

SÄHKÖISTÄMISEN ROOLI SUOMEN ILMASTOTAVOITTEIDEN SAAVUTTAMISESSA

Kustannustehokas polku kohti päästötöntä
Suomea

SYYSKUU 2021

Sitra muistio

© Sitra 2021

Sähköistämisen rooli Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa

Kustannustehokas polku kohti päästötöntä Suomea

Kirjoittajat: Fabien Roques, Yves Le Thieis, Gerald Aue,
Petr Spodniak, Guillaume Pugliese (Compass Lexecon),
Sylvain Cail, Aurélien Peffen (Enerdata), Samuli Honkapuro
ja Ville Sihvonen (LUT)

Suomeksi toimittaneet: Mariko Landström, Saara Tamminen,
Antti Koistinen ja Janne Peljo

Muistio pohjautuu englanninkieliseen selvitykseen Enabling
cost-efficient electrification in Finland (Sitra 2021).

Taitto: PunaMusta

ISBN 978-952-347-238-9 (PDF) www.sitra.fi

ISSN 2737-1034 (PDF) www.sitra.fi

www.sitra.fi

Julkaisua koskevat tiedustelut: julkaisut@sitra.fi

**Sitran muistiot ovat tulevaisuustyömme taustaksi tuotettuja
sisältöjä.**

Sisällys

Esipuhe	4
Johdanto – mitä tehtiin?	6
1 Tulevaisuudessa energian loppukäyttö sähköistyy	8
2 Uutta sähköntuotantoa tarvitaan paljon	12
2.1 Maatuuivoima on tulevaisuuden merkittävin sähköntuotantomuoto	12
2.2 Sähköjärjestelmän laajennus edellyttää merkittäviä investointeja	16
2.3 Sähköntuotannon päästöt laskevat nopeasti	17
2.4 Sähköntuotannon kustannus laskee ja sähkön hinta nousee	18
2.5 Kustannukset kasvavat, jos tuulivoiman tai kysyntäjoustopotentiaalia ei hyödynnetä	20
3 Johtopäätökset ja seuraavat askeleet	21
Lähdeluettelo	23

Esipuhe

Ilmastokriisi on yhdessä luontokadon kanssa aikamme merkittävin haaste. Päästöt tulisi saada ympäri maailman nopeaan ja jyrkkään laskuun, jotta ilmaston kuumeneminen voitaisiin rajata mahdollisimman lähelle 1,5 astetta Pariisin ilmastopimuksen mukaisesti.

Suomi pyrkii pääministeri Sanna Marinin hallitusohjelman mukaisesti saavuttamaan hiilineutraaliuden vuonna 2035 ja hiilinegatiivisuuden nopeasti sen jälkeen. Näiden tavoitteiden saavuttaminen edellyttää merkittäviä muutoksia yhteiskuntaamme ja erityisesti energijärjestelmäämme. Edessä on ennennäkemättömän suuri murros siinä, miten tuotamme ja käytämme energiaa ja muita resursseja.

Aikaisemmat Suomen energijärjestelmään keskittyneet selvitykset ovat osoittaneet energiankulutuksen sähköistämisen tärkeyden päästöjen vähentämisessä. Karkeasti ottaen resepti mittaviin päästövähennyksiin on tämä: ensin tehdään sähköntuotannosta päästötöntä ja sen jälkeen sähköistetään yhteiskunnan ja talouden toiminnot – siinä järjestyksessä kun se on tehokkainta kustannusten, energiankäytön ja resurssien näkökulmasta.

Tämän selvityksen tavoitteena on luoda kokonaisvaltainen kuva sähköistämisestä ja päästöjen vähentämisestä Suomessa ja siten täydentää sekä täsmentää näkymää energijärjestelmän tulevaisuuteen. Tarkastelun lähtökohtana on, että hiilineutraalius saavutetaan vuoteen 2035 ja päästöttömyys vuoteen 2050 mennessä. Lisäksi olemme pyrkineet tunnistamaan kehitykseen liittyviä tärkeitä mahdollistajia ja kipupisteitä ja toisaalta laatimaan suosituksia etenemistä varten.

Selvityksen lähtökohtana ovat Suomen nykyinen energijärjestelmä, riittävä toimitusvarmuus ja saatavilla olevat resurssit. Työssä on huomioitu myös uudemmat teknologiset ratkaisut, kuten kysyntäjousto, puhtaasti tuotettu vety ja synteettiset polttoaineet.

Tulokset osoittavat, että Suomen ilmastotavoitteiden saavuttaminen on energijärjestelmän näkökulmasta tarkasteltuna hyvinkin mahdollista, mutta se edellyttää fossiilisten polttoaineiden korvaamista puhtaasti tuotetulla sähköllä niin teollisuudessa, liikenteessä kuin lämmityksessäkin. Siellä missä päästöjä ei voida poistaa sähköistymisen avulla, voidaan käyttää vetyä tai biomassaa, kuten puuta.

Sähköistymiskehitys kasvattaa merkittävästi sähkön kysyntää, joka arviolta tuplaantuu nykytasolta vuoteen 2050 mennessä. Kustannustehokkainta on tuottaa valtaosa tarvittavasta lisäsähköstä maatuulivoimalla, mutta tuulivoima tarvitsee kuitenkin tuekseen joustavaa sähkön tuotantoa ja -kulutusta. Lisäksi on panostettava sähkön varastointiin, kuten akkuihin ja vetyyn. Myös Suomen sähkönsiirron selkärankaa, kantaverkkoa, pitää vahvistaa.

Selvitys osoittaa, että siirtymä kohti päästötöntä energijärjestelmää on tehtävissä. Siirtymän toteutuminen kustannustehokkaasti on kuitenkin ensisijaisesti päättäjiemme käsissä: Jotta energijärjestelmän sähköistäminen onnistuu, puitteet on pantava kuntoon. Tarvitaan selvä näkymä tulevaan, riittävät kannustimet sähköistämiseen ja tukea uuden teknologian käyttöön-ottoon ja kehittämiseen.

Suomen pitkän aikavälin menestyksen kannalta on kriittistä, miten energiamurroksen toteuttamisessa onnistutaan. Tämän selvityksen kannustava viesti on, että meillä on hyvät mahdollisuudet onnistua. Pallo on nyt päättäjillämme.

Helsingissä 28.9.2021

Mari Pantsar
Sitra johtaja, Kestävyyssratkaisut,
Sitra

Janne Peljo
projektijohtaja, Ilmasto- ja luontoratkaisut,
Sitra

Johdanto – mitä tehtiin?

Aikaisemmat Suomen energiajärjestelmään keskittyneet tutkimukset – mukaan lukien Sitran tilaamat selvitykset – ovat osoittaneet energiankulutuksen sähköistämisen tärkeyden päästöjen vähentämisessä. Sähköistäminen kasvattaa sähkön kysyntää, ja samaan aikaan sähköntuotannon päästöjen vähentäminen lisää sääriippuvaista tuotantoa ja vähentää perinteistä, joustavaa tuotantoa. Tämä tarkoittaa merkittävää muutosta energiajärjestelmän toiminnan kannalta. Siitä on kuitenkin vielä epävarmuutta, miten päästötön energiajärjestelmä olisi saavutettavissa kustannustehokkaasti.

Tämän laajan selvityksen tavoitteena on antaa kokonaisvaltainen kuva sähköistämisen päästövähennyspotentiaalista ja kustannustehokkaasta energiajärjestelmän kehityksestä Suomessa. Lisäksi tavoitteena on ollut tunnistaa muutoksen erilaiset mahdollistajat, kipupisteet ja suositukset jatkoa varten. Tarkastelun lähtökohtana on, että Suomi saavuttaa hiilineutraaliuden vuoteen 2035 mennessä ja päästöttömyyden¹ vuoteen 2050 mennessä. Tutkimustyön tilasi Sitra, ja sen tekivät yhteistyössä konsulttiyritykset Compass Lexecon ja Enerdata sekä Lappeenrantaan-Lahden teknillinen yliopisto (LUT-yliopisto).

Selvityksen lähtökohtana ovat Suomen nykyinen energiajärjestelmä, riittävä toimitusvarmuus ja saatavilla olevat resurssit. Työssä on huomioitu myös uudemmat teknologiset ratkaisut, kuten kysyntäjousto, vety ja siihen pohjautuvat synteettiset polttoaineet.

Selvityksessä on mallinnettu kaksi sähköistämiskenaariota. Suoran sähköistämisen skenaario olettaa laajaa suoraa sähköistymistä useissa käyttökohteissa. Lisääntynyt PtX -skenaario olettaa laajamittaisempaa epäsuoraa sähköistymistä, joka perustuu vetyyn ja muihin synteettisiin polttoaineisiin (power-to-X, PtX)².

Selvitys lähtee liikkeelle tulevaisuuden energiankulutuksen määrittämisestä. Mallinnetuissa skenaarioissa Suomen tulevaisuuden primäärienergiatarve on laskettu käyttäen väestöennusteita sekä teollisuuden, palvelujen ja maatalouden kasvuennusteita. Teknologian kehittymisen ja sähköistymisen on oletettu tuovan merkittävät mutta realistiset parannukset energiatehokkuuteen: esimerkiksi sähköautoilla on polttomoottoriautoja korkeampi hyötysuhde.

Energian kulutuksen muutoksesta on mallinnettu kaksi eri skenaariota eurooppalaisen energiamarkkinan simulointimallilla (Enerdatan POLES-malli³), joka kilpailuttaa eri teknologioita ja polttoaineita päästötavoitteiden kiristyessä. Käytännössä malli asettaa ajan myötä kasvavan hiilidioksidin hinnan, jolloin fossiilisia polttoaineita korvataan vähitellen kilpailukykyisimmillä, päästöttömillä vaihtoehdoilla.

Tämän jälkeen Compass Lexeconin sähkömarkkinamallilla on määritetty kummallekin skenaariolle kustannustehokkain tuotantomuotojen yhdistelmä, jolla voidaan tuottaa vaadittu sähköenergia täyttämällä asetetut päästövaatimukset ja muut rajoitukset, kuten esimerkiksi tuotan-

1 Päästöttömyydellä tarkoitetaan tässä maataloudesta, teollisuusprosesseista ja jätteistä jäljelle jäävien kasvihuonekaasujen kompensointia negatiivisia päästöjä tuottavilla ratkaisuilla, kuten bioperäisen hiilen talteenotolla ja varastoinnilla (BECCS). Maankäytön, maankäytön muutoksen ja metsätalouden (LULUCF) nettohiilinielun on tässä oletettu olevan keskimäärin 21,4 miljoonaa tonnia vuodessa (Mt/v) tarkasteltavan ajanjakson aikana.

2 Power-to-X (PtX) viittaa teknologioihin, joissa sähköenergiaa muutetaan toiseen muotoon. Tässä selvityksessä sillä tarkoitetaan vedyn tuotantoa sähköllä, ja vedyn jatkojalostusta synteettisiksi polttoaineiksi ja kemikaaleiksi.

3 POLES-malli on alun perin IEPE:n (Institute for Economics and Energy Policy), nykyisin GAEL (Grenoble Applied Economics Lab) kehittämä. Tässä selvityksessä käytetty versio mallista on Enerdatan omistama POLES-Enerdata.

topotentiaalit ja rajasiirtoyhteyksien kapasiteetti. Eri oletuksista, kuten rajoituksista ja muista teknistaloudellisista reunaehdoista, on työn kuluessa keskusteltu sidosryhmien kanssa.

Viimeisenä on tunnistettu pääasialliset mahdollistajat ja pullonkaulat hyödyntämällä muun muassa sidosryhmätyöpajoja ja haastatteluja. Näiden perusteella on laadittu suositukset seuraavista askeleista.

Tähän muistioon on koottu laajan englanninkielisen raportin *Enabling cost-efficient electrification in Finland* (Roques ym. 2021) keskeiset havainnot suomeksi.

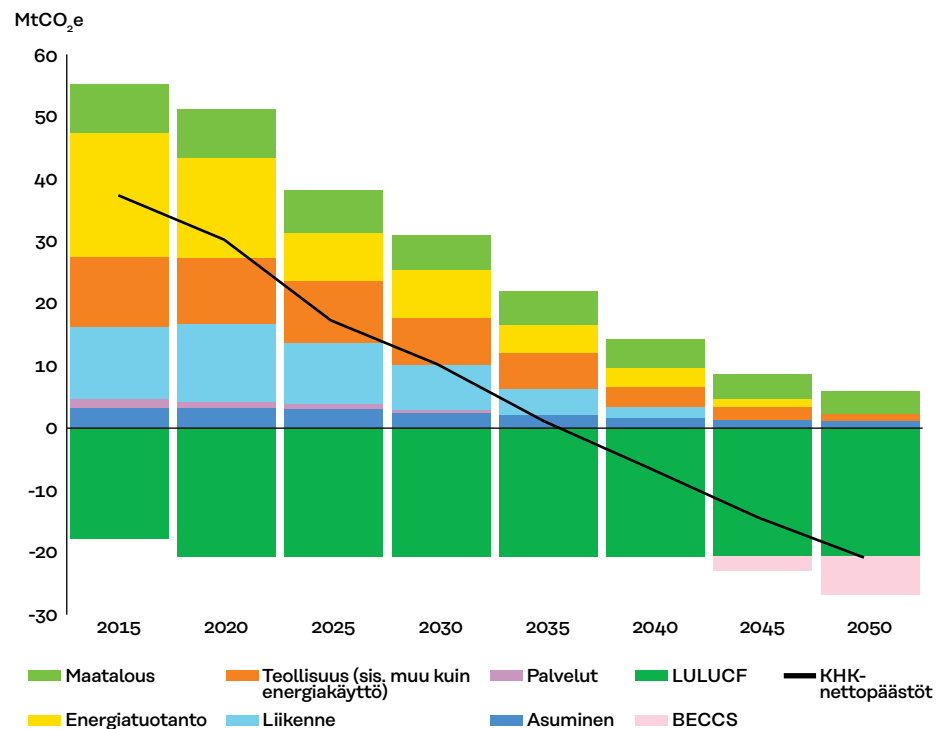
On syytä huomata, että tässäkin selvityksessä käytetyillä malleilla on rajoitteensa. Esimerkiksi kaukolämmön tuotantoa ja lämpövarastojen roolia ei voitu mallintaa tarkasti, eikä mallinrus sisällä tarvittavaa sähkön, vedyn, metaanin ja hiilidioksidin siirto- ja varastointi-infrastruktuuria ja niiden kustannusten analyysiä. Selvitys ei myöskään pysty ottamaan kantaa joidenkin olennaisten tuotannontekijöiden, kuten metallien tai kestäväen biomassan saatavuuteen. Tulokset myös riippuvat tehdyistä oletuksista. Esimerkiksi jos tulevaisuuden teknologia- ja polttoainekustannukset (esimerkiksi merituulivoiman, ydinvoiman tai biomassan) poikkeavat merkittävästi oletetuista, saattaisi se johtaa erilaiseen kustannustehokkaan energiantuotannon rakenteeseen ja polkuun päästöjen vähentämiseksi.

1 Tulevaisuudessa energian loppukäyttö sähköistyä

POLES-mallin simulointituloksien perusteella Suomi voi saavuttaa molemmissa skenaarioissa tavoitteet hiilineutraaliudesta vuoteen 2035 mennessä ja päästöttömyydestä vuoteen 2050 mennessä.

Kuva 1 esittää Suomen päästöjen kehityksen suoran sähköistämisen skenaariossa. Nettopäästöt laskevat tasaisesti 2020–2050 ja painuvat lähes nollaan vuoteen 2035 mennessä. Vuoteen 2050 mennessä päädytään jo $-21 \text{ MtCO}_2\text{e}$ (miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonnia) tasoon, mikä vastaa oletettua maankäytön, maankäytön muutoksen ja metsätalouden (LULUCF) hiilinielua. Verrattuna vuoden 1990 tasoon bruttopäästöt¹ laskevat 69 prosenttia vuoteen 2035 mennessä ja sata prosenttia vuoteen 2050 mennessä.

Kuva 1: Kasvihuonekaasujen nettopäästöt ja päästöt sektoreittain suoran sähköistämisen skenaariossa



Lähde: Enerdatan POLES-mallin tulokset

Vuotta 2050 kohti kuljettaessa kaikki sektorit osallistuvat päästövähennyksiin. Liikenne, palvelut ja energiantuotanto ovat päästöttömiä vuoteen 2050 mennessä. Vaikeasti vähennettäviä

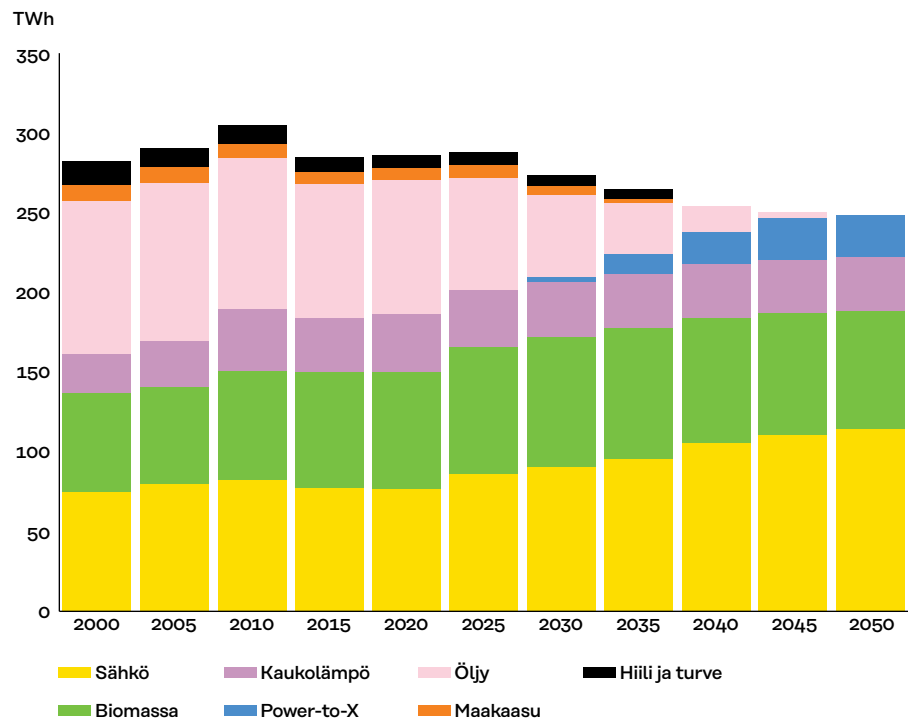
¹ Tässä bruttopäästöihin sisältyvät tekniset negatiiviset päästöt bioperäisen hiilidioksidin talteenotosta ja varastoinnista (BECCS), jotka kumoavat jäljellä olevat päästöt vuonna 2050.

päästöjä aiheutuu kuitenkin vielä maataloudesta (4 MtCO₂e), teollisuuden prosesseista (1 MtCO₂e) ja kotitalousjätteistä (1 MtCO₂e). Jäljelle jäävät päästöt hyvitetään käyttämällä teollisuudessa bioperäisen hiilen talteenottoa ja varastointia (BECCS), jotta voidaan saavuttaa päästöttömyys vuonna 2050.

Suoran sähköistämisen skenaariossa energian loppukäyttö laskee Suomessa vuoden 2015 noin 290 terawattitunnista (TWh) noin 250 TWh:iin vuoteen 2050 mennessä (kuva 2). Etenkin lämmityksen (lämpöpumput) ja liikenteen (sähköautot) sähköistäminen pienentävät energian loppukäyttöä aiempaa paremman hyötysuhteen ansiosta. Samalla sähkönkulutus kasvaa nopeasti, ja vuonna 2050 sähkö onkin suurin yksittäinen energiamuoto. Se kattaa noin 46 prosenttia energian loppukäytöstä, kun vielä vuonna 2015 osuus oli 27 prosenttia. Bioenergia (30 %), kaukolämpö (14 %) ja power-to-X (11 %) kattavat jäljelle jäävän osuuden energian loppukäytöstä.

Etenkin suoran sähköistämisen skenaario pohjautuu vahvasti oletukseen, että edullista ja kestävä bioenergiaa on riittävästi saatavilla. Lisäntynyt PtX -skenaariossa osa bioenergian käytöstä korvataan synteettisillä polttoaineilla. Lisätutkimusta vaadittaisiin selventämään, kuinka paljon kestävä biomassaa olisi todellisuudessa käytettävissä.

Kuva 2: Energian loppukäyttö polttoaineittain suoran sähköistämisen skenaariossa



Lähde: Enerdatan POLES-mallin tulokset

Päästöttömän energiajärjestelmän saavuttamiseksi täytyy energian loppukulutuksessa luopua täysin fossiilisista polttoaineista vuoteen 2050 mennessä, ja ne täytyy korvata pääasiassa suoralla sähköistämisellä. Etenkin lämmityksessä tulee siirtyä merkittävästi lämpöpumppuihin ja liikenteessä sähköautoihin. Bioenergia ja power-to-X-ratkaisut, kuten synteettisesti sähkön avulla valmistetut polttoaineet, osoittautuvat myös tärkeiksi. Niitä tarvitaan etenkin sellaisissa käyttökohteissa, joissa päästöjen vähentäminen on muuten vaikeaa. Tällaisia ovat muun muassa raskas liikenne, osa teollisuusprosesseista ja kemianteollisuuden raaka-aineet.

Teollisuudessa suora sähköistäminen korvaa suuren osan fossiilisten polttoaineiden kuluksista. Sähkö kattaakin vuonna 2050 suoran sähköistämisen skenaariossa teollisuuden energian loppukäytöstä puolet: teollisuuden energian loppukäyttö on kokonaisuudessaan 112 TWh:a, josta 56 TWh:a on sähköä.

Esimerkiksi joissain teollisuusprosesseissa voidaan käyttää sähköistä valokaariuunia fossiilisia polttoaineita käyttävän uunin sijaan. Vuoden 2030 jälkeen kummassakin skenaariossa PtX-polttoaineet mahdollistavat päästöjen vähentämisen vaikeasti sähköistettävissä prosesseissa, etenkin raudan pelkistyksessä ja joissain korkeaa lämpötilaa vaativissa prosesseissa.

Teollisuudessa käytetään fossiilisten polttoaineiden ohella myös fossiilisia raaka-aineita esimerkiksi kemianteollisuuden prosesseissa. Näitä voidaan korvata biomassalla, kuten metsäteollisuuden raaka-aineista syntyvillä sivuvirroilla, ja power-to-X-ratkaisuilla sekä lisääntyneellä kierrätyksellä.

Lisääntynyt PtX -skenaariossa teollisuuden energiankäytöstä ja erityisesti nykyisestä fossiilisesta raaka-ainekäytöstä suurempi osuus korvataan power-to-X-ratkaisuilla. Suoran sähkön käytön lisäksi myös biomassan kulutus vähenee – energiantuotannossa 2 TWh:a ja fossiilisten raaka-aineiden korvaajana 5 TWh:a vuonna 2050. Lisääntynyt PtX -skenaariossa energian kulutus teollisuudessa on alhaisemman hyötysuhteen takia hieman ensimmäistä skenaariota korkeampi, 119 TWh:a.

Liikenne sähköistyy laajasti, mikä näkyy etenkin henkilöautoissa. Suoran sähköistämisen skenaariossa henkilöautoilusta kaksi kolmasosaa on täysin sähköistetty vuoteen 2050 mennessä. Loppuosa henkilöautoista käyttää joko synteettisiä polttoaineita (power-to-X) tai biopolttoaineita. Raskaassa liikenteessä synteettisten polttoaineiden ja biopolttoaineiden rooli on kuitenkin selvästi tätä korkeampi: ne kattavat noin 60 prosenttia kaikesta kulutuksesta vuonna 2050. Sähköistyminen ja ajoneuvojen parantunut hyötysuhde laskevat selvästi energian loppukäyttöä liikenteessä. Kun liikenteen energiankulutus oli vuonna 2015 yhteensä 49 TWh:a, niin vuonna 2050 määrä on suoran sähköistämisen skenaariossa enää 34 TWh:a. Lisääntynyt PtX -skenaariossa biopolttoaineiden ja akkusähkön käyttö on hieman vähäisempää ja vedyn sekä synteettisten polttoaineiden käyttö vastaavasti suurempaa kuin suoran sähköistämisen skenaariossa. Biopolttoaineiden käyttö vähenee tässä skenaariossa 2 TWh:a ensimmäiseen skenaarioon verrattuna.

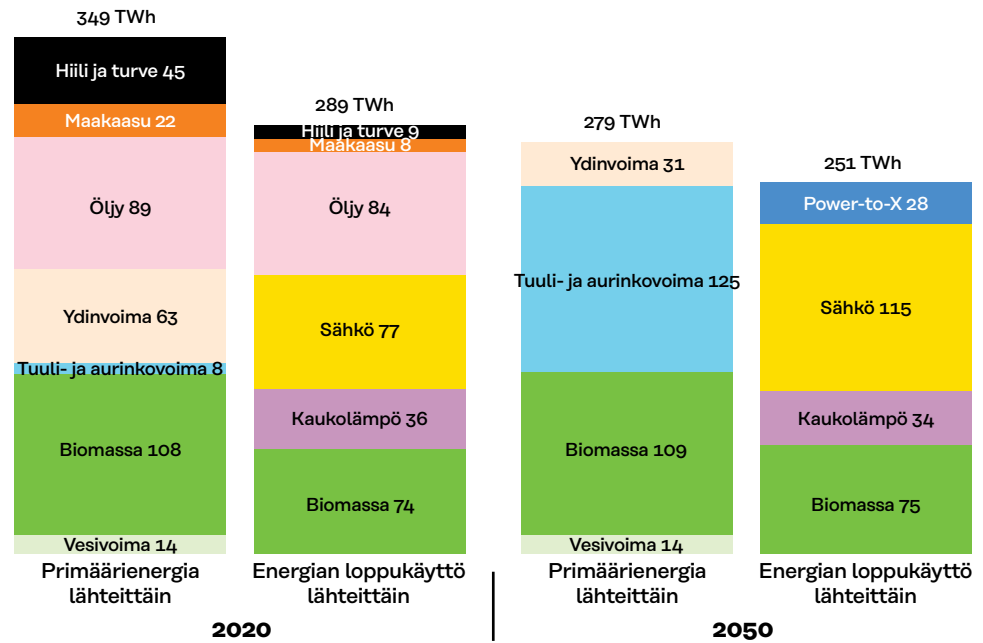
Rakennuksissa ja palveluissa suora sähköistäminen, etenkin lämpöpumput rakennuksissa ja kaukolämpöverkossa, on pääasiallinen keino vähentää päästöjä. Vuonna 2050 lämpöpumput kattavat yli 90 prosenttia kaikesta lämmitykseen käytetystä sähköstä rakennuksissa ja yli 55 prosenttia kaukolämpöverkkoon syötetystä energiasta.

Yllä kuvatut kulutuksen kehityssuunnat eri sektoreilla mahdollistavat kummassakin skenaariossa täydellisen fossiilisten polttoaineiden korvaamisen vuoteen 2050 mennessä. Bioenergialla, niin kiinteänä, nesteinä kuin kaasunakin, on merkittävä rooli muutoksessa. Vaikka bioenergian käyttö kasvaa keskipitkällä aikavälillä muun muassa kaukolämmössä, vastaa vuoden 2050 käyttö vuoden 2020 tasoa (kuva 3)².

Lisääntynyt PtX -skenaariossa biomassaa käytetään polttoaineena ja fossiilisten raaka-aineiden korvaajana vuonna 2050 noin 10 TWh:a vähemmän kuin suoran sähköistämisen skenaariossa. Vuonna 2050 vedyn tuotanto kasvattaa sähkönkulutusta 34 TWh:a suoran sähköistämisen skenaariossa ja 60 TWh:a lisääntynyt PtX -skenaariossa.

2 Selvityksen ulkopuolelle jää energiakäyttöä varten kestävästi saatavilla olevan biomassan saatavuuden arviointi.

Kuva 3: Primäärienergia ja energian loppukäyttö vuonna 2020 ja 2050 (TWh) suoran sähköistämisen skenaariossa



Lähde: Enerdatan POLES-mallin tulokset

2 Uutta sähköntuotantoa tarvitaan paljon

Nykyiseen verrattuna sähkönkulutus kasvaa suoran sähköistämisen skenaariossa yli 20 prosenttia vuoteen 2035 mennessä ja tuplaantuu vuoteen 2050 mennessä. Lisääntynyt PtX -skenaariossa kulutus kasvaa lisääntyneiden häviöiden ja laajemman biomassan korvaamisen takia tätäkin enemmän, ja sähkön kulutus on vuonna 2050 noin 20 TWh:a ensimmäistä skenaariota korkeampi. Tämänkaltaisen kasvu vaatii merkittävää muutosta Suomen sähköntuotannossa. Selvityksessä on mallinnettu kummallekin sähkönkulutuksen skenaariolle kustannustehokas sähköntuotannon kehitys.

2.1 Maatuloivoima on tulevaisuuden merkittävin sähköntuotantomuoto

Skenaarioissa Suomen sähköntuotanto muuttuu seuraavan 30 vuoden aikana merkittävästi niin määrältään kuin rakenteeltaan. Jotta sähköistymisestä johtuvaan kasvavaan kulutukseen voidaan vastata, sähköntuotantokapasiteetti kasvaa yli kolminkertaiseksi vuoteen 2050 mennessä.

Vuonna 2020 kapasiteetti oli alle 20 gigawattia (GW), ja molemmissa skenaarioissa se kasvaa yli 70 GW:iin vuosisadan puoliväliin mennessä (kuva 4). Pääosa kapasiteetin lisäyksestä on maatuloivoimaa, sillä sen tuotantokustannus on muita hiilivapaita tuotantomuotoja, kuten ydinvoimaa tai merituuloivoimaa, alhaisempi. Lisäksi maatuloivoiman tuotantopotentiaali on riittävä. Jos tuuloivoiman rakentamista rajoitettaisiin esimerkiksi Puolustusvoimien asettamien rajoitusten tai heikon hyväksyttävyyden takia, se estäisi päästöjen vähentämisen kustannustehokkaimmalla tavalla. Keinoja tyydyttää Puolustusvoimien aluevalvonnan tarpeet ja mahdollistaa tuuloivoiman rakentaminen yhtä aikaa tulisikin tutkia lisää.

Valitut oletukset, kuten teknologioiden hintojen kehitys ja uusiutuvien energiantuotantomuotojen potentiaalit, johtavat tilanteeseen, jossa suoran sähköistämisen skenaarion kustannusoptimoidussa sähköntuotannossa ei rakenneta uusia ydinvoimaloita Olkiluoto 3:n jälkeen¹. Näin se on ainoa jäljellä oleva ydinvoimala Suomessa vuoden 2040 jälkeen, kun Olkiluoto 1 ja 2 sekä Loviisa 1 ja 2 lopettavat toimintansa niiden oletettujen jatkolupakausien päätyttyä. Lisääntynyt PtX -skenaariossa sen sijaan ydinvoiman kapasiteettia lisätään vuonna 2040, ja skenaariossa tuotetaan 5 TWh:a enemmän ydinsähköä ja 10 TWh enemmän tuulisähköä vuonna 2050 verrattuna ensimmäiseen skenaarioon. Oletukset nykyisten ydinvoimaloiden jatkoluovista ja toiminnan jatkamisesta ovat tärkeässä roolissa molemmissa skenaarioissa. Jos nämä oletukset eivät toteudu, vaihtoehtoisia tuotantomuotoja tarvittaisiin hyvin nopeasti lisää.

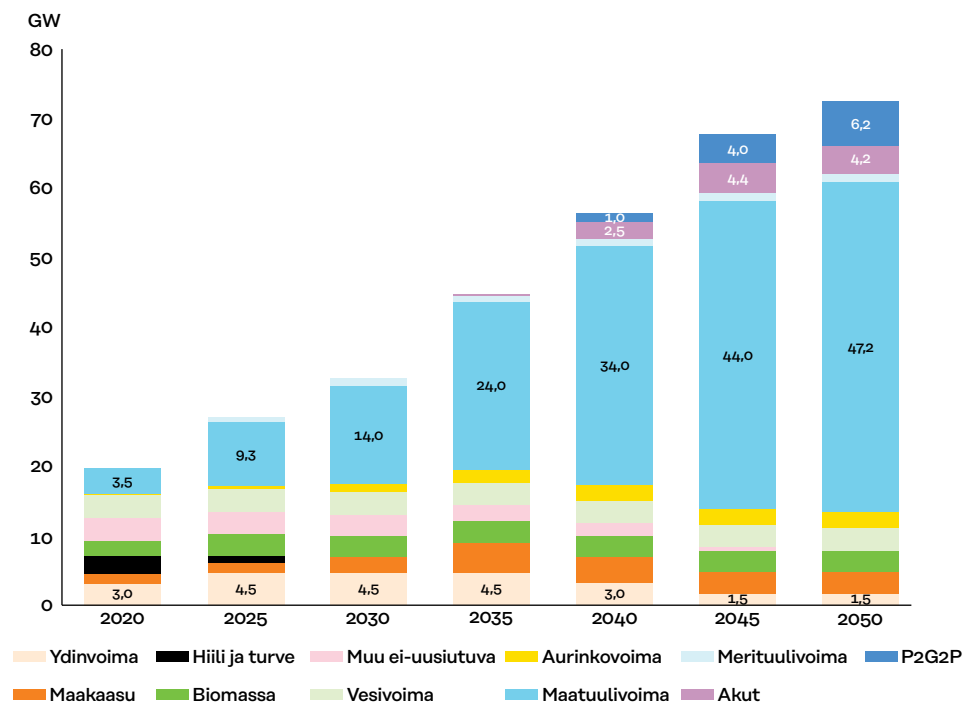
Koska tuuloivoima kattaa huomattavan osan tuotannosta, muulta järjestelmältä vaaditaan joustokykyä. Kulutuksen joustavuutta on saatavilla erityisesti teollisuuden vedyn tuotannosta, kaukolämmön ja rakennusten lämpöpumpuista sekä sähköautojen latauksesta. Lisäksi tarvitaan

¹ Hanhikiven ydinvoimalan toteutumiseen liittyvien epävarmuuksien takia sitä ei ole mallin oletuksissa asetettu varmistuneeksi tuotantokapasiteetiksi (toisin kuin Olkiluoto 3, jonka oletetaan valmistuvan 2022).

myös merkittävästi tuotantopuolen joustoratkaisuja, kuten varastoja ja huipputuotantokapasiteettia, esimerkiksi kaasuvoimaloita.

Uusilla tuotannon joustoratkaisuilla on tärkeä rooli sääriippuvaisen uusiutuvan energian lisäämisessä ja toimitusvarmuuden turvaamisessa. Akut tarjoavat lyhyen aikavälin joustoa, kun taas power-to-gas-to-power² (P2G2P) tarjoaa pitkän aikavälin joustoa viikosta useaan viikkoon. Varastojen tärkeys kasvaa vuoteen 2030 asti, kun olemassa olevia lämpövoimaloita ajetaan alas ja jälleen vuoden 2040 jälkeen, kun ydinvoimakapasiteetti vähenee. Vuonna 2050 tarvitaan kummassakin skenaariossa kaikkiaan noin 4 GW akkuvarastoja, 6 GW P2G2P-kapasiteettia ja 3 GW kaasuvoimaloita, joissa voidaan polttaa myös biokaasua, vetyä tai synteettistä kaasua. Kotimaisen tuotantopuolen jouston lisäksi tarvitaan rajasiirtoyhteyksiä. Mahdollisia esteitä tuotantopuolen jouston rakentamiselle ovat puutteellinen taloudellinen kannustin investoida teknologiaan, jota käytetään vuodessa hyvin lyhyitä aikoja (kaasuvoima huipputuotantokapasiteettina) sekä rajalliset varastointimahdollisuudet tarvittavalle vedylle (P2G2P). Yhdistyminen osaksi eurooppalaista kaasu- ja vetyverkkoa voisi osittain helpottaa tilannetta.

Kuva 4: Sähköntuotantokapasiteetti suoran sähköistämisen skenaariossa



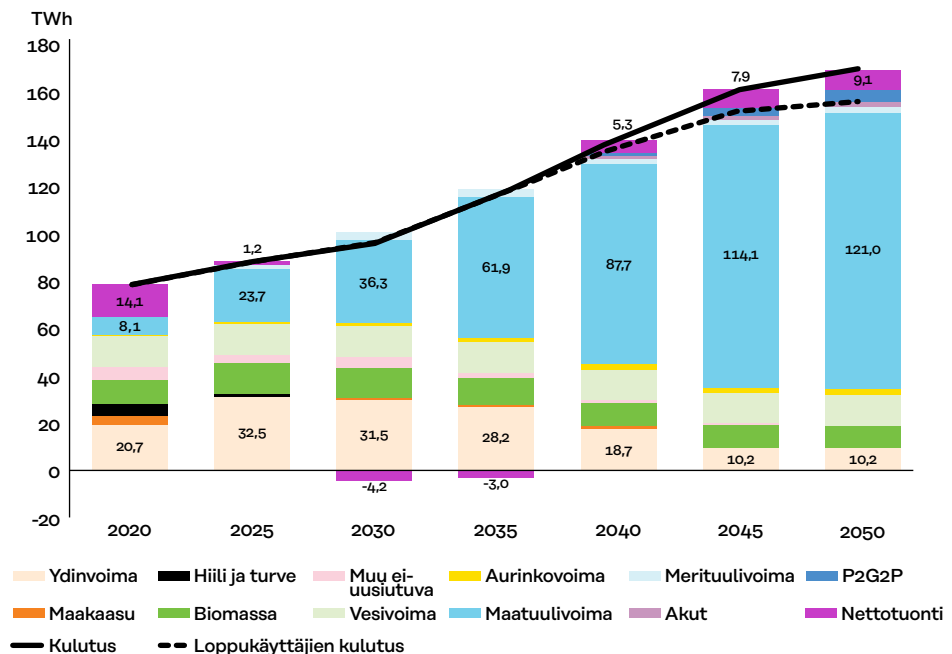
Huomio: "Muu ei-uusiutuva" viittaa pieniin lämpövoimalaitoksiin, kuten ENTSO-E on määrittänyt julkaisuissa Mid-term Adequacy Forecast (MAF) ja Ten-Year Network Development Plan (TYNDP). Tyypillisesti lämpökapasiteetiltaan alle 20 MW:n yksiköt eivät kuulu EU:n päästökauppaan ja siksi ne on laskettu erikseen.

Lähde: Compass Lexeconin sähkömarkkinamallin tulokset

² Power-to-gas-to-power tarkoittaa vedyn tai synteettisen kaasun tuottamista hiilineutraalilla sähköllä varastoon ja tämän varastoidun polttoaineen käyttöä myöhemmässä tilanteessa, kun muu sähköntuotanto, kuten tuulivoima, on vähäisempää.

Sähkötuotannossa tuulivoiman osuus kasvaa selkeästi suurimmaksi jo vuoteen 2035 mennessä, yltyen suoran sähköistämisen skenaariossa jopa 73 prosenttiin vuonna 2050 (kuva 5) ja 72 prosenttiin lisääntynyt PtX -skenaariossa. Biomassaan perustuva sähkön ja lämmön yhteistuotanto (combined heat and power, CHP) pysyy pitkällä aikavälillä vakaana tuottaen sähköä noin 10 TWh:a vuodessa. Tuotanto kuitenkin kasvaa keskipitkällä aikavälillä ja on korkeimmillaan vuonna 2025 noin 14 TWh:a vuodessa, kun biomassaa käytetään korvaamaan hiiltä ja turvetta sähkötuotannossa. Vesivoima pysyy vakaana vuoteen 2050 asti, ja se tuottaa noin 14 TWh:a vuodessa. Ydinvoima saavuttaa tuotantohuippunsa vuonna 2025, jolloin se kattaa lähes kolmanneksen sähkötuotannosta. Tämän jälkeen ydinvoiman osuus laskee vuoteen 2050 asti, jolloin se kattaa suoran sähköistämisen skenaariossa enää kuusi prosenttia ja lisääntynyt PtX -skenaariossa kahdeksan prosenttia tuotannosta.

Kuva 5: Sähkötuotanto ja -kulutus suoran sähköistämisen skenaariossa

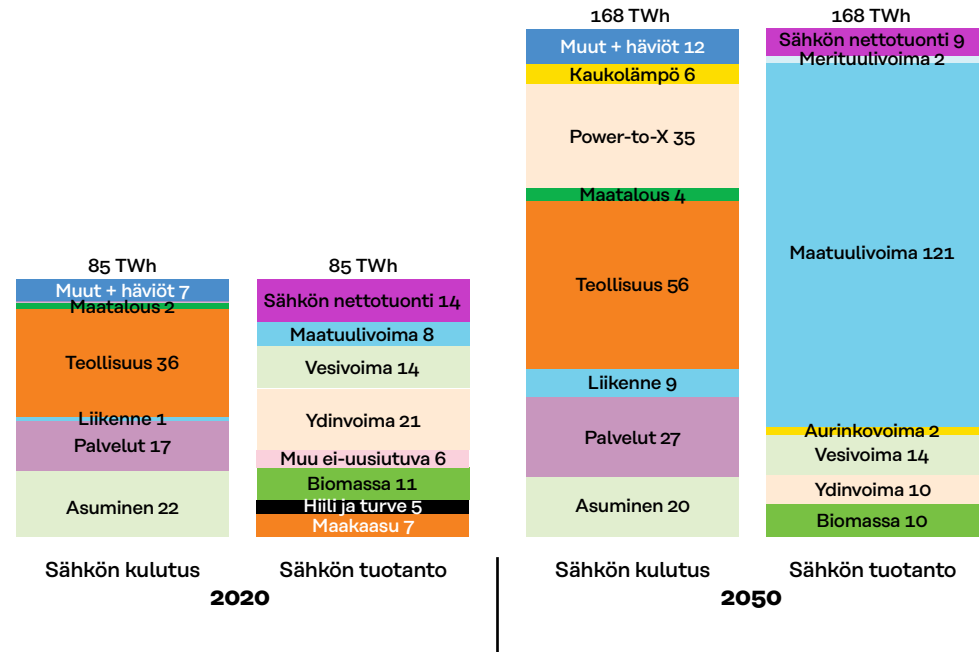


Huomio: 'Muu ei-uusiutuva' viittaa pieniin lämpövoimalaitoksiin (kuten ENTSO-E on määrittänyt MAF ja TYNDP -julkaisuissa); 'kulutus' viittaa sähköjärjestelmän kokonaiskulutukseen, ml. 'loppukäyttäjien kulutus' ja varastointihäviöt, joita aiheutuu pääasiassa P2G2P-kapasiteetista. Lähde: Compass Lexeconin sähkömarkkinamallin tulokset

Sähköjärjestelmässä tapahtuu kaksi merkittävää rakennemuutosta vuoteen 2050 mennessä. Ensinnäkin Suomesta tulee tilapäisesti sähkön nettoviejä. Verrattuna nykyiseen tilanteeseen, jossa noin viidennes Suomen vuosikulutuksesta on tuontia, vuosina 2030–2035 Suomi veisi suoran sähköistämisen skenaariossa nettona noin 3–4 TWh ylituotantoa vuodessa. Pääsialliset syyt tähän ovat ydinvoimakapasiteetin kasvu lyhyellä aikavälillä Olkiluoto 3:n valmistumisen myötä ja maatuulivoimakapasiteetin nopea kasvu. Sähkönkulutuksen kasvu ja suurten ydinvoimaloiden alasajo tekevät Suomesta kuitenkin jälleen sähkön nettotuojan vuodesta 2040 eteenpäin. Vuonna 2050 sähkön nettotuonti on suoran sähköistämisen skenaariossa 9 TWh:a ja lisääntynyt PtX -skenaariossa 15 TWh:a. Koko tarkastelujakson ajan Suomen sähköjärjestelmän saatavissa on lisää joustavuutta pohjoismaisesta vesivoimasta (Norja ja Ruotsi) ja ydinvoimasta (Ruotsi). Tämä rajasiirtoyhteyksien tuoma joustavuus on tärkeässä asemassa tuulituotannon

liittämiseksi osaksi sähköjärjestelmää. Toinen osa rakenteellista muutosta on kasvava ero sähköjärjestelmän kokonaiskulutuksen ja loppukäyttäjien kulutuksen välillä, mikä erottuu vuodesta 2040 eteenpäin (kuva 5). Sähköjärjestelmän kokonaiskulutus kasvaa selvästi loppukäyttäjien kulutusta suuremmaksi pääasiassa pitkäaikaisvarastoinnin (P2G2P) häviöiden takia. Ero on noin 14 TWh:a vuonna 2050 kummassakin skenaariossa. Yhteenvedo sähköjärjestelmän muutoksesta suoran sähköistymisen skenaariossa on esitetty kuvassa 6.

Kuva 6: Sektorikohtainen sähköntuotanto ja -kulutus vuonna 2020 ja 2050 (TWh) suoran sähköistämisen skenaariossa



Lähde: Enerdatan POLES-mallin ja Compass Lexeconin sähkömarkkinamallin tulokset

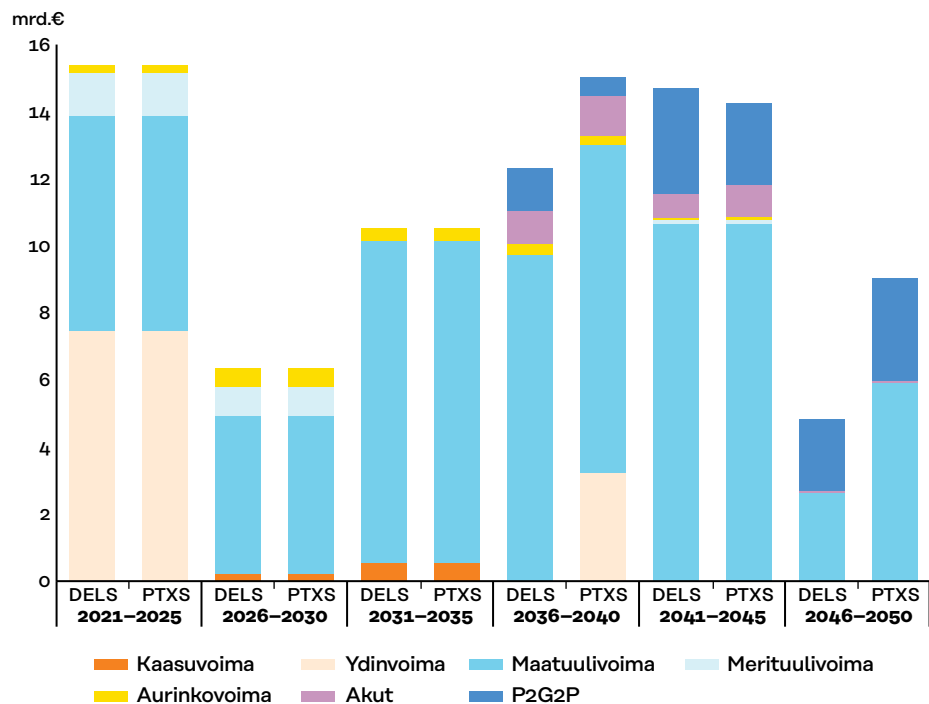
Sähköverkkojen näkökulmasta sähköistyminen näkyy voimakkaasti kantaverkossa, jossa tarvitaan uutta siirtokapasiteettia yhdistämään uusi tuulivoimakapasiteetti kulutukseen. Kantaverkon lisäkapasiteetin ohella skenaarioissa oletetaan merkittävää kasvua rajasiirtokapasiteettiin: +1,5 GW:a vuoteen 2035 mennessä ja +5,8 GW:a vuoteen 2050 mennessä. Sähköistymisen odotetaan vaikuttavan hyvin rajallisesti sähkönkuluttajia lähempänä oleviin jakeluverkkoihin, joiden kapasiteettiin vaaditaan vain vähäisiä laajennuksia verkkojen ikääntymisestä johtuvan uusimisen ja myrskyvarmuusinvestointien lisäksi.

2.2 Sähköjärjestelmän laajennus edellyttää merkittäviä investointeja

Selvityksessä on analysoitu kustannukset kummankin skenaarion edellyttämistä investoinneista sähköjärjestelmään. Tuotannon ja varastoinnin kustannusoletukset pohjaavat Euroopan komission tutkimuksiin (Euroopan komissio 2018; Capros et al. 2019), joissa puhtaiden teknologioiden kustannusten odotetaan laskevan tulevaisuudessa.

Arvio vaadittavista investoinneista vuoteen 2050 mennessä on 64 miljardia euroa³ suoran sähköistämisen skenaariossa ja 70 miljardia euroa lisääntynyt PtX -skenaariossa. Kummassakin skenaariossa suurin osa investoinneista, noin 70 prosenttia, kohdistuu maatuulivoimaan (kuva 7).

Kuva 7: Pääomakustannukset teknologioittain suoran sähköistämisen skenaariossa ja lisääntynyt PtX -skenaariossa



Huomio: Suoran sähköistämisen skenaario (DELS) ja lisääntynyt PtX -skenaario (PTXS). Ydinvoiman investointikustannukset vuosina 2021–2025 kuvastavat Olkiluoto 3:a, jonka oletetaan aloittavan sähköntuotannon vuonna 2022. Yksiköt miljardia euroa, arvoja ei ole diskontattu. Lähde: Compass Lexeconin sähkömarkkinamallin tulokset.

Arvio Suomen kantaverkon investointitarpeesta perustuu Fingridin (2021) tutkimukseen. Uuden kulutuksen ja tuotannon arvioidaan vaativan 1,5–3,0 miljardin euron lisäinvestointeja kantaverkkoon vuosina 2020–2050, Fingridin vuosille 2020–2030 varaaman kahden miljardin euron lisäksi. Skenaarioissa kuvattujen rajasiirtoyhteyksien odotetaan vaativan noin 0,9 miljardin euron investointeja vuosina 2020–2035 ja 2,6 miljardin euron investointeja 2035–2050 välillä.

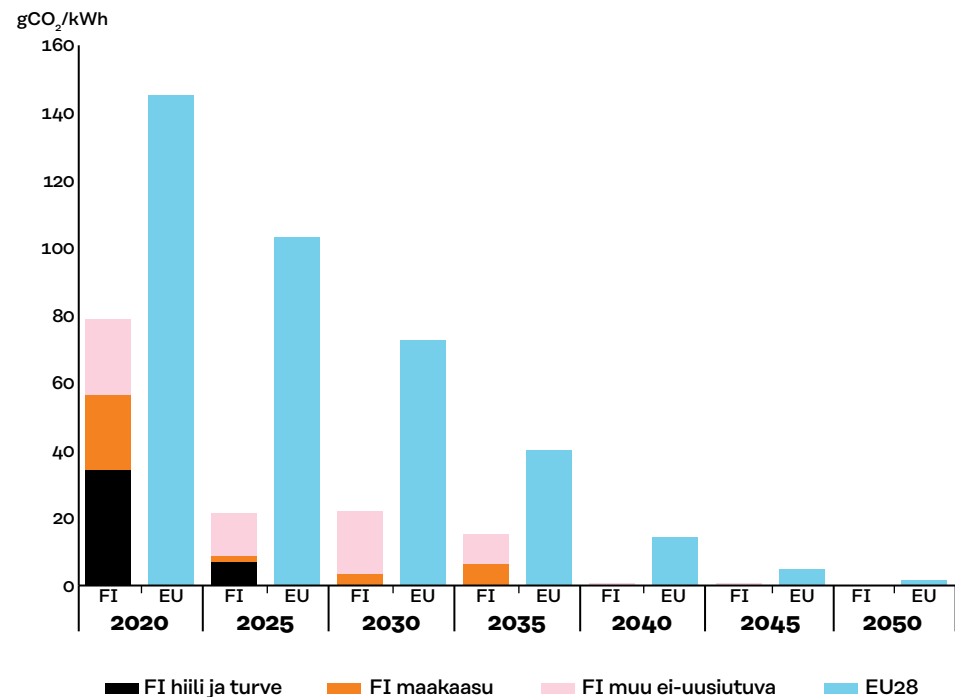
³ Selvityksessä investointiluvut on esitetty reaaliarvoina nykyrahassa. Perusvuotena on käytetty vuoden 2020 tasoa.

Sähköistäminen ei aiheuta merkittäviä lisäkustannuksia jakeluverkkoihin, sillä tarvittavat vähäiset kapasiteetin laajennukset voidaan tehdä säännöllisten verkon päivitysten yhteydessä, kunhan tulevat muutokset kuormituksessa huomioidaan riittävän ajoissa.

2.3 Sähköntuotannon päästöt laskevat nopeasti

Kummassakin skenaariossa sähköntuotanto on lähes päästötöntä jo vuonna 2040. Suomen hiilidioksidipäästöjen kehitys on siten selvästi EU:n keskiarvoa edellä (kuva 8).

Kuva 8: Suomen ja Euroopan sähköntuotannon ominaishiilidioksidipäästöt (gCO₂/kWh) suoran sähköistämisen skenaariossa

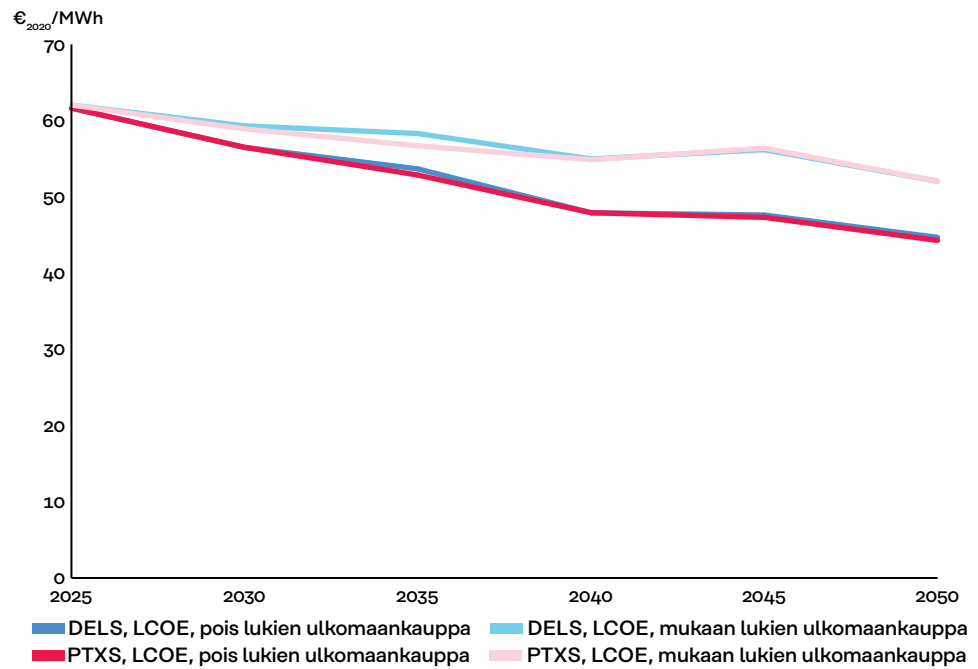


Lähde: Compass Lexeconin sähkömarkkinamallin tulokset

2.4 Sähköntuotannon kustannus laskee ja sähkön hinta nousee

Vuoteen 2050 mennessä sähköntuotannon kustannukset (LCOE) laskevat Suomessa nykytilanteeseen verrattuna kummassakin skenaariossa noin 30 prosenttia. Kun huomioidaan myös sähkön tuonti, kustannukset laskevat noin 20 prosenttia (kuva 9).

Kuva 9: Sähköjärjestelmän kokonaiskustannus energiayksikköä kohti



Huomio: Suoran sähköistämisen skenaario (DELS) ja lisääntynyt PtX -skenaario (PTXS). Yksikkönä LCOE (€/MWh). LCOE tarkoittaa tasoitettua sähkön hintaa eli pääoma-, käyttö- ja huoltokustannukset on jaettu tuotannolla; veroja ja hiilen hintaa (päästökauppa) ei ole huomioitu. Ulkomaankauppa kuvastaa sähkön tuonin ja viennin arvoa tai kustannusta. Lähde: Compass Lexeconin sähkömarkkinamallin tulokset.

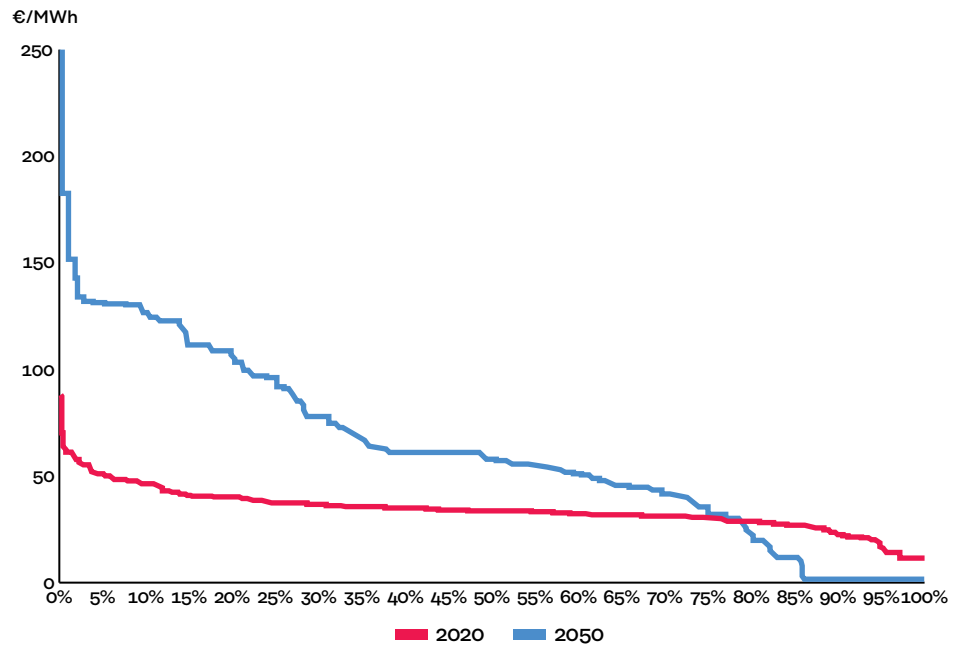
Kun sään mukaan vaihteleva sähköntuotanto lisääntyy, myös sähkön pörssihinnan⁴, eli spot-hinnan, dynamiikka muuttuu. Hintavaihtelu lisääntyy, eli vuodessa on aiempaa enemmän hetkiä, jolloin sähkön hinta on korkeampi kuin nykyisin, sekä hetkiä, jolloin sähkön hinta on lähellä nollaa (kuva 10). Sähkön keskimääräinen⁵ pörssihinta nousee suoran sähköistämisen skenaariossa vuoden 2020 33 eurosta per megawattitunti (MWh) tasolle 61 euroa MWh:lta vuoteen 2050 mennessä.

Lisääntynyt PtX -skenaariossa sähkön pörssihinta on noin 5 euroa MWh:lta suoran sähköistämisen skenaariota korkeampi vuosina 2035–2045, ja vuonna 2050 ero on noin 2 euroa per MWh. Sähkön hinta määräytyy kulloinkin käytössä olevan marginaalisen tuotantomuodon kustannusten mukaan, joten se voi nousta, vaikka sähkön keskimääräinen tuotantokustannus laskeekin.

⁴ Pörssihinta (spot-hinta) kuvastaa sähkön hintaa sähkömarkkinoilla. Pörssihinta perustuu sähkön kysyntään ja tarjontaan jokaisella tunnilla sekä vaadittavan (marginaalisen) tuotannon kustannukseen. Tuotantoteknologioiden kustannukset (LCOE) ovat tyypillisesti alemmat kuin pörssihinta.

⁵ Keskiarvo vuoden tuntien ajalta. Ei huomioi oikeita asiakaskuormia ja kysyntäjoustoa, jolla vältetään sähkön ostaminen kalliimpina tunteina.

Kuva 10: Sähkön pörssihinnan pysyvyyskäyrä suoran sähköistämisen skenaariossa



Huomio: Pysyvyyskäyrä kuvastaa sitä, minkä osuuden vuoden tunneista (8760 tuntia vuodessa) sähkön hinta on kuvaajan käyrän osoittama tai korkeampi.

Lähde: Compass Lexeconin sähkömarkkinamallin tulokset

Loppukuluttajan energialaskun näkökulmasta kasvavaa sähkönkulutusta ja siihen liittyvää kasvavaa kustannusta kuitenkin tasapainottavat energiatehokkuuden parantumisen myötä laskeva kokonaisenergiankulutus ja sähköistämisen myötä vähenevä fossiilisten polttoaineiden kulutus.

Selvitys arvioi, että kuluttajan energialasku pysyy kokonaisuutena lähes ennallaan ja voi jopa laskea nykyisestä. Vaikka sähkö kallistuu, rahaa säästyy, kun fossiilisista polttoaineista luovutaan liikenteessä ja lämmityksessä ja ne korvataan energiatehokkaammilla ratkaisuilla. Lisäksi kuluttajan on mahdollista säästää ohjaamalla sähkönkulutustaan niihin aikoihin, jolloin sähkö on edullisempaa.

Teollisuudessa energiakustannukset sen sijaan selvityksen mukaan hieman nousisivat, sillä sähköistäminen ei kaikissa sovelluksissa tuo merkittävää parannusta energiatehokkuuteen, ja erityisesti vety ja synteettiset polttoaineet lisäävät energiantarvetta. Vastaavaa kehitystä tapahtuu kuitenkin keskeisissä kilpailijamaissa, joten tämän ei odoteta vaikuttavan Suomen teollisuuden kilpailukykyyn.

2.5 Kustannukset kasvavat, jos tuulivoiman tai kysyntäjoustopotentiaalia ei hyödynnetä

Selvityksessä tehtiin kaksi herkkyyksianalyysiä. Ensimmäinen rajoittaa maatuulivoiman potentiaalin 25 GW:iin, kun alkuperäinen potentiaali oli 54 GW:a. Maatuulivoiman rajoittaminen lisää ydinvoiman käyttöä sähköntuotannossa (+4,5 GW:a suoran sähköistämisen skenaariossa vuonna 2050) sekä tarvittavaa akkukapasiteettia ja sähkön tuontia. Toisaalta kasvava ydinvoimakapasiteetti vähentää tarvetta pidemmän aikavälin P2G2P-varastoille. Tuloksena Suomessa tuotetun sähkön yksikkökustannus (LCOE) kasvaa 11 prosenttia vuonna 2050 ja Suomessa kulutetun sähkön (sisältäen tuonnin kustannuksen) kolme prosenttia vuonna 2050.

Toinen herkkyyksianalyysi puolittaa kysyntäjoustopotentiaalin alkuperäisestä. Vähentynyt kysyntäjousto kasvattaa tarvittavaa tuotannon joustavuutta, eli varastojen tarvetta, ja edellyttää lisää tuotantoa kattamaan lisääntyneet varastointihäviöt. Tämä puolestaan johtaa kasvaneisiin sähköjärjestelmän kustannuksiin. Tuloksena Suomessa tuotetun sähkön yksikkökustannus (LCOE) kasvaa viisi prosenttia vuonna 2050 ja Suomessa kulutetun sähkön (sisältäen tuonnin kustannuksen) kolme prosenttia vuonna 2050. Kysyntäjoustopotentiaalin tärkeys korostuu, sillä Suomessa kaasuvälikapasiteettia ja niille sopivia rakennuskohteita on rajallisesti. Jotta kysyntäjoustopotentiaali saataisiin käyttöön, saatetaan tarvita lisää kannustimia, informaatio-ohjausta sekä laajaa digitaalisten ratkaisujen käyttöönottoa.

3 Johtopäätökset ja seuraavat askeleet

Selvityksen mukaan Suomen hiilineutraalius vuonna 2035 ja päästöttömyys 2050 ovat toteutettavissa. Tavoitteet voidaan saavuttaa turvautumatta vielä tuntemattomiin teknologioihin tai ylioptimistisiin oletuksiin energiatehokkuuden parantumisesta ja ilman pysyvää biomassan käytön kasvua. Suurimmasta osasta kasvihuonekaasupäästöjä voitaisiin päästä eroon suoralla sähköistämisellä sekä epäsuoralla sähköistämisellä ja biomassan hyödyntämisellä niissä koh-teissa, joissa suora sähköistäminen on vaikeaa. Jäljelle jäävät päästöt maataloudesta, teollisuuden prosesseista ja kotitalousjätteistä voitaisiin kompensoida käyttämällä bioperäisen hiilen talteen-ottoa ja varastointia (BECCS).

Selvityksessä tarkasteltiin epäsuoran sähköistämisen eli elektrolyysiin pohjautuvan vedyn ja synteettisten polttoaineiden (power-to-X, PtX) mahdollista roolia. PtX-polttoaineet voivat olla kilpailukykyisiä raskaassa liikenteessä. Teollisuudessa ne voivat mahdollistaa päästöjen vähentämisen sellaisissa sovelluskohteissa, joissa suora sähköistäminen on vaikeaa tai mahdotonta. Teollisuuden, erityisesti kemianteollisuuden, fossiilisten raaka-aineiden käyttöä on mahdollista korvata ja siten niiden päästöjä vähentää biomassalla, kuten teollisuuden jäteliemillä, PtX-rat-kaisuilla ja lisääntyneellä kierrätyksellä.

Selvityksessä mallinnetuissa skenaarioissa merkittävin kustannustehokas sähköntuotanto-muoto on maatuulivoima, jota tukevat vahvasti muun tuotannon ja kysynnän jousto. Kasvava vaihtelevan tuotannon määrä ja vanhojen fossiilisten voimalaitosten alasajo lisäävät merkittä-västi tarvetta tuotantopuolen joustoratkaisuille Suomessa. Etenkin vuoden 2040 jälkeen viikoit-taista ja pidemmän aikavälin joustavuutta skenaarioissa tarjoaa power-to-gas-to-power-kapasi-teetti (P2G2P), ja akkujärjestelmät puolestaan päivänsisäistä joustavuutta. Selvitys osoittaa myös, että jos maatuulivoiman ja kysyntäjoustop täyttää potentiaalia ei saavuteta, aiheutuu siitä tuntuvia lisäkustannuksia Suomen sähköjärjestelmälle.

Sähköistäminen näkyy selvästi kantaverkossa, jossa vaaditaan lisää siirtokapasiteettia. Vastaavaa lisäkapasiteettia ei vaadita jakeluverkoilta, mutta kysyntäjoustop tärkeys korostuu kysyntähuippujen rajaamisessa.

Kummassakin skenaariossa Suomen sähköntuotannon kustannukset (LCOE) laskevat nykytilanteesta lähes 30 prosenttia vuoteen 2050 mennessä. Samaan aikaan sähkön hintavaihte-lut lisääntyvät ja sähkön keskimääräinen hinta nousee nykyisestä. Selvityksen mukaan energia-tehokkuusparannukset ja vähentynyt fossiilisten polttoaineiden käyttö kuitenkin tasoittavat kasvavaan sähkönkulutukseen liittyviä kustannuksia, ja kulutusjousto tarjoaa uusia säästömah-dollisuuksia kuluttajille.

Selvityksessä on tunnistettu useita tärkeitä seuraavia askeleita, jotta kustannustehokas päästöjen vähentäminen olisi mahdollista:

- **Hyvät puitteet teollisuuden investoinneille:** Teollisuudelle tarvitaan selvä ja vakaa näkymä tulevaan sääntelyyn sekä sujuvat luvitusprosessit.
- **Riittävät kannustimet teollisuuden sähköistymiselle:** Teollisuudelle tarvitaan kannustimet fossiilisen energian ja raaka-aineiden korvaamiseen sekä tukea uusien ratkaisujen kehittämiseen, kokeilemiseen ja kaupallistamiseen. Ensisijaisesti kannustimia kannattaa edistää EU-tasolla.
- **Perusta puhtaan vedyn hyödyntämiselle:** Tarvitaan näkemys vedyn siirtoinfrastruktuurin toteuttamisesta sekä kannustava verokohtelu ja EU-tason sääntely vedylle ja sen johdannaisille.
- **Perusta negatiivisten päästöjen tuottamiselle:** Negatiivisten päästöjen tuottamiselle tarvitaan EU-tason sääntely, kannustimet ja markkina. Tavoitteet ja toimenpideohjelma investointien liikkeelle laittamiseksi sekä näkemys hiilidioksidin siirtoinfrastruktuurin toteuttamisesta kannattaa luoda myös kansallisesti.
- **Tuulivoimarakentamisen sujuvoittaminen:** Tuulivoiman kaavoitusta ja luvitusta tulisi sujuvoittaa, ja hallinto-oikeuksien resursseja lisätä. Tuulivoimarakentamisen ja Puolustusvoimien aluevalvonnan yhteensovittamiseen tarvitaan ratkaisumalli ja tutkahäiriöiden vähentämiseen tähtäävää tutkimus- ja kehitystyötä. Puolustusvoimien lausuntoprosessin vuorovaikutteisuutta voidaan lisätä kertomalla hakijalle, millä muutoksilla hanke olisi hyväksyttävissä.
- **Sähkönsiirron saatavuuden varmistaminen:** Sähkönsiirtoverkkojen luvitusta tulisi sujuvoittaa. Sähkönsiirtotarpeiden ennakointia voidaan helpottaa säännöllisesti päivitettävillä teollisuuden tiekartoilla.
- **Kulutusrakenteen edistäminen:** Rakennuksilta tulisi edellyttää valmiutta joustavaan energiankulutukseen ja kunnianhimoisempaa energiatehokkuutta. Myös neuvontaa ja tukea energiatietäjien ratkaisujen käyttöönottoon tulisi lisätä.
- **Toimitusvarmuuden takaaminen:** Energijärjestelmän kehitystä on seurattava tiiviisti ja tarvittaessa toimitusvarmuuden turvaamiseksi on otettava käyttöön uusia kannustimia tuotantopuolen joustoratkaisuille ja riittävälle huippukapasiteetille.

Lähdeluettelo

Capros, P., Zazias, G., Evangelopoulou, S., Kannavou, M., Fotiou, T., Siskos, P., Sakellaris, K. 2019. Energy-system modelling of the EU strategy towards climate-neutrality. *Energy Policy*, 134: 1–15.

Euroopan komissio 2018. Technology pathways in decarbonisation scenarios. ASSET project. Brussels, EC.

ENTSO-E 2018. TYNDP 2018 - Data and expertise as key ingredients. Brussels. ENTSO-E.

ENTSO-E 2020. MAF 2020 Dataset. Brussels, ENTSO-E.

Fingrid 2021. Verkkovisio. Fingrid.

Roques, F., Le Thieis, Y., Aue, G., Spodniak, P., Pugliese G., Cail, S., Peffen A., Honkapuro, S., Sihvonon, V. 2021. Enabling cost-efficient electrification in Finland. Sitra.

SITRA

SITRA MUISTIO syyskuu 2021

Sitran muistiot ovat tulevaisuustyömmen taustaksi tuotettuja sisältöjä.

ISBN 978-952-347-238-9 (PDF)
www.sitra.fi

SITRA.FI

Itämerenkatu 11-13,
PL 160,
00181 Helsinki
Puhelin 0294 618 991
 @SitraFund