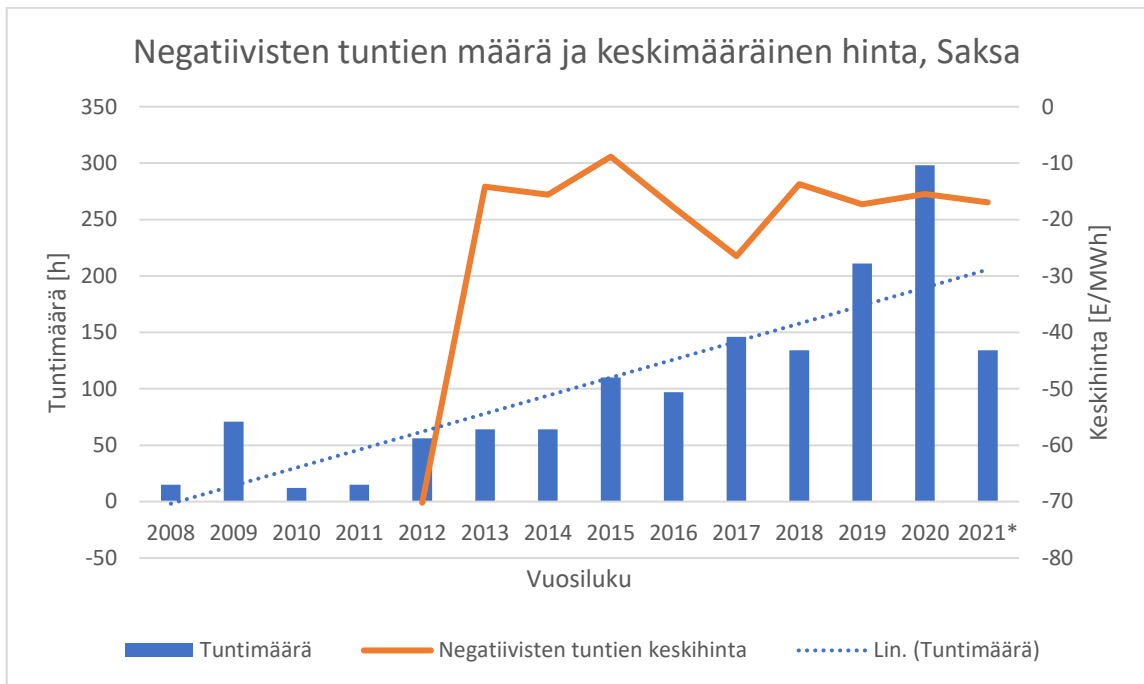
Negatiivisiin sähkön hintoihin ei ole yksittäistä selittävää tekijää, vaan ne muodostuvat usean asian summasta. Yksinkertaistettuna, sähkön kysyntä ja tarjonta on aina saatava kohtaamaan ja hinta joustaa, kunnes tarvittava tasapainotilanne saavutetaan. Sähkön hinnan painumisessa negatiiviseksi syynä on aina kysynnän pienentyminen tai tarjonnan kasvaminen, mutta markkinatasapainon takana vaikuttaville mekanismeille on monta osasyitä.

3.1 Historia ja esiintyvyys

Nord Poolin alueella ensimmäinen negatiivinen tuntihinta on havaittu vuoden 2009 lopulla Tanskassa. Suomessa aluehinta putosi negatiiviseksi ensimmäistä kertaa 10.2.2020, jonka jälkeen ilmiö on toistunut yhteensä 14 kertaa. Pohjatietona Suomen ja Saksan keskimääräisestä sähkönhinnasta, vuoden 2020 keskihinta oli Suomessa 28,02 €/MWh (Energiateollisuus, 2021) ja Saksassa vastaavasti 30,46 €/MWh (Bundesnetzagentur, 2021). Vuodessa on keskimäärin 8 760 tuotantotuntia.

Tarkastellaan negatiivisten hintatuntien vuotuista esiintymistiheyttä Saksan sähkömarkkinalla, joka on Euroopan suurimpana markkina-alueena hyvä tarkkailukohde. Saksa koostuu yhdestä hinta-alueesta, joten alueiden välisiä eroja ei tarvitse huomioida. Saksassa negatiivisia hintoja on esiintynyt vuoden 2007 elokuusta lähtien. Spot-hintojen markkinadataa on saatavilla vuodesta 2008 alkaen (Götz et.al. 2014), mutta valitettavasti vuosien 2008–2011 keskihinnan kehitystä ei ole saatavilla puutteellisen arkistoinnin vuoksi. Saksan sähköpörssiä hallinnoiva EPEX ei luovuta tuntikohtaista historiallista dataa ilmaiseksi, toisin kuin pohjoismainen Nord Pool, joten tässä työssä käytetään ainoastaan vapaasti saatavilla olevaa aineistoa.

Spot-hintojen dataa käsiteltäessä on tärkeää muistaa kyseessä olevan nimenomaisesti vuorokausi etukäteen määräytyvä markkinahinta. Spot-hinnoissa ei huomioida päivänsisäisiä muutoksia Elbas-markkinalla, joten todelliset toteutuneet tuntimäärät voivat poiketa hieman Kuvassa 3. esitetyistä.



Kuva 3. Vuotuinen negatiivisten hintojen tuntimäärän ja keskihinnan kehitys. Vuoden 2021 luvut ovat 18.10.2021 mennessä esiintyneistä tapauksista (Bundesnetzagentur, 2021. Entso-E, 2021. Götz et.al. 2014).

Kuvasta 3. huomataan nouseva trendilinja vuotuisten negatiivisten tuntien määrässä. Vuotuista vaihtelusta huolimatta ilmiön tasainen toistuvuus ja kasvu on selkeää, eikä nykyisellä energijärjestelmällä ole katoamassa itsestään. Huomattavaa on myös negatiivisten tuntien keskihinnan kehitys, joka ei suoranaisesti korreloi tuntimäärän kanssa ja on pysynyt suhteellisen tasaisena vuodesta toiseen, poikkeuksena 2012 huomattavan matala hinta. Historian perusteella negatiivisten hintojen voimakkuuden ja yleisyyden välillä ei ole selkeää yhteyttä. Ei siis voida olettaa, että harvoin esiintyessään hintapiikit olisivat aina voimakkaasti negatiivisia ja negatiivisten tuntien yleistyessä hintakäytös tasoittuisi (Fanone et al., 2011). Tehokkailla sähkömarkkinoilla näin tulisi käydä, sillä voimakkaat hintapiikit kertovat markkinan tehottomuudesta, kun poikkeustilanteessa järjestelmä ei pysty mukautumaan ja hinta joutuu joustamaan. Voidaan siis todeta nykyisessä järjestelmässä olevan vielä kehitettävää.

3.2 Kuormitusennusteet

Tarvittavaa sähkön tuotantoa pyritään ennakoimaan mallintamalla kysyntää historiallisen kulutus- ja säädatan perusteella. Kuormitus- eli kysyntäennusteiden tekemiseen on useita tapoja, joihin ei perehdytä tarkemmin tässä työssä. Karkeasti voidaan kuitenkin jaotella ennusteet tilastollisten menetelmien perusteella tehtyihin talousmalleihin ja tarkempiin aluekohtaisiin menetelmiin. Kuormitusennusteita tehdään eri aikajaksoille ja alueille riippuen sähkömarkkinaosapuolen tarpeista. Verkkoyhtiöt kehittävät sähköverkostojaan 10–30 vuoden aikajänteellä vastaamaan kulloistakin kysyntää. Tällöin yhtiöitä kiinnostaa erityisesti pitkän aikavälin kysynnän kehittyminen, sekä vaadittava hetkellinen tuntihuipputeho, joka määrittelee verkon mitoitusarpeen (Partanen, 2020).

Sähkön tuottajille ja myyjille lyhyempi aikahorisontti, 1–168 h (7 vrk) on tärkeä optimoitaessa tuotantoa vastaamaan kysyntää Elspot-markkinalla. Tarkka ennuste on kriittinen oikean hinnanmuodostamisen takia: ennusteen poiketessa oleellisesti todellisesta kysynnästä hinnanmuodostaminen ei ole tehokasta ja markkinaosapuolista joku on aina kärsijänä. Elbas-markkina tasapainottaa Elspotin hintavirheet tiettyyn pisteeseen asti, mutta tehokkailla markkinoilla tarjoushinnan ja lopullisen toimitushinnan tulee olla mahdollisimman lähellä toisiaan pitkässä juoksussa (Partanen, 2020).

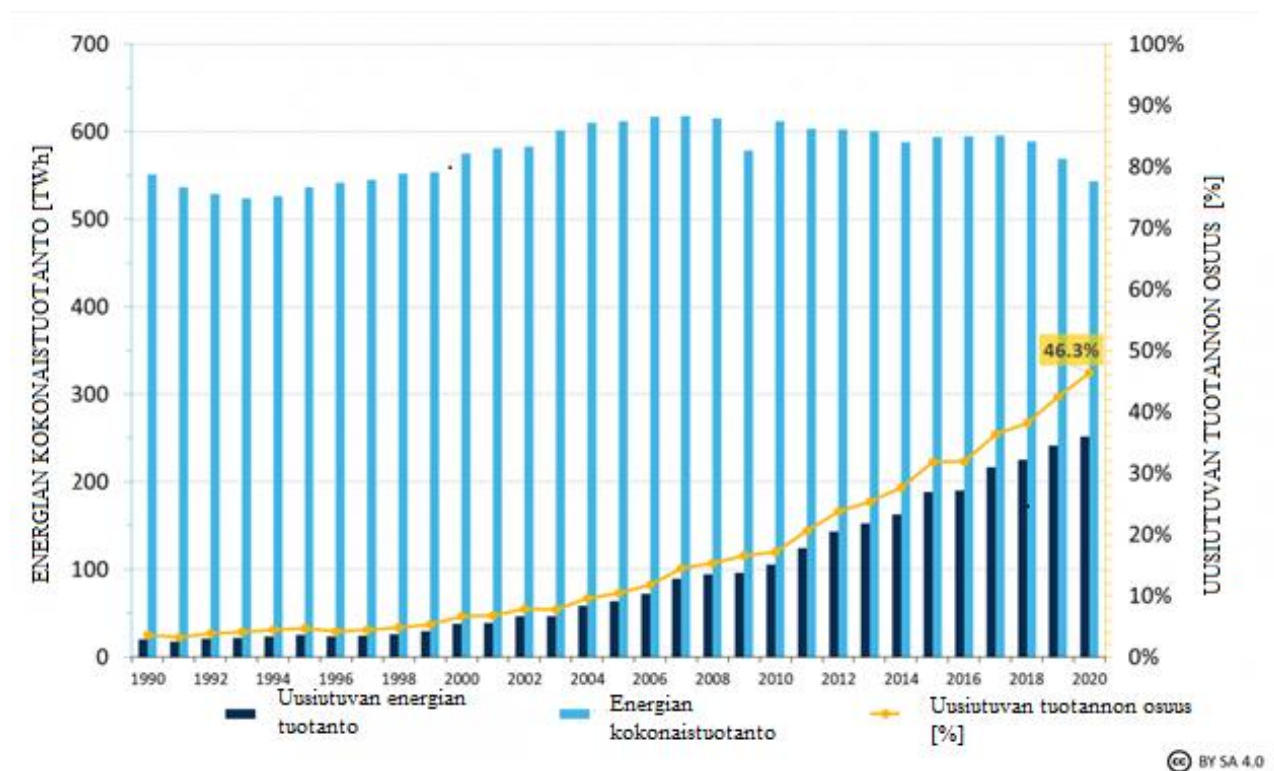
Sähkön tuottajille myös keskipitkä aikaväli, eli 1–5 vuotta eteenpäin tehtävät kuormitus-, tuotanto- ja hintaennusteet ovat tärkeitä suojatessa tuotantoa finanssimarkkinoilla. Suojaukset ovat olennainen osa sähköntuottajien riskinhallintaa ja paras tapa varautua negatiivisiin markkinahintoihin. Säätelöviranomaisen taas tekee ennusteita sekä pitkälle, että lyhyelle aikavälille tasehallintaa, varavoiman mitoitus- ja markkinaympäristön kehittämistä varten (Partanen, 2020).

Kuormitusennusteista pystyy osittain ennakoimaan todennäköisimpiä negatiivisten tuntien esiintymisajankohtia hakemalla pienimmän kysynnän ajanjaksoja. Tällöin todennäköisyys ylituotannolle on suurimmillaan uusiutuvan energiantuotannon mahdollisen ylituotannon ansiosta. Vaikka Elspotin hinta olisi ennusteen perusteella muodostunut positiiviseksi, voi päivänsisäinen hinta painua negatiiviseksi Elbas-markkinalla (De Vos, 2015). Myös yliimitettu kuormitusennuste voi johtaa negatiiviseen hintapiikkiin, jos verkosta poistuu yllättäen iso kuluttaja, kuten teollisuuslaitos.

Väärin mitoitettu kuormitusennuste on yksi osasyllinen negatiivisten hintojen muodostumiselle, mutta vaikka kysyntä olisikin oikein ennakoitu, voi uusiutuvan tuotannon vaihtelu aiheuttaa merkittävää ylituotantoa.

3.3 Uusiutuva energiantuotanto

Uusiutuvilla sähköntuotantotavoilla tarkoitetaan tuuli-, aurinko-, ja vesivoimaa. Myös bioenergia on uusiutuvaa, mutta tässä työssä se mielletään mukaan konventionaalisiin tuotantotapoihin sen polttotavan ja polttoaineen kustannusten vuoksi.



Kuva 4. Saksan energiantuotannon tuotanto- ja kulutusjakauma ajalta 1990–2020 (Clean Energy Wire, 2021a).

Kuvassa 4. on esitettyä uusiutuvan energiantuotannon osuus kokonaistuotannosta suhteessa kokonaiskulutukseen. Viimeisen 10 vuoden aikana uusiutuvan energiantuotannon osuus on noussut noin 17 %:sta ennätyselliselle 46,3 % tasolle. Näin nopeasta muutoksesta aiheutuu väistämättä haasteita sähkömarkkinajärjestelmälle. On tärkeää huomata kyseessä olevan nimenomaisesti energian- eikä sähköntuotanto, joten mukana on myös lämmöntuotanto.

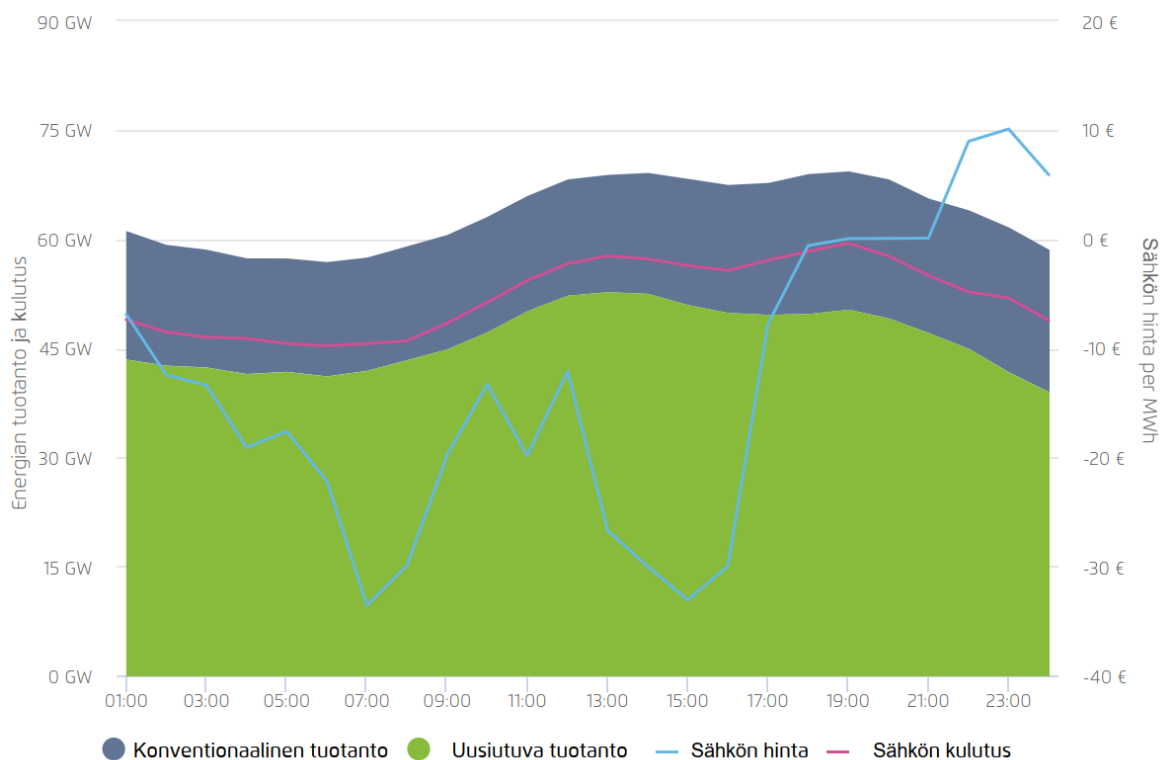
Uusiutuvista tuotantomuodoista tuulivoima on suurin selittävä tekijä negatiivisten sähkönhintojen muodostumiselle. Tuulivoiman tuotannon heikko ennustettavuus ja ylös säädettävyys aiheuttavat ongelman tuotannon sovittamisessa kysyntään. Kysyntähuippuihin vastaaminen tuulivoimalla on riippuvainen sääolosuhteista, eikä täysin tuottajan hallittavissa. Toiseen suuntaan taas tuotantohuippujen ajoittuessa kysyntäpohjiin, markkinan kokonaistuotannosta riippuen hinnan painuminen negatiiviseksi on mahdollista. Tällainen tilanne aiheutuu yleensä yöajalla, jolloin sähkön kysyntä on luontaisesti matalaa ja kysynnän jousto heikkoa (Aust & Horsch, 2020).

Aurinkovoimaan pätevät samat ongelmat, pois lukien yöaikainen ylituotanto. Aurinkovoiman tehohuippu ajoittuu keski- ja iltapäivään, jolloin kysyntä ja sähkön hinta ovat luontaisesti korkeimmillaan talouden pyöriessä täydellä teholla. Suomessa aurinkovoiman osuus sähkön tuotannosta on pieni, 0,4 prosenttia, mutta Saksassa jopa 19,4 prosenttia (BMW, 2021). Saksan tuotannosta osa on pientuotantoa, eli talouksien asentamia aurinkopaneeleja, jotka syöttävät ylimääräisen sähkön verkkoon. Aurinkovoiman pientuotannossa viranomaisella ei ole alas säätömahdollisuutta, joten aurinkoisena päivänä tuotantopiikki voi olla huomattava aiheuttaen hintapainetta alaspäin (Aust & Horsch, 2020).

Vesivoima on uusiutuvista parhaiten säädettävissä oleva tuotantomuoto. Sen rajoitteet liittyvät vesivarantojen riittävyyteen ja juoksutussäätelyihin, jotka pitkällä aikavälillä vaikuttavat energiantuotantoon. Päivän sisäisesti tuotanto on hyvin joustavaa ja kysyntään voidaan reagoida nopeasti, jonka vuoksi se on erityisen toimiva säätövoimana. Sähkön markkinahinnan laskiessa vesivoima voidaan ajaa alas nopeasti, jollei erityisestä syystä ajolle olekin tarvetta. Näin ollen negatiivisten hintojen muodostumiseen vesivoimalla ei ole suoranaista vaikutusta, vaan jopa päinvastoin ehkäisevä vaikutus (Partanen, 2020).

Uusiutuvan energian tuottajat voivat säätää tuotantoa pienemmäksi, jolloin negatiivisilta hinnoilta vältyttäisiin. Sähköpörssin hinnanmuodostus muodostaa tässä ongelman: edullisin ja vähäpäästöisin sähköntuotanto tulee aina priorisoida edelle, jolloin uusiutuvan tuotannon rajoittaminen ei tule kyseeseen. Tällöin kalliimmat ja epäekologisemmat vaihtoehdot, kuten kaasu- ja hiilivoimalaitokset saisivat suhteellisesti etua. Loogisesti pääteltynä siis fossiilisen ja ei-uusiutuvan energiantuotannon tulisi joustaa, mutta fyysisten ja taloudellisten rajoitteiden vuoksi niidenkin tuotanto on pitkälle sidottua (Götz et.al, 2014). Kyseisiin rajoitteisiin perehdytään tarkemmin kappaleessa 3.4.

Uusiutuvan sähköntuottajan kannalta tuotannon rajoittaminen ei ole välttämättä taloudellisesti järkevää edes negatiivisilla hinnoilla. Uusiutuville energiamuodoilla ei ole polttoainekuluja, joten kun energiaa on saatavilla, kannattaa voimalaitosta ajaa normaalisti. Tasehallinnan takia tuotannon laajamittainen alas säätäminen aiheuttaisi tuottajalle isomman kustannuksen kuin hetkellisesti negatiivinen Spot-hinta. Markkinahinnan negatiiviseksi painumiseen varaudutaankin tehokkaimmin suojaamalla tuotantoa johdannaismarkkinalla normaalina toimenpiteenä (Götz et.al, 2014).

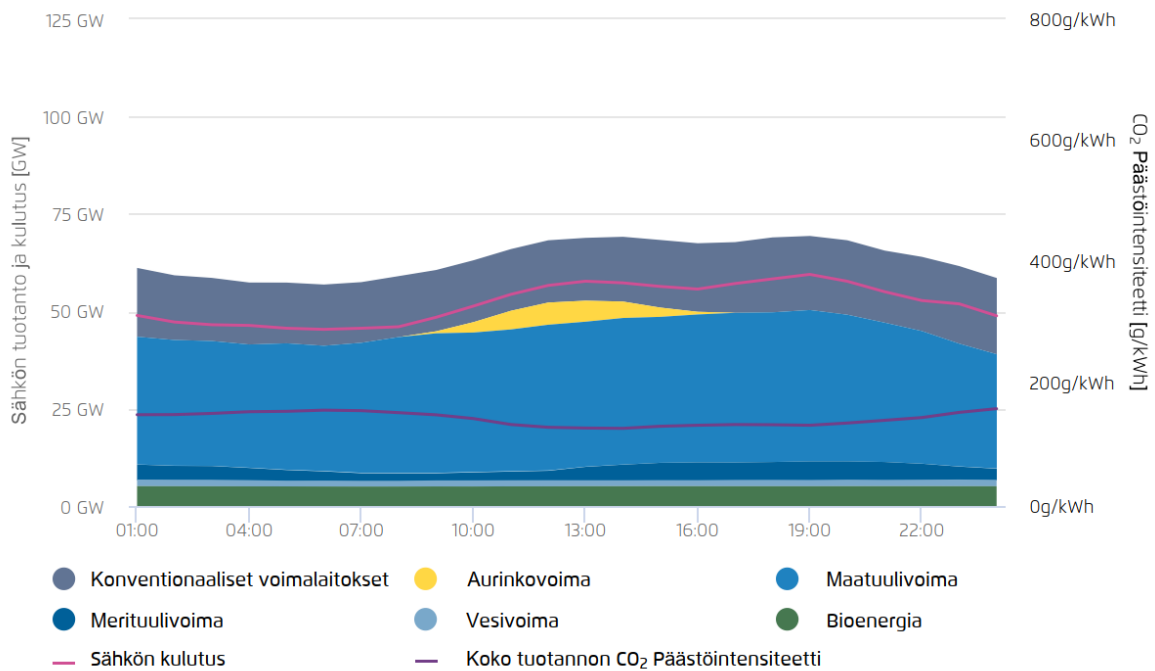


Kuva 5. 27.12.2020 Saksan sähkömarkkinan Spot-hinta, tuotantojakauma ja kulutus esitettynä tunneittain koko vuorokaudelta. (Agora Energiewende, 2021)

Esimerkkitapauksena negatiivisten hintojen esiintymisestä käytetään Saksan sähkömarkkinatilannetta 27.12.2020. Kuvasta 5. huomataan hinnan painuneen merkittävästi negatiiviseksi melkein koko vuorokauden ajalla, vaikka kysyntä on pysynyt ajankohtaan nähden tavanomaisella tasolla. Tuotantojakauma on selkeästi uusiutuviin painottuva ja kuvasta 4. selviää vielä tarkempi tuotantomuotokohtainen jakauma. Kuvajasta on hyvin nähtävissä mainitut mekanismit negatiivisen hinnanmuodostuksen takana. Konventionaalinen tuotanto pysyy tasaisena koko vuorokauden ajan, vesivoima on säädetty minimiin, aurinkovoima

tuottaa sähköä valoisan ajan ja mikä tärkeintä, maatuulivoiman osuus on dominoiva. Kyseinen vuorokausi on ollut poikkeuksellisen tuulinen, jolloin tuulivoiman tuotanto on nostanut tuotannon ennakoitua korkeammalle tasolle. Tavoitteena oleva 100 % uusiutuva sähköntuotanto on yksittäisenä vuorokautena jo melkein saavutettu 70 % tuotannosta ollessa uusiutuvaa. Tavoitellussa tulevaisuuden tilanteessa, jossa sähkö tuotetaan jatkuvasti pelkästään uusiutuvalla energialla, järjestelmä tulee mitoittaa enimmäiskysynnän ehdoilla. Tällöin vaihtelevan uusiutuvien tuotannon takia ylituotantotilanteet tulevat lisääntymään huomattavasti, jollei kysyntä elä jatkuvasti tuotannon mukana.

Tarkasteltaessa kuvaa 6. huomataan myös perinteisen tuotannon tasaisuus ja joustamattomuus. Vuodenajasta (talvi) johtuva lämmitystarve selittää osaltaan perusvoiman tarvetta ja joustamattomuutta.



Kuva 6. 27.12.2020 Saksan energiantuotannon tarkka tuotantojakauma ja kulutus tunneittain esitettynä (Agora Energiewende, 2021).

3.4 Konventionaalinen energiantuotanto

Konventionaalisiin eli perinteisiin voimalaitoksiin lasketaan tässä työssä perinteisten fossiilisten voimalaitosten (hiili ja kaasu) lisäksi ydinvoima ja biopolttoaineet niiden polttoaineen varastoitavuuden vuoksi.

Kuten jo aikaisemmin on todettu, konventionaaliset voimalaitokset ovat osasyllisenä negatiivisten sähkön markkinahintojen syntyyn. Uusiutuvan energian tuottajien mielestä konventionaalinen energiantuotanto ei jousta riittävästi uusiutuvan tuotannon ollessa runsasta, jolloin nimenomaisesti perinteinen sähköntuotanto ajaa hinnan negatiiviseksi ylituotannollaan (Götz et.al, 2014). Katsontakannasta riippuu, kuinka asian tulkitsee. Virallisen tavoitteen ollessa uusiutuvien lisäämisessä, konventionaalisen tuotannon joustoa tulisi luonnollisesti lisätä. Ongelmaksi tässä muodostuu erityisesti tuotantotapojen säätörajoitteet ja säätövoiman tarve.

Ydinvoiman säätelyllä voitaisiin laskea tuotantoa huomattavasti, mutta ydinvoiman teknisen luonteen takia nopeat tuotantoreagoinnit eivät ole mahdollisia. Muutenkin, Saksan sulkiessa viimeisen ydinvoimalansa 2022 tämäkin vaihtoehto poistuu paletista Saksan osalta. Suomessa pidempiaikainen (useampia vuorokausia kestävä) tehonlasku olisi mahdollista tilanteen vaatiessa, mutta nykyisellään tarvetta ei ole esiintynyt (De Vos, 2015).

CHP-voimalaitoksilla ongelmaksi muodostuu lämmöntuotanto. Ajettaessa CHP-laitosta saadaan sähkön lisäksi lämpöenergiaa, jota käytetään joko teollisuusprosessissa tai hyödynnetään kaukolämpönä. Lämmöntarpeeseen vastatessa laitos tuottaa myös sähköä. Vaikka prosessi pysäytettäisiin, seisokista ja tasehallinnasta johtuvat kulut voivat olla suuremmat kuin negatiivisella hinnalla tuotetusta sähköstä aiheutuvat kustannukset (De Vos, 2015).

Lauhdevoimalaitoksia ja kaasuturbiineja ajetaan lähtökohtaisesti vain sähkönhinnan ollessa korkealla tasolla ja niitä käytetään vastaamaan kysyntäpiikkeihin.

3.4.1 Päästökauppa

Päästökauppamekanismilla pyritään pienentämään energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä. Päästökaupan piirissä oleville toimijoille on määritetty tietty hiilidioksidipäästökiintiö, jonka verran tuotannosta saa aiheutua päästöjä. Kiintiö riippuu tuotannon hiilidioksidi-intensiteetistä, joka on fossiilisella tuotannolla korkeinta. Jos tuotannosta syntyy kiintiötä enemmän päästöjä, joutuu tuottaja ostamaan päästöoikeuksia vastaavan määrän pörssistä

kattaakseen erotuksen. Päästöoikeuden lisähinta nostaa konventionaalisen tuotannon hintaa ja heikentää kilpailukykyä suhteessa uusiutuvaan tuotantoon. Päästökauppa ajaa uusiutuvan tuotannon kasvua ja vähentää merkittävästi energiantuotannon hiilijalanjälkeä, mutta on osaltaan myötävaikuttamassa volatiliteetin ja negatiivisten hintojen lisääntymiseen (TEM, 2021a)

Kuvassa 7. esitetystä päästöoikeuden hintakehityksestä nähdään kasvava trendi, joka on tehokkaasti ajamassa fossiilista tuotantoa kannattamattomaksi. Fossiiliselle tuotantolaitokselle jää vaihtoehdoksi sulkeminen tai tuotannon myyminen reservi- tai säätövoimaksi säätelyviranomaiselle. Suurin osa tuotannosta kuitenkin suljetaan, jolloin uusiutuvien suhteellinen osuus ja volatiliteetti kasvaa.



Kuva 7. Päästöoikeuksien hintakehitys 2011-2021 (YLE, 2021)

3.5 Tukimekanismit

EU on sitoutunut olemaan hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Suomen tavoite on 2035 ja Saksalla 2045. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi uusiutuvia energiamuotoja on tuettu ja tuetaan jatkossakin huomattavasti. Seuraavaksi perehdytään Saksan ja Suomen käyttämiin tukimekanismeihin ja niiden vaikutuksiin hinnanmuodostumisessa.

3.5.1 Kiinteä syöttötariffi

Kiinteässä syöttötariffijärjestelmässä uusiutuvalla energialla tuotetulle sähkölle maksetaan tuotantotukea niin sanottuna kiinteänä syöttötariffina. Järjestelmään osallistuville voimalaitoksille on taattu kiinteä tavoitehinta, jonka tuottaja saa tuotetusta energiasta riippumatta markkinasähkön hinnasta. Markkinasähkönhinnan ja tavoitehinnan erotus hyvitetään tuottajalle sääätelyviranomaisen toimesta. Summa kerätään käyttäjiltä sähkömaksun yhteydessä, joten alustavasti tariffi nostaa sähkön hintaa loppukäyttäjälle (Saksassa 6,405 snt/kWh vuonna 2019) (Bundesnetzagentur, 2021). Kiinteän syöttötariffin ansiosta voimalaitoksen rakentajan riski pienenee huomattavasti ja tekee uusiutuvaan energiaan sijoittamisen houkuttelevaksi.

Suomessa kiinteä syöttötariffijärjestelmä otettiin käyttöön vuonna 2011 ja suljettiin vuoden 2017 lopussa. Tällä ajanjaksolla järjestelmän avulla rakennettuja tuulivoimapuistoja on Suomessa 125 kpl (turbiineja n. 750 kpl), joiden tariffisopimusten pituus on 12 vuotta sopimuksen solmimisesta ja tavoitehinta 83,5 €/MWh (Motiva, 2021). Suomessa voimalaitokset eivät saa tariffista hyvitystä, jos sähkön hinta tippuu negatiiviseksi.

Saksassa vastaava kiinteä syöttötariffijärjestelmä otettiin käyttöön ensimmäisen kerran jo vuonna 2000 ja sitä pidetään tärkeimpänä ajurina Saksan energiamurrokselle. Järjestelmä suljettiin Suomen tavoin vuoden 2017 lopussa, mutta Suomesta poiketen sopimukset ovat 20 vuoden pituisia. Ensimmäiset tariffien avulla rakennetut voimalaitokset menettivät tukensa 1.1.2021 syöttösopimuksien loppuessa. (BMW, 2021).

Saksan järjestelmää on muokattu useaan kertaan, viimeisimpänä 2021 energialakia muutettaessa (Environmental Energy Act-EEG) uusiutuvien rakentamisen sääätelyä lisättiin huomattavasti verkon rajoitteiden takia. Saksan järjestelmän erikoisuutena Suomeen verrattuna on se, että syöttötariffijärjestelmään hyväksytty voimalaitoksen etuajo-oikeus syöttää sähköä verkkoon on lailla turvattu (BMW, 2021a).

3.5.2 Tarjouskilpailutariffi

Uusiutuvan energiantuotannon tukeminen ei ole loppunut vuoteen 2017, vaan tilalle on kehitetty tarjouskilpailulla järjestettävä tariffijärjestelmä. Tarjouskilpailussa sääätelyviranomaisen kilpailuttaa tietyn määrän uusiutuvan energian tuotantoa, josta tuottajat voivat tarjota vapaasti. Tarjouksessa tuottaja ilmoittaa matalimman preemion, jonka viranomaisen sitoutuu hyvittämään tuottajalle sähkön markkinahinnan ollessa alle kilpailutuksessa ilmoitetun viitehinnan. Kilpailutuksesta valitaan matalimman preemion tarjonneet voimalaitokset, jotka saavat jatkossa tukea tarjouksensa verran sähkön markkinahinnan päälle (Energiavirasto, 2021).

Esimerkkinä, Suomessa Energiavirasto järjesti 2018 tarjouskilpailun 1,4 TWh uudesta tuotannosta, jolla sitoutui tukemaan valittuja voimalaitoksia 12 vuoden ajan. Kilpailutus oli vapaa kaikille uusiutuvien tuottajille. Tarjouskilpailussa viitehintana oli 30 €/MWh ja tarjousten keskiarvoksi tuli 2,49 €/MWh. Korkein hyväksytty preemio oli 3,97 €/MWh. Kaikki tuettavat voimalaitokset olivat tuulivoimaloita niiden edullisuuden ansiosta (Energiavirasto, 2021).

Saksan markkinalla toimii vastaava järjestelmä, mutta tukitasot ovat huomattavasti korkeammat johtuen sähkömarkkinoiden rakenteellisista hintaeroista. Saksan tarjouskilpailut järjestetään erikseen jokaiselle tuotantotavalle ja myös maantieteellisesti eritellen, jotta saadaan ohjattua energiantuotantojakaumaa haluttuun suuntaan. Sopimuskausi on vanhan järjestelmän tapaan 20 v. Tarjouskilpailutetuissa sopimuksissa on aiemmasta poiketen sisäänrakennetut leikkurit, jotka vähentävät tasaisesti maksetun tuen määrää, jos uusiutuvien tuotannon rakentaminen kehittyy viranomaisen haluamalla tavalla (BMW, 2021a).

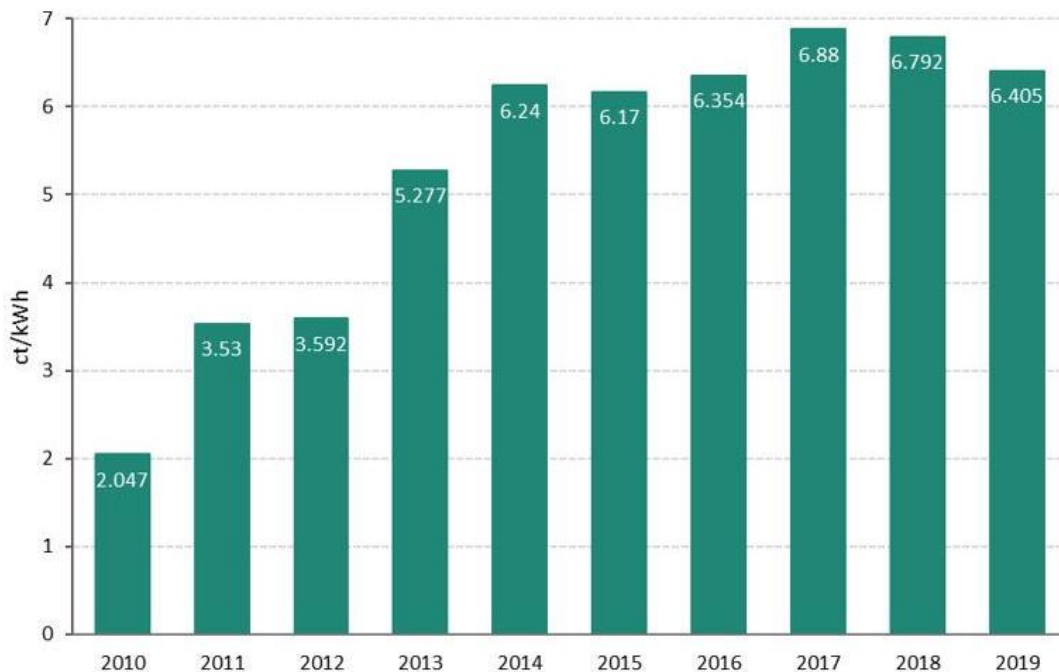
3.5.3 Syöttötariffien vaikutus

Kiinteällä syöttötariffilla on sekä positiiviset että negatiiviset vaikutuksensa sähkömarkkinalle. Tariffit ovat toimineet tarkoituksenmukaisesti lisäten merkittävästi uusiutuvan energiantuotannon rakentamista. Tuuli- ja aurinkovoiman rakentamisen lisääntyessä uusiutuvien rakentamiskulut ovat laskeneet tasaisesti kysynnän lisätessä kilpailua ja tarve tuille on pienentynyt. Sääätelyviranomaisen tavoitteena on päästä lopulta tilanteeseen, jossa kaikki rakennettava tuotanto on markkinaehtoista, eikä tukimekanismeja tarvita. Suomessa tähän tilanteeseen on jo pitkälti päästy, mutta Saksassa tilanne on haastavampi sähköverkon ollessa eri

kokoluokkaa ja uusiutuvien rakennustarpeen ollessa valtava Energiewenden (ydinvoiman ja fossiilisen tuotannon alasajo) ansiosta (Gerster, 2016).

Tukimekanismien lisätessä uusiutuvan energian tuotantoa, painaa lisääntyvä tuotanto samalla markkinasähkön hintaa ja fossiilisen energiantuotannon kannattavuutta alaspäin. Fossiilisen sähköntuotannon poistuessa markkinalta kannattamattomana, altistuu sähkömarkkina uusiutuvien luonteen vuoksi suuremmalle volatiliteteetille lisäen myös negatiivisten hintojen esiintymistodennäköisyyttä.

Kiinteän syöttötariffin taatessa tuottajalle takuuhinnan, maksajaksi joutuu säätelyviranomaisen, joka kerää lopulta erotuksen loppukäyttäjältä. Kiinteä syöttötariffi onkin jälkikäteen todettu todella hintavaksi yhteiskunnalle ja sähkön loppukäyttäjille (Brandstätt et.al, 2011). Tarjouskilpailutariffin kustannukset ovat Suomessa vain alle 5 % vastaavan syöttötariffin kuluista, joten kehitys on huomattava. Kuvassa 8. näkyy kuluttajien sähkölaskussa maksaman uusiutuvien tuen kehitys Saksassa. Vuonna 2020 tuki oli 6,756 snt/kWh, josta kertyi yhteensä 37,66 miljardin euron tukipotti (BMW, 2021b).



© BY SA 4.0

Kuva 8. Kuluttajan sähkölaskussa maksama uusiutuvien tariffituki Saksassa vuosina 2010–2019 (Clean Energy Wire, 2018)

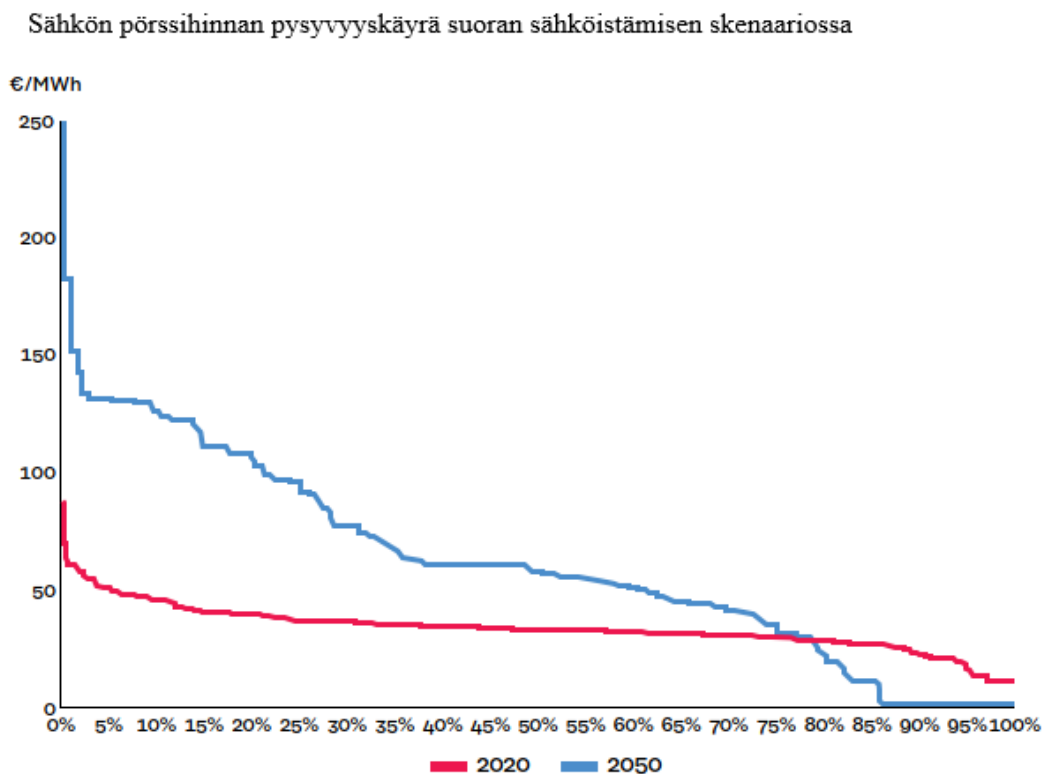
Saksan järjestelmässä tariffit aiheuttavat oman erityisongelmansa. Spot-hinnan painuessa negatiiviseksi, takuuhintaa maksetaan tuottajalle kuuteen tuntiin asti. Vasta hinnan pysyessä negatiivisena yli 6 h, tuki katkeaa. Vuoden 2021 EEG:n uudistuksessa raja pudotettiin 4 tuntiin negatiivisten hintojen yleistymisen takia. Kehityssuunta on oikea ja parantaa markkinoiden tehokkuutta poistaen vääristävän tukimekanismin. Tariffijärjestelmässä olevat uusiutuvien tuottajat joutuvat jatkossa suojaamaan tuotantonsa finanssimarkkinoilla muiden tuottajien tapaan menettäessään etunsa (CLEW, 2021b).

4 NEGATIIVISTEN HINTOJEN SEURAUKSET JA TULEVAISUUS

Nykyisellään negatiivisiin hintoihin reagointi aiheuttaa ylimääräistä työtä kaikille markkinaosapuolille ennakoitavuuden heikkouden takia. Seuraavaksi tutkitaan ilmiön aiheuttamia seurauksia, tulevaisuuden kehitystä ja mahdollisia ratkaisuja ongelmiin.

4.1 Ongelmat ja kehityssuunta

Suurin negatiivisten hintojen aiheuttama ongelma on tuottajien ja sähkön myyjien kärsimät tappiot, jotka vaikuttavat välillisesti koko järjestelmään. Vaikka nopeasti ajattelisi negatiivisten hintojen olevan suoraa voittoa kuluttajalle, tulee tuottajan tappioista aiheutuva lasku kuitenkin lopulta juuri kuluttajalle maksettavaksi volatiliteetin kasvattaessa tariffi- ja säätökustannuksia, sekä energia- ja investointitukia (Sitra, 2021). Suojausten tullessa entistä tärkeämmäksi, myös johdannaisten hinnat nousevat volatiliteetin mukana aiheuttaen lisäkustannuksia markkinaosapuolille.



Kuva 9. Pysyvyyskäyrä skenaariossa, jossa Suomi sähköistää energian loppukäytön vuoteen 2050 mennessä. (Sitra, 2021).

Kuvassa 9. on kuvattu sähkön pörssihinnan pysyvyyskäyrät nykytilanteessa ja vuonna 2050, jos Suomen loppuenergiankäytössä luovutaan fossiilisesta energiasta ja sähköistetään yhteiskunta Hiilineutraali Suomi 2035-tavoitteen mukaisesti. Pysyvyyskäyrä kuvastaa sitä osuutta, minkä osuuden vuoden tunneista sähkön hinta on kuvaajan käyrän osoittama tai korkeampi.

Tarkasteltaessa vuoden 2050 ennustekäyrää, nähdään hinnan painuvan nolnaan jopa noin 15 % ajan tuotantotunneista ja vaihteluvälin olevan huomattavasti nykyistä tilannetta suurempi. Hinnan painuminen nolnaan on teoreettinen minimi, mutta käytännössä hinta tulee painumaan negatiiviseksi asti, sillä mitään estoa siihen ei ole. Ääritilanteet yleistyvät Sitran mallinnuksen mukaan, mutta riittäväällä kysyntäjoustolla negatiiviset hinnat eivät tulevaisuudessa aiheuttaisi samanlaista ongelmaa kuin nykyään (Sitra, 2021).

Uusiutuvan energiantuotannon lisääntyessä tapahtuva järjestelmämuutos on viemässä sähkömarkkinaa tilanteeseen, jossa tuotannon alas säätämisen sijaan kehitetään ratkaisuja, mitä ylituotantotilanteessa edullisella sähköllä voidaan tehdä. Ongelmaksi tilanne muuttuu, jos ylituotanto ohjautuu käyttöön, joka ei ole tuottavaa vaan ilmastolle haitallista. Yhtenä esimerkkinä voidaan mainita kiistellyt kryptovaluutat, joiden käyttämään sähköön nähden saavutettu yhteiskunnallinen hyöty on suhteellisen matala, mutta taloudellinen hyöty mittava.

4.2 Investoinnit

Investointeja suunnitellessa epävarmuus on ongelma. Voimalaitoksen elinkaari lasketaan kymmenissä vuosissa ja kannattavuuslaskelmia tehtäessä otetaan huomioon eri skenaariot. Negatiivisen sähkönhinnan esiintymistiheys on yksi tekijä, jonka kehittymisellä on vaikutusta investointihalukkuuteen ja kannattavuuteen. Nykyisellä kehityssuunnalla muuten järkevän ja kannattavan investoinnin tuotto-odotus voi jäädä riittämättömäksi pitkällä aikavälillä negatiivisten hintojen ollessa tasaisesti kasvava ilmiö, jota ei saada kuriin. Tällöin investoinnit ohjautuvat luonnollisesti kannattavimpiin tuotantomuotoihin, jotka ovat tällä hetkellä tuuli- ja aurinkovoima. Näiden tuotannon lisääntyminen ilman riittävää säätövoimaa ja kysyntäjoustoa taas aiheuttaa lisää volatilitteettia ja negatiivisia hintoja markkinoille, luoden itseään ruokkivan kehän. Sääteleviranomaisen tehtäväksi jää hallita kehitystä ja pitää varamekanismit riittävänä.

Kuvatun ja kuvassa 9. esitetyn kaltainen kehityssuunta toisaalta kannustaa investoimaan tuotannon sijaan sähkön varastoinnin ja kysyntäjoustopon kehittämiseen, joihin ei muuten

investoitaisi riittävästi. Tällöin ylituotantotilanteessa sähkö saadaan hyötykäyttöön ja teoriassa tehokkailla markkinoilla hinta ei painuisi negatiiviseksi. Kysyntäjoustop toteuttamiseen on useita vaihtoehtoja, joiden investointivaihe on käynnistynyt 2020-luvun alussa ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi (Sitra, 2021). Käsitellään seuraavaksi vaihtoehtoja, joita ollaan kehittämässä kyseistä tulevaisuuden skenaariota varten.

Nykytekniikalla tärkein investointi on siirtoverkkojen kehittäminen. Rakennettaessa riittävän kapasiteetin siirtoverkot, aluehintojen väliset erot tasoittuvat ja aluehinta lähestyy systeemihintaa. Tällöin alueelliset ylituotantotilanteet, jotka painavat aluehinnan negatiiviseksi, saadaan ratkaistua siirtämällä sähköä alituotantoalueelle ja vastaavasti toisin päin. Suomessa viimeisin investointi siirtokapasiteettiin on Suomen ja Ruotsin välinen Aurora-siirtolinja, joka valmistuessaan 2025 lisää siirtokapasiteettia 800 MW Ruotsista Suomeen ja 900 MW Suomesta Ruotsiin (TEM, 2021b).

4.2.1 Akkuvarastointi

Akkuvarastointi ideana on vanha, mutta kapasiteettia ei ole saatu aiemmin kasvatettua riittävään mittakaavaan korkeiden kustannusten takia. Akkuvarastoinnilla tarkoitetaan akkukonaisuuksia, joiden kapasiteetti on riittävä varastoimaan pidempiaikaista ylituotantoa yksittäisten tuotantopiikkien tasaamisen lisäksi. Nykytilanteessa esimerkiksi Fortumilla on Järvenpään voimalaitoksella nimellisteholtaan 2 MW litiumioni akku, jolla voidaan tarjota sekunti- ja minuuttitasoista joustoa (Fortum, 2021). Tuntitason joustoa varten kokoluokan tulisi olla monikymmenkertainen. Nyt kehitystä on tukemassa akkuteknologian kehittyminen ja päästöjen leikkaustavoitteista johtuva aikaisemmin käsitelty volatilititeetin ja sähkönhinnan poikkeustilanteiden (negatiiviset hinnat) kasvu. Nykyinen valtioiden tuki- ja rahapolitiikka mahdollistaa osaltaan vielä heikon kannattavuuden projektien kehittämisen.

Teknisesti akkuvarastointi ei ole ongelmaton, mutta verrattuna nykyisiin pumppaamovoimalaitoksiin varastoitavaan energiaan tai power-to-x-tekniikoihin, hyötysuhde on hyvä. Pumppaamovoimalaitoksissa sähkö muunnetaan veden potentiaalienergiaksi mekaanisesti, jolloin häviöt ovat isot, mutta taloudellisesti pumppaamo voi toimia erittäin kannattavasti.

4.2.2 Sähköautojen akkuvarasto

Sähköautojen yleistyessä hajautettua akkuvarastoa ilmestyy huomattavasti lisää. Markkinaehtoisesti syntyvä mekanismi on säätelyviranomaisen kannalta edullinen ratkaisu, mutta toisaalta säätömahdollisuutta ei ole. Sähköautoihin ylituotantosähkön varastoiminen riittävässä mittakaavassa vaatii ison sähköautokannan lisäksi kuluttajien käytökseen vaikuttamista ja valistamista sähkön hinnanvaihtelusta ja sen tarjoamasta edusta. Tehokkailla markkinoilla mekanismin pitäisi kehittyä itsestään negatiivisten hintojen lisääntyessä, mutta käytännössä se tulee vaatimaan suunniteltuja toimenpiteitä. Keskitettyihin akkuvarastoihin verrattaessa hajautetun autoverkoston etuna on toisaalta verkon hallinta, jolloin verkko rasittuu tasaisesti ilman pullonkauloja (Virta, 2021).

4.2.3 Hiilidioksidin talteenotto

Päästöjen vähentämiseen ratkaisuksi kehitetty hiilidioksidin talteenotto ja varastointi CCS (Carbon Capture and Storage), sekä hyötykäyttö CCU (Carbon Capture and Utilisation) on energiaintensiivinen prosessi, jossa ilmakehässä oleva hiilidioksidi sidotaan tiiviiseen ja helposti käsiteltävään muotoon. Talteen otetulle hiilidioksidille on monia hyödyllisiä käyttötarkoituksia, kuten lannoite-, poltto- ja lisäainekäyttö. Käyttötapoja kehitetään jatkuvasti ja parhaimmillaan saavutettavat hyödyt ilmastolle ovat todella merkittäviä. Operoimalla uusiutuvasti tuotetulla sähköllä toimivaa CCU-laitteistoa, joka tuottaa jalostettua lopputuotetta, voidaan saavuttaa jopa ”negatiiviset päästöt”. Tuotteen tuotanto sitoo hiilidioksidia ilmakehästä ja lopputuotteen ollessa esimerkiksi rakennusmateriaali, hiilidioksidi sitoutuu käyttöön ja korvaa epäekologisemman materiaalivaihtoehdon (VTT, 2021).

Ongelmana on toiminnan kannattavuus ja jatkuvuus. Nykyteknologialla tuotanto on kallista ja valmiin tuotteen käyttöarvon lisäksi tuotto tulee päästökaupparakkinoilla, jonne tuottaja voi myydä vapautuvia päästöoikeuksia. Ollakseen kannattavaa, tuotannon on oltava jatkuvaa investointikulujen kattamiseksi ja päästöoikeuksien hinnan korkealla, eivätkä pelkät negatiiviset tunnit nykyisellään riitä tämän saavuttamiseksi (Scholz et al., 2016). Nykyisiä investointeja tehtäessä luotetaan paljolti nouseviin päästöoikeushintoihin ja sähköntuotannon muuttumisen uusiutuvaksi laskevan sähkönhintoja tulevaisuudessa. Optimitilanteessa talteenottolaitokset reagoisivat sähkön hinnan laskuun nostamalla tuotantoaan toimien samalla hyvänä kysyntäjoustona rajoittaen hinnan negatiiviseksi painumista.

Katsottaessa kuvassa 7. esitettävää päästöoikeuksien hintakehitystä, saadaan käsitys trendistä. Covid-19:sta aiheutunut notkahdus on kurottu kiinni ja tasainen kasvu on jatkunut sähkötuotannon muuttuessa vihreäksi. Ennustettavissa olevilla tulevaisuuden näkymillä talteenottoinvestointien kannattavuus on jatkuvassa kasvussa ja on hankala nähdä päästöoikeuksien hinnan painuvan laskuun.

4.2.4 Vetytuotanto

Ympäristöystävällinen vetytuotanto on hiilidioksidin talteenoton tavoin erittäin energiain-
tensiivinen prosessi, jossa vedestä valmistetaan elektrolyysiä hyödyntämällä vetyä. Vety on erinomainen energianvarastoiija ja vetyä voidaan muuntaa tarpeen mukaan takaisin energiaksi polttokennolla tai kaasuturbiinilla. Pakattavuutensa vuoksi raskaan liikenteen käytössä vety on houkutteleva vaihtoehto tulevaisuudessa ja Suomessa erityisesti Woikoski on ollut ajamassa vedyn polttoainekäyttöä eteenpäin (Woikoski, 2021). Suurimmat päästövähennykset ovat saavutettavissa raskaassa tieliikenteessä ja laivaliikenteessä, jotka ovat päästöintensiivisiä sektoreita.

Vedyn tuotannon ongelmana on pitkälti samat seikat kuin hiilidioksidin talteenotolla. Vedyn potentiaali fossiilisten polttoaineiden korvaajana on kuitenkin nykyään laajasti tunnistettu ja Suomen tulevaisuuden energiatalouden suunnitelmissa vetytalous on vahvasti esillä (Laurikko et.al., 2020). Kysynnän kasvaessa kannattavuus tulee paranemaan ja jälleen matala sähkönhinta parantaa tuotannon kannattavuutta.

5 YHTEENVETO

Ilmastonmuutos on ihmiskunnan suurin ongelma, joka on pakko ratkaista seuraavien vuosikymmenien aikana. Nyt tehtävillä päätöksillä on kauaskantoiset seuraukset ja energiantuotannon muuttamisella päästöttömäksi tullaan saavuttamaan suurimmat tulokset. Muutos ei kuitenkaan koskaan ole täysin ongelmaton.

Ilmastonmuutoksen vastaisen taistelun aiheuttama energiamarkkinan järjestelmämuutos vaikuttaa jo nykyisellään sähkön hintaan, ja tulevaisuudessa vaikutukset tulevat vain vahvistumaan. Volatiliteetin ja hinnanmuodostuksen ääripäiden lisääntyessä on mielenkiintoista nähdä, miten muutokseen tullaan reagoimaan. Saadaanko kysyntäjoustoa lisättyä riittävästi? Tuleeko varastoinnista taloudellisesti kannattavaa? Rakennetaanko ydinvoimaa sittenkin lisää tukemaan muutosta? Viranomaiset voivat vaikuttaa valittavaan linjaan ja kehitykseen. Annetaanko negatiivisten hintatuntien lisääntyä vapaasti vai pyritäänkö vaikuttamaan markkinatalouden lisäksi lainsäädännöllä ja investoinneilla?

Negatiivisista hinnoista puhuttaessa tärkeintä on muistaa sähkömarkkinan hinnanmuodostuksen olevan monimutkainen kokonaisuus, jonka tulee olla mahdollisimman tehokas. Epätehokkuuden maksajaksi päätyy lopulta sähkön loppukäyttäjä, eivätkä negatiiviset hintatunnit kerro tehokkaasta markkinasta. Niitä ei voida myöskään estää yksittäisen toimijan toimesta. Nykyisellään Suomessa negatiivisten hintojen aiheuttamat ongelmat loistavat poissaolollaan, mutta lisääntyvät väistämättä uusiutuvien tuotanto-osuuden noustessa Saksan tasolle. Suomella on kuitenkin mahdollisuus ottaa Saksasta opiksi ja välttää sudenkuopat. Kiinteistä syöttötariffeista on jo luovuttu ja uusiutuvan energiantuotannon rakentaminen on jo markkinaehtoista. Kysyntäjoustoon panostamalla tullaan pääsemään kaikkien markkinaosapuolten kannalta edullisimpaan ratkaisuun, jossa hiilineutraalius vuonna 2035 ei jää pelkäksi tavoitteeksi.

LÄHTEET

Agora Energiewende. 2021. ”Electricity price data and charts”. [verkkoaineisto]. [viitattu 18.12.2021]. Saatavissa: https://www.agora-energiewende.de/en/service/recent-electricity-data/chart/power_generation_price/27.12.2020/27.12.2020/today/

Aust, B., & Horsch, A. (2020). Negative market prices on power exchanges: Evidence and policy implications from Germany. *The Electricity Journal*, 33(3), 106716.

BMWi. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2021a. “State-imposed components of the electricity price” [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2021]. Saatavissa: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Artikel/Energy/electricity-price-components-state-imposed.html>

BMWi. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2021b. “EEG Surcharge will fall in 2021”. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2021]. Saatavissa: <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/EN/Newsletter/2020/10/Meldung/news.html>

Bundesnetzagentur. 2021. Day-ahead price data in Germany. [verkkoaineisto]. [viitattu 18.12.2021]. Saatavissa: <https://www.smard.de/en>

Brandstätt, C., Brunekreeft, G., & Jahnke, K. 2011. How to deal with negative power price spikes? —Flexible voluntary curtailment agreements for large-scale integration of wind. *Energy Policy*, 39(6), 3732–3740.

Clean Energy Wire. 2021a. “Germany’s energy consumption and power mix in charts”. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2021]. Saatavissa: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

CLEW, Clean Energy Wire. Kerstine, A. 2021b. What's new in Germany's Renewable Energy Act 2021. [verkkoaineisto]. [viitattu 18.11.2021]. Saatavissa: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/whats-new-germanys-renewable-energy-act-2021>

Clean Energy Wire. 2018. “Renewables set to fall by six percent in 2019”. [verkkoaineisto]. [viitattu 18.12.2021]. Saatavissa: <https://www.cleanenergywire.org/news/renewables-support-set-fall-six-percent-2019>

De Vos, K. 2015. Negative wholesale electricity prices in the German, French and Belgian day-ahead, intra-day and real-time markets. *The Electricity Journal*, 28(4), 36-50.

Energiavirasto. Preemiojärjestelmä. [verkkoaineisto]. [viitattu 16.11.2021]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/preemiojarjestelma>

Entso-E. 2021. Transparency platform, day-ahead prices. [verkkoaineisto]. [viitattu 8.12.2021]. Saatavissa: <https://transparency.entsoe.eu>

Eurelectric. Distribution Grids in Europe. Saatavissa: <https://cdn.eurelectric.org/media/5089/dso-facts-and-figures-11122020-compressed-2020-030-0721-01-e-h-57999D1D.pdf>

Fanone, E., Gamba, A., & Prokopczuk, M. 2013. The case of negative day-ahead electricity prices. *Energy Economics*, 35, 22-34.

Fingrid. Kantaverkkopalvelut. [verkkoaineisto]. [viitattu 18.11.2021]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/asiakkaille/kantaverkkopalvelut/>

Fortum. 2021. ”Pohjoismaiden suurin akku otettiin käyttöön Järvenpäässä”. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2021]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/media/2017/03/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kayttoon-jarvenpaassa>

Gerster, A. 2016. Negative price spikes at power markets: the role of energy policy. *Journal of Regulatory Economics*, 50(3), 271-289.

Götz, P., Henkel, J., Lenck, T., & Lenz, K. 2014. Negative strompreise: Ursachen und wirkungen. Eine Analyse der aktuellen Entwicklung–und ein Vorschlag für ein Flexibilitätsgesetz.

Laurikko, J., Ihonen, J., Kiviaho, J., Himanen, O., Weiss, R., Saarinen, V., Kärki, J. & Hurskainen, M. 2020. ”National Hydrogen Roadmap for Finland”. ISBN 978-952-457-657-4

Motiva. Syöttötariffi. [verkkoaineisto]. [viitattu 17.11.2021] Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuvan_energian_tuet/syottotariffi

Nord Pool, 2021a. Price calculation. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.11.2021]. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/trading/Day-ahead-trading/Price-calculation/>

Nord Pool, 2021b. Trading. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.11.2021]. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/trading/>

Partanen, J, Viljainen, S, Lassila, J, Honkapuro, S, Salovaara, K, Annala, S & Makkonen, M, 2020. Sähkömarkkinat -opintojakson opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Scholz, Y., Gils, H. C., & Pietzcker, R. C. 2017. Application of a high-detail energy system model to derive power sector characteristics at high wind and solar shares. Energy Economics, 64, 568-582.

Sitra, 2021. Sähköistämisen rooli Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. ISBN 978-952-347-238-9

TEM., Työ- ja Elinkeinoministeriö. Päästökauppa. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2021]. Saatavissa: <https://tem.fi/paastokauppa>

TEM., Työ- ja Elinkeinoministeriö. Aurora siirtolinja. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2021]. Saatavissa: <https://tem.fi/-/fingridille-lupa-400-kv-siirtolinjan-rakentamiseen-suomen-ja-ruotsin-valille>

Virta, 2021. Vehicle to Grid. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2021]. Saatavissa: <https://www.virta.global/vehicle-to-grid-v2g>

VTT, 2021. Hiilidioksidin talteenotto, käyttö ja varastointi (CCU ja CCS). [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2021.] Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/hiilidioksidin-talteenotto-kaytto-ja-varastointi-ccu-ja-ccs>

Woikoski, 2021. Vety. [Verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2021]. Saatavissa: <https://www.woikoski.fi/woikoski/vedyn-edellakavija.html>

YLE. Päästöoikeuden hinta. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2021] Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-11742983>

