



TUULISÄHKÖLLÄ KORVATUT PÄÄSTÖT SUOMESSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2023

Saku Repo

Työn tarkastaja: Apulaisprofessori (TkT) Ville Uusitalo

Työn ohjaaja: Tutkijatohtori (TkT) Anna Claudelin

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Ympäristötekniikka

Saku Repo

Tuulisähköllä korvatut päästöt Suomessa

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2023

35 sivua, 9 kuvaa ja 1 taulukko

Työn tarkastaja: Apulaisprofessori (TkT) Ville Uusitalo

Työn ohjaaja: Tutkijatohtori (TkT) Anna Claudelin

Avainsanat: tuulivoima, sähköntuotanto, kasvihuonekaasupäästöt, hiilijalanjälki, päästökerroin

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, mitä sähköntuotantomuotoja on käytetty Suomessa silloin vähän, kun tuulivoimalla on tuotettu sähköä paljon. Työssä kerrotaan tuulivoimasta sähköntuotantomuotona, minkä lisäksi tutustutaan myös muihin sähköntuotantomuotoihin. Eri sähköntuotantomuotojen hiilijalanjälkiä vertaillaan keskenään. Työssä laskeaan lisäksi karkeasti tuulivoimalla korvattujen päästöjen määrä omassa skenaariossa, jossa muita tuotantomuotoja korvataan tuulivoimalla. Tulosten pohjalta tehdään päätelmiä. Työssä käytetään avuksi tilastoja ja taulukkoja.

Tuloksissa tarkastellaan ja analysoidaan sähköntuotannon kuvaajia ja taulukoita ja esitellään eri sähköntuotantomuotojen hiilijalanjäljet. Työssä on pääasiassa käytetty tilastoja vuodelta 2021, koska nämä ovat olleet kattavasti saatavilla. Tuulivoima on sähköntuotantomuodoista vähäpäästöisin. Suurimmat päästöt sähköntuotantomäärää kohden tulevat polttoaineita käyttävän erillistuotannon lauhdevoimalaitoksista.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Environmental Technology

Saku Repo

Emissions compensated by wind power in Finland

Bachelor's thesis

2023

35 pages, 9 figures and 1 table

Examiner: Associate Professor (D.Sc.) Ville Uusitalo

Instructor: Post-doctoral Researcher (D.Sc.) Anna Claudelin

Keywords: wind power, electricity production, greenhouse gas emissions, carbon footprint, emission factor

The aim of this bachelor's thesis is to find out which electricity production methods have had little use when wind power has generated a lot of electricity. Wind power is explained as an electricity production method and other electricity production methods are also introduced. The carbon footprints of different production methods are compared to each other. In addition, the reduced emissions are roughly calculated in a scenario where wind power replaces other electricity production methods. Conclusions are made based on the results. Statistics and tables are utilized.

In the results, graphs and tables are analysed and the carbon footprints of different production methods are introduced. Statistics from year 2021 are mostly used since they have been comprehensively available online. The wind power has the least emissions of all electricity production methods and the most emissions come from separate production's condensing power plants.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

CHP Combined heat and power, lämmön ja sähkön yhteistuotanto

CO₂-ekv. Hiilidioksidiekvivalentti

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1. Johdanto.....	6
2. Suomen sähköntuotanto.....	8
2.1. Tuulivoima	9
2.2. Vesivoima	10
2.3. Ydinvoima.....	11
2.4. Lämmön ja sähkön yhteistuotanto ja lauhdevoima.....	12
2.5. Aurinkovoima	13
2.6. Trendit	13
3. Menetelmät	15
4. Tulokset ja analyysi	16
5. Keskustelu	24
6. Johtopäätökset	27
7. Yhteenveto.....	29
Lähteet	30

1. Johdanto

Tuulivoima on tulevaisuuden sähköntuotantomuoto. Uusia tuulivoimaloita rakennetaan jatkuvasti, ja niiden koot kasvavat entisestään. Tuulivoimaloita oli Suomessa 962 vuoden 2021 lopussa, ja niitä rakennettiin 141 kappaletta vuonna 2021 (Motiva a 2023). Tuulivoima on uusiutuvaa energiaa, ja sähköntuotantomarkkinat ovat mullistuneet uusiutuvan energian suosion kasvamisen myötä (Spodniak et al. 2021). Suomi on vahvasti mukana ilmastonmuutoksen torjumisessa, sillä sen tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja hiilen käyttö energiantuotantomuotona kielletään vuonna 2029 (Khosravi et al. 2020). Tuulivoima on merkittävä keino tavoitteiden saavuttamiseksi, koska se on vähäpäästöinen sähköntuotantomuoto. Tämän lisäksi esimerkiksi Ukrainan sodan takia Suomen on oltava omavaraisempi tulevaisuudessa. Tuulivoimalla pystytään lisäämään Suomen omavaraisuutta sähköntuotannossa.

Tässä työssä käsitellään tuulivoimaa sähköntuotantomuotona ja selvitetään, millainen suhde sillä on muihin sähköntuotantomuotoihin. Työssä vertaillaan tuulisähkön hiilijalanjälkeä muiden sähköntuotantomuotojen hiilijalanjälkiin. Tutkimuksessa selvitetään lähdekirjallisuuden ja tilastojen avulla mitä sähköntuotantomuotoja tuulivoima korvaa Suomessa silloin, kun tuulivoiman sähköntuotto on korkealla tasolla.

Alma Economicsin tutkimuksessa (2021, 24) arvioidaan sosioekonomisia hyötyjä tuulivoiman lisäämisestä Kreikassa, kun tuulivoima korvaa öljyllä ja maakaasulla tuotettua sähköä. Lisäksi Suomessa on tehty tutkimusta tuulivoiman vaikutuksesta hiilidioksidipäästöjen vähenemiseen (Holtinen & Tuhkanen 2004). Kyseisessä tutkimuksessa kerrotaan, että tuulivoima korvaa yleensä kalleinta sähköntuotantomuotoa, joka on pääasiassa hiileen perustuva sähköntuotantoa. Tiedetään siis, että tuulivoima korvaa ainakin fossiililla polttoaineilla tuotettua sähköä, mutta ei vielä tiedetä, korvaako se myös muita sähköntuotantomuotoja. Tuulivoiman lisäämisen kannattavuutta Ruotsissa pohditaan Sehlbergin tutkimuksessa (2021, 51, 58). Tutkimuksessa ei päästä selkeään lopputulokseen kannattavuudesta, ja

suuren tuulivoimakapasiteetin lisäämistä Ruotsissa pidetään kyseenalaisena, koska tuulivoiman lisäämisen sosioekonominen arvo voi olla negatiivinen. Sosioekonomisella arvolla voidaan arvioida, onko jokin asia taloudellisesti sekä ihmisten ja yhteiskunnan hyvinvoinnin kannalta kannattavaa. Murajan kirjassa (2017, 68) kerrotaan, että tulevaisuudessa tuulivoiman lisäyksen suhteellinen hyöty pienenee kalliimpien tuotantomuotojen vähentyessä. Tässä työssä pohditaan tarkemmin tuulivoiman lisäämisen vaikutusta Suomen sähköjärjestelmään.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, mitä sähköntuotantomuotoja tuulivoima korvaa Suomessa silloin, kun tuulivoiman sähköntuotto on korkealla tasolla. Lisäksi tavoitteena on selvittää, millainen vaikutus tuulivoiman lisäämisellä olisi päästöihin Suomessa.

Tämän kandidaatintyön tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Mitkä sähköntuotantomuodot vähenevät Suomessa tuulivoiman lisääntyessä?
- Kuinka suuri vaikutus tuulivoiman lisäämisellä on päästöjen vähenemiseen?

Työssä keskitytään vertailemaan tuulivoiman hiilijalanjälkeä muiden sähköntuotantomuotojen hiilijalanjälkiin ja päästöihin sekä siihen, miten tuulivoiman lisääntyminen vaikuttaa Suomen sähköjärjestelmään. Tutkielmassa kerrotaan ensin Suomen sähköntuotannosta ja tuulivoimasta yleisesti sekä mahdollisista sähköntuotantomuodoista, joita tuulivoimalla voitaisiin korvata. Tuloksissa selvitetään, mitä sähköntuotantomuotoja tuulivoima on korvannut Suomessa, ja verrataan niitä tuulivoimaan. Lisäksi lasketaan päästöt, jotka ovat säästyneet käyttämällä tuulivoimaa. Johtopäätöksissä pohditaan vastauksia tutkimuskysymyksiin.

2. Suomen sähköntuotanto

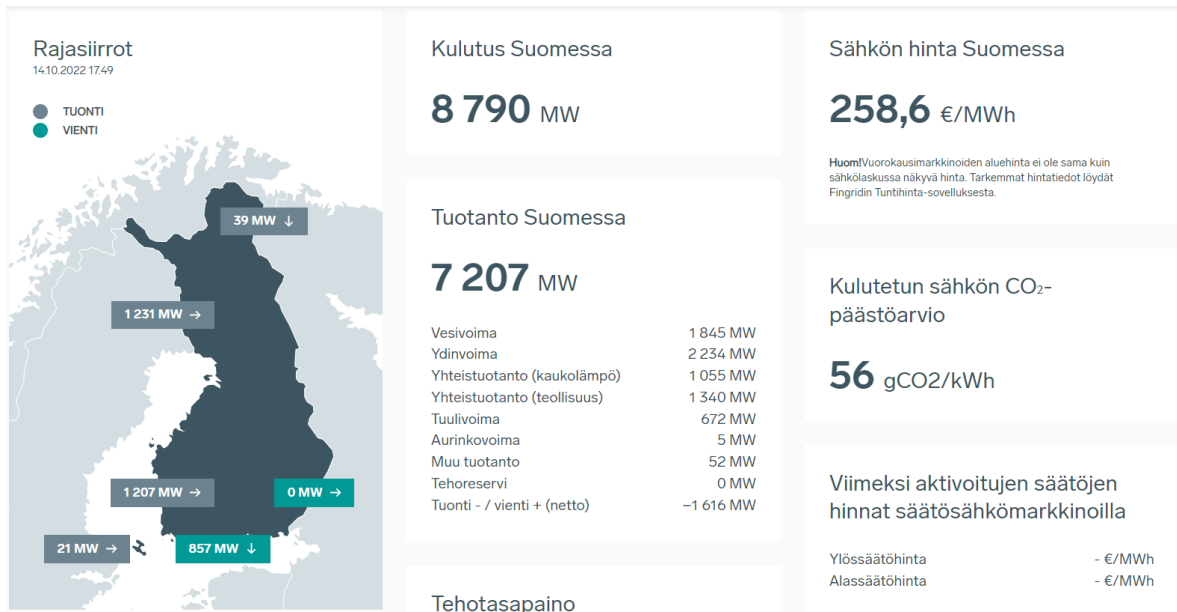
Suomen sähköntuotanto perustuu nykypäivänä pääasiassa uusiutuvien energialähteiden käyttöön, ja fossiilisia polttoaineita käytetään sähköntuotannossa vain vähän. Sen sijaan lämmitykseen käytetään yhä suurimmaksi osaksi fossiilisia polttoaineita. Suomessa tuotetusta sähköstä 86 % oli fossiilivapaata ja 53 % uusiutuvilla energialähteillä tuotettua vuonna 2021. Sähköä tuotettiin Suomessa 69,3 TWh ja käytettiin 87,0 TWh. (Tilastokeskus a 2022.) Kuvasta 1 nähdään, miten sähkönhankinta jakautui Suomessa vuonna 2021.



Kuva 1. Suomen sähkönhankinta vuonna 2021 (Motiva a 2023).

Sähkön nettotuonti kasvoi vuodesta 2020 vuoteen 2021, koska talous alkoi elpymään koronakriisin jäljiltä, jolloin sähkön kulutus kasvoi (Tilastokeskus c 2022). Sähkön nettotuonti kuitenkin putosi rajusti vuonna 2022, sillä sähkön tuonti Venäjältä lopetettiin kokonaan Venäjälle asetettujen pakotteiden takia. Esimerkiksi lokakuussa 2022 tuontisähkön osuus

kulutuksesta oli vain 9,2 %. Ukrainan sodan alettua käytännössä vain Ruotsista tuodaan sähköä Suomeen ja lisäksi Norjasta hyvin vähän. Viroon viedään paljon sähköä Suomesta ja Ruotsiin myös vähän. (Energiateollisuus a 2022.) Kuvasta 2 nähdään, miten paljon sähköä tuotiin Suomeen ja vietiin Suomesta 14.10.2022.



Kuva 2. Sähkön rajasiirrot Suomessa 14.10.2022 (Fingrid).

2.1. Tuulivoima

Tuulivoima on uusiutuvan energian tuotantomuoto, jonka energialähde tuuli on päästötöntä ja sitä on käytännössä rajattomasti. Tuulivoiman päästöt syntyvät tuulivoimaloiden rakentamisesta, ylläpidosta ja kuljettamisesta, mutta ne saadaan kompensoitua jo vuoden käytön jälkeen. Tuulivoimalan materiaaleista pystytään kierrättämään 80 %. Tuulivoima on todella edullista sähköntuotantoa silloin kun tuulee sopivasti, ja maalla sijaitseva tuulivoimala onkin kaikista edullisin sähköntuottokeino. Optimaalinen tuulen nopeus on 12–14 m/s. Tuulen nopeuden ollessa alle 3,5 m/s tai yli 25 m/s tuulivoimaloita ei voi käyttää, minkä lisäksi tuulivoimalat eivät toimi kunnolla kovilla pakkasilla. (Vattenfall a, b.) Tuulivoimaloiden kapasiteetti kasvaa joka vuosi Suomessa 1000 MW (Helsingin Sanomat 2022). Tämä vastaa sähköntuotokapasiteetiltaan yhtä ydinvoimalaa. Tuulivoimalla tuotettiin sähköä 8,1 TWh vuonna 2021, mikä vastaa noin 12 % Suomen sähköntuotannosta (Motiva a 2023).

Tuulienergia perustuu siihen, että tuulen liike-energia pyörittää tuulivoimalan lapoja ja akselia, ja akselin liike-energia muutetaan sähköksi konehuoneen generaattorissa (Tuulivoimayhdistys). Tuulivoimaloita on sekä maalla että merellä. Merituulivoimaloilla suunnitellaan tuotettavan sähkön lisäksi fossiilivapaata vetyä tulevaisuudessa. Suurimmat voimalat Suomessa ovat teholtaan 5 MW, ja tulevaisuudessa etenkin merituulivoimaloiden tehon voidaan odottaa olevan 7 MW. Talvikuukausina tuulee enemmän kuin kesäkuukausina Suomessa, joten tuulisähköstä 70 % tuotetaan kuuden kylmimmän kuukauden aikana. (Vattenfall a.) Tuulivoiman etuja on myös, että tuulivoimalat vievät vain vähän maapinta-alaa. Tuulivoimalat on hyvä sijoittaa lähelle kuluttajia sähkön siirtämisestä johtuvien tehohäviöiden takia (Tuulivoimayhdistys).

Tuulivoimalla on kuitenkin myös haittoja. Tuulivoimalat aiheuttavat melua ja voivat olla näköhaittana ympäristön asukkaille. Lisäksi tuulivoimalat voivat muuttaa eläinten elinympäristöä. Etenkin linnuille ja lepakoille aiheutuu haittaa törmäyskuolemien myötä. Haitat ovat kuitenkin paljon pienemmät esimerkiksi fossiiliperäisiin sähköntuotantomuotoihin verrattaessa. Tuulivoima on riippuvainen sääolosuhteista, joten sillä ei voi tuottaa aina sähköä kaikkialla. Kuitenkin aina tuulee jossain, joten laajalla sähköverkolla voidaan saada vakaa sähköntuotanto tuulivoimalla. (Brown 2017, 126.)

2.2. Vesivoima

Vesivoima on Pohjoismaiden ja Suomen tärkein uusiutuvan energian tuotantomuoto. Toisin kuin tuulivoima ja aurinkovoima, vesivoima ei ole riippuvainen sääolosuhteista, joten sillä voidaan tasapainottaa aurinkovoiman ja tuulivoiman epäsuotuisten olosuhteiden jättämää tuotantorakoa. (Fortum a 2015.) Vesivoima on ensisijainen ja kustannustehokkain sähköntuotannon säätövoima Suomessa. Vesivoimalla pystytään reagoimaan nopeasti äkillisiin muutoksiin sähköverkon tasapainossa ja vastaamaan kulutukseen minuuttitasolla. (ÅF-Consult 2019.) Sähköverkon taajuutta voidaan säädellä sopivaksi vesivoimalla, mikä on tärkeää, jotta verkon sähkölaitteet eivät vaurioidu (Päkkilä 2021, 3).

Vesivoima perustuu siihen, että veden korkeuseron potentiaalienergia muuntuu liike-energiaksi, kun veden annetaan virrata. Veden virtauksen liike-energia pyörittää turbiinia, joka puolestaan pyörittää generaattoria, jonka avulla liike-energia muunnetaan sähköksi. (Fortum a 2015.)

Vesivoimalla on hyötyjä ja haittoja. Vedenpinnan korkeuden säätelyllä voidaan esimerkiksi ehkäistä tulvariskejä ja parantaa vedenhankintaa (ÅF-Consult 2019, 21). Padot kuitenkin aiheuttavat eläimille haittaa, esimerkiksi estäen vaelluskalojen kulkureitin ja ne myös vaikuttavat vesistöjen virkistyskäyttöön (Fortum a 2015).

2.3. Ydinvoima

Ydinvoima on Suomen suurin sähköntuotantomuoto. Sen osuus oli 33 %, eli noin kolmasosa Suomen sähköntuotannosta vuonna 2021 (Tilastokeskus a 2022). Olkiluoto 3:n rakentamisen jälkeen ydinvoiman osuus Suomessa nousi jo 55 %:iin vuoden 2023 kesäkuussa (Energiateollisuus c 2023). Ydinvoima perustuu fissioon, jossa uraaniatomit halkeavat ketjureaktiossa vapauttaen lämpöenergiaa, joka muunnetaan sähköksi. Ydinvoima on todella energiatehokas sähkön tuotantomuoto, koska ydinpolttoaineen energiasisältö on suuri. Ydinvoima luokitellaan päästöttömäksi sähköntuotantomuodoksi tuulivoiman, vesivoiman ja aurinkovoiman kanssa (Helsingin Sanomat 2022). Vaikka ydinvoimasta ei aiheudu suoria hiilidioksidipäästöjä, vaarallista ydinjätettä kuitenkin muodostuu. Ydinjäte pitää sijoittaa 500 metrin syvyyteen (Päkkilä 2021, 13). Ydinvoimaa varjostaa ydinonnettomuusriski, ja seuraukset ovat valtavat onnettomuuden sattuessa. Vaikka ydinvoima on lisääntynyt Suomessa, on se maailmanlaajuisesti vähentynyt. Tähän on vaikuttanut ydinonnettomuudet sekä taloudellisten arvioiden virheellisyys ydinvoimasta. Tuuli- ja aurinkovoimalla on paljon edullisempaa tuottaa korvaavaa sähköä kuin uusilla ydinvoimaloilla. (Brown 2017, 77.) Esimerkiksi Saksa on luopumassa ydinvoimasta kokonaan ja korvaa sen pääasiassa uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla (Yle a 2023). Suomessa ydinvoimalakapasiteettia on kuitenkin lisätty. Viimeisimpänä lisäyksenä on Olkiluoto 3, joka alkoi tuottaa sähköä säännöllisesti huhtikuussa 2023 (Yle b 2023).

Ydinvoimalla ei ole hyvä säätökyky, koska ydinvoimaloita pyritään ajamaan tasaisella ja mahdollisimman suurella teholla niin, että uraani saadaan käytettyä optimaalisesti ja turvalisesti (Päkkilä 2021, 13). Säätäminen on kuitenkin teknisesti mahdollista, ja uusia ydinvoimaloita suunniteltaessa se yritetään ottaa huomioon (ÅF-Consult 2019, 17).

2.4. Lämmön ja sähkön yhteistuotanto ja lauhdevoima

Suomessa on vielä nykyäänkin monia hiilivoimalaitoksia. Hiilivoimaloista suurin osa on lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksia eli CHP-laitoksia (Combined heat and power). Nämä laitokset ovat merkittävä sähköntuotantomuoto Suomelle, sillä niillä tuotetun sähkön osuus kulutuksesta oli 22 % vuonna 2021 (Motiva a 2023). CHP-laitoksilla on korkea hyötysuhde, jopa yli 90 %, ja ne ovat täten todella energiatehokkaita (Höyrytys). Niitä käytetään pääasiassa kaukolämmön tuottamiseen ja sähköä tuotetaan oheistuotteena. CHP-laitoksia käytetään yleensä siis silloin, kun lämmöntarve on suuri, jolloin usein myös sähköntarve on suuri (Energiamaaailma). CHP-tuotantokapasiteetti vähentyy tulevaisuudessa alhaisen sähkönhinnan vuoksi ja niitä korvataan esimerkiksi lämpöpumpuilla (ÅF-Consult 2019).

Hiilivoimalaitoksissa käytetään nykyään nimestä huolimatta nykyään kivihiilen lisäksi paljon myös kotimaisia biopolttoaineita (Energiateollisuus e). Monet Suomen hiilivoimalaitokset luopuvat kivihiilen käytöstä lähivuosina (Hiilitieto). Hiilivoimaloiden käynnistykseen menee vuorokausi, joten niitä ei saa käyttöön heti yllättävän sähköntarpeen sattuessa. Suomen hiilivoimalaitoksista vain suurin, Meri-Porin hiilivoimalaitos käyttää polttoaineena pelkästään kivihiiiltä ja tuottaa ainoastaan sähköä. Laitosta käytetään varavoimalaitoksena. Hiilen kieltäminen energiantuotannossa vuonna 2029 aiheuttaa muutostoimia laitokselle. (Fortum b.)

Yhteistuotannon lisäksi sähköä tuotetaan erillistuotannolla. Erillistuotantoa on pääasiassa lauhdevoimalaitokset. Lauhdevoima tarkoittaa sähkön tuottamista lämpövoimalaitoksessa ilman lämmön tuottamista. Sillä tuotettiin 4 % Suomen sähköstä vuonna 2021. Myös

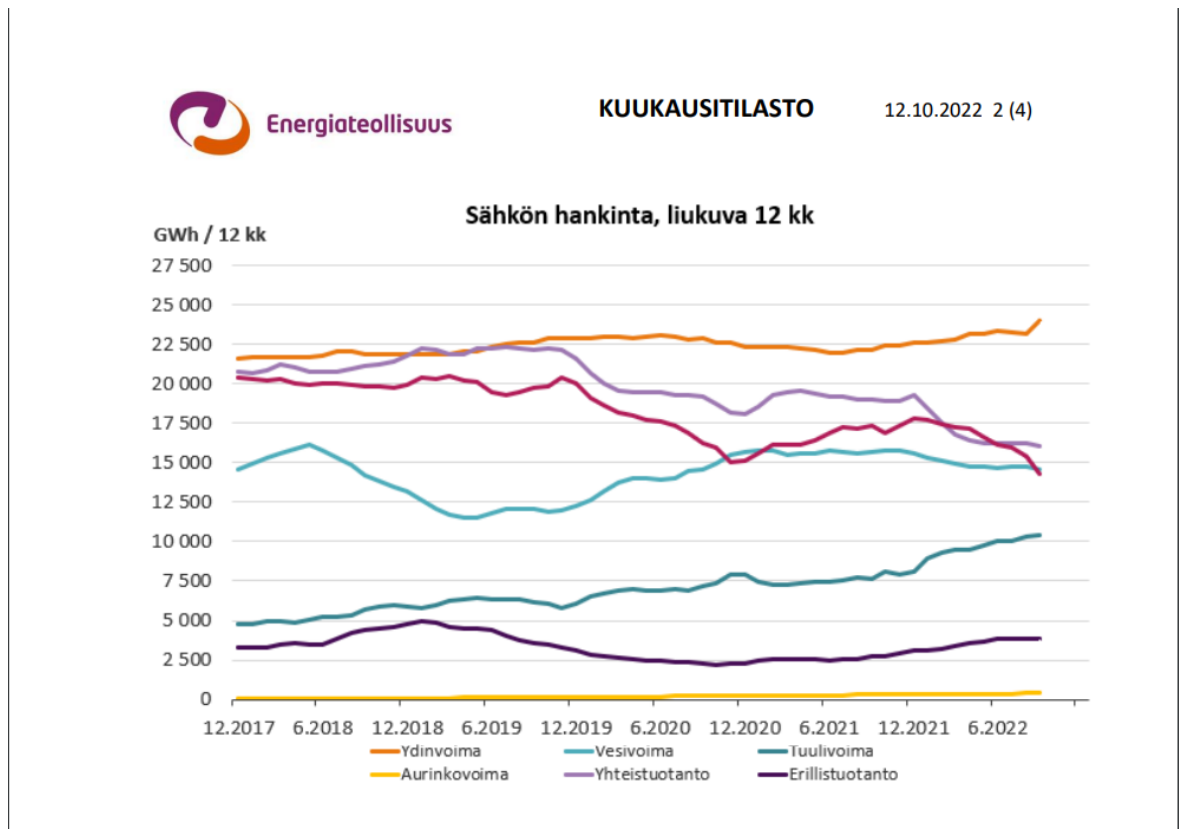
lauhdevoimalaitoksissa pääpolttoaineena on kivihiili, mutta myös monia muita polttoaineita käytetään, kuten biopolttoaineita, turvetta, maakaasua ja öljyä. Lauhdevoima on helposti säädettävä sähköntuotantomuoto, ja sen tuotanto voidaan ajoittaa tarkasti sähkön kysynnän mukaan. (Energiategollisuus.) Lauhdevoimalla on nykyään kannattamatonta tuottaa sähköä muuten kuin tilanteissa, jolloin tarvitaan nopeasti sähköä fossiilisten polttoaineiden verotuksen ja päästökaupan takia (Päkkilä 2021, 16). Erillistuotantoa ovat lisäksi maakaasulaitokset. Ne ovat hiilivoimaloita pienempiä yksiköitä ja saadaan käyntiin minuuteissa, jos sähköä ei ole tarjolla riittävästi. Maakaasulaitokset ovat tämän takia tärkeitä esimerkiksi talvipakkasilla ja yllättävissä tilanteissa, kun sähköntarve on suuri. Vaikka maakaasu on fossiilinen polttoaine, on se kuitenkin paljon kivihiiltä ympäristöystävällisempi (Fortum c).

2.5. Aurinkovoima

Aurinkovoima on Suomessa vielä todella pieni sähköntuotantomuoto. Sen osuus oli vain 0,4 % sähkön kokonaistuotannosta Suomessa vuonna 2021. Aurinkovoiman sähköverkkoon kapasiteetti kasvaa kuitenkin vuosittain paljon. Verkkoon liitetyn aurinkosähkön pientuotannon kapasiteetti lähes kaksinkertaistui vuodesta 2019 vuoteen 2021. (Energiavirasto 2022.) Aurinkovoima perustuu siihen, että auringon säteilemä fotoni irrottaa aurinkopaneelissa olevia elektroneja, jättäen aukkoja. Kun elektronit kulkeutuvat peittämään syntyneitä aukkoja, syntyy sähkövirtaa. Aurinkoenergia on tuulivoiman tavoin itsessään päästötöntä, ja siitä aiheutuvat päästöt tulevat vain resurssien hankkimisesta, paneelien rakentamisesta ja asentamisesta. Aurinkovoiman tuottavuus riippuu Auringon valon määrästä, joten kesällä aurinkovoimalla saadaan luonnollisesti tuotettua enemmän sähköä kuin talvella. (Vattenfall c.) Aurinkovoima on tuulivoiman kanssa edullista, nopeasti kasvavaa ja sillä on valtava kehityspotentiaali (Brown 2017).

2.6. Trendit

Uusiutuvan energian osuus kasvaa jatkuvasti Suomen sähköntuotannossa ja fossiilisilla polttoaineilla tuotetun energian osuus vähenee. Kuvasta 3 nähdään kunkin tuotantomuodon trendi sähkön hankinnassa vuosina 2017–2022.



Kuva 3. Sähkön hankinta 2017–2022 (Energiateollisuus a 2022).

Kuvasta nähdään, että ydinvoima on säilyttänyt paikkansa Suomen tärkeimpänä sähköntuotantomuotona ja sen tuotanto kasvaa hitaasti. Vesivoiman tuotanto on vaihdellut, mutta kapasiteetti ei ole kasvanut vuodesta 2017. Vaihtelu johtuu mahdollisesti sateisuuden vaihtelusta. Tuulivoima on jatkuvassa kasvussa ja kasvaa nopeimmin. Sillä on tuotettu sähköä kaksi kertaa enemmän vuonna 2022 kuin 2017. Erillistuotannon, eli pääasiassa lauhdevoimalaitosten sähkönhankinta on pysynyt suurin piirtein samana, mutta sen osuus sähköntuotannosta laskee. Yhteistuotanto on laskussa. Aurinkovoima kasvaa prosentuaalisesti nopeasti, mutta sen osuus on vielä niin pieni Suomen sähköntuotannossa, että aurinkovoima ei vaikuta vielä merkittävästi Suomen sähköjärjestelmässä. Kuvassa näkyvä punainen viiva on sähkön nettotuonti. Suomen lisättyä omavaraisuuttaan sähköntuotannossa nettotuonti on laskenut.

3. Menetelmät

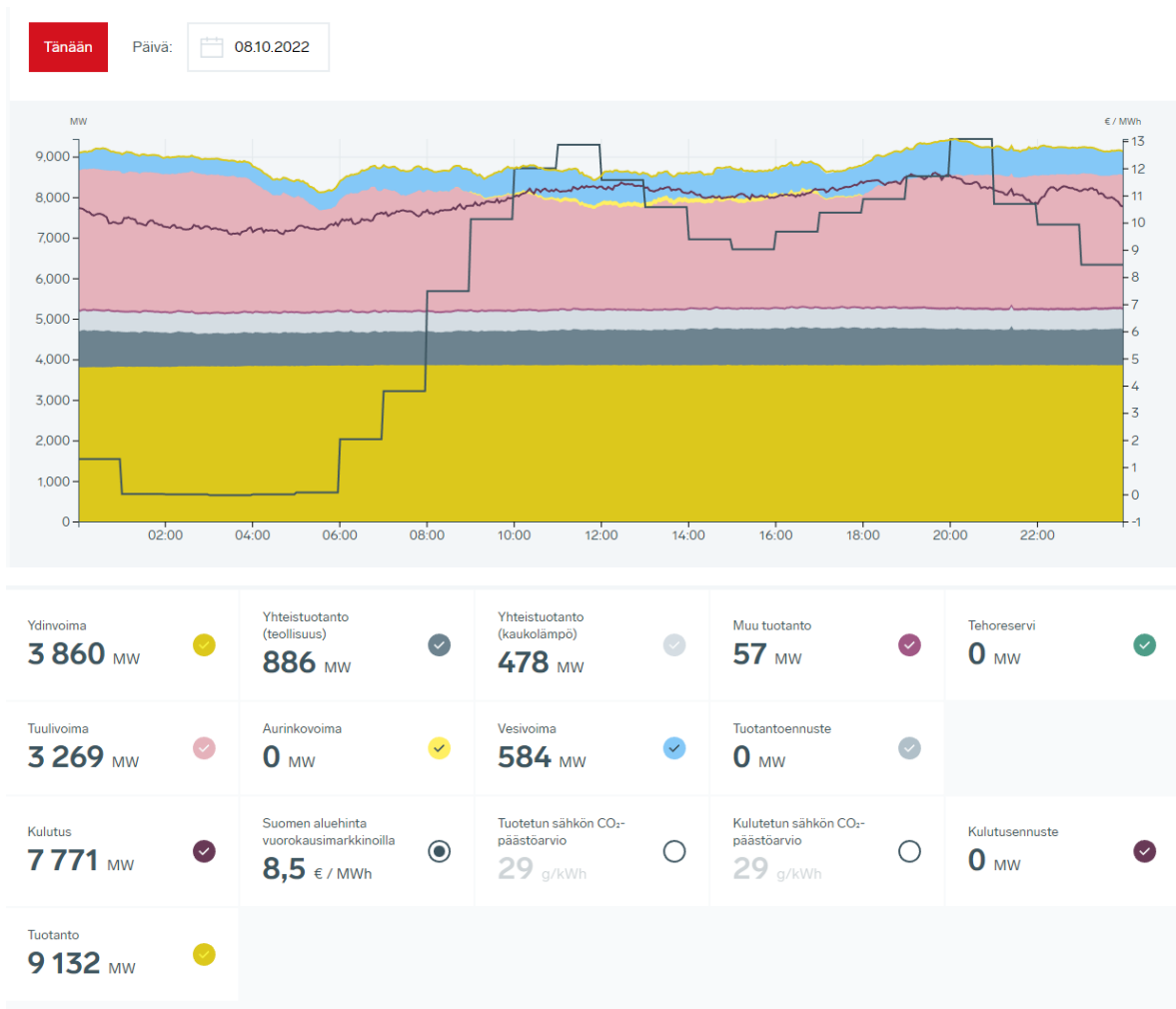
Tuulisähköllä korvattuja päästöjä selvitetään kokoamalla ensin eri sähköntuotantomuotojen hiilijalanjäljet ja tekemällä niistä kuvaaja. Tiedonlähteenä käytetään tieteellisiä töitä sekä asiantuntijayritysten artikkeleita. Aluksi tarkastellaan Fingridin kuvaajia, joista nähdään päiväkohtaisesti sähkön hankinta tuotantomuodoittain. Kuvaajista voidaan karkeasti päätellä, mitä tuotantomuotoja tuulisähkö korvaa Suomessa. Tämän jälkeen tehdään skenaario, jossa näitä tuotantomuotoja korvataan tuulivoimalla ja lasketaan karkeasti säästyneet päästöt. Lisäksi pohditaan tuulisähkön lisäämisen vaikutusta Suomen sähköjärjestelmään.

Säästyneiden päästöjen laskennassa tarkasteluväliksi valitaan vuosi. Oletetaan skenaario, jossa tuulivoimaa lisätään Suomessa 10 % ja korvattavia tuotantomuotoja vähennetään yhteensä saman verran. Tilastot on otettu vuodelta 2021, koska tuosta vuodesta on saatavilla tarvittavat tilastot sähköntuotantomääristä. Päästökertoimet pitää muuttaa oikeaan yksikköön, kertomalla taulukoissa oleva t/TJ arvo 3,6:lla saadaan t/GWh eli g/kWh . Lasketaan kullekin korvattavalle energialähteelle vähennettävän tuotantomäärän osuus, jonka kautta saadaan tuotantomäärät vähennyksen jälkeen. Tämän jälkeen saadaan säästyneet päästöt energialähteittäin vähentämällä alkuperäisistä päästöistä skenaarion päästöt. Päästöt saadaan laskettua kertomalla tuotantomäärä päästökertoimella. Säästyneet päästöt energialähteittäin kootaan kuvaajaan. Säästyneet päästöt yhteensä lasketaan lisäämällä korvattavien energialähteiden päästöt yhteen ja vähentämällä tuulivoimakapasiteetin lisäyksestä kasvaneet päästöt.

4. Tulokset ja analyysi

Kuvissa 4, 5 ja 6 nähdään kuvaajia sähkön hankinnasta Suomessa päiväkohtaisesti. Kuvaajien eri värit on selitetty kuvassa 4. Tarkastellaan kuvaajien avulla, mitä tuotantomuotoja tuulivoima korvaa.

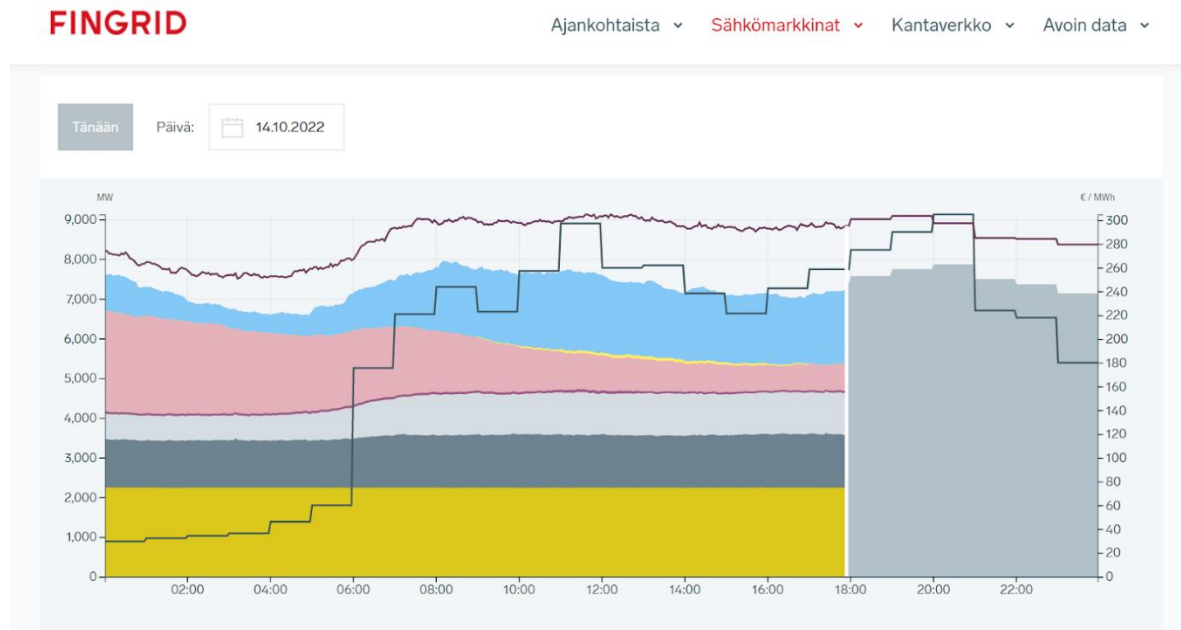
Kuvan 4 perusteella voisi luulla, että tuulivoima korvaa vesivoimaa, koska kyseisenä päivänä on tuullut paljon, ja tuulivoiman osuus on suuri, kun taas vesivoiman osuus on pieni. Aurinkovoiman osuus on niin pieni, että on vaikea tulkita kuvaajasta, onko tuulivoima korvannut sitä, mutta voisi luulla, että tuulivoima korvaa aurinkovoimaa silloin, kun aurinko ei paista ja tuulee paljon. Aurinkovoimaa tuotetaan kuitenkin aina niin paljon kuin mahdollista, joten tuulivoima ei välttämättä korvaa sitä ollenkaan. Lauhdevoiman, joka on kuvassa muuta tuotantoa, osuus on myös niin pieni, että kuvan perusteella on vaikea sanoa, onko tuulivoima korvannut sitä. Muissa tuotantomuodoissa ei näy selvää vaihtelua tuotannossa. Lisäksi muuna muuna päivänä vesivoiman osuus on ollut suuri, kun on tuullut vähän.



Kuva 4. Sähkön hankinta Suomessa 08.10.2022 (Fingrid).

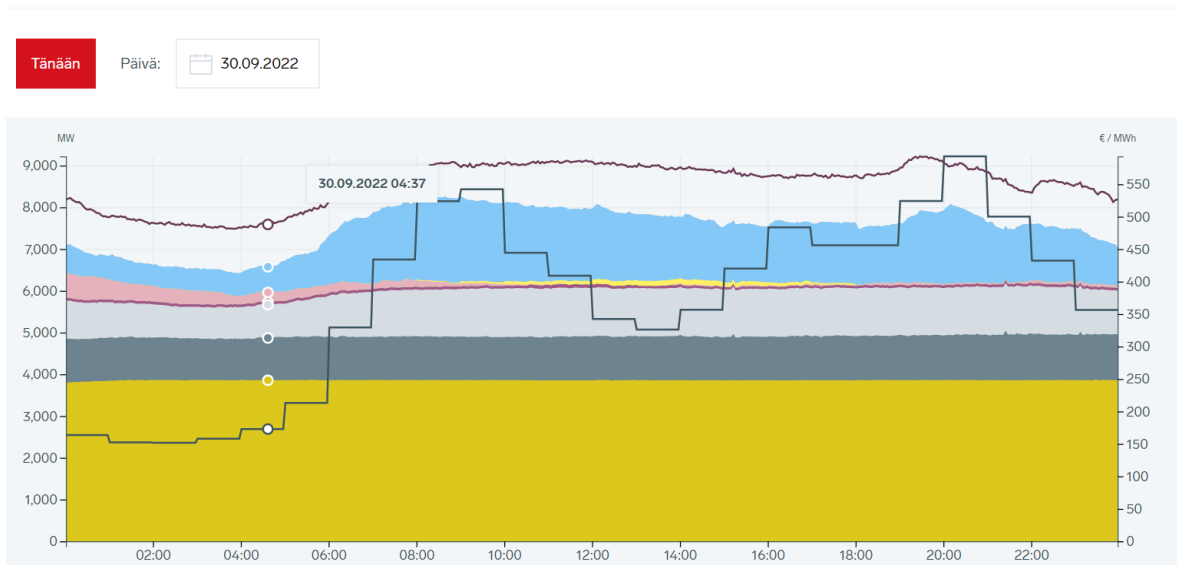
Kuvasta 5 nähdään, että vesivoimaa on tuotettu vähemmän silloin kun tuulivoimaa on tuotettu paljon, ja enemmän silloin kun tuulivoimaa tuotettu vähemmän. Tuuli- ja vesivoiman tuotannot riippuvat siis päivätasolla toisistaan. Tuuli- ja vesivoiman tuotannot eivät kuitenkaan korvaa vesivoimaa merkittävästi vuositasolla, sillä vesivoiman tuotantoa säädetään käyttötarpeen mukaan, ja sillä tuotetaan sähköä loppujen lopuksi vuodessa tietty määrä. Kuitenkin tuulisena päivänä tuulivoima säästää vesivoimaa päiville, jolloin vesivoimalle on suuri tarve, jolloin vesivoima korvaa muita sähköntuotantomuotoja. Yöllä sähköä on tuotettu selvästi vähemmän kuin päivällä, koska käyttötarve on ollut pienempi. Kuvaajasta nähdään lisäksi selvästi, että yhteistuotannon sähköntuotanto on noussut, kun tuuli on luultavasti tyyntynyt ja tuulivoimalla on iltaa kohden tuotettu vähemmän sähköä. Kuitenkaan tämän perusteella ei voi tehdä johtopäätöstä, että tuulivoima korvaa yhteistuotantoa, koska CHP-laitosten tuotantoa lisätään

silloin, kun lämmitystarve on suurentunut. Lisäksi nousu tuotannossa voi johtua pelkästään myös lisääntyneestä sähkönkulutuksesta aamun koittaessa.



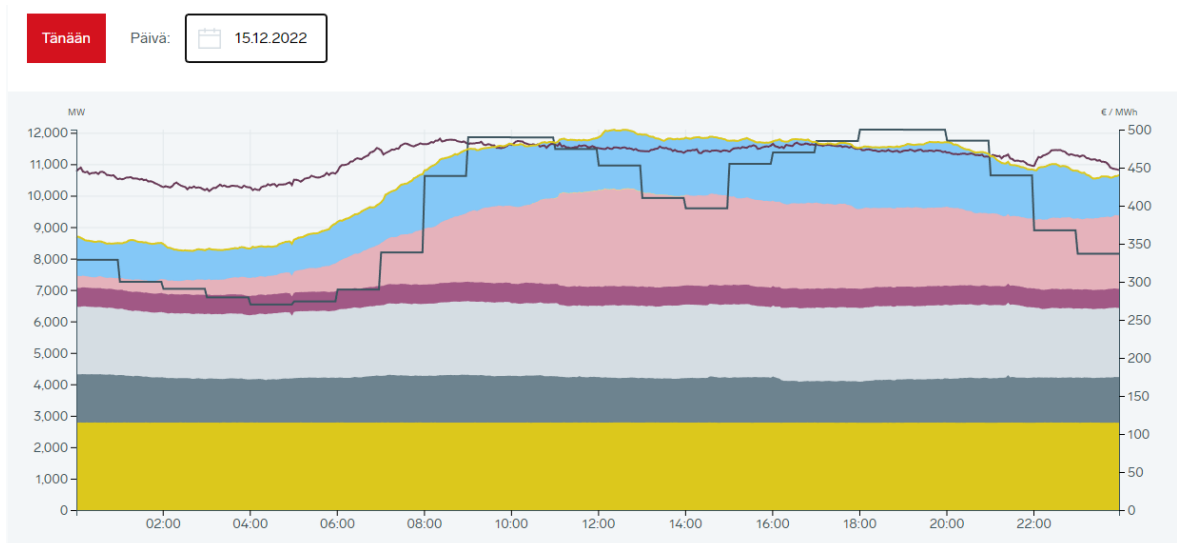
Kuva 5. Sähkön hankinta Suomessa 14.10.2022 (Fingrid).

Kuvassa 6 nähdään päivä, jolloin on todennäköisesti ollut tyyntä ja tuulivoimalla ei ole tuotettu juuri ollenkaan sähköä. Ydinvoiman tuotantomäärä vaihtelee päivätasolla, mutta ei juuri ollenkaan tuntitasolla. Tässäkin kuvassa yhteistuotantoa on ollut vähemmän, kun on tuullut enemmän, mutta se on luultavasti sattumaa. Kuvasta nähdään hyvin, että vesivoiman tuotantoa säädetään kulutuksen mukaan.



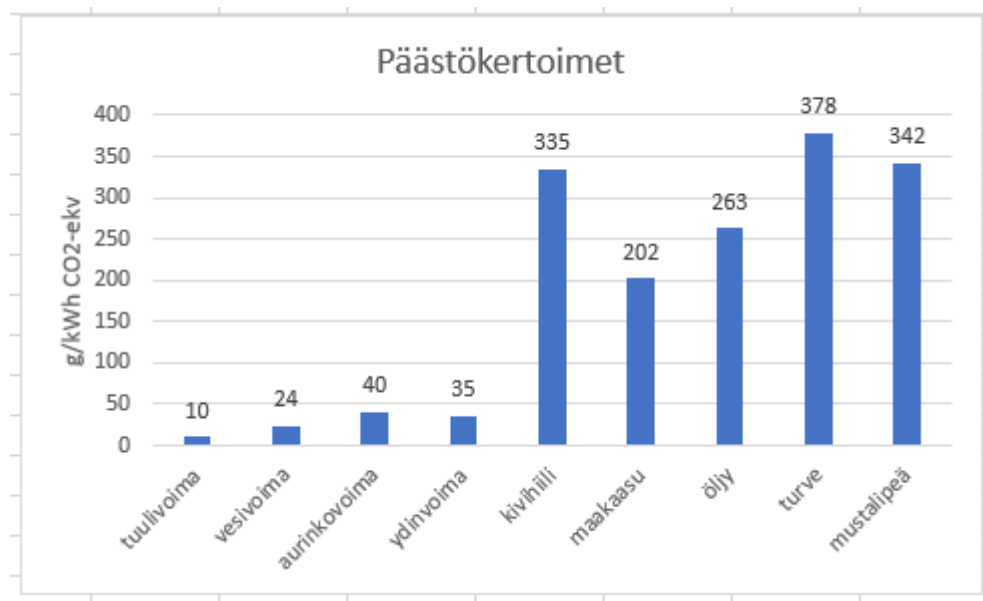
Kuva 6. Sähkön hankinta Suomessa 30.09.2022 (Fingrid).

Kuvassa 7 näkyy Suomen sähköntuotantoa joulukuisena päivänä. Huomataan, että erillistuotannon ja yhteistuotannon osuudet ovat selvästi isompia kuin syksyn kuvaajissa. Tämä johtuu erittäin todennäköisesti siitä, että kyseessä on ollut kylmä päivä, jolloin sähköä ja on täytynyt tuottaa polttoaineita käyttävillä laitoksilla enemmän, jotta vastataan korkeaan sähkön kulutukseen.



Kuva 7. Sähkön hankinta Suomessa 15.12.2022 (Fingrid)

Kuvasta 8 nähdään eri tuotantomuotojen ja polttoaineiden hiilijalanjäljet. Tuuli-, vesi-, aurinko- ja ydinvoiman päästökertoimissa on huomioitu myös rakentamisesta huollosta ja kuljetuksesta aiheutuneet päästöt, mutta polttoaineissa ei, joten diagrammi ei ole täysin vertailukelpoinen. Muitakin kuin kuvassa olevia polttoaineita käytetään Suomen sähköntuotannossa, mutta selkeyden vuoksi kaikkia ei ole otettu tarkasteluun mukaan. Polttoaineita käytetään pääasiassa lauhdevoimalaitoksissa, joiden kokonaishiilijalanjälki on 820 g/kWh. Yhteistuotannon sähköntuotannossa kaukolämmössä hiilijalanjälki on 230 g/kWh ja teollisuudessa 60 g/kWh. (Tilastokeskus b.) Maakaasulaitosten hiilijalanjälki on noin 400 g/kWh (Holtinen & Tuhkanen 2004). Päästökertoimet vaihtelevat jonkin verran lähteen mukaan. Etenkin ydinvoiman päästökerroin voi olla mainittua pienempi, ja on vesivoimalaitoksia, joiden hiilijalanjälki on alle 10 g/kWh (Li et al. 2017). Teknologian ja ympäristöystävällisempien materiaalien kehittyessä hiilijalanjäljet putoavat.



Kuva 8. Tuotantomuotojen ja polttoaineiden päästökertoimet (Vattenfall a, Christensen 2020, Tuominen 2019, Tilastokeskus d)

Kuvasta voidaan todeta, että tuulivoimalla on alhaisin päästökerroin, jonka jälkeen tulevat muut päästöttömät energialähteet, vesi- aurinko- ja ydinvoima. Sekä uusiutuvilla biopolttoaineilla että fossiilisilla polttoaineilla on edellisiä selvästi suurempi päästökerroin. Näistä

maakaasu on kuvaajan mukaan vähäpäästöisin. Turpeella on kuvan polttoaineista suurin päästökerroin ja se uusiutuu todella hitaasti, eikä sitä luokitella Suomessa uusiutuvien energialähteiden joukkoon, vaan jopa fossiiliseksi polttoaineeksi (Turveinfo 2020, Yle c 2012). Biopolttoaineiden päästökertoimissa on otettava huomioon, että biopolttoaineissa suuri osa on biopohjaista hiiltä, joten esimerkiksi mustalipeän korkea päästökerroin taulukossa ei kerro koko totuutta. Bioenergian ei lasketa lisäävän hiilidioksidipäästöjä, koska biopolttoaineiden poltossa vapautunut hiili sitoutuu lopulta biomassaan (Motiva c 2023). Taulukosta 1 nähdään eri tuotantomuodoilla ja polttoaineilla tuotetun sähkön tuotantomäärät gigawattitunteina vuonna 2021.

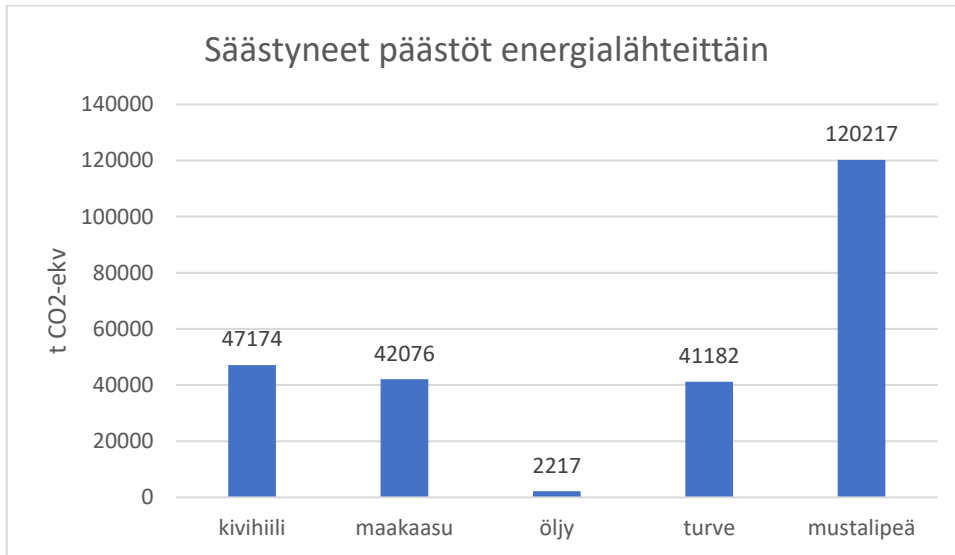
Taulukko 1. Sähkön tuotantomäärät energialähteittäin Suomessa 2021 (Lukujen lähde: Tilastokeskus b).

Sähkön tuotanto 2021	
	GWh
tuulivoima	8180
vesivoima	15624
aurinkovoima	298
ydinvoima	22646
kivihiili	2523
maakaasu	3732
öljy	151
turpe	1952
mustalipeä	6298

Taulukosta huomataan, että mustalipeällä on tuotettu polttoaineista eniten sähköä. Myös maakaasua käytetään kohtuullisesti. Öljyä käytetään nykyään suhteellisen vähän sähkön tuotannossa.

Kuvassa 9 nähdään säästyneet päästöt tonneina energialähteittäin skenaariossa, jossa niitä on korvattu lisäämällä tuulivoimaa 10 %. Energialähteiksi on valittu Suomessa eniten käytetyt polttoaineet, koska näitä käytetään erillistuotannossa, jota tuulivoima korvaa. Puhtaiden

tuotantomuotojen korvauksesta saatava hyöty olisi niin pieni, ettei niitä ole otettu tähän skenaarioon mukaan.



Kuva 9. Säästöt päästöissä energialähteittäin skenaariossa.

Kuvasta nähdään, että tuulivoimalla korvaaminen vaikuttaisi eniten mustalipeään, koska sillä tuotetaan suhteellisen paljon sähköä, minkä lisäksi sen päästökerroin on yksi suurimmista. Lisäksi kivihiilen, maakaasun ja turpeen korvaamisesta säästyneet päästöt ovat merkittävät. Öljyn korvaamisesta säästyneet päästöt ovat minimaaliset muihin verrattuna, koska öljyä käytetään paljon vähemmän. Kun säästyneet päästöt energialähteittäin lasketaan yhteen ja vähennetään tuulivoimakapasiteetin lisäyksestä aiheutuneet päästöt, saadaan säästyneiksi päästöiksi vuodessa 245 000 tonnia CO₂-ekv.

Skenaariossa on huomioitu vain maatuulivoimalat, ja merituulivoimaloiden päästökerroin on hieman maatuulivoimaloita korkeampi, tyypillisesti noin 16 g/kWh (Christensen 2020). Tämä johtuu siitä, että putkien vetäminen merenpohjaa pitkin ja tuulivoimaloiden vaikeampi huolto aiheuttavat lisäpäästöjä. Tämän vuoksi skenaariossa säästyneet päästöt ovat liian isoja, mutta ei merkittävästi. Lisäksi polttoaineita käytetään myös lämmön ja sähkön yhteistuotannossa, jota tuulisähkö ei juuri korvaa. Kuitenkin tarkastelusta on jätetty pois joitain

biopolttoaineita, joita käytetään myös erillistuotannossa, joten säästyneet päästöt olisivat siltä kannalta isommat kuin mitä skenaariossa on laskettu. On myös epäselvää, väheneekö mustalipeän poltto todellisuudessa, kun sitä yritetään korvata tuulivoimalla, koska se on kiinteä osa sellun valmistusprosessia. Lisäksi kompleksisuutta lisää bioenergian luokittelu hiilidioksidineutraaliksi.

5. Keskustelu

Tuulivoimalla korvatuista päästöistä on tehty tutkimuksia aiemmin. Tuomas Muraja kertoo kirjassaan (2017, 68), että tuulivoima laskee sähkön hintaa markkinoilla, koska tuulivoimalla ei ole muuttuvia kustannuksia, kuten polttoainetta, ja siten sillä tuotettua sähköä kannattaa tarjota jopa ilmaiseksi. Tuulivoima korvaa ensin sitä tuotantomuotoa markkinoilla, jolla on korkeimmat muuttuvat kustannukset, joka on pääasiassa fossiilisten polttoaineiden sähköntuotantoa. Muraja kertoo, että talvella kallista huipputuotantoa on enemmän kuin muina vuodenaikoina, joten tuulivoiman vaikutus sähkön hintaan ja päästöihin on tällöin suurinta. Lisäksi Muraja mainitsee, että tuulivoima syrjäyttää sitä vähemmän kalliin muuttuvien kustannusten tuotantoa, mitä enemmän sitä tulee markkinoille.

Tuulivoiman lisäämisen vaikutuksesta on kerrottu Alma Economicsin tutkimuksessa (2021, 8, 24). Tutkimuksessa arvioidaan kuvitteellisen Kreikassa lisätyn tuulivoimakapasiteetin sosioekonomisia hyötyjä. Tuulivoimalat ovat kelluvia merituulivoimaloita, ja tuulipuiston kapasiteetiksi on asetettu 455 MW. Tuulivoima korvaa lauhdevoimaa öljystä ja maakaasusta. Tutkimuksessa kerrotaan, että globaalilla tasolla tuulivoiman lisääminen on kannattavaa puhtaamman ympäristön puolesta riippumatta kustannuksista, mutta kansallisella tasolla investointi ei ole välttämättä kannattavaa taloudellisesti. Lisäksi tutkimuksessa mainitaan tuulivoimaloiden näköhaitat ja melu turisteille ja asukkaille.

Myös Sehlbergin tutkimuksessa (2021, 51, 58) tutkittiin tuulivoiman lisäämisen kannattavuutta sosioekonomisen arvon avulla, mutta tutkimuksessa ei päästy selkeään lopputulokseen, kannattaako tuulivoimakapasiteettia lisätä suuresti Ruotsissa. Tutkimuksessa todetaan, että tuulivoimakapasiteetin suuri lisääminen on kannattavaa, jos tuulivoima korvaa tuotantoa, joka aiheuttaa suuria kasvihuonekaasupäästöjä ja on kallista, kuten öljyllä tuotettua sähköä. Jos tällaista korvattavaa tuotantoa ei juuri ole, hyödyt pienenevät ja tuulivoimakapasiteetin suuri lisääminen tulee tutkimuksen mukaan kyseenalaistaa.

Näkökulmaan, että tuulivoimaa ei kannattaisi lisätä suurta määrää Vattenfall vastaa, että tuulivoimakapasiteettia voi lisätä huomattavasti niin, ettei säätövoimakapasiteettia tarvitse lisätä (Vattenfall a). Tuulivoima on lisäksi edullista ja päästötöntä, joten Suomen asiantuntijaorganisaatioiden mukaan suuri tuulivoimakapasiteetin lisääminen on kannattavaa. Tuulivoiman kapasiteettia lisäämällä vähennetään kasvihuonekaasupäästöjä epäsuorasti 213 000 tonnia CO₂-ekvivalenttia joka vuosi. Fingrid teki vuonna 2021 tuulivoiman liittymissopimuksia, jotka aiheuttaisivat toteutuessaan 438 000 tonnin vähennykset hiilidioksidipäästöihin vuodessa. (Helsingin Sanomat 2022.) Nämä vastaavat suuruusluokaltaan tämän työn skenaariossa säästyneitä päästöjä.

Fossiiliset polttoaineet ovat joustavia, ja niitä on käytetty tarpeen mukaan vastaamaan kulu- tukseen, jolloin sähköä on saanut koko ajan kohtuulliseen hintaan. Vaikka fossiiliset poltto- aineet ovat helppoa energiaa suuren energiatiheydensä vuoksi, ovat niiden ympäristöhaitat merkittävät, minkä lisäksi niitä on vain rajallisesti. Tämän vuoksi uusiutuvien ja puhtaiden energiamuotojen kehittäminen ja kapasiteetin lisääminen on tärkeää. Keinoja täytyy keksiä joustavuuden saavuttamiseksi muillakin kuin fossiilisilla polttoaineilla. (ÅF-Consult 2019.) Uusiutuvien sähköntuotantomuotojen kustannukset halpenevat koko ajan uusiutuvilla tu- tantomuodoilla teknologian kehittyessä ja ne ovat jo fossiilista tuotantoa pienemmät useilla markkina-alueilla (Brown 2017, 14). Nykyään vielä tarvitaan lauhdevoimaa, koska sillä voi- daan vastata nopeasti vaihtelevaan sähkön kysyntään ja säähän, mutta ympäristöystävälli- sempiä ratkaisuja täytyy kehittää ja lopulta siirtyä kokonaan pois fossiilisista polttoaineista. Lisäksi biopolttoaineiden päästökertoimetkin ovat vielä melko isoja, joten niitäkin pitää saada ympäristöystävällisemmiksi. Viime vuosina lauhdevoiman ympäristökuormitusta on- kin vähennetty merkittävästi ja sama trendi jatkuu (Energiateollisuus b).

Ukrainan sota on vaikuttanut tuulisähkön rooliin Suomessa, sillä Suomen lopettaessa sähkön tuonnin Venäjältä, tuulivoiman merkitys on kasvanut entisestään. Suomen energia on perus- tunut osittain tuontienergiaan Venäjältä sekä sähkön että muidenkin energiamuotojen, kuten maakaasun muodossa. (Energiateollisuus e 2022.) Suomen on Venäjälle asetettujen pakot- teiden kautta oltava entistä omavaraisempi, koska ei tiedetä, kuinka pitkään sota kestää Uk- rainassa ja voidaanko Venäjän kanssa olla enää yhteistyössä tulevaisuudessa. Sähkön

nettotuonti Suomeen onkin romahtanut 94,5 % edellisvuodesta ja sen osuus kulutuksesta on enää 1,3 % vuonna 2023 (Energiateollisuus c 2023). Herää myös kysymys, onko Suomella riittävästi maakaasuvarastoja, koska kun maakaasuputket ovat kiinni Venäjältä, kylminä talvipäivinä vesivoiman ja ydinvoiman tuotannot eivät saata riittää ja tarvitaan nopeaa sähköntuotantoa.

6. Johtopäätökset

Tuulivoiman, aurinkovoiman sekä ydinvoiman lisääntyessä Suomen sähköjärjestelmän tuotantorakenne muuttuu. Nämä ovat heikosti säädettäviä tuotantomuotoja, joten säädettävän tuotannon määrä vähenee Suomessa. (ÅF-Consult 2019, 34.) Esimerkiksi vesivoiman osuus on vähentynyt edellisvuodesta (Energiateollisuus c 2023). Tuulisähkön lisäys tekee Suomesta omavaraisemman sähkönhankinnan suhteen. Toisaalta Suomen on pystyttävä hankkimaan sähköä nopeasti vaihtelevan kulutuksen mukaan sekä häiriötilanteissa, joten tuulivoimalla ei voi korvata kaikkea muuta sähköntuotantoa, kuten lauhdevoimaa, koska aina ei tuule tarpeeksi. Lisäksi lämpöä on saatava tuotettua, mikä onnistuu helpoiten CHP-laitoksissa, joten tuulivoima ei voi korvata kaikkea CHP-tuotantoa. Mutta kuten aiemmin on mainittu, lämmöntuotannossa CHP-laitoksia tullaan korvaamaan muilla ratkaisulla kuten lämpöpumpuilla, joten CHP-laitosten poistuessa käytöstä tuulivoima voi tulla korvaamaan niiden sähköntuotantoa. Myöskään ydinvoiman varaan ei kannata liikaa turvautua, sillä laitoksia on vain muutama, joten ongelman ilmetessä tulee suuri häiriötilanne sähköjärjestelmään.

Tällä hetkellä tuulivoima korvaa lauhdevoimaa, mutta ei yhteistuotantoa. Tuulivoima mahdollisesti korvaa kuitenkin poistuvaa yhteistuotantoa tulevaisuudessa. Siitä, korvaako tuulivoima loppujen lopuksi ydinvoimaa ja vesivoimaa voidaan olla montaa mieltä, mutta ainakin hetkellistä korvausta tapahtuu. Aurinkovoimaa tuotetaan aina maksimimäärä, joten sitä tuulivoima ei korvaa. Tuulivoiman lisäämisellä saatava päästöjen vähenemisen vaikutus on sitä pienempi, mitä enemmän uusiutuvaa ja päästötöntä energiaa tuotannossa on ja mitä vähemmän fossiiliperäistä sähköntuotantoa on. Uusiutuvia ja päästöttömiä sähköntuotantomuotoja korvatessa tuulivoimalla päästövähennykset eivät olisi siis kovinkaan merkittävät, joten ensisijaisesti erillistuotantoa kannattaa korvata niin paljon kuin mahdollista. Silti, vaikka tuulivoima korvaisi vain muita päästöttömiä tuotantomuotoja, päästöt vähenisivät joka tapauksessa, koska tuulivoima on vähäpäästöisin sähköntuotantomuoto.

Suomen sähköntuotannon määrä tulee luultavasti nousemaan tulevaisuudessa sähkönkulutuksen kasvamisen myötä, joten tuulivoima ei välttämättä edes korvaa mitään sähköntuotantoa. Vihreän sähkön tuottaminen vaatii miljardiluokan investoinnit kantaverkkoon, joten tuulivoimaloiden kapasiteetin lisääminen ei ole aivan halpaa (Helsingin Sanomat 2022). Pitkällä tähtäimellä sijoitus maksaa kuitenkin itsensä takaisin, koska nykyään, ajan edetessä on yhä kannattavampaa sijoittaa uusiutuvaan energiaan sekä talouden että päästöjen kannalta.

Kuvasta 9 nähtiin, että säästöt päästöissä tulisivat pääasiassa erillistuotannossa käytettävien polttoaineiden korvauksesta, vaikka niiden tuotantomäärät eivät ole kovin isoja. Aurinkovoiman korvauksesta säästyneet päästöt olisivat niin pienet, ettei sen tuotantoa kannata korvata tuulivoimalla. Vesivoimalla on hieman isompi päästökerroin kuin tuulivoimalla, mutta sitä käytetään tärkeänä säätövoimana, joten senkään tuotantokapasiteettia ei ole järkevää korvata tuulivoimalla. Ydinvoiman korvaaminen tuulivoimalla voi olla mahdollista, koska Saksassakin on päästy eroon ydinvoimasta (Yle b), mutta päästöjen kannalta tuulivoima on vain vähän ydinvoimaa puhtaampi. Kuitenkin radioaktiivinen ydinjäte ja ydinvoimalan riskit on pidettävä mielessä. Ydinvoima on tällä hetkellä kuitenkin todella merkittävä osa Suomen sähköntuotantoa, etenkin uuden Olkiluoto 3:n lisäyksen myötä. Ydinvoima ei ole lisäksi säästä riippuvainen, kun taas tuulivoima on, joten ydinvoiman korvaamisella on haasteensa.

Ilmaston kannalta tuulivoiman lisäämisellä on suuri positiivinen vaikutus. Suomessa suhteellisen pienelläkin kapasiteetin lisäämisellä voidaan saavuttaa satojentuhansien tonnien hiilidioksidipäästövähennykset. Jos globaalissa mittakaavassa tehdään sama, ilmastonmuutosta saadaan rajoitettua huomattavasti.

Ei ole aivan yksiselitteistä, mitä tuotantomuotoja tuulivoima korvaa, eikä säästyneitä päästöjä pysty näillä tiedoilla laskemaan täysin tarkkaan. Jotta asian saisi paremmin selvitettyä, tulisi tehdä tarkempaa analyysia, mutta sen laatiminen korvatuista päästöistä vaatisi enemmän taustatietoja ja aikaa.

7. Yhteenveto

Tuulivoima korvaa pääasiassa erillistuotantoa, mutta sen voidaan katsoa korvaavan myös vesivoimaa tuntitasolla sekä ydinvoimaa päivätasolla. Lisäksi se korvaa mahdollisesti poistuvaa yhteistuotantoa.

Yleisimpiä erillistuotannossa käytettyjä polttoaineita korvattaessa 10 % tuulivoimalla säästyneet päästöt olisivat skenaariossa 245 000 tonnia CO₂-ekvivalenttia vuodessa. Vaikka skenaario ei ole täysin realistinen, voidaan suuruusluokaksi sanoa hiilidioksidipäästöjen satojen tuhansien tonnien väheneminen vuodessa kapasiteetin kasvattamisesta kymmenesosalla. Päästövähennykset ovat siis merkittävät. Tuulivoima on edullista ja kaikista sähköntuotantomuodoista vähäpäästöisintä, joten sen kapasiteetin suurimittainen lisääminen on kannattavaa sekä taloudellisesti että ihmisten hyvinvoinnin kannalta niin Suomessa kuin globaalissa mittakaavassa.

Lähteet

Alma economics. Offshore wind energy in Greece: Estimating the socio-economic impact. 2021. [verkkajulkaisu] [viitattu 18.10.2022] Saatavilla: https://www.eliamep.gr/wp-content/uploads/2021/09/Social-impact-study_Alma-Economics-1.pdf

Brown R. Lester. Suuri energiamurros. 2017. [kirja]. [viitattu 19.4.2023]

Christensen Jesse. Tuulivoiman hyödyntämisen ympäristövaikutukset. 2020. [opinnäytetyö] [viitattu 24.3.2023] Saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/122072/JesseChristensen.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Energiamailma. Yhteistuotanto [www-sivut] [viitattu 18.4.2023] Saatavilla: <https://energiamailma.fi/energiasta/energiantuotanto/yhteistuotanto/>

Energiateollisuus a. Sähkön hankinta ja kulutus, lokakuu 2022 [verkkajulkaisu] [viitattu 3.11.2022] Saatavilla: https://energia.fi/files/3922/pikatilasto_lokakuu.pdf

Energiateollisuus b. Lauhdevoima [www-sivut] [viitattu 13.3.2023] Saatavilla: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/lauhdevoima>

Energiateollisuus c. Sähkön hankinta ja kulutus, heinäkuu 2023 [verkkajulkaisu] [viitattu 26.8.2023] Saatavilla: https://energia.fi/files/3922/pikatilasto_heinakuu.pdf

Energiateollisuus d. Sähköntuotantolaitosten säätöominaisuudet s.20 [verkkojulkaisu] [viitattu 3.4.2023] Saatavilla: https://energia.fi/files/694/Mista_lisajoustoa_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf

Energiateollisuus e. Ukrainan sota. 2022. [www-sivut] [viitattu 11.1.2023] Saatavilla: https://energia.fi/energiapolitiikka/ukrainan_sota

Energiavirasto. Aurinkosähkön kapasiteetti kasvoi Suomessa yli 100 megawattia vuonna 2021. 2022. [www-sivut] [viitattu 13.3.2023] Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-kapasiteetti-kasvoi-suomessa-yli-100-megawattia-vuonna-2021>

Fingrid. Suomen sähköjärjestelmän tila. [www-sivut] [viitattu 14.10.2022] Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/>

Fortum a. Energiantuotanto 2015 [verkkojulkaisu] [viitattu 29.10.2022] Saatavilla: https://www.fortum.fi/sites/default/files/investor-documents/fortum_energiantuotanto_2015_lr2.pdf

Fortum b. Meri-Porin hiilivoimalaitos [www-sivut] [viitattu 28.10.2022] Saatavilla: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/energiantuotanto/voimalaitoksemme/meri-porin-lauhdevoimalaitos>

Fortum c. Miksi Euroopan polku puhtaaseen energiaan kulkee kaasun kautta? [www-sivut] [viitattu 28.8.2023] Saatavilla: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/uutiset-ja-julkaisut/puh-taampi-maailma/miksi-euroopan-polku-puhtaaseen-energiaan-kulkee-kaasun-kautta>

Helsingin Sanomat. Fingrid. Suomen sähköverkon selkäranka vahvistuu huomasti: peräti kolmella miljardilla lisää siirtoyhteyksiä. 2022. [verkkouutinen] [viitattu 12.4.2023] Saatavilla: <https://www.hs.fi/mainos/ideat/art-2000009084283.html>

Hiilitieto. Hiilivoimalaitokset Suomessa [www-sivut] [viitattu 28.2.2023] Saatavilla: <https://hiilitieto.fi/hiilitietoa/hiili-suomessa/hiilivoimalaitokset-suomessa/>

Holtinen & Tuhkanen. Wind power replaces coal. 2004. [verkkójulkaisu] [viitattu 18.10.2022] Saatavilla: https://lut.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay?docid=cdi_proquest_miscellaneous_37897878&context=PC&vid=358FIN_LUT:LUT&lang=en&search_scope=LUT_CAMPUS_CDI&adaptor=Primo%20Central&tab=Everything&query=any,contains,Holtinen%20%26%20Tuhkanen%202004&offset=0

Höyrytys, CHP-laitokset [www-sivut] [viitattu 3.3.2023] Saatavilla: <https://hoyrytys.fi/laitokset/chp-laitokset/>

Khosravi et al. Replacing hard coal with wind and nuclear power in Finland - impacts on electricity and district heating markets. 2020. [verkkójulkaisu] [viitattu 19.10.2022] Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544220309919>

Li et al. Carbon footprints of two large hydro-projects in China: Life-cycle assessment according to ISO/TS 14067. 2017 [verkkójulkaisu] [viitattu 19.4.2023] Saatavilla: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0960148117307012>

Motiva a. Suomen sähkön hankinta ja kulutus 2021. (Päivitetty 28.4.2023) [www-sivut] [viitattu 12.10.2022] Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/sahkon_hankinta_ja_kulutus

Motiva b. CO₂ päästökertoimet [verkkojulkaisu] [viitattu 13.3.2023] Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/co2-paastokertoimet

Motiva c. Bioenergian käyttö. 2023 [www-sivut] [viitattu 5.10.2023] Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_kaytto

Muraja Tuomas Faktat tiskiini!: suomalaisen faktantarkistuksen käsikirja. 2017. [kirja] [viitattu 13.3.2023]

Päkkilä Lauri. Vesivoiman merkitys säätövoimana Suomessa. 2021. [opinnäytetyö] [viitattu 19.10.2022] Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/504299/P%c3%a4kkil%c3%a4_Lauri.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Sehlberg Kristoffer. Will we be s(wind)led? A CBA of further onshore wind power expansion in Sweden 2021 [verkkojulkaisu] [viitattu 19.10.2022] Saatavilla: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1566327/FULLTEXT01.pdf>

Spodniac et. al. The impact of wind power and electricity demand on the relevance of the different short-term electricity markets: The Nordic case. 2021 [verkkojulkaisu] [viitattu 19.10.2022] Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192031494X>

Tilastokeskus a. Fossiilivapaan sähkön osuus nousi 86 %:iin vuonna 2021. 2022. [verkkajulkaisu] [viitattu 23.10.2022] Saatavilla: <https://www.stat.fi/julkaisu/cku28dfkw805d0b9922uxoyep>

Tilastokeskus b. Sähkön ja lämmön tuotannon hiilidioksidipäästöt. 2022. [verkkajulkaisu] [viitattu 24.3.2023] Saatavilla: https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2022/html/suom0011.htm

Tilastokeskus c. Sähkön tuotanto energialähteittäin ja kokonaiskulutus 2021. [verkkajulkaisu] [viitattu 4.11.2022] Saatavilla: https://pxweb2.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_salatuo/statfin_salatuo_pxt_12b4.px/table/tableViewLayout1/

Tilastokeskus d. Polttoaineluokitus 2023. [verkkajulkaisu] [viitattu 17.3.2023] Saatavilla: https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Tuominen Riina, Kaidan kiho ja Tuukkalan tila raportti. 2019. (s.4) [verkkajulkaisu]

[viitattu 12.3.2023] Saatavilla: <https://www.xamk.fi/wp-content/uploads/2017/03/Kaidan-Kiho-Tuukkalan-tila-raportti.pdf>

Turveinfo. Tutkittua tietoa turpeesta. 2020. [www-sivut] [viitattu 28.8.2023] Saatavilla: <http://turveinfo.fi/ukk/>

Tuulivoimayhdistys. Tuulivoimaloiden rakenne [www-sivut] [viitattu 26.2.2023] Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>

Vattenfall a. Tuulivoima [www-sivut] [viitattu 19.10.2022] Saatavilla: <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/tuulivoima/>

Vattenfall b. Tuulivoima- tärkeä voimavara hiilipäästöjen vähentämiseen [www-sivut] [viitattu 13.3.2023] Saatavilla: https://www.vattenfall.fi/vastuullisuus/fossiilivapaa-kehitys/tuulivoimalla-hiilipaastojen-vahentamiseen/?gclid=Cj0KCQjw48OaBhDWA-RIsAMd966C0yFYyJK731pLNAXCH16CuWxT4Slo1fQPVXmcge45j3ZyZxkLnd-jMaAo4cEALw_wcB

Vattenfall c. Aurinkovoima [www-sivut] [viitattu 23.10.2023] Saatavilla: <https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/aurinkovoima/>

Yle a. Saksa sulkee viimeiset ydinvoimalansa – näin se käytännössä tapahtuu. 2023 [verkkouutinen] [viitattu 26.8.2023] Saatavilla: <https://yle.fi/a/74-20027272>

Yle b. Olkiluoto 3 otettiin käyttöön yllättävällä vuorokauden loppukirillä - toimitusjohtaja: “Testit saatiin valmiiksi ajoissa”. 2023 [verkkouutinen] [viitattu 26.8.2023] Saatavilla: <https://yle.fi/a/74-20027315>

Yle c. Bioenergia – Väärin käytetty tai ymmärretty termi. 2012 [verkkouutinen] [viitattu 6.10.2023] Saatavilla: <https://yle.fi/a/3-6065977>

ÅF-Consult Oy. Vesivoiman merkitys Suomen energiajärjestelmälle ZETVESF loppuraportti. 2019. Energiateollisuus. [verkkojulkaisu] [viitattu 19.4.2023] Saatavilla: https://energia.fi/files/3427/Vesivoimaselvitys_FINALrev1_20190206.pdf