



SUOMEN
ILMASTOPANEELI
The Finnish Climate
Change Panel

Sähköllä merkittävä rooli Suomen kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamisessa

Peter Lund, Paula Kivimaa, Antti Arasto, Anna Lipsanen, Petteri Heliste, Eemeli Tsupari

Suomen ilmastopaneelin julkaisu 3/2021

Muistio

Useiden kansallisten^{1 2} ja kansainvälisten^{3 4} arvioiden mukaan energiajärjestelmien sähköistäminen voi merkittävästi vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Sähkön osuus loppuenergiasta nousisi näiden arvioiden mukaan huomattavasti tulevaisuudessa, mikä edellyttäisi myös sähkön tuotannon lisäämistä. Kokonaisnäkemys sähköistymisen hyödyistä ja haitoista sekä suorista ja epäsuorista vaikutuksista on vielä puutteellinen. Ilmastopaneeli on suositellut, että Suomi vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 90 prosenttia, mutta pyrkien 95 prosenttiin vuoteen 2050 mennessä⁵. Tämä edellyttää merkittäviä muutoksia niin energian tuotannossa kuin käytössä.

Tässä muistiossa luodaan kokonaiskuva sähköistymisen mahdollisuuksista Suomessa arvioimalla kriittisesti sen vaikutuksia sähköntuotantoon, päästöihin ja yhteiskuntaan viimeisintä tutkimustietoa yhdistelemällä. Tarkasteluväli ulottuu vuoteen 2050. Muistio on osa Suomen ilmastopaneelin tiede-neuvonantotehtävää. Ilmastopaneeli tuo muistion kautta näkemyksiään myös käynnissä olevaan kansallisen ilmasto- ja energiastrategian päivitykseen.

Päähuomio on seuraavissa asioissa:

- sähköistymisen kansainvälinen konteksti ja vaikutukset Suomeen
- erilaisten sähköistymispolkujen vaikutukset Suomen energiajärjestelmään
- teollisten prosessien sähköistäminen ja vaikutukset teollisuuden energiankäyttöön
- sähköistymisen vaikutukset sosiaaliseen oikeudenmukaisuuteen ja kansalliseen turvallisuuteen.

Energialähteet, kuten biomassassa tai tuulivoima, pitää muuntaa **loppuenergiaksi** eli joko sähköksi, lämmöksi tai polttoainelasteiksi ennen kulutusta. Pohjoisissa maissa noin puolet tarvittavasta loppuenergiasta on lämpöä, sähkön osuus on 20–30 prosenttia. Sektoreittain katsottuna teollisuus kuluttaa 45 prosenttia energiasta, rakennukset 26 prosenttia, liikenne 17 prosenttia ja muut käytöt 12 prosenttia.

Sähköistymisellä tarkoitetaan sähkön käytön lisäämistä ja käyttösovellusten laajentamista perinteisen sähkön käytön lisäksi eri sektoreilla. Sähköistymisessä energialähteet, kuten tuulivoima muunnetaan sähköksi ja hyödynnetään käyttövoimana esimerkiksi liikenteessä (kuten sähköautoissa) tai lämmityksessä (kuten lämpöpumpuissa). Sähköstä voidaan myös tuottaa esimerkiksi sähköpolttoaineita korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Kun sähköä tuotetaan päästöttömistä energialähteistä – esimerkiksi uusiutuvalla energialla – voi sähköistyminen avata uusia mahdollisuuksia suurille päästöleikkauksille monilla perinteisesti fossiilienergiaa hyödyntäneille sektoreille. Samalla voidaan saavuttaa parannuksia myös energiatehokkuudessa.

JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

1. Sähköllä on keskeinen merkitys pyrittäessä kohti nollapäästöjä

- Sähkön tuotannon arvioidaan muuttuvan päästöttömäksi Pohjoismaissa ja Suomessa 2030-luvun alkuun mennessä eli nopeammin kuin muilla sektoreilla. Päästötöntä sähköä käyttämällä muut toimialat voivat hyötyä sähköntuotannon nopeasti alenevista päästöistä. Sähkö auttaa saavuttamaan päästövähennykset, mutta sitä tarvitaan paljon lisää. Sähkön tarve Suomessa kasvaa sähköistymiskehityksen myötä jopa yli kaksinkertaiseksi vuoteen 2050 mennessä. Sähköistymisen avulla päästöjä voitaisiin leikata 95 prosenttia vuoteen 2050 mennessä.
- Sähköä pitää tuottaa vähäpäästöisesti, eikä sen tuotannon päästöjä saa ulkoistaa. Sähköistymisen päästövähennykset perustuvat nolla- ja vähäpäästöisen sähköntuotannon lisäämiseen. Sähköistyminen ei saa johtaa päästöintensiivisen sähköntuotannon kasvuun tai alasajon hidastumiseen. Erityisen tärkeää on, ettei sähkön kulutuksen kasvu johda lisääntyneeseen sähkön tuontiin EU:n ulkopuolelta, sillä mikäli päästökaupan alaisia päästöjä korvautuu päästökaupan ulkopuolisilla päästöillä, on riskinä, että päästöt ulkoistetaan EU:n ulkopuolelle.
- Parhaimmillaan sähköistäminen tehostaa energiankäyttöä, mutta sähköpolttoaineiden tuotannossa kokonaisenergian tarve voi kasvaa. Sähköpolttoaineiden käyttö kannattaakin ohjata niihin polttoon perustuviin prosesseihin tai sovelluksiin, joissa sähköistäminen muilla keinoin on hankalaa.
- Polttoaineita tarvitaan jonkin verran tulevaisuudessa myös vahvan sähköistymisen skenaarioissa. Tarvitaankin pikaisesti lisäselvityksiä siitä, missä määrin polttoaineeksi voidaan ilmastokestävästi hyödyntää biopohjaisia ratkaisua, missä määrin tarvitaan synteettisiä polttoaineita.
- Valtion tulee mahdollistaa sähköistymiskehitys aktiivisella politiikalla. Sähköistymisen mahdollisuudet tulee tunnistaa täysimääräisesti Suomen energia- ja ilmastopolitiikassa kuten energieveroratkaisuissa, tarvittavan infrastruktuurin varmistamisessa ja pitkäjänteisen tutkimuksen turvaamisessa parhaiden ratkaisujen kehittämiseksi.
- Sähköistyminen luo uusia mahdollisuuksia kunnille vähentää päästöjään, esimerkiksi lämmityksessä ja liikenteessä, jotka muodostavat suuren osan kuntien päästöistä. Sähköistymisellä voidaan myös poistaa paineita lisätä bioenergian käyttöä fossiilisista polttoaineista luovuttaessa, erityisesti kaukolämmössä.

2. Sähköistymisen kautta teollisuuden päästöjä voidaan leikata merkittävästi

- Teollisuuden sähköistämisen päästövähennyspotentiaali on merkittävä ja jopa yksittäisillä investointipäätöksillä voi olla suuri vaikutus päästöihin. Monille nykyisin fossiilisia polttoaineita käyttäville prosesseille on jo olemassa sähkөөn perustuva vaihtoehto ja lisää ratkaisuja on kehitysvaiheessa. Teollisuudessa keskipitkän aikavälin suurimmat sähköistämismahdollisuudet liittyvät erilaisten prosessilämmöntuotantojen sähköistämiseen esimerkiksi lämpöpumppu- ja muilla teknologioilla. Kokonaisten osaprosessien sähköistäminen ja epäsuora sähköistäminen vedyn avulla nähdään keskipitkän ja pitkän aikavälin ratkaisuiksi.
- Teollisuuden sähkönkäyttö on ympärivuotista, mikä helpottaa sähköistymistä, sillä se ei aiheuta vastaavaa vuodenaikaisista lämmönvaihteluista johtuvaa tehohaastetta kuin esimerkiksi lämmityssektorin sähköistys. Teollisuuden suurten kulutuskohteiden sähköistyminen voi lisätä koko energijärjestelmän kysyntäjoustoa.

- Olemassa oleva järjestelmä tukee sähköpolttoaineiden, kuten vedyn ja synteettisen metaanin, käyttöä teollisuudessa, ja tätä kautta teollisuuden päästöjä voidaan edelleen leikata. Nämä epäsuorat sähköistymisratkaisut tarjoavat mahdollisuuksia myös pitkän aikavälin energian varastoina, joustona ja huoltovarmuustekijänä. Pitkällä aikavälillä vety ja uusiutuvat hiilivedyt voivat olla uusiutuva ja hiilineutraali raaka-aine moniin raskaan teollisuuden prosesseihin.

3. Sähköistymisessä on kiinnitettävä kriittistä huomiota järjestelmän uusiin pullonkauluihin

- Laajalti sähköön energiankantajana perustuvassa järjestelmässä pitää kiinnittää enemmän huomiota sähköjärjestelmien integrointiin, luotettavuuteen ja kestävyYTEEN erilaisissa ääritilanteissa (esimerkiksi äärisääliöt tai kyberturvallisuusuhat), koska sähköllä on hyvin keskeinen rooli koko yhteiskunnan toiminnassa. Tämä tarkoittaa kasvavaa tarvetta sähkön ja energian varastointiratkaisuille, sähkö- tai biopolttoaineet mukaan lukien. Nykyteknologialla ei vielä pystytä kattavasti vastaamaan suurimpiin huoltovarmuus- ja toimitusvarmuuskysymyksiin.
- Sähköistymisen kautta energiatuonti tulee vähenemään, mutta riippuvuus fossiilienergiasta tulee korvautumaan uusilla riippuvuuksilla esimerkiksi kriittisistä materiaaleista tai komponenteista (kuten puolijohdepiirit, muuntajat), joita tarvitaan sähköön pohjautuvissa energiajärjestelmissä. Myös sähkön tuonnin ja laajemman sähkönsiirtoinfrastruktuurin merkitystä yhteiskunnan kannalta on tarkasteltava entistä monipuolisemmin.

4. Sähköistymisen vaikutukset oikeudenmukaisuuteen ja turvallisuuteen edellyttävät tarkkaa ja moniulotteista arviointia

- Sähköistymisen vaikutukset sosiaaliseen oikeudenmukaisuuteen, sen eri ulottuvuudet (jako-, tunnustava ja menettelytapojen oikeudenmukaisuus) sekä tasot paikallisesta kansainväliseen huomioon ottaen, tulee tunnistaa ja arvioida entistä tarkemmin ja moniulotteisemmin, jotta ilmasto- ja energiapolitiittisen päätöksenteon ja siihen kytkeytyvän systeemisen muutoksen seurauksiin osataan varautua.
- Selvityksessä tunnistettiin kuusi osa-aluetta, jotka liittyvät sähköistymisen oikeudenmukaisuuteen. Oikeudenmukaisuuden arviointiin sisältyvät muun muassa globaalit kysymykset kriittisten materiaalien ja mineraalien saatavuudesta sekä eettisyydestä, sähköistymisen kustannusten ja hyötyjen jakautuminen sekä kuluttajien tietotaito uuden teknologian hyödyntämisessä ja saavutettavuudessa. Lisäksi vaikutuksia työllisyyteen tulee tarkastella sekä eri toimialojen että eri alueiden välillä. Myös sähköistymisen edistämiseen kohdistuvan julkisen politiikan menettelytapojen oikeudenmukaisuus on tärkeää.
- Sähköistymisellä on sekä suoria ja epäsuoria että positiivisia ja negatiivisia vaikutuksia kansallisen turvallisuuden eri ulottuvuuksiin. Sähköistymisen turvallisuusvaikutuksia arvioidessa tulee huomioida sekä huoltovarmuuteen että energijärjestelmän toimintakykyyn liittyvät tekijät, mutta myös geopolitiikka, maailmanlaajuinen vakaus sekä sisäinen turvallisuus.

Sektorikytkennällä tarkoitetaan energian tuotanto- ja kulutussektorien tiiviimpää, verkostomaista ja monensuuntaista kytkemistä yhteen energiankantajien, kuten vedyn ja sähkön, sekä datan kautta. Esimerkiksi tuulivoiman tuotanto voidaan kytkeä vedyn, lämmön ja sähkön kautta lämmitykseen, liikenteeseen ja teollisuuteen, jotka puolestaan voivat olla edelleen toisiinsa kytkettyjä esimerkiksi lämmityksen tuotannon ja kulutuksen osalta. Päästöttömien energiankantajien käyttö mahdollistaa kulutussektorien päästöjen tippumisen. Eri sektorien yhteen kytkentä lisää energijärjestelmän joustavuutta, mutta tuo myös uusia tarpeita esimerkiksi infrastruktuurille.

Sähköistymisen kansainvälinen konteksti ja vaikutukset Suomeen

Uusiutuvien energialähteiden – erityisesti aurinko- ja tuulienergian – kustannusten putoaminen ja markkinoiden nopea kasvu ovat keskeisesti vaikuttaneet siihen, että kiinnostus sähköistymiseen ilmastopolitiikan keinona on kasvanut. Pariisin ilmastopöytäkirja ja päästöoikeuksien hinnan nousu Euroopassa vauhdittavat uusiutuvien energialähteiden markkinoita. Kansainvälinen energiajärjestö IEA arvioi⁶, että uudet uusiutuvat energialähteet voisivat tuottaa yli puolet maailman sähköstä vuonna 2040. Viimeisimmässä katsauksessaan IEA arvioi, että hiilineutraalisuuteen pyrkiminen edellyttäisi, että 70 prosenttia maailman sähköntuotannosta perustuisi aurinko- ja tuulivoimaan vuonna 2050⁷.

Uusiutuvan sähkön, erityisesti sen ylijäämätuotannon, hyödyntäminen sektorikytkennän kautta mahdollistaa päästöjen vähentämisen myös muilla sektoreilla. Sektorikytkentä tuo myös tarvittavaa joustovaraa vaihtelevalle uusiutuvan sähkön tuotannolle. Tästä on itse asiassa syntymässä itseään ruokkiva positiivinen kierre – mitä enemmän joustavuutta energiajärjestelmässä on, sitä enemmän myös uusiutuvaa energiaa voidaan rakentaa. Samassa yhteydessä sähkön loppukäyttöteknologiat ovat kehittyneet huomattavasti, esimerkiksi lämmityksessä (mm. lämpöpumput) ja liikenteessä (mm. sähköajoneuvot), mikä mahdollistaa tehokkaan tavan vähentää polttoon perustuvaa tuotantoa. Positiivinen kehitys näyttäisi jatkuvan: merituulivoima kasvaa, aurinkosähkö edelleen halpenee ja esimerkiksi sähköajoneuvojen käytettyjen akkujen uusiokäyttö niin kutsuttuina ”toisen elämän” akkuina voi avata merkittäviä mahdollisuuksia akkuvarastoille⁸.

Sähkön osuus globaalista energiankulutuksesta oli 19 prosenttia vuonna 2018. Sähkön kysyntä on kasvanut nopeammin kuin primäärienergian tarve jo pitemmän aikaa, mikä korostaa sähkön merkitystä yhteiskuntien kehittämisessä. IEA arvioi, että sähkö voisi vastata 39–51 prosenttia globaalisti kaikista loppuenergiasta vuonna 2040 – eräissä skenaarioissa jopa 65 prosenttia, johtuen pääosin kehittyvien maiden kasvavasta sähkön tarpeesta⁹. IEA arvioi myös, että puolet autokannasta olisi sähköajoneuvoja vuonna 2040. Merkittävä määrä tarvittavasta sähköstä tulisi uusiutuvista energialähteistä. Euroopan komission yhteisen tutkimuskeskuksen Joint Research Centerin (JRC) EU-alueen skenaarioissa sähkön osuuden oletetaan kaksinkertaistuvan perustapauksissa ja kasvavan 20 prosentista 40 prosenttiin – vahvemmissa sähköistymisen skenaarioissa sähkön osuus on jopa 50 prosenttia¹⁰. Sähkön tuotannosta pääosan arvioidaan perustuvan uusiutuviin energialähteisiin.

Pohjoismaissa sähkön merkitys on perinteisesti ollut tärkeä muun muassa suuresta vesivoiman määrästä (yli puolet sähköstä) ja energiaintensiivisestä teollisuudesta johtuen. Pääosa pohjoismaisesta sähköstä on jo nyt päästötöntä, ja arvioidaan, että sähkö voisi olla lähes nollapäästöistä jo tämän vuosikymmenen loppuun mennessä, mikä osaltaan vauhdittaa sähköistymistä yli sektorien¹¹. Tuulivoiman määrä Pohjoismaissa kasvaisi näissä skenaarioissa huomattavasti, nykyisestä jopa yli viisinkertaiseksi vuoteen 2050 mennessä.

Ruotsissa laadittiin vuonna 2019 arvio sähköistymisen vaikutuksista sähkönkulutukseen¹². Arvion mukaan sähkönkulutus kasvaa noin kolmanneksella vuoteen 2045 mennessä, erityisesti liikenteen ja teollisuuden sähköistymisen myötä, sekä esimerkiksi palvelinsektorin lisääntymisen seurauksena. Yhtä skenaariota lukuun ottamatta kaikki sähkö Ruotsissa olisi uusiutuvaa vuonna 2045, ja tästä yli puolet olisi tuulivoimaa. Sähkön hinnan arvioitiin jonkun verran nousevan esimerkiksi energiajärjestelmän tarvitsemien systeemipalvelujen kautta. Keväällä 2021 tehdyssä päivityksessä sähköistymistä vahvistettiin osana ilmastopolitiikkaa, jolloin päädyttiin peräti 71–121 prosentin lisäykseen sähkön tarpeessa vuonna 2040¹³. Sähkön käyttö teollisuudessa kolminkertaistuisi, kun käytön arvioitiin lisääntyvän erityisesti raudan, teräksen ja metallien valmistuksessa (51–57 % sähköstä) sekä liikenteessä, jossa nähtäisiin 7–9-kertainen lisäys (9 % sähköstä). Metsäteollisuuden sähkön käytön arvioitiin sen sijaan pysyvän nykyisellä tasolla. Vaikka kyseessä onkin vain arvio, olisi näin suurella sähkönkulutuksen kasvulla vaikutuksia pohjoismaisiin sähkömarkkinoihin ja heijastusvaikutuksia myös Suomeen, esimerkiksi ehtyvänä sähkön tuontina Ruotsista. Kasvava sähkö kysyntä Ruotsissa voisi siten vaikuttaa sähkön hintaan myös Suomessa. Jos pohjoismaiset

sähkömarkkinat lisäksi integroituisivat tiiviimmin manner-Eurooppaan, voisi sähkön kuluttajahinta Suomessa nousta tuntuvasti tulevaisuudessa¹⁴.

Sähköistymisen globaalit kehityssuunnat voivat vaikuttaa sähkön hintaan Suomessa. Yleensä oletetaan, että sähkön hinta pysyy vakaana tai jopa laskee tulevaisuudessa, mutta kysynnän kasvaessa ja sähkömarkkinoiden integroitua voi tapahtua myös päinvastaista kehitystä, kuten yllä on kuvattu. Halvan sähkön tuotantoa saattaa teknologiamuutosten kautta syntyä muualle kuin Suomeen, mikä voi vaikuttaa sähköistyvän energiaintensiivisen teollisuuden kilpailukykyyn ja uusien sähköintensiivisten teollisten investointien sijoittumiseen Suomen ulkopuolelle, ellei Suomessa ole riittävästi muita kilpailuetuja. Esimerkiksi Persianlahden olosuhteissa suurten aurinkosähkövoimaloiden sähkön tuotannon hinnassa on jo päästy peräti alle yhden sentin per kWh¹⁵, johon verrattuna uusien tuulivoimaloiden tuotantohinta Suomessa on 3–4-kertainen ja uusien ydinvoimaloiden 4–5-kertainen. Jos esimerkiksi sähköpolttoaineista muodostuisi merkittävä globaali markkina, Suomen kilpailuetuna tuskin voisi jatkossa olla halpa sähkö, vaan pikemminkin teknologiaan ja osaamiseen pohjautuvat tuotteet ja palvelut, joiden kehittäminen edellyttäisi nykyistä pitkäjänteisempää tutkimus- ja innovaatiopolitiikkaa.

PtX (Power-to-X, tai P2X, jossa X= väli- tai lopputuote) tarkoitetaan uusiutuvan sähköenergian muuntamista muiksi energiankantajiksi tai tuotteiksi. Usein muuntaminen tapahtuu hajottamalla elektrolyysillä vettä hapeksi ja vedyksi. Tämä mahdollistaa päästöttömän sähkön hyödyntämisen raaka-aineena myös prosesseissa tai sektoreilla, joissa suora sähkön käyttö on teknologisesti vaikeaa tai mahdotonta. Esimerkkejä PtX:stä ovat muun muassa P2fuel (power to fuel) kuten sähkön muuttaminen hiilidioksidin avulla ilmastoneutraaliksi hiilivedyksi esimerkiksi liikennesektorilla tai P2G (power to gas), jossa sähkön energia muutetaan synteettiseksi metaaniksi korvaamaan fossiilista metaania. Tällä tavalla tuotettua polttoainetta kutsutaan myös **sähköpolttoaineeksi** (englanniksi e-fuel). Fossiilisten energialähteiden energia voidaan näin korvata loppukäytön kannalta suoraan hyödynnettävässä muodossa (drop-in).

Sähköistymisen vaikutuksista Suomen energiajärjestelmään

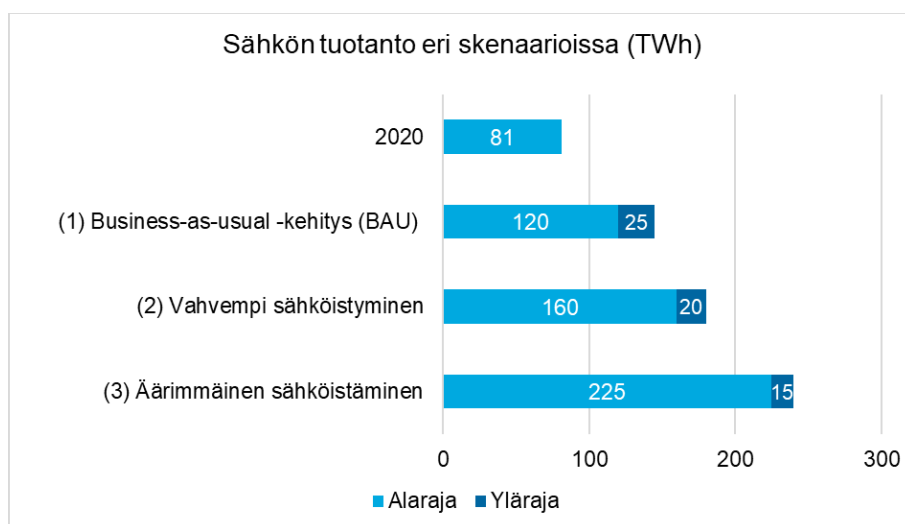
Aalto-yliopiston energiajärjestelmien DEFEND-simulointimallilla tehtiin kattava analyysi sähköistymisen mahdollisista vaikutuksista Suomen energiajärjestelmään¹⁶. Perustarkasteluissa käytettiin VTT:n Low Carbon Finland 2035 -kulutusskenaarioita. Skenaariot perustuvat energiajärjestelmän optimointiin annetuilla reunaehdoilla ja lähtötiedoillaⁱ. Tavoitteeksi asetettiin 95 prosentin päästövähennys vuoteen 2050 mennessä mahdollisimman kustannustehokkaasti annetuilla lähtötiedoilla ja reunaehdoilla. Kuvassa 1 (s. 6) on yhteenveto skenaarioiden päätuloksista, joissa keskeinen muuttuja on sähköistymisen aste. Tarkemmat analyysit löytyvät lähdeviitteestä 16.

Tarkastelussa käytetyt skenaariot

- (1) BAU = Business-as-usual (BAU) -skenaario kuvastaa nykykehityksen jatkumista vuoteen 2050, jossa mukana on nykyinen sähköistymistrendi.
- (2) Vahvemmassa sähköistymisskenaariossa pyrittiin voimakkaammin korvaamaan polttoaineita esimerkiksi teollisuudessa, sekä vähennettiin bioenergian käyttöä muualla kuin teollisuudessa;
- (3) Äärimmäisessä sähköistämistapauksessa haettiin karkeaa ylärajaa sähkön käytölle, kun koko energiajärjestelmä sähköistettäisiin (pois lukien metsäteollisuuden bioenergia).

ⁱ Pohjautuu kansainvälisiin arvioihin teknologioiden kehitymisestä ja hinnasta. Ks. esim. S. Pilpola and P. D. Lund, "Analyzing the effects of uncertainties on the modelling of low-carbon energy system pathways". Energy, vol. 201, 2020; IEA, World Energy Outlook 2020. IEA, Paris, 2020. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>; Danish Energy Agency, Technology Data. 2018. <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data>.

Kuvassa 1 on annettu kullekin skenaariolle sähkön kulutuksen ala- ja yläraja johtuen esimerkiksi erilaisista oletuksista sähkönsiirron rajakapasiteetista ja ydinvoiman määrästä. Sähkön kulutus asetui ensimmäisessä skenaariossa (BAU) välille 120 TWh (+48 %) – 145 TWh (+79 %), joka on samaa tasoa kuin aiemmissa tutkimuksissa tehtyt arviot^{17 18}. Sähkön osuus loppuenergiasta oli alle 40 prosenttia. Tarkasteltaessa vielä vahvempaa sähköistymistä skenaariossa (2) lisättiin sähköistymisen määrää siirtämällä teollisuuden polttoaineiden käyttöä sähköön. Tällainen kehityskulku voisi kuvata esimerkiksi biomassan saatavuusongelmia tai käytön rajoituksia. Vahvemman sähköistymisen skenaariossa muun biomassan käyttö (teollisuuden bioenergian käyttö ennallaan) putosi murto-osaan BAU-skenaarioon verrattuna. Sähkön käyttö kasvoi tässä tapauksessa tasolle 160–180 TWh eli +98–122 prosenttia nykytilaan verrattuna ja sähkön osuus loppuenergiasta oli 63 prosenttia. Hypoteettisessa skenaariossa (3), jossa koko energiajärjestelmä sähköistettäisiin, pois lukien metsäteollisuuden bioenergia, päädyttiin 225–240 TWh sähköntuotantoon (+178–196 %) ja sähkön osuus loppuenergiasta oli peräti 90 prosenttia.



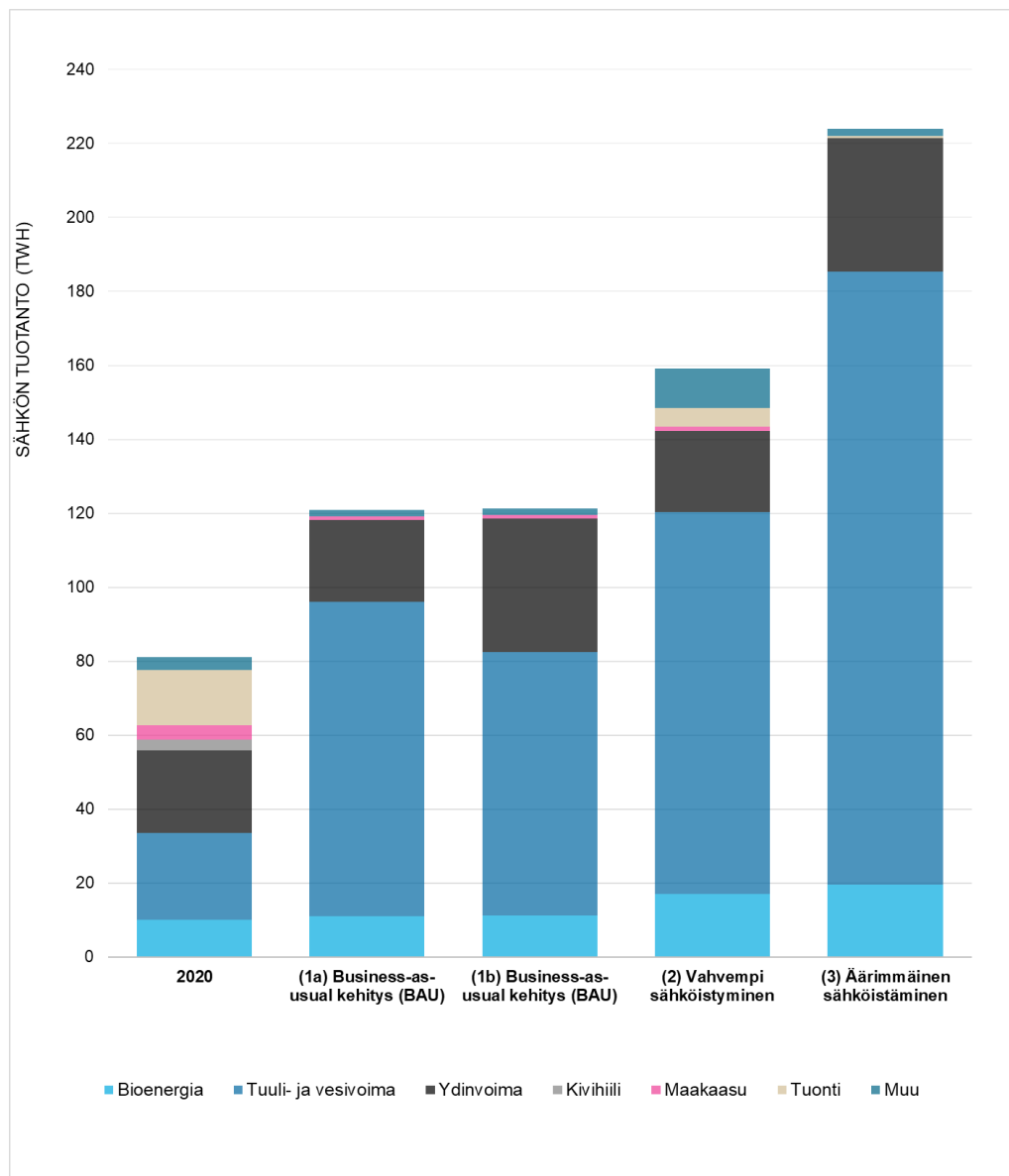
Kuva 1. Sähkön tuotanto eri skenaarioissa vuonna 2050.

Ilmastopaneeli suosittelee Suomen tavoitteeksi pyrkimistä lähes nollapäästöihin (-95 %) vuonna 2050¹⁹. Sähköistyminen näyttäisi Suomen kohdalla mahdollistavan tämän. Tarkastelluissa vahvemman sähköistymisen skenaarioissa CO₂-päästöt tippuivat 95 prosenttia vuoden 2018 tasosta. Nykykehityksen mukaisessa BAU-skenaariossa (1) päästöt olivat noin 2 Mt CO₂-ekv. korkeammat kuin vahvemman sähköistymisen skenaarioissa (2) ja (3). Skenaariotulokset seuraavat varsin hyvin aikaisempia tutkimuksia tarvittavista teknologiamuutoksista, kun pyritään suuriin päästöleikkauksiin. Sähkö korvaa fossiilisia polttoaineita kaikilla sektoreilla. Suomen tapauksessa alkuvaiheessa erityisesti lämpöä, mutta myöskään liikenteen päästöjä ei saada alas ilman voimakasta sähköistämistä, koska biopolttoainevarat ovat rajalliset (BAU-skenaariossa oletus on, että 50 prosenttia liikenteestä on sähköistetty ja 50 prosenttia biopolttoaineita vuonna 2050). Lämmityksessä sähkön käyttö kasvoi lämpöpumppujen kautta tuottamalla lämpöä ulkoilmasta, rakennusten poistoilmasta tai kallioperän syvälämpökaivoista. Sähkön siirtokapasiteetin vahvistaminen Pohjoismaihin lisäsi simuloinneissa Suomen omaa sähkön tuotantoa ja sähkön vientiä, mutta todellisuudessa tilanne voi poiketa tästä pohjoismaisesta sähkömarkkinoiden tilanteesta johtuenⁱⁱ.

Tuulivoima on merkittävin sähköntuotantomuoto (yli 50 %) kaikissa skenaariossa. Tuulivoiman määrä kasvaa huomattavasti nykyisestä, mikä edellyttäisi todennäköisesti laajaa merituulivoiman käyttöä. Ydinvoiman määrä annettiin lähtötietona muun muassa aiemmin tehtyihin energialinjauksiin perustuen

ⁱⁱ Tässä käytettiin Balmorel-energiajärjestelmämallilla laskettua tunnitaitaista sähkön hintaa vuodelle 2050 tapauksessa, jossa vesi- ja tuulivoima dominoivat sähköntuotantoa.

(alle 30 %). Metsäteollisuuden bioenergian määrä pysyi skenaarioissa pääosin ennallaan. Koska skenaarioissa luovuttiin lähes kaikesta fossiilisesta energiasta, jouduttiin lisäämään muun biomassan ja/tai sähköpolttoaineiden tuotantoa, jolla taattiin energiasektorien toimivuus kaikissa tilanteissa. Bioenergialla tuotettavan sähkön osuus sähköntuotannosta on skenaarioissa alle 10 prosenttia (ks. Kuva 2.)



Kuva 2. Esimerkkejä sähkön tuotannosta energialähteittäin eri skenaarioissa. Vesivoima pysyy nykytasolla, jolloin pääosa sähkön lisäyksestä tulee tuulivoiman kasvusta. Ydinvoiman määrä skenaariossa 1(a) vastaa rakenteilla olevia Olkiluoto 3 ja Hanhikivi 1 -ydinvoimaloita, 1(b) ja (3) sisältävät tämän lisäksi nykyisten Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 -laitosten verran lisää ydinvoimaa. Bioenergian määrä kasvaa hieman sähköistymisen edetessä energijärjestelmän toimivuuden varmistamiseksi – tätä voitaisiin korvata lisäämällä sähköpolttoaineiden tai sähkön varastoinnin käyttöä, mikä kasvattaisi muiden energialähteiden osuutta sähkön tuotannossa.

Skenaariosimuloinneissa sähköpolttoaineet (kuten synteettinen maakaasu) paransivat energijärjestelmän toimintaa ja vähentävät biopohjaisten polttoaineiden tarvetta, kun lähestytään nollapäästöjä. Energijärjestelmän toimivuuden ja sen toimintavarmuuden kannalta näyttäisi siis tarvittavan jonkin verran polttoaineita tai niiden ominaisuuksia. Sähköllä tuotettu polttoaine tarvitsee suuria määriä

sähköä ja on vielä toistaiseksi hyvin kallis. Esimerkiksi metsäteollisuuden tähteisiin ja sivuvirtoihin perustuvat ratkaisut (esimerkiksi ligniinin talteenotto) ja biokaasu voisivat siten olla kiinnostavia polttoainevaihtoehtoja tässä yhteydessä, joita kannattaisi selvittää tarkemmin.

Hiilineutraalisuustavoite vuonna 2035²⁰ sallii vielä jonkin verran fossiilisia polttoaineita energiajärjestelmässä, jotka auttavat tasapainottamaan energian kysyntää ja tuotantoa eri sektoreilla. Vuonna 2035 kuitenkin puolet öljystä, kaikki hiili ja käytännössä kaikki turve poistuvat energiajärjestelmästä. Tätä kautta bioenergian rooli tasapainottavana polttoaineena saattaa kasvaa. Pääosa bioenergiasta tuotetaan Suomessa metsäteollisuuden harvennushakkuiden, tähteiden ja jätelienten kautta. Energiajärjestelmän toimivuuden kannalta bioenergiaa saatetaan joutua käyttämään monipuolisemmin tulevaisuudessa, esimerkiksi hyödyntämään nykyistä tehokkaammin bioenergiaa luonnollisena uusiutuvan energian kausivarastona, eli vähentämään polttoa kesällä ja varastoimaan talveksi. Biomassan varastoitavuutta voidaan parantaa esimerkiksi kuivaamalla biomassaa kesäajan edullista sähköä hyödyntäen, jolloin samasta biomassaresurssista saadaan myös enemmän energiaa kuin sitä tarvitaan.

Bioenergiaan liittyy kuitenkin epävarmuutta, kuten metsäteollisuuden volyyymi, ainespuun saatavuus ja kestävyys, minkä vuoksi energiajärjestelmän polttoainekysymystä pitäisi tarkastella kriittisemmin, kun sähköistymisessä edetään. Biomassan käytössä tulee kuitenkin painottaa ilmaston kannalta kestäviä ratkaisuja, jottei samalla tulla heikentäneeksi esimerkiksi metsien hiilinielua²¹. Biomassaa kohdellaan päästöttömänä energian tuotannossa, mutta sen päästöt näkyvät maankäyttösektorilla metsään varastoituneen hiilen vähenemisenä ja maankäyttösektorin nettonielun laskuna. Tehty tarkastelu ei ota huomioon LULUCF-sektorilla tapahtuvia muutoksia nieluissa ja päästöissä. Lisää tutkimusta tarvitaankin hahmottamaan bioenergian kestävä tason tarkastelua sähköistyvässä yhteiskunnassa, erityisesti sähköpolttoaineiden mahdollisuudet tulevaisuudessa huomioiden.

Skenaariosimuloinnit tehtiin 1-tunnin aika-askeleella yhden kokonaisen kalenterivuoden yli²². Tätä kautta saatiin myös esille dynaamisia ilmiöitä energiajärjestelmästä ja energiasektoreista, kun sähkön osuus energiasta kasvoi. Vahvasti sähköön nojaavassa energiajärjestelmässä syntyi ajoittain pullonkauloja tuotannon ja kysynnän välillä, jolloin energiajärjestelmä ei välttämättä toimi kuten pitäisi – toisin sanoen syntyy mahdollisia lyhyitä energiakatkoksia. Näitä voitaisiin poistaa esimerkiksi sähkön kulutusjoustoilla tai ilmaston kannalta kestävillä polttoaineilla. Tällaiset tilanteet muistuttavat myös sähköjärjestelmän haavoittuvaisuudesta, johon pitää kiinnittää enemmän huomiota. Kyberturvallisuus, ääritilanteet, järjestelmäkriittiset kohdat, yms. vaativat uusia lähestymistapoja. Järjestelmän resilienssi on siten kriittinen tekijä sähköistämisen, erityisesti lämmityksessä, jossa sähkökatkokset voisivat vaarantaa terveyttä ja pohdittavaksi voi tulla varajärjestelmien tarve.

Sähköinfrastruktuuria (siirto- ja jakeluverkosto, rajayhteydet) pitäisi skenaarioissa hahmotelluilla sähköistymisen tasoilla vahvistaa. Kyse on kaikkiaan suurista miljarditason investoinneista, jotka pitää saada liikkeelle. Sähkömarkkinoiden nykyiset mekanismit ja epävarmuudet eivät välttämättä kannusta riittävästi investointeihin. Samoin sähköverkko-operaattorien tuotot pitää sovittaa yhteen tarvittaviin verkkoinvestointeihin. Laajamittainen sähköntuotanto merkitsee suuria infrastruktuureja ihmisten lähellä. Paikallisväestön hyväksyntä investointien toteutukselle ja hankesuunnitteluun mukaan ottaminen on keskeistä huomioida. Myös mahdollisten haittojen kompensointia tulisi pohtia paremmin politiikkakeinoja kehitettäessä.

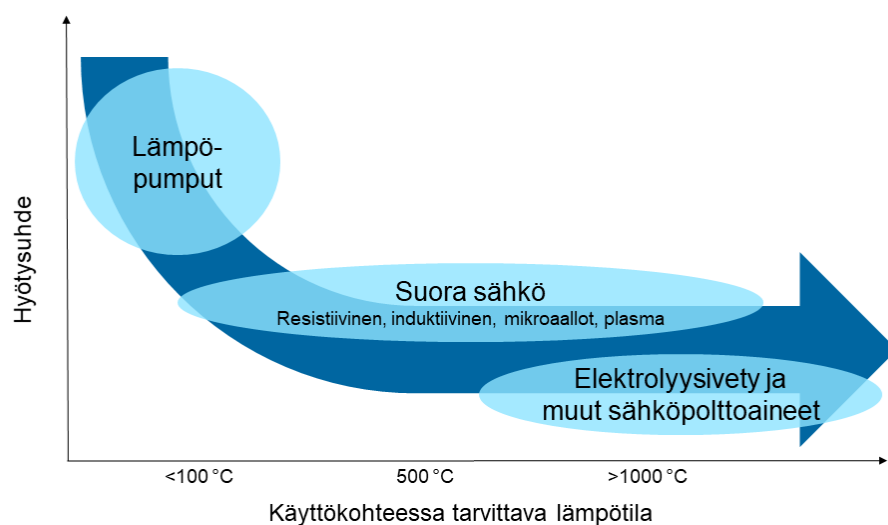
Sähköistymisen mahdollisuuksia teollisuudessa

Teollisuus käyttää lähes puolet sekä primäärienergiasta että sähköstä. Tästä syystä teollisuuden energiankäytön ja prosessien sähköistymisen oletetaan olevan merkittävä tekijä Suomen hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä ja primäärienergian kulutuksen tehostamisessa. Sähkö on erittäin monipuolinen energiamuoto, ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi teollisuuden tarvitseman

lämmön tuotantoon joko suoraan erilaisilla sähkölämmitysprosesseilla tai epäsuorasti käyttäen vetyä ja siitä johdettuja muita puhtaita energiankantajia. Yleisesti ottaen teollisuuden sähköistäminen on osittain huonosti tunnettu ja monimuotoinen joukko erilaisia ratkaisuja kuten

- polttoaineen vaihto uusiutuvista lähteistä peräisin olevaan – esimerkiksi uusiutuvalla vedyllä tuotettuun – sähköpolttoaineeseen
- keskeisen fossiilisten polttoaineiden polttoon perustuvan, esimerkiksi prosessihöyryä tuottavan kattilan vaihtaminen lämpöpumppeihin perustuvaan prosessihöyryn tuotantoon
- prosessin muuttaminen niin, että prosessiin tuodaan lämpö sähköllä (vastuksella, induktiolla, mikroaalloilla, infrapunalla tms.) muuttamatta itse prosessia
- yksikköprosessin vaihtaminen kokonaan sähkökäyttöiseen, esimerkiksi haihuttamisen vaihtaminen mekaaniseen erotukseen.

Kehitteillä on myös monenlaisia hybridiratkaisuja, joissa teollisuusprosessi saa energiaa tarpeensa mukaan, mutta energian lähde muuttuu hintojen ja/tai tehontarpeen mukaan. Hybridiratkaisut voivat tuoda merkittäviä hyötyjä tulevaisuuden sähköjärjestelmän tuotantovaihteluiden tasaamisessa. Ratkaisujen kokoluokka voi vaihdella pienistä sähkökäyttöistä aina suurten prosessiyksikköjen kuten esimerkiksi terästeollisuuden masuunin korvaamiseen. Sähköistäminen siis vähentää energian tuottamiseen liittyviä hiilidioksidipäästöjä, mutta voi samalla myös mahdollistaa energiankäytön vähentämisen esimerkiksi lämpöpumpuilla. Sähkön muuntaminen polttoaineiksi on hyötysuhteeltaan selvästi heikompi kuin muut sähköistämisen vaihtoehdot (ks. Kuva 3), mutta teollisuudessa tarvitaan myös niiden mahdollistamia korkean lämpötilan prosesseja.



Kuva 3. Lämmön tuotannon energiatehokkuutta voidaan huomattavasti parantaa lämpöpumpuilla. Teollisissa sovelluksissa, joissa tarvitaan korkeita lämpötiloja tai suurta tehoa vety ja sähköpolttoaineet ovat vaihtoehto.

Kaikissa Suomen hiili-intensiivisen prosessiteollisuuden kohteissa voidaan tunnistaa mahdollisuuksia sähköistämiseksi. Suomen osalta potentiaalisimmat sähköistymistä soveltavat teollisuudenalat ovat rauta- ja terästeollisuus, sementin, mineraalien ja tiilien valmistus, sellu- ja paperiteollisuus, kemiateollisuus sekä muoviteollisuus. Monet olemassa olevista sähkölämmitystekniikoista vaativat esimerkiksi runsaasti lisää uusiutuvan sähkön tuotantoa, elektrolyysi-infraa sekä jakelumenetelmien ja -tapojen suunnittelua tullakseen skaalatuksi ison mittaluokan käyttöön. Moniin prosesseihin voitaisiin käyttää useita erilaisia sähköisiä lämmitystekniikoita ja soveltamistapoja. Optimaaliseen ratkaisuun vaikuttavat monet tekijät kuten esimerkiksi sijainti, ympäröivät olosuhteet, teollisuusprosessin elinkaaren vaihe ja aiemmat valinnat, tulevaisuuden näkymät, poliittiset vaikuttimet ja eettiset valinnat.

Myös asiakaspaine (kysyntä vähäpäästöisille tuotteille) tai asiakastottumukset (konservatiivisuus, epäilykset uudella prosessilla tuotettuja tuotteita kohtaan) ovat tärkeitä ohjaavia tekijöitä. Edellä mainittujen tekijöiden rooli kasvaa vetysähkämurroksessa.

Prosessien sähköistämisen arvioidaan tuovan paljon muitakin hyötyjä kuin mahdollisen päästöjen vähenemisen. Teollisuuden sähköistymisen kokonaishyötyihin voi kuulua verkkotuen ja oheispalvelujen tarjoaminen, sähkökuormitustekijöiden parantaminen ja mahdollisesti tuotantokustannusten laskeminen. Hyötyihin lukeutuvat myös joustavuus muuttuvien sähköresurssien integroinnissa sekä aurinkosähkön, sähköajoneuvojen ja energiavarastoinnin synergiat. Energiahyötyjen lisäksi sähköistämisen muilla eduilla, kuten lisääntyneellä tuotteiden laadulla, tuotantomäärällä, prosessijalla, prosessin ohjattavuudella, prosessin joustavuudella ja turvallisuudella voi olla tärkeä rooli. Olemassa olevien prosessijärjestelmien ja niiden yksikkötoimintojen ymmärtäminen sekä kokonaisuusien hahmottaminen ovat välttämättömiä, jotta voidaan tunnistaa sähköistämisen lisäämiseksi soveltuvia tekniikoita ja tehdä kestäviä ratkaisuja. Sähköistymiseen liittyvien lämpöpumppujen osalta teollisuuden ylijäämälämmön tehokas hyödyntäminen on merkittävä mahdollisuus esimerkiksi hyötysuhteen ja ympäristönäkökulmien kannalta.

Sähköistymisen vaikutukset sosiaaliseen oikeudenmukaisuuteen

Sähköistymisellä on positiivisten päästövähennysvaikutusten ohella laajempia yhteiskunnallisia vaikutuksia esimerkiksi sosiaaliseen oikeudenmukaisuuteen sekä kansalliseen turvallisuuteen, joita tässä projektissa tarkasteltiin.

Sähköistymisen sosiaalista oikeudenmukaisuutta voidaan tarkastella energiamurroksen yhteydessä tunnistettujen energiaoikeudenmukaisuuden ja -demokratian käsitteiden kautta. Energiaoikeudenmukaisuus pohjautuu periaatteeseen, joka jakaa energiapalvelujen hyödyt ja haitat oikeudenmukaisesti, edistää edustavampaa ja osallistavampaa energiapäätöksentekoa sekä peräänkuuluttaa ihmisten oikeudenmukaista kohtelua ja vastavuoroista viestintää energiaan liittyvässä päätöksenteossa. Energiademokratiassa kansalaiset ovat olennainen ja aktiivinen osa energiapoliittista päätöksentekoa. Samalla pyritään eroon fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Uusi energiateknologia (kuten aurinkosähkö, lämpöpumput ja sähköautot) sekä sähköistyminen mahdollistavat energiasiirtymässä energijärjestelmien hajautumisen, jossa kotitaloudet ja kuluttajat voivat olla samanaikaisesti sekä energian kuluttajia että tuottajia (ns. prosumereita). Kaikilla ei kuitenkaan ole yhtäläisiä mahdollisuuksia ryhtyä energian kuluttaja-tuottajiksi esimerkiksi varallisuudesta, tietotaidosta tai asumismuodosta riippuen. Energiaoikeudenmukaisuuden kannalta yhtäläisten mahdollisuuksien edistäminen olisi kuitenkin tärkeää, esimerkiksi poistamalla institutionaalisia esteitä kuluttaja-tuottajamallin tieltä. Oikeudenmukaisuutta tarkasteltaessa on tärkeää myös se, miten haavoittuvassa asemassa olevat ihmiset on huomioitu sekä miten oikeudenmukaisuus näyttäytyy eri tasoilla (paikallinen, kansallinen ja globaali).

Sähköistymisellä on vaikutuksia sosiaaliseen oikeudenmukaisuuteen kansalaisten, alueiden ja eri maiden välillä. Kansainväliseen tutkimuskirjallisuuteen perustuvan katsauksen sekä sähköistymisen oikeudenmukaisuuskysymyksiä käsittelevän sidosryhmätyöpajan pohjalta tunnistettiin kuusi keskeistä teemaa, joiden alle sähköistymisen oikeudenmukaisuuskysymykset jakautuvat²³. Näitä tulee arvioida tarkemmin osana energiapoliittista päätöksentekoa Suomessa (ks. Kuvio 1, s. 11).



Kuvio 1. Sähköistymiseen ja oikeudenmukaisuuteen liittyvät keskeiset teemat ja vaikutukset. (ks. lähdeviite 23.)

Sähköistymisen vaikutukset kansalliseen turvallisuuteen

Kansainvälisen tutkimuskirjallisuuden pohjalta voidaan tunnistaa useita sähköistymiseen liittyviä positiivisia ja negatiivisia turvallisuusvaikutuksia, joiden mahdollisuuksia ja riskejä Suomessa tulisi arvioida tarkemmin²⁴. Turvallisuus viittaa keskeisiin yhteiskunnallisiin arvoihin kohdistuvien uhkien puutteeseen tai riittävään suojaan niitä vastaan. Turvallisuusvaikutuksia on jaoteltu muun muassa sotilaalliseen turvallisuuteen, taloudelliseen turvallisuuteen, ihmisten turvallisuuteen sekä ilmasto- ja ympäristöturvallisuuteen. Energiaturvallisuus on keskeinen osa kansallista turvallisuutta, käsittäen muun muassa polttoaineiden ja muiden energiantuotannon kannalta olennaisten materiaalien huoltovarmuuden, järjestelmien toimivuuden ja joustavuuden häiriötilanteissa sekä energianlähteiden moninaisuuden ja omavaraisuuden.

Sähköistyvään energiajärjestelmään kytkeytyy sekä positiivisia että negatiivisia odotuksia turvallisuuden suhteen. Yhtäältä huoltovarmuuden nähdään parantuvan fossiilisten polttoaineiden käytön vähetessä ja uusiutuvan sähkön tarjotessa enemmän kotimaista energiaa sekä uudenlaista joustavuutta. Toisaalta tähän sisältyy uudenlaisia riskejä ja riippuvuuksia. Näitä ovat esimerkiksi kriittisten mineraalien ja metallien sekä teknologisten komponenttien saatavuus ja kauppaketjut sekä monikansallisten sähköverkkojen toimivuus.

Vastaavalla tavalla positiivisia ja negatiivisia turvallisuusvaikutuksia voi olla kansainvälisesti, riippuen siitä, miten esimerkiksi kriittisiin materiaaleihin ja maankäyttöön liittyviä ongelmia ratkotaan, ja miten suurvallat reagoivat fossiilisten polttoaineiden vähenevään käyttöön. Sähköistymisellä on myös vaikutuksia yhteiskunnan instituutioihin, kuten työllisyys- ja puolustusjärjestelmiin.

Taulukko 1. Sähköistyvän energijärjestelmän turvallisuusvaikutuksia (ks. lähdeviite 24)

Negatiivisia turvallisuusvaikutuksia	Positiivisia turvallisuusvaikutuksia
Sähköntuotantojärjestelmä	
<p>Uudet riippuvuudet ja geopoliittiset riskit liittyvät kriittisiin mineraaleihin ja metalleihin sekä uusiutuvan sähkön teknologisiin komponentteihin (uudentyyppinen huoltovarmuus).</p> <p>Monimutkaistuva sähköntuotantojärjestelmä, tästä aiheutuvat tilapäiset huoltovarmuusriskit ja kyberhyökkäysten kasvava riski.</p> <p>Maiden väliset sähköverkot ja suurten infrastruktuurien luontainen heikkous pitkillä matkoilla.</p> <p>Heijastevaikutukset sähköstä riippuviin järjestelmiin, kuten ruoka- tai terveydenhuoltojärjestelmiin.</p>	<p>Suurempi valikoima sähkötuotannon vaihtoehtoja eli parantunut huoltovarmuus kansallisesti sekä kansainvälisesti superverkkojen kautta.</p> <p>Sähköjärjestelmän parantunut joustavuus ja sopeutumiskyky (erityisesti älyverkkojen ja varastoinnin kautta).</p> <p>Hajautetun sähköntuotannon ja mikroverkkojen myötä pienentynyt yksittäisen häiriön tai iskun vaikutus koko järjestelmään.</p> <p>Luottamus Euroopan maiden välisten sähköverkkojen vakauteen.</p>
Laajemman energiamurroksen vaikutukset kansainvälisesti	
<p>Konfliktit ja rakenteellinen väkivalta kohdistuvat erityisesti kriittisten materiaalien ympärille sen sijaan, että fossiilisen sähköntuotannon konfliktit poistuvat.</p> <p>Kiinan kasvava valta-asema kriittisten materiaalien ja mineraalien tuotannossa ja kauppaketjuissa, ja Euroopan huono asema (esimerkiksi harvinaisten maametallien osalta).</p> <p>Uusiutuvaan sähköntuotantoon maankäytön kautta liittyvät ristiriidat ja konfliktit (esimerkiksi Afrikassa ja Intiassa).</p> <p>Uudet epävakaudet joillakin alueilla tai alueiden välillä, kuten Eurooppa ja Venäjä tai Algeria, fossiilipolttoaineiden kysynnän vähetessä.</p> <p>Paikalliset ympäristöturvallisuusriskit kriittisten mineraalien ja metallien louhinnasta.</p>	<p>Vallan hajautuminen kansainvälisessä energiakaupassa, kun yksittäisten fossiilista energiantuotantoa hallitsevien maiden valta vähenee.</p> <p>Rajallinen geopoliittinen konfliktiriski koskien kriittisiä materiaaleja ja metalleja, jossa konfliktit ovat arvioilta pienempiä kokoluokaltaan ja vakavuudeltaan kuin fossiilisisä polttoaineissa.</p> <p>Uusiutuvan sähköntuotannon tarjoamat mahdollisuudet rauhanrakentamiseen (kytkös ulko- ja kehityspolitiikkaan).</p> <p>Hajautuvan uusiutuvan sähkön kautta mahdollisuus lisääntyvään energiaoikeudenmukaisuuteen ja -demokratiaan.</p> <p>Parantunut ilmasto- ja ympäristöturvallisuus kasvihuonekaasupäästöjen sekä fossiilisten polttoaineiden tuotannon ja kuljetuksen vähetessä.</p>
Institutionaaliset riskit ja mahdollisuudet	
<p>Sosiaalinen epävakan riski, kun fossiilisiin polttoaineisiin kytketyt työllisyysjärjestelmät hajoavat ja/tai ristiriidat ilmastotoimia vastaan ja niiden puolesta kasvavat.</p> <p>Negatiivinen lyhyt tai keskipitkä vaikutus sotilaallisten instituutioiden toimintakykyyn.</p>	<p>Mahdollisuus rikkoa hiilivetyjen kaupan lukkiutuneet toimintamallit ja vähentää niihin liittyviä huoltovarmuus- ja muita turvallisuusriskejä.</p> <p>Päästöttömät teknologiat voivat parantaa sotilaallisten instituutioiden toimintakykyä pitkällä aikavälillä.</p> <p>Euroopan sisäinen poliittinen visio ja pyrkimys taloudelliseen integraatioon parantaa myös Euroopan maiden välisten sähköverkkojen vakautta ja vähentää riippuvuutta Venäjän sähköntuotannosta.</p>

Lähteet

- ¹ T. Koljonen, J. Aakkula, J. Honkatukia, S. Soimakallio, M. Haakana, H. Hirvelä, H. Kilpeläinen, L. Kärkkäinen, J. Laitila, A. Lehtilä, H. Lehtonen, L. Maanavilja, P. Ollila, H. Siikavirta, and T. Tuomainen, *Hiilineutraali Suomi 2035 - Skenaariot ja vaikutusarviot (Finnish) [Carbon-neutral Finland 2035 - scenarios and impact analysis]*. VTT, 2020. ISBN 3-2278-83-159-879.
- ² AFRY, *Finnish Energy - Low carbon roadmap*, Technical Report 2020. https://energia.fi/files/5064/Taustaraportti_-_Finnish_Energy_Low_carbon_roadmap.pdf. Luettu 18.4.2021.
- ³ International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*. IEA, Paris, 2018. <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>.
- ⁴ Keramidas, K., Diaz Vazquez, A., Weitzel, M., Vandyck, T., Tamba, M., Tchung-Ming, S., Soria-Ramirez, A., Krause, J., Van Dingenen, R., Chai, Q., Fu, S. and Wen, X. *Global Energy and Climate Outlook 2019: Electrification for the low carbon transition*, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020, ISBN 978-92-76-15065-7, doi:10.2760/350805, JRC119619.
- ⁵ Suomen ilmastopaneeli, 2021. *Ilmastolakiin kirjattavat pitkän aikavälin päästö- ja nielutavoitteet – Ilmastopaneelin analyysi ja suositukset*. Suomen ilmastopaneelin raportti 1/2021.
- ⁶ IEA, *World Energy Outlook 2020*, OECD/IEA, Paris, 2020.
- ⁷ International Energy Agency (2021). *Net Zero by 2050. A roadmap for the global energy sector*. IEA, Paris.
- ⁸ Lund, P.D. Improving the Economics of Battery Storage. *Joule* 4 (12) 2020, 2543-2545.
- ⁹ International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*. IEA, Paris, 2018. <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>.
- ¹⁰ Keramidas, K., Diaz Vazquez, A., Weitzel, M., Vandyck, T., Tamba, M., Tchung-Ming, S., Soria-Ramirez, A., Krause, J., Van Dingenen, R., Chai, Q., Fu, S. and Wen, X. *Global Energy and Climate Outlook 2019: Electrification for the low carbon transition*, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020, ISBN 978-92-76-15065-7, doi:10.2760/350805, JRC119619.
- ¹¹ Peter D. Lund, Klaus Skytte, Simon Bolwig, Torjus Folsland Bolkesjö, Claire Bergaentzlé, Philipp Andreas Gunkel, Jon Gustav Kirkerud, Antje Klitkou, Hardi Koduvere, Armands Gravelins, Dagnija Blumberga and Lennart Söder. Pathway Analysis of a Zero-Emission Transition in the Nordic-Baltic Region. *Energies* 2019, 12(17), 3337; <https://doi.org/10.3390/en12173337>.
- ¹² Johan Bruce, Frank Krönert, Fredrik Obel, Katarina Yuen, Emma Wiesner, Linda Dyab, Kajsa Greger och Erica Lidström, Sweco. Håkan Sköldberg, Bo Rydén och Thomas Unger, Profu. Jenny Gode och Johanna Nilsson, IVL. Färdplan fossilfri el – analysunderlag. En analys av scenarier med en kraftigt ökad elanvändning. Augusti 2020. <https://www.energiforetagen.se/globalassets/energiforetagen/sa-tycker-vi/fardplaner-fossilfritt-sverige/fardplan-el-20190802.pdf>.
- ¹³ Jenny Gode, Ebba Löfblad, Thomas Unger, Julia Renström, Johan Holm, Stefan Montin, *Efterfrågan på fossilfri el. Analys av högnivåscenario*. April 2021. Saatavilla: <https://www.energiforetagen.se/globalassets/dokument/fardplaner/scenario-2045-april-2021/scenarioanalys-efterfragan-fossilfri-el-2045-slutrapport.pdf>.
- ¹⁴ Simon Bolwig, Torjus Folsland Bolkesjø, Antje Klitkou, Peter D Lund, Claire Bergaentzlé, Kristian Borch, Ole Jess Olsen, Jon Gustav Kirkerud, Yi-kuang Chen, Philip Andreas Gunkel, Klaus Skytte. Climate-friendly but socially rejected energy-transition pathways: The integration of techno-economic and socio-technical approaches in the Nordic-Baltic region. *Energy Research & Social Science* 67 (2020), 101559.
- ¹⁵ <https://www.pv-magazine.com/2021/04/08/saudi-arabias-second-pv-tender-draws-world-record-low-bid-of-0104-kwh/>
- ¹⁶ Heliste, P., *The Role of Electrification in the Decarbonisation of the Finnish Energy System*. M.Sc. Thesis. Aalto University School of Science, 26 April 2021.
- ¹⁷ AFRY (2020). *Finnish Energy - Low Carbon Roadmap*, Technical Report. https://energia.fi/files/5064/Taustaraportti_-_Finnish_Energy_Low_carbon_roadmap.pdf. Luettu 18.4.2021.
- ¹⁸ T. Koljonen, J. Aakkula, J. Honkatukia, S. Soimakallio, M. Haakana, H. Hirvelä, H. Kilpeläinen, L. Kärkkäinen, J. Laitila, A. Lehtilä, H. Lehtonen, L. Maanavilja, P. Ollila, H. Siikavirta, and T. Tuomainen (2020). *Hiilineutraali Suomi 2035 - Skenaariot ja vaikutusarviot (Finnish) [Carbon-neutral Finland 2035 - scenarios and impact analysis]*. VTT, 2020. ISBN 3-2278-83-159-879.

¹⁹ Suomen ilmastopaneeli, 2021. *Ilmastolakiin kirjattavat pitkän aikavälin päästö- ja nielutavoitteet – Ilmastopaneelin analyysi ja suositukset*. Suomen ilmastopaneelin raportti 1/2021.

²⁰ Suomen ilmastopaneeli, 2021. *Ilmastolakiin kirjattavat pitkän aikavälin päästö- ja nielutavoitteet – Ilmastopaneelin analyysi ja suositukset*. Suomen ilmastopaneelin raportti 1/2021.

²¹ Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnaichner, A. et al. Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nat. Clim. Chang.* 11, 384–393 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>

²² Heliste, P., *The Role of Electrification in the Decarbonisation of the Finnish Energy System*. M.Sc. Thesis. Aalto University School of Science, 26 April 2021.

²³ Lipsanen, A., Kivimaa, P. & Leino, M. 2021. *Sähköistymisen vaikutukset sosiaaliseen oikeudenmukaisuuteen ja sen kytkökset kansalliseen turvallisuuteen - synteesiraportti* (osana hanketta Energiajärjestelmien sähköistymisen merkitys CO₂-päästöjen leikkaamisessa). Suomen ilmastopaneelin raportti (luonnos).

²⁴ Kivimaa, P., Brisbois, M.C., Jayaram, D., Hakala, E., Siddi, M. (2021). A socio-technical lens on security in the energy transition. *Käsikirjoitus arvioitavana tieteellisessä lehdessä*.

© Suomen ilmastopaneeli



Julkaistu [CC BY 4.0](#) -lisenssillä.

Suomen ilmastopaneelin julkaisuja 3/2021

Sähköllä merkittävä rooli Suomen kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamisessa

Tekijät:

Peter Lund, Paula Kivimaa, Antti Arasto, Anna Lipsanen, Petteri Heliste ja Eemeli Tsupari

ISSN: 2737-0984

ISBN: 978-952-7457-02-3

DOI: <https://doi.org/10.31885/9789527457023>


Viittausohje:

Lund P., Kivimaa P., Arasto A., Lipsanen A., Heliste P. & Tsupari E. 2021. Sähköllä merkittävä rooli Suomen kasvihuonekaasupäästöjen leikkaamisessa. Suomen ilmastopaneelin julkaisuja 3/2021.

Suomen ilmastopaneeli edistää tieteen ja politiikan välistä vuoropuhelua ilmastokysymyksissä. Se antaa suosituksia hallituksen ilmastopoliittiseen päätöksentekoon ja vahvistaa monitieteellistä otetta ilmastotieteissä. Ilmastopaneelin selvitykset ja kannanotot tehdään tieteellisin perustein.

info@ilmastopaneeli.fi

www.ilmastopaneeli.fi

 @Ilmastopaneeli1