

Janne M. Korhonen

Muuttuva energiapalapeli: onko edessä vihreä humahdus?

IMPULSSEJA



Energiajärjestelmä muuttuu nopeasti. Esimerkiksi aurinkovoiman tuotannossa on ylitetty kaikki ennusteet. Käynnissä voi olla historiallisen nopea vihreä humahdus, jossa siirrymme vähähiiliseen järjestelmään hyvin nopeasti. Sitä kannattaa vauhdittaa ja samalla siihen on varauduttava, jotta muutos tapahtuu oikeudenmukaisesti ja hyödyimme siitä.

Tulevaisuuden energiajärjestelmä tulee perustumaan ennen kaikkea sähköön, joka tuotetaan pääasiassa tai jopa lähes kokonaan aurinko- ja tuulivoimalla. Kaiken sähköistämisen rinnalla toinen siirtymän suurista linjoista on energiajärjestelmän sektoreiden – sähköjärjestelmän, lämpöjärjestelmän, polttoainejärjestelmän – lisääntyvä *sektori-integraatio* yhdeksi energiajärjestelmäksi.

Siirtymää edellyttää suunnitelmallisuutta, jotta investoinnit uusiin ratkaisuihin saadaan varmistettua. Samalla se etenee evolutiivisesti askel kerrallaan, ja ongelmat ratkaistaan sitä mukaa, kun niiden ratkaiseminen kannattaa. Suunnitelmia on siis kyettävä muuttamaan parhaan tiedon varassa. Tätä varten valtioonhallintoon tarvitaan pysyvä poikkihallinnollinen yksikkö, joka pystyy laatimaan ja päivittämään suunnitelmia. Suunnitelmista on käytävä parlamentaarista ja kansalaiskeskustelua.

SISÄLLYS

1. Johdanto	4
2. Energiajärjestelmien perusteet	6
3. Suomen energiajärjestelmä vuonna 2023 ja sen kehitysnäkymät	12
4. Vähähiilinen energiajärjestelmä tulee, mutta kuinka nopeasti?	24
5. Uusi energiajärjestelmä on sähköinen, pääosin uusiutuva järjestelmä	45
6. Miten siirtymän oikeudenmukaisuus varmistetaan?	58
7. Yhteenveto ja politiikkasuositukset	60
Lähteet	63

Muuttuva energiapalapeli: onko edessä vihreä humahdus?

Kirjoittanut Janne M. Korhonen

Kannen kuva: TimOve – To capture a star (CC-BY-2.0)

Julkaisu on osa Kalevi Sorsa-säätiön Ihmisen toiminnan vaikutukset maapallolle -hanketta (2019–2023). Hankkeeseen on saatu rahoitusta Palkansaajasäätiöltä, Riihi säätiöltä ja Kuluttajaosuustoiminnan säätiöltä.

© Kirjoittaja ja Kalevi Sorsa -säätiö 2023.

Kalevi Sorsa -säätiö on sosialidemokraattinen ajatushautomo, joka ylläpitää yhteiskunnallista tasa-arvoa ja demokratiaa edistävää keskustelua.

1. Johdanto

HYVINVOINTIMME PERUSTANA toimiva energiajärjestelmämme syntyi teollisessa vallankumouksessa noin kaksi vuosisataa sitten. Tekniikan kehitys on vienyt meidät kauas 1800-luvusta, mutta energiajärjestelmämme on edelleen riippuvainen teolliselle vallankumoukselle sen voiman antaneista fossiilisista polttoaineista – hiilestä, öljystä ja maakaasusta. Neljä viidesosaa maailman primäärienergiasta tuotetaan yhä niillä.¹

Suuren muutoksen merkit ovat kuitenkin ilmassa.

Vuosikymmenien kärsivällisen kehitystyön jälkeen fossiilisten energialähteiden vaihtoehtoista on viimein saatu hinnaltaan ja ominaisuuksiltaan kilpailukykyisiä. Samaan aikaan sekä kasautuva huoli fossiilisten polttoaineiden aiheuttamasta ilmastonmuutoksesta että Venäjän aloittaman sodan antama muistutus fossiiliriippuvuuden riskeistä kirittävät meitä vaihtamaan energialähteet parempiin. Yksi seuraus on teollisuussijoittajien ennennäkemätön ryntäys Suomeen ja Ruotsiin. Suomen ja Ruotsin jo lähes fossiilivapaa sähkö ja mahdollisuudet rakentaa halpaa tuulivoimatuotantoa houkuttelevat esimerkiksi terästehtaita ja aiemmin venäläiseen maakaasuun nojannutta kemianteollisuutta.

Muutoksen suunta on selvä: pois fossiilisista, kohti yhä vahvemmin sähköön perustuva järjestelmä. Muutoksen aikataulu on kuitenkin avoin. Aiemmat energiasiirtymät ovat olleet hitaita ja osittaisia.

Tämän raportin keskeinen viesti on, että nyt siirtymä saattaa kuitenkin tapahtua yllättävän nopeasti. Vihreästä siirtymästä saattaa tulla nopea "vihreä humahdus."

Energian tuotannossa ja siihen liittyvissä tekniikoissa muutos etenee jo nyt niin nopeasti, että alaa seuraavillakin on vaikeuksia pysyä ajan hermolla. Puoli vuotta vanha tieto saattaa olla jo vanhentunutta. Tämä ei ole tavallista alalla, jossa investoinnit tehdään yleensä vähintään neljännesvuosisadaksi.

Energiasektori ja eräät siihen liitännäiset alat kuten sähköliikenne saattavat olla epälineaarisen, itseään kiihdyttävän muutoksen kourissa. Esimerkiksi Suomessa tuulivoima ohittanee ydinvoiman tärkeimpänä yksittäisenä sähkön lähteenä jo muutamassa vuodessa, ja yksinomaan vuosien 2024–2029 välillä rakennettavien uusien aurinkopaneelien vuosituotanto saattaa ylittää maailman kaikkien ydinvoimaloiden yhteenlasketun sähkön tuotannon.

Suomessa tuulivoima ohittanee ydinvoiman tärkeimpänä yksittäisenä sähkön lähteenä jo muutamassa vuodessa.

¹ Energy Institute 2023

Siirtymän hyödyt ja haitat tulevat jakautumaan epätasaisesti, jos sen oikeudenmukaisuudesta ei huolehdita.

Tämä raportti selittää, miksi vihreästä siirtymästä voi tulla vihreä humahdus. Raportissa käydään läpi myös tekijöitä, joiden vuoksi siirtymän nopeuteen liittyy epävarmuutta. Ennen sitä raportissa kuvataan kuitenkin energijärjestelmien perusteita, sekä Suomen nykyistä energijärjestelmää.

Vihreä humahdus on ennen kaikkea kiinnostava mahdollisuus, jonka toteutumisen todennäköisyyteen voidaan vaikuttaa politiikalla. Sekä maapallon että fossiilisesta energiasta edelleen riippuvaisten teollisuusmaiden tulevaisuuden kannalta nopea siirtymä fossiilisesta energijärjestelmästä vähähiiliseen energijärjestelmään on toivottava. Se voisi olla kokonaisuutena myös hidasta siirtymää halvempi.

Täydellistä energijärjestelmää ei kuitenkaan ole olemassa. Myös vähähiilinen energijärjestelmä tulee väistämättä olemaan kompromissi eri tavoitteiden välillä. Kompromissia havainnollistaa raportin luvussa 2.5 esiteltävä *energiatrillemma*: energijärjestelmät tasapainoilevat turvallisuuden ja saatavuuden, hinnan, ja ympäristöllisen kestävyuden kolmiossa.

Suurilla muutoksilla on suuria vaikutuksia, eivätkä kaikki vaikutukset ole välttämättä positiivisia. Siirtymän hyödyt ja haitat tulevat jakautumaan epätasaisesti, jos sen oikeudenmukaisuudesta ei huolehdita. Raportin lopussa käsitellään lyhyesti sitä, mitä vaikutuksia energiahumahuksella voi olla eri ryhmiin.

Muutos synnyttää väistämättä epävarmuutta, ja epävarmuus väistämättä ahdistusta. Seurauksena voi olla halu kieltää muutos ja tarrata vanhaan. Muutosvastarintaa ei kuitenkaan tulisi ottaa politiikan ohjenuoraksi. Aktiivista sekä reilua siirtymäpolitiikkaa tekevät valtiot ja niiden kansalaiset hyötyvät siirtymästä todennäköisesti enemmän kuin ne, jotka vastustavat siirtymää. Puhtaanvihreä aalto on vyörymässä kohti Suomemme rantaa. Surffaammeko aallon harjalla, vai jäämmekö sen alle?

2. Energiajärjestelmien perusteet

2.1 Energian on oltava käyttökelpoisessa muodossa

LUONNONLAIT MÄÄRÄÄVÄT, ettei energiaa voi luoda tai tuhota. Maailmankaikkeudessa on edelleen sama määrä energiaa kuin sen syntyhetkellä. Maahan myös virtaa jatkuvasti energiaa. Aurinko lämmittää ja valaisee Maata koko ajan noin 175 000 tuhannen miljardin watin eli terawatin (TW) teholla.² Puolet tästä tehosta heijastuu avaruuteen ja Maan pinnalle pääsee "vain" noin 80 500 terawattia. Silti kaikkien ihmiskunnan käyttämien energianlähteiden yhteenlaskettu keskiteho, vuoden 2020 tienoilla noin 17–18 terawattia, on taivaallisen fuusioreaktorimme pöhinään verrattuna mitätön pyörästysvirhe.³

Energiaa on siis runsaasti, mutta siitä on silti niukkuutta. Vain pieni osa energiasta on muodossa, jota voimme käyttää tarpeisiimme. Vain osa käyttökelpoisista energiamuodoista on paikoissa, joissa haluaisimme käyttää energiaa.

Energiaa voidaan kuitenkin sekä siirtää että muuttaa muodosta toiseen. Jokaisen muunnoksen hintana vähintään osa energiasta tosin huonontuu käyttökelvottomaan muotoon. Kaikki muunnokset eivät myöskään ole yhtä helppoja – tai välttämättä edes mahdollisia. Esimerkiksi kuumen kesäpäivän lämmittämien järvien valtavaa energiasisältöä ei käytännössä voida valjastaa sähkön tuotantoon. Lämpöpumpuilla vedestä voidaan kuitenkin "pumpata" lämpöenergiaa.⁴

2.2 Energia on keino saada asioita aikaan

Tunnetun sanonnan mukaisesti porakonetta ostava ei yleensä varsinaisesti halua porakonetta, vaan *reikiä*. Energiaakaan ei haluta energian itsensä vuoksi, vaan siksi, mitä energialla saadaan aikaan.

Perustavanlaatuisin tarpeemme on tarve pysyä hengissä. Aikuisen ihmisen peruselintoimintojen ylläpito kuluttaa vuorokaudessa energiaa noin 1200–2400 kilokaloria eli noin 1,4–2,8 kilowattituntia.⁵ *Ruoka* onkin yhteiskunnallisesti tärkein energiamuotomme.

Useimmilla seuduilla hengissä pysyminen vaatii myös toista tärkeää energiamuotoa:

2 Kleidon 2016. Watti (W) on tehon yksikkö. Tehon ja energian yhteys on yksinkertainen: teho kertaa aika on yhtä kuin energia. Yhden watin teholla energiaa tuottava tai käyttävä asia tuottaa tai käyttää yhdessä tunnissa yhden wattitunnin energiaa. Yhden watin teho vaaditaan sadan gramman painoisen esineen nostamiseen yhdessä sekunnissa yhden metrin suoraan ylöspäin. Watin teho vastaa siis karkeasti sanoen pienehkön omenan nostamista lattialta pöydälle yhdessä sekunnissa, ja wattitunti vastaisi omenan nostamista lattialta pöydälle kerran sekunnissa tunnin ajan. **3** Kleidon 2016. **4** Käytännössä energia on sitä hyödyllisemmässä muodossa, mitä suurempi *ero* energianlähteen ja siitä virtaavan lämpö- tai muun energian virran päätepuoleen välille voidaan järjestää. Esimerkiksi suurella lämpötilaerolla on useampia käyttötarkoituksia kuin pienellä, ja suuri korkeusero on hyödyllisempi kuin pieni. **5** FAO 2004. Ruoan energiamäärä ilmoitetaan tavallisesti kilokaloreina, ja energia-alalla käytetään useita eri yksiköitä, kuten wattitunteja (Wh), jouleja (J), tai tonneja öljykvivalenttia (TOE). Tutkimuskirjallisuudessa ja tilastoinnissa käytetään useimmiten wattitunteja ja niiden

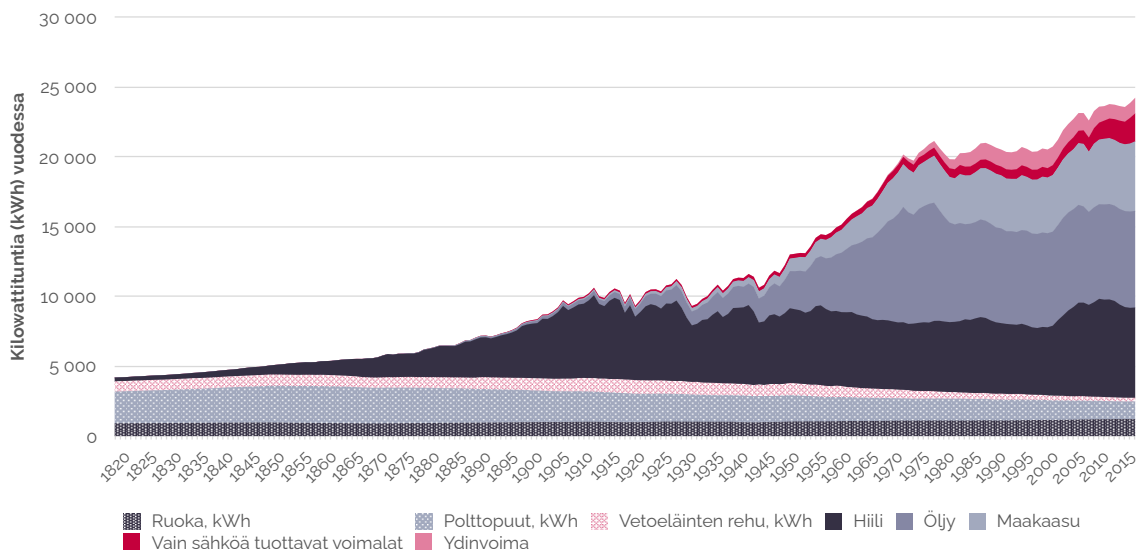
lämpöä. Lämpöä tarvitaan paitsi asumustemme lämmittämiseen, myös monenlaisten asioiden tuottamiseen – ruoan valmistuksesta metallien jalostamiseen.

Lämmön tuottamiseksi on perinteisesti käytetty *polttoaineita*. Vuosituhansien ajan lämmön tuotanto olikin ainoa tapa hyödyntää puuta, hiiltä, ja muita polttoaineita. Muiden asioiden aikaansaamiseksi, esimerkiksi aineen muokkaamiseksi tai liikuttamiseksi paikasta toiseen, tarvittiin yleensä ihmisen tai eläimen voimaa. Tuulen ja virtaavan veden voima tunnettiin, mutta niiden hyödyntäminen oli hankalaa. Vielä vuonna 1780 Euroopan kaikkien kauppalaivojen purjeet yhteensä liikuttivat rahtia arviolta vain 400 000–800 000 hevosvoiman, tai noin 300–600 megawatin teholla.⁶ Tätä voi verrata esimerkiksi jumbojetin kaltaisen suuren lentokoneen moottoreiden tehoon: nousussa yhteensä jopa 200 megawattia.

Juuri tästä syystä höyrykone oli niin mullistava keksintö. Se oli ensimmäinen käytännöllinen ja taloudellisesti järkevä keino muuttaa polttoaineiden palamisessa syntyvää lämpöä hyödylliseksi liikkeeksi: pumppaavaksi, pyöriväksi, vetäväksi, puristavaksi ja niin edelleen.

Höyrykoneiden ja myöhemmin polttomoottoreiden kyky muuttaa polttoaineiden energiaa liikevoimaksi muutti maailman perusteellisesti. Jos maailman muuttamisen mittarina käytetään siirretyn aineen määrää, vuosituhannen vaihteessa ihmiskunnan voimat ylittivät kaikki luonnonvoimat arviolta *kymmenkertaisesti*.⁷ Nykyään energiankulutuksemme, ja voimamme, ovat lähes 50 prosenttia suuremmat kuin vuonna 2000.

Kuva 1. Maailman primäärienergiankulutus asukasta kohden 1820–2018.



Lähde Malanima, 2020.

monikertoja kuten kilo- ja megawattitunteja (tuhat wattituntia eli kWh, miljoona wattituntia eli MWh) sähköenergian yksikkönä, ja mega-, peta-, tai jopa eksajouleja (miljoona-, miljoona miljardia-, tai triljoona joulea; MJ, PJ, EJ) polttoaineiden energiasisällön ilmoittamiseen. Tässä raportissa käytetään vertailujen helpottamiseksi yksinomaan wattituntien monikertoja. Eniten käytetty yksikkö, terawattitunti (TWh) tarkoittaa tuhatta miljardia wattituntia eli miljardia kilowattituntia tai miljoonaa megawattituntia. Jos raportin lukemia haluaa verrata jouleja yksikkönä käyttöviiniin tilastoihin, yksi wattitunti on 3600 joulea ja yksi joule on 0,0002778 wattituntia.

⁶ Kander ym. 2014. ⁷ Wilkinson 2005.

Nykyinen elintasomme on nimenomaan konevoimalla tehdyn työn ansiota. Koneiden ruokkiminen niille käyttökelpoisilla energiamuodoilla on puolestaan yksi yhteiskuntiemme tärkeimmistä kysymyksistä.

Tällä hetkellä noin viidennes koneidemme ja laitteidemme käyttämästä energiasta on *sähköä*.⁸ Osuus kasvaa, mutta toistaiseksi vielä hitaasti. Sähkö ei ole energialähde, kuten esimerkiksi öljy, polttopuu tai tuuli. Osaamme kuitenkin muuttaa energialähteistä peräisin olevaa energiaa sähköksi tehokkaasti ja edullisesti. Sähköä on helppo siirtää paikasta toiseen, ja sitä voidaan käyttää monipuolisemmin kuin mitään muuta käyttämäämme energiamuotoa. Tietokoneet ja elektroniikka olisivat suorastaan mahdottomia ilman sähköä.

Sähkössä on vain yksi merkittävä ongelma: sen varastointi on vaikeaa. Useimpia polttoaineita voi säilyttää helposti ja käyttää tarvittaessa. Sähköä ei käytännössä voi varastoida sellaisenaan. Sähköenergiaa voidaan kuitenkin muuttaa muotoihin, joita voidaan varastoida. Sähköä voidaan varastoida esimerkiksi akkujen tai vedyn kemialliseksi energiaksi tai vesivoimaloiden patoaltaisiin pumpatun veden potentiaalienergiaksi.

2.3 Energiajärjestelmä on sektoreista muodostuva kokonaisuus

Kokonaisuudesta, joka hankkii, muuntaa ja kuljettaa yhteiskuntiemme käyttämän energian, voidaan käyttää nimitystä *energiajärjestelmä*.

Energiajärjestelmä voidaan jakaa osiin tai sektoreihin. Tärkeitä sektoreita ovat ennen kaikkea sähköä tuottava ja siirtävä *sähköenergiajärjestelmä*, lämmitystä ja jäädytystä tuottava ja siirtävä *lämpöenergiajärjestelmä*, sekä polttoaineita niin liikenteelle, sähkövoimaloille kuin teollisuuteenkin toimittava *polttoainejärjestelmä*.

Polttoainejärjestelmän tällä hetkellä tärkein osa, etenkin Suomessa, ovat liikenteen polttoaineet. Energiasisällöllä mitattuna seuraavaksi tärkeimmässä osassa ovat ydinvoimaloiden ydinpolttoaineet, käytännössä uraani.⁹

Polttoainejärjestelmään kuuluu myös se osa teollisuuden raaka-aineista, joka poltetaan teollisuuden prosessien käyttämäksi energiaksi. Esimerkiksi metsäteollisuus polttaa puunjalostuksen jätetuotteita, kuten mustalipeää, tuottaakseen prosesseissa tarvittavaa kuumaa höyryä ja sähköä. Kemianteollisuudessa maakaasua ja öljyä käytetään sekä raaka-aineena että energialähteenä.

⁸ Enerdata 2023. ⁹ Uraani on tällä hetkellä käytännössä ainoa varsinainen ydinpolttoaine. Osa ydinreaktoreiden uraanipolttoainesauvoista muuttuu reaktorissa plutoniumiksi. Plutoniumin reaktiot tuottavat jopa kolmannesosan ydinreaktoreiden tehosta, mutta plutoniumista ei nykyään valmisteta uutta ydinpolttoainetta. Uraania noin neljä kertaa yleisemmän toriumin käyttöä ydinpolttoaineena on tutkittu 1960-luvulta lähtien, mutta kaupallisessa käytössä sitä ei vielä ole. Jos fuusioreaktorit saadaan joskus toimimaan, niiden polttoaineena käytettäisiin vedyn isotooppeja: vedessä luontaisesti esiintyvää "raskasta vetyä" eli deuteriumia ja ydinreaktioiden kautta tuotettua tritiumia. Fuusiopolttoaineeksi sopisi erinomaisesti myös ilmakehättömiltä planeetoilta kuten Kuusta ja asteroideilta löytyvä heliumin isotooppi helium-3.

2.4 Fossiilinen energiajärjestelmä oli lähes täydellinen

Teollinen vallankumous ei olisi tapahtunut ilman miljoonia vuosia sitten kuolleiden eläinten ja kasvien jäänteistä muodostuneita hiilivetyesiintymiä, eli fossiilisten polttoaineiden varantoja. Esiteollisen ajan niin sanottu *biologinen energiajärjestelmä* ei yksinkertaisesti olisi kyennyt tuottamaan sellaisia energian ylijäämiä, joita teollistuminen vaati.¹⁰ Erään laskelman mukaan Euroopan energiankulutus oli jo 1870-luvulla niin suurta, että edes koko Euroopan maapinta-alan valjastaminen polttopuiden tuotantoon ei olisi sitä voinut tyydyttää. Vuoden 1900 tienoilla tarvittavan polttopuun tuotantoon olisi tarvittu jo kahden Euroopan maa-ala.¹¹

Teollisen vallankumouksen perintönä syntyneitä energiajärjestelmiä voidaankin kutsua *fossiiliseksi energiajärjestelmäksi*. Vaikka tuotamme nykyisin osan käytetystä energiasta esimerkiksi uusiutuvalla vesivoimalla ja ei-fossiilisella ydinvoimalla, vielä vuonna 2021 peräti 85,6 prosenttia maailmassa käytetystä niin sanotusta *primäärienergiasta* oli peräisin hiilestä, öljystä ja kaasusta.

Fossiilisen energiajärjestelmän eri sektorit oli helppo erottaa toisistaan, sillä kukin muodosti oman, yleensä tarkkarajaisen kokonaisuutensa. Sähkösektoriin kuuluvat voimalat ja siirtolinjat tuottivat ja siirsivät sähköä kuluttajille. Liikennepolttoaineet jalostettiin erillisissä jalostamoissa öljystä ja jaettiin käyttäjille omassa, erillisessä järjestelmässään. Lämpöä tuotettiin sekä paikallisesti, usein jotain polttoainetta polttamalla, että lämpöenergiaa siirtävässä kaukolämpöverkossa keskitetysti.

Yhteydet kokonaisuuksien välillä eli niin sanottu *sektori-integraatiot* olivat kuitenkin harvinaisia. Esimerkiksi teollisten prosessien hukkalämpö on pitkään johdettu ympäristöön sen sijaan, että lämpöenergiaa olisi pyritty hyödyntämään vaikkapa kaukolämmön tuotannossa. Järjestelmän eri osien yhdistäminen monimutkaisilla yhteenkytkennöillä oli fossiilisessa järjestelmässä useimmiten kannattamatonta, sillä fossiiliset polttoaineet ovat olleet pitkään liiankin halpoja.

Fossiilisia polttoaineita on toisinaan sanottu lähes täydellisiksi polttoaineiksi. Niitä on ollut runsaasti saatavilla, ja niitä on ollut helppo kuljettaa, säilyttää ja käyttää. Jos niiden hankinta ja käyttö eivät aiheuttaisi niin suuria vahinkoja, ja jos niiden varannot olisivat loppumattoman suuria ja sijaitsisivat tasaisemmin ympäri maailmaa, fossiilisten polttoaineiden aika voisi jatkua vielä kauankin.

Tosiasiat ovat kuitenkin tosiasioita. Fossiilisista polttoaineista on pakko luopua. Niiden polttaminen on suurin syy vakavimpaan koko teollista sivilisaatiota kohdanneeseen uhkaan, ilmastonmuutokseen.¹² Lisäksi niiden hankkiminen aiheuttaa paikallisesti suuria ympäristövahinkoja, ja useimmat esiintymät ovat epädemokraattisten harvainvaltojen hallinnassa. Vaikka fossiiliset polttoaineet tuskin loppuvat, helposti ja edullisesti saatavilla olevat esiintymät ovat jo hupenemassa. Siksi fossiilisten polttoaineiden hankinta käy vuosi vuodelta vaikeammaksi – ja kalliimmaksi. On vain ajan kysymys, milloin kustannukset ylittävät hyödyt.

Jos polttamisen aiheuttamat vahingot laskettaisiin mukaan kustannuksiin, fossiiliset polttoaineet olisivat jo nyt selvästi vaihtoehtoja kalliimpia.¹³ Niinpä suurin osa maailman maista pyrkii eroon fossiilisten polttoaineiden käytöstä.

¹⁰ Smil 2017. ¹¹ Kander ym. 2014, taulukko 7.5. ¹² Energiantuotanto aiheuttaa nykyisin 73 prosenttia maailman kasvihuonekaasupäästöistä. Lähes kaikki tästä on peräisin fossiilisten polttoaineiden polttamisesta. Katso World Resources Institute 2023. ¹³ Jacobson 2021.

2.5 Energiatrillemma

Täydellistä energijärjestelmää ei ole eikä tule. Kaikissa vaihtoehdoissa on omia hyviä ja huonoja puoliaan. Hyvä energijärjestelmä on silti mahdollinen. Se ei kuitenkaan synny itsestään. Tarvitsemme vähintäänkin käsityksen siitä, millaisia ominaisuuksia hyvällä energijärjestelmällä on.

Koska energia on vapauksien toteutumisen edellytys, hyvän energijärjestelmän tulee toimittaa yhteiskunnan jäsenille oikeudenmukaisesti ja luotettavasti vähintään ihmisarvoiseen elämään riittävä määrä energiaa sopivissa muodoissa. Järjestelmän on oltava kustannuksiltaan kohtuullinen. Se ei myöskään saa aiheuttaa haittoja, jotka vähentävät joko nyt tai tulevaisuudessa elävien vapauksia nauttia vähintään yhtä hyvästä elämästä.

Näiden kolmen tavoitteen toteuttaminen yhtä aikaa voi olla haastavaa. Maailman energianeuvosto World Energy Council (WEC) on käyttänyt kompromissin havainnollistamiseen niin sanottua *energiatrillemmaa*: energiaturvallisuus, energian tasa-arvoinen saatavuus ja hinta, ja energijärjestelmän kestävyys.¹⁴

Suurin osa valtioista on priorisoinut hinnan ja saatavuuden. Kärsijänä on kuitenkin ollut järjestelmän kestävyys, ja usein myös luotettavuus ja turvallisuus – kuten talven 2022–2023 kriisi osoitti.¹⁵ Missään maassa energijärjestelmä ei vielä myöskään ole kokonaisuudessaan ympäristön kannalta kestävä.

WEC kertoo vuosittain oman näkemyksensä maailman eri maiden sijoittumisesta energiatrilemmalla. Energiaturvallisuus mittaa maan kykyä tyydyttää nykyinen ja tuleva energiakysyntä, ja selvittää energian tarjonnan häiriöistä. Saatavuus ja hinta mittaavat energijärjestelmän kykyä tuottaa luotettavasti kohtuullisen hintaista energiaa. Ympäristömittari puolestaan mittaa maan energijärjestelmän ympäristölle, ilmasto mukaan lukien, aiheuttamia vahinkoja.

Taulukossa 1 on koostettuna vuoden 2022 tulokset. Suomi pärjää hyvin sekä yhteispisteissä että energiaturvallisuudessa ja melko hyvin ympäristöarvoissa (sijalla 13), mutta on keskitasoa (sijalla 23) energian tasa-arvoisessa saatavuudessa ja hinnassa. Suomen sijoituksen voi kuitenkin odottaa nousevan talven 2022–2023 energiakriisin vuoksi: esimerkiksi sähkö oli tuolloin Suomessa Euroopan toiseksi halvinta.¹⁶

*Energia on vapauksien
toteutumisen edellytys.*

¹⁴ World Energy Council 2022. ¹⁵ Talven 2022–2023 energiakriisin syitä ja seurauksia käsitellään tarkemmin Sorsa-säätiön raportissa *Myytimurtajaiset osa 2: Yhdeksän kysymystä ja vastausta vuoden 2022 energiakriisistä* (Korhonen 2023). ¹⁶ *Myytimurtajaiset osa 2-raportti* (Korhonen 2023).

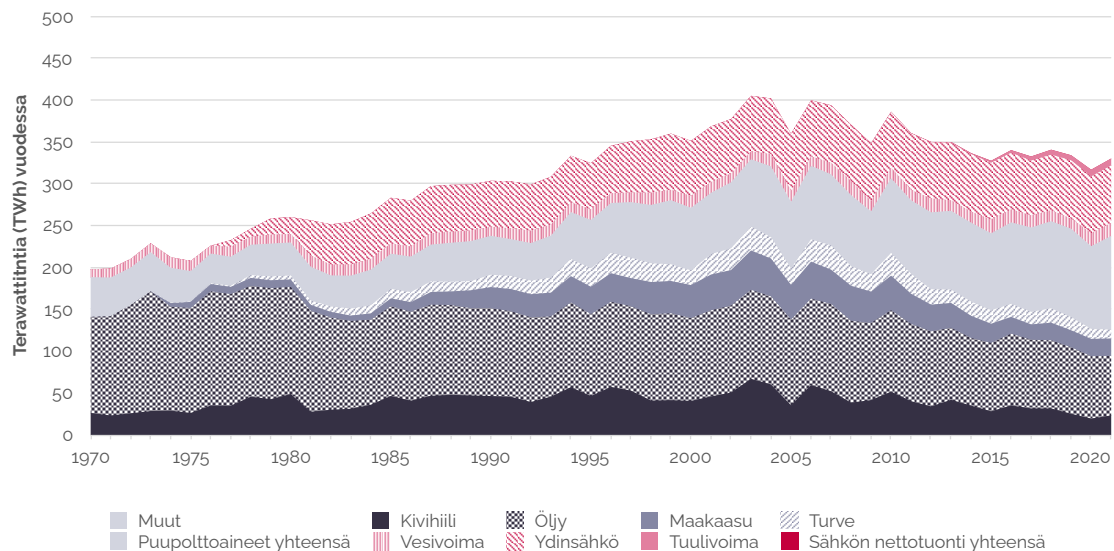
Taulukko 1. WEC Energy Trilemma-sijoitukset vuonna 2022.

Sijoitus 2022	Yhteispisteet	Turvallisuus	Saatavuus ja hinta	Ympäristö
1	Ruotsi	Kanada	Luxemburg	Ruotsi
2	Sveitsi	Yhdysvallat	Kuwait	Sveitsi
3	Tanska	Suomi	Yhdistyneet Arabiemi- raatit	Norja
4	Suomi	Ruotsi	Islanti	Tanska
5	Iso-Britannia	Tshekki	Oman	Uruguay
6	Kanada	Saksa	Bahrain	Ranska
7	Itävalta	Latvia	Irlanti	Iso-Britannia
8	Ranska	Unkari	Sveitsi	Brasilia
9	Norja	Itävalta	Trinidad ja Tobago	Albania
10	Saksa	Iso-Britannia	Israel	Luxemburg

3. Suomen energiajärjestelmä vuonna 2023 ja sen kehitysnäkymät

SUOMEN ENERGIAJÄRJESTELMÄ on jo hyvää vauhtia matkalla kohti hyvää energiajärjestelmää. Lyhyesti sanoen, sähköntuotannon ongelmat on pitkälti ratkaistu, mutta liikenteen ja lämmön energialähteiden korvaaminen kestäväillä energiamuodoilla on vasta tekeillä (Kuva 2).

Kuva 2. Suomen primäärienergiankulutus 1970–2021.



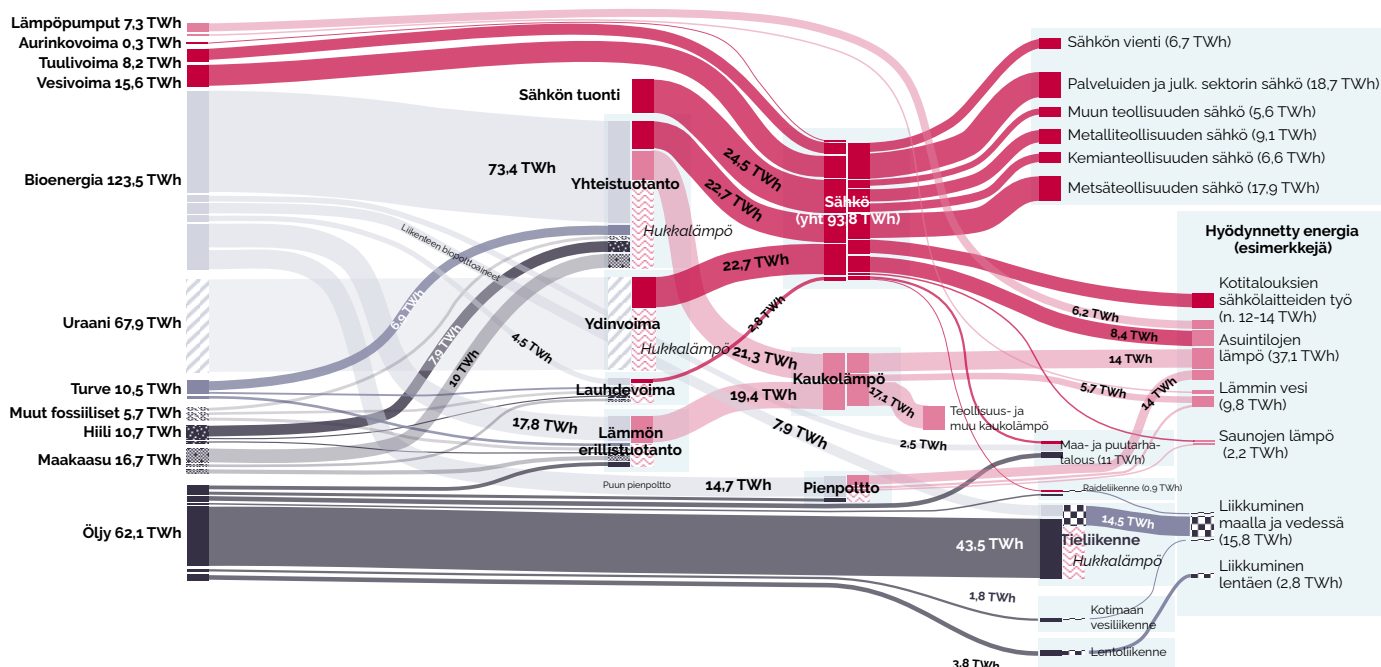
Aineistolähteenä Tilastokeskus (2022), Energian hankinta ja kulutus.

Kuvassa 3 on hahmoteltu Suomen energiajärjestelmän tärkeimmät osat vuonna 2021. Vasemmassa laidassa ovat keskeiset energialähteet terawattitunneissa (TWh) mitattuna. Kuvan keskeltä nähdään, että ne jalostetaan etupäässä sähköksi ja lämmöksi. Kuvan oikeassa laidassa on esimerkkejä energian loppukäytöstä, kuten kotien lämmöstä, sähkölaitteiden tekemästä työstä, sekä liikkumisesta.

Kuva näyttää myös osan energiahäviöistä. Esimerkiksi liikenteen käyttämistä polttoaineista valtaosa ei muutu hyödylliseksi liikkeeksi, vaan hukkalämmöksi ja muiksi häviöiksi. Syynä tähän on se, että parhaimpienkin polttomoottoreiden hyötysuhde jää käytännössä alle 40 prosenttiin.

Sähköntuotannon ongelmat on pitkälti ratkaistu, mutta liikenteen ja lämmön energialähteiden korvaaminen kestävillä energiamuodoilla on vasta tekeillä.

Kuva 3. Suomen energiajärjestelmän keskeiset virrat vuonna 2021.



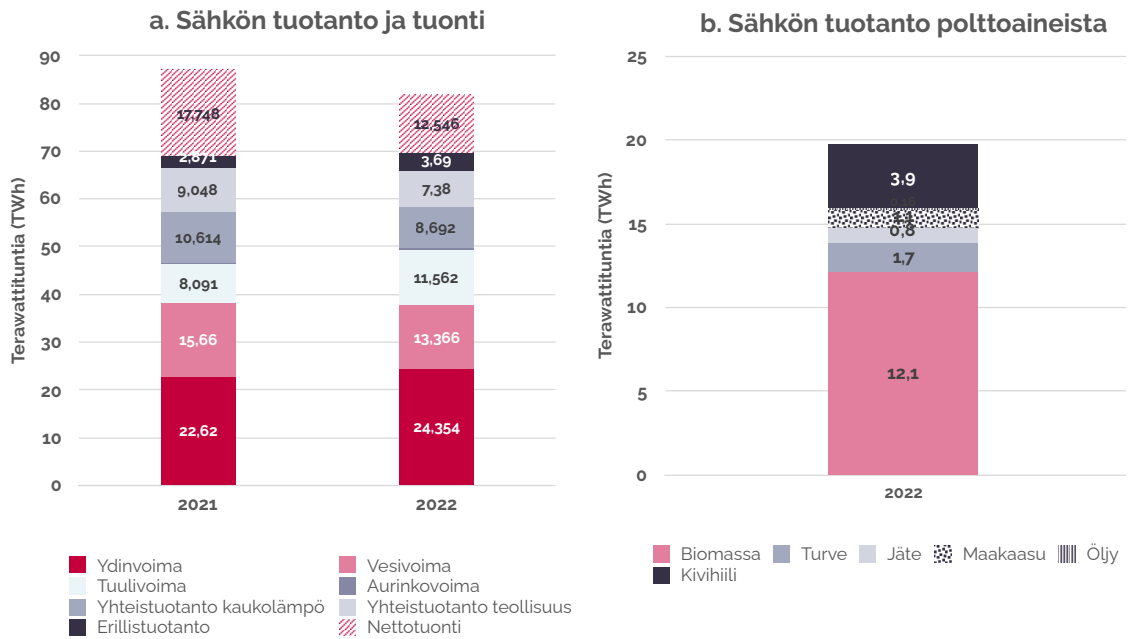
Aineistolähteenä Tilastokeskus (2023), Energian hankinta ja kulutus.

3.1 Sähkö tuotetaan enimmäkseen kestävästi

Vuonna 2022 noin 90 prosenttia Suomessa tuotetusta sähköstä tuotettiin jo kestävästi pienin kasvihuonekaasupäästöin. Suomen sähköntuotannon riippuvuus fossiilisista polttoaineista onkin Euroopan vähäisimpien joukossa (Kuva 4). Tämä auttoi meitä selviämään kriisitalvesta 2022–2023 muihin Euroopan maihin verrattuna suhteellisen vähäisin vahingoin.¹⁷

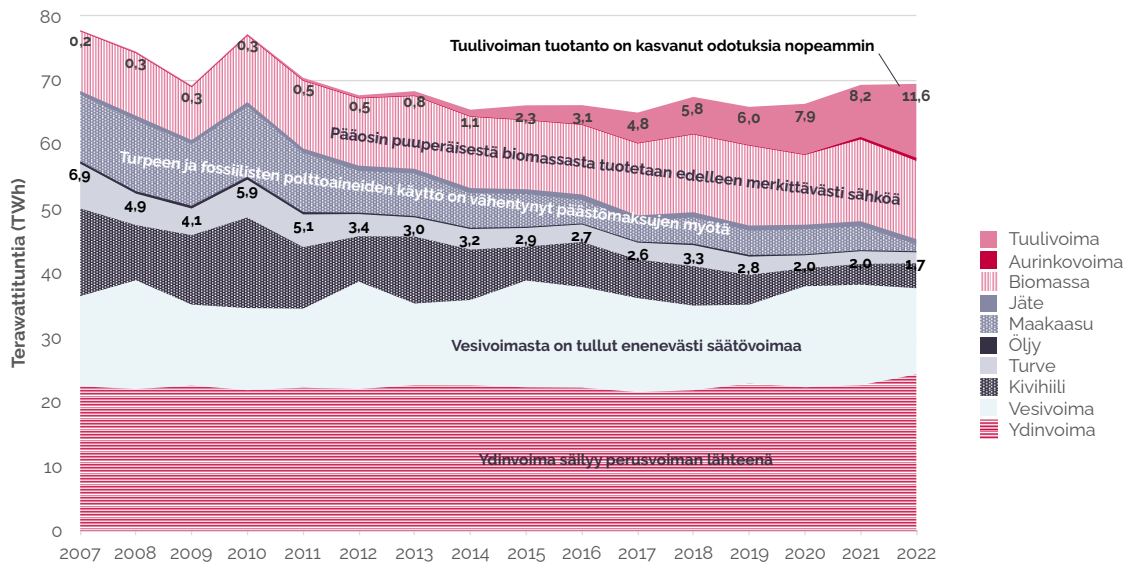
¹⁷ Myytimurtajaiset osa 2-raportti (Korhonen 2023).

Kuva 4. Sähkön tuotanto ja tuonti 2021 ja 2022.



Lähde: Energiateollisuus, 2023.

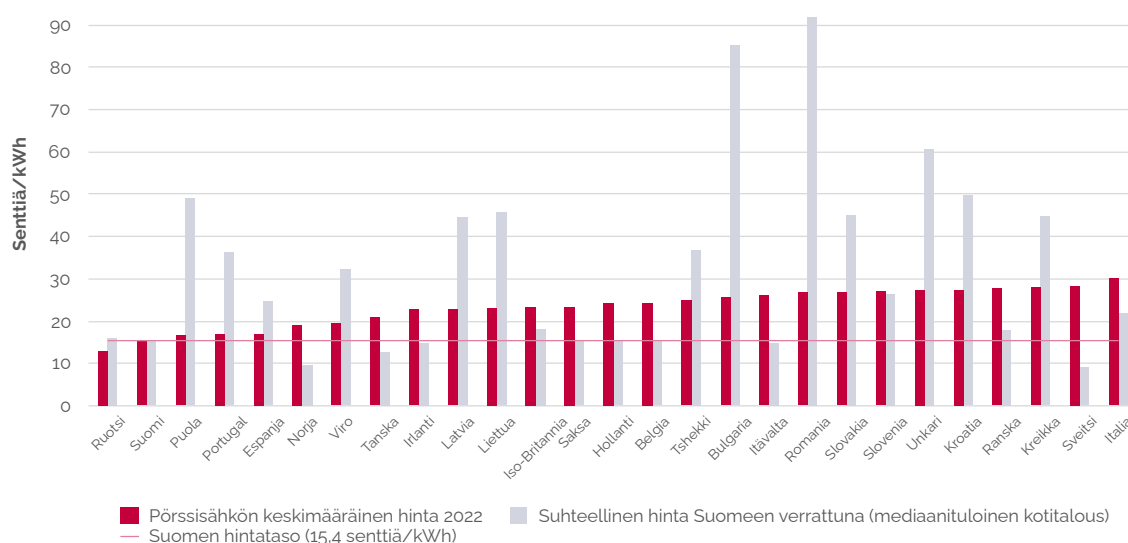
Kuva 5. Suomen sähköntuotannon kehitys energialähteittäin.



Lähde: Energiateollisuus, 2022.

Kriisi olisi ollut paljon vakavampi, jos tuulivoimarakentamisen käynnistämistä ei olisi tuettu jo yli vuosikymmen sitten (Kuva 5). Tuulivoimalla tuotettiin vuonna 2022 jo lähes 17 prosenttia Suomessa tuotetusta sähköstä.¹⁸ Kaikesta käytetystä sähköstä (tuotanto ja tuonti yhteensä) tuulivoiman osuus oli 14,1 prosenttia. Tuulisina päivinä sähkön hinnat pysyivätkin maltillisina myös viime talven kriisin aikana. Ilman ennätysnopeasti lisääntyntä tuulivoimaa, sähkön hinta olisi ollut erittäin korkealla lähes koko kriisitalven ajan. Vuonna 2022 sähkö oli Suomessa Euroopan toiseksi halvinta (Kuva 6).

Kuva 6. Sähkön keskihinta Euroopassa 2022 (punainen) ja hinta suhteutettuna Suomen ostovoimaan (harmaa).



Aineistolähteet Energiategollisuus, 2023 ja Eurostat, 2023.

Kriisi olisi saatettu välttää lähes kokonaan, jos Olkiluodon kolmas reaktori olisi saatu käyttöön ajoissa. Reaktorin käyttöönoton, Pohjoismaiden parantuneen vesitilanteen, fossiilisten hinnan laskun, tuulivoiman rakentamisen ja aurinkovoiman yllättävänkin nopean lisääntymisen vuoksi sähkön hintoja parhaiten ennustavat hintafutuurit ennustavat Suomen selvinneen energiakriisistä.¹⁹

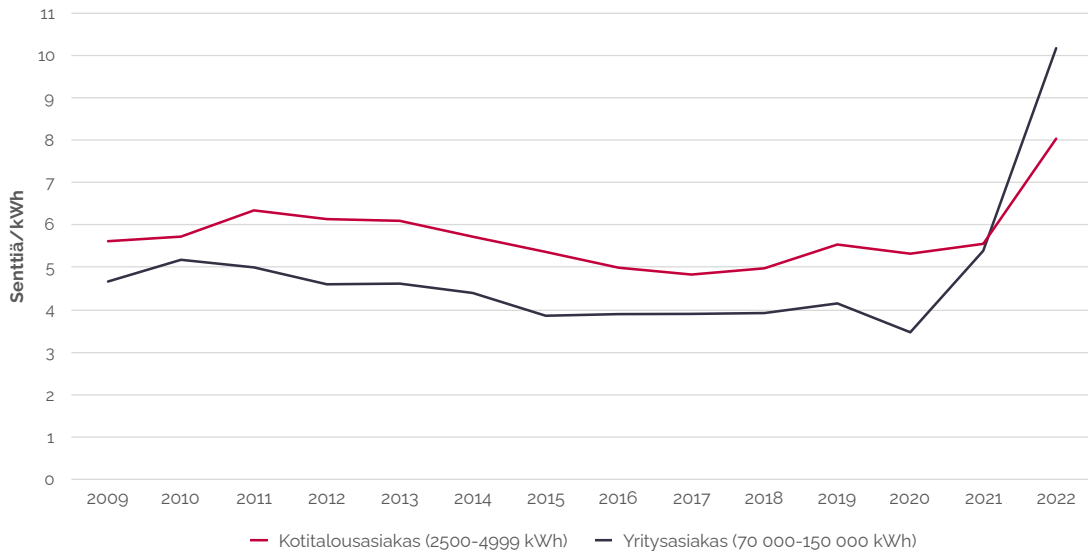
Suomi houkuttaakin tällä hetkellä uusia teollisuussijoituksia, koska sähkön hinta tulee todennäköisesti pysymään maltillisena.²⁰ Hinnan vaihtelut tulevat kuitenkin olemaan suurempia kuin sähkön ylituotannosta johtuneiden poikkeuksellisen halpojen hintojen kaudella 2009–2021 (Kuva 7).²¹ Tuulisina ja aurinkoisina päivinä sähkö tulee todennäköisesti olemaan lähivuosina hyvin halpaa. Tuulettomina, kylminä päivinä nähdään hintahuippuja. Hintaa parhaiten ennustavien hintafutuuriin mukaan sähkön keskihinta tulee kuitenkin vuonna 2024 olemaan inflaatio huomioiden lähes samalla tasolla kuin 2009–2021.²²

¹⁸ Energiategollisuus 2022. ¹⁹ Panzar 2023 ja Energiategollisuus 2023; Matti Leppänen, henkilökohtainen viesti.

²⁰ Esimerkiksi Ruotsin kantaverkkoyhtiö SVK ennustaa sähkön keskihinnan olevan Suomessa vuonna 2024 51 €/MWh (5,1 senttiä/kWh) ja nousevan vuoteen 2027 mennessä tasolle 65 €/MWh. Hinta voi todellisuudessa jäädä alhaisemmaksi, koska kulutus ei luultavasti kasva aivan SVK:n ennusteiden mukaisesti.

²¹ Vehviläinen ja Kara 2015. ²² Panzar 2023 ja Energiategollisuus 2023.

Kuva 7. Sähkön hinta Suomessa ilman veroja tai siirtomaksuja 2009–2022.



Lähde: Tilastokeskus (2022), Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin.

3.2 Liikenteen veroitus fossiiliriippuvuudesta on vasta alkamassa

3.2.1 Maaliikenne ja jopa osa laivoista sähköistyy

Energiajärjestelmän muilla sektoreilla on vielä enemmän tehtävää. Kuten muissakin maissa, liikenne on Suomessa vielä lähes täysin riippuvaista fossiilisesta öljystä. Esimerkiksi vuonna 2021 tieliikenteen yhteensä noin 44 terawattitunnin (TWh) energiankulutuksesta vain noin 0,24 TWh katettiin sähköllä. Vain raideliikenne on enimmäkseen sähköinen: vuonna 2021 sen yhteensä noin 0,9 TWh kulutuksesta noin 0,7 TWh oli sähköä.

Muutos on kuitenkin kiihtymässä sähköautojen määrän lisääntyessä nopeasti.

Akkuteknikka on kehittynyt niin paljon, että sähkön voi jo ennustaa nousevan ylivoimaisesti tärkeimmäksi liikenteen energialähteeksi. Akkujen hinta on laskenut nopeasti, ja niiden odotuksia nopeammin kasvanut energiatiheys (varastoitavissa oleva energian määrä jaettuna akun painolla) houkuttelee sähköistämään jopa aiemmin mahdottomana sähköistettävänä pidetyn lentoliikenteen.

Kehityksen mahdollisuuksia hahmottaa alla oleva taulukko, jossa on esitetty eri polttoaineiden ja akkukemioiden mahdollisia energiatihyksiä (Taulukko 2). Akkujen energiatihyden vertaaminen polttoaineiden energiatihyteen on kuitenkin hankalaa, koska polttomoottoreiden hyötysuhde on merkittävästi sähkömoottorien hyötysuhdetta pienempi. Yksi sähköistymisen sivuvaikutuksista onkin energiankulutuksen väheneminen.

Esimerkiksi tavallisilla henkilöautoilla hyötysuhde jää yleensä 10–20 prosenttiin, tehokaimman tuotannossa olevan auton polttomoottorin (Toyota DFE) päästessä enintään 40 prosenttiin.²³ Sähkömoottorit muuttavat sen sijaan akun energiasisällöstä hyödylliseksi liikkeeksi 73–90 prosenttia tai enemmänkin.²⁴ Niinpä taulukossa on esitetty myös tyypillisillä hyötysuhteilla korjattu *tehollinen energiatiheys*.²⁵

Taulukko 2. Energiavarojen energiatihyksiä.

Energiavaro	Energiatiheys, Wh/kg	Käyttö	Hyötysuhde	Tehollinen energiatiheys, Wh/kg
<i>Polttoaineet</i>				
Bensiini	n. 12 900	Toyota DFE	40 %	5 200
Raskas polttoöljy	n. 11 360	Laivakone	44 %	5 000
Lentokerosiini	n. 11 950	Suihkuturbiini	33 %	3 900
Bensiini	n. 12 900	Henkilöauto	10–20 %	1 300–2 600
<i>Mahdolliset akkukemiat</i>				
Litium-ilma (Li-Air)	≤ 11 140	Liikenteessä	73–90 %	8 100–10 000
Alumiini-happi (Al-O)	≤ 8 100	Liikenteessä	73–90 %	5 900–7 300
Magnesium-happi (Mg-O)	≤ 6 800	Liikenteessä	73–90 %	5 000–6 100
Litium-rikki (Li-S)	≤ 2 600	Liikenteessä	73–90 %	1 900–2 350
Natrium-happi (Na-O)	≤ 1 605	Liikenteessä	73–90 %	1 200–1 450
Sinkki-happi (Zn-O)	≤ 1 084	Liikenteessä	73–90 %	800–975
Litium-ioni (Li-ion)	≤ 1 250?	Liikenteessä	73–90 %	910–1 125
Li-ion, laboratoriossa	700	Liikenteessä	73–90 %	510–630
<i>Sarjatuotannossa kesällä 2023 olevat akut</i>				
CATL Li-ion	500	Liikenteessä	73–90 %	365–450
Tyypillinen Li-ion	n. 250	Liikenteessä	73–90 %	182–225
Lyijyakku	n. 123	Liikenteessä	73–90 %	90–110

Taulukon lähteet: Hyötysuhteet Craig 2020, Hepperle 2012, Hughes 2018 ja Jacobson 2021. Akkujen energiatihydet Naqvi ym. 2022 ja Bleakley 2023.

23 Hughes 2018. **24** Hepperle 2012 ja Jacobson 2021. **25** Mahdollisten akkukemioiden energiatiheys on ilmoitettu kirjallisuudessa ilmoitettuna teoreettisena enimmäisarvona. Käytännön energiatiheys jää väistämättä pienemmäksi. Tämä huomioidenkin, parhailla akkukemioilla voisi olla mahdollista rakentaa esimerkiksi sähköautoja, joiden toimintasäde ylittää vastaavan bensiiniauton toimintasäteen. Litium-ilma-akut voisivat kenties mahdollistaa jopa pitkän matkan lentoliikenteen sähköistämisen.

Henkilö- ja pakettiautojen kokoluokassa sekä muun muassa paikallisliikenteen linja-autoissa ladattava sähköauto on osoittautumassa elinkaarikustannuksiltaan selvästi halvimmaksi vaihtoehdoksi.²⁶ Kirjoitushetkellä, vuonna 2023, on vahvoja viitteitä siitä, että akuista tulee viimeistään 2030-luvulla halvin vaihtoehto jopa raskaassa rekka-liikenteessä.²⁷

Akkujen käyttö tulee yleistymään myös laivaliikenteessä. Noin 80 prosenttia maailman rahtilaivoista käyttää jo dieselsähköistä voimansiirtoa, jossa dieselmoottorin voima siirretään potkureita pyörittäviin moottoreihin sähkönä.²⁸ Sähköhybridilaiva, jossa järjestelmään yhdistetään akusto mm. polttoaineenkulutuksen vähentämiseksi, onkin luonteva seuraava askel. Jopa täyssähköisiä, yksinomaan akkuvirtaa käyttäviä aluksia käytetään jo lyhyillä matkoilla.²⁹

3.2.2 Lentoliikenteen sähköistyminen ei ole enää mahdoton ajatus

Lyhyen ja keskimatkan lentoliikenteen (toimintasäde 600 merimailia eli 1 111 km) sähköistäminen onnistuisi akuilla, joiden energiatiheys on noin 800 wattituntia kilogrammaa kohden (Wh/kg).³⁰ Tavallisen sähköauton akkujen energiatiheys on tällä hetkellä noin 200–275 Wh/kg, mutta kiinalainen akkuvalmistaja CATL ilmoitti keväällä 2023 aloittavansa 500 Wh/kg akkujen sarjatuotannon.³¹ Samoihin aikoihin kiinalainen tutkimusryhmä ilmoitti onnistuneensa valmistamaan laboratoriossa 700 Wh/kg litium-ioniakun.³²

Akkujen energiatiheys on kasvanut 2000-luvulla keskimäärin neljä prosenttia vuosittain.³³ Jos akut kehittyvät jatkossa samalla nopeudella, 800 Wh/kg akku voisi olla sarjatuotannossa vuonna 2035. Sähkölentokoneiden yleistymiseen kuluu kuitenkin vuosia.

Energiatiheydeltään 800 Wh/kg akuilla voitaisiin sähköistää noin 15 prosenttia maailmassa vuonna 2015 lennetyistä matkustajakilometreistä ja ainakin puolet kaikista lennetyistä matkustajalennosta.³⁴ Polttoaineen ja sitä kautta suorien kasvihuonekaasupäästöjen säästö olisi noin 15 prosenttia lentoliikenteen yhteenlasketusta polttoaineenkulutuksesta.³⁵ 600 merimailin toimintasäde riittäisi esimerkiksi suurimpaan osaan Euroopan tai Yhdysvaltojen sisäisistä lennoista.³⁶ Lentokonevalmistaja Airbus on ilmoittanut olevansa valmis tuomaan lyhyemmille 600 kilometrin matkoille sopivan sähkölentokoneen markkinoille 2030. Suomessa Traficom arvioi sähkölentokoneiden olevan vuoteen 2030 mennessä kannattavia enintään 200 kilometrin matkoilla.³⁷

26 Vetyautojen fundamentaaleista ongelmista tiiviisti esimerkiksi lähteissä Baxter 2020 ja Morris 2020. Sähköbusseista katso esimerkiksi Juopperi 2023. **27** Vertailuja raskaan liikenteen vaihtoehtoisiin energialähteistä, mukaan lukien vertailu dieseliin, löytyy esimerkiksi lähteistä Basma ym. 2021 ja 2023 sekä Chauhan ym. 2023. Sähköbusseista Suomessa katso esimerkiksi Juopperi 2023. Ensimmäisten joukossa sähkörekat Suomessa käyttöön ottanut yritys uskoo säästävänsä vuosittain polttoainekuluissa yli 40 000 euroa – per auto (Tervola 2023). **28** Rapid Transition Alliance 2022. **29** Rapid Transition Alliance 2022. **30** Schäfer ym. 2019. **31** Bleakley 2023. **32** Li ym. 2023. **33** Schäfer ym. 2019. **34** Schäfer ym. 2019. **35** Lentämisen ilmastovaikutukset ovat ainakin kolme kertaa suoria kasvihuonekaasupäästöjä suurempia ennen kaikkea lentokoneiden synnyttämien tiivistymisvannojen ja cirrus-pilvien vuoksi (Lee ym. 2021). Yksi tapa vähentää lentämisen ilmastovaikutuksia olisi yölentojen lopettaminen. Öisin syntyvät tiivistymisvanat ja pilvet estävät Maasta lähtevää lämpösäteilyä hajaantumasta avaruuteen; päivisin syntyvät heijastaisivat lisäksi Auringon säteilyä. **36** Schäfer ym. 2019. **37** Traficom 2022.

Sähköistämisen kannattavuus riippuu polttoaineen, akkujen ja sähkön hinnasta. Vuonna 2015 vallinneilla lentopolttoaineen hinnoilla sähköistäminen todennäköisesti kannattaisi, jos lentokoneiden käyttämän sähkön inflaatiokorjattu reaalihintavuoden 2023 euroissa olisi noin 4,75–7,14 senttiä kilowattitunnilta.³⁸ Lentopolttoaineiden hinta seurailee öljyn hintaa, ja oli 2022 enimmillään jopa kaksinkertainen vuoden 2015 hintoihin verrattuna. Jos esitykset lentopolttoaineiden tai fossiilisilla polttoaineilla lennettyjen lentojen verottamisesta ja päästökaupan laajentamisesta etenevät, sähköistämisen houkuttelevuus kasvaa entisestään.

Pidempien lentoreittien sähköistämiseen vaaditaan vähintään 1 200 merimailin (2 222 km) toimintasäteeseen riittävät, energiatihedeltään noin 1 600 Wh/kg akut.³⁹ Yllä mainitulla neljän prosentin vuotuisella kehitysnopeudella tällaisia akkuja voisi olla saatavissa 2050-luvun puolivälissä. Ennuste on kuitenkin epävarma, sillä etukäteen on vaikea sanoa edes sitä, millä akkukemialla kyseiset energiatihedetyt saavutettaisiin.

Noin 20 prosenttia vuonna 2015 lennetyistä lennoista oli kuitenkin yli 1 200 merimailin lentoja. Nämä pitkät lennot kuluttavat niin paljon polttoainetta, että edes kaikkien enintään 1 200 merimailin lentojen sähköistäminen ei vähentäisi lentoliikenteen polttoaineenkulutusta ja suoraa hiilidioksidipäästöjä kuin noin 40 prosenttia.⁴⁰ Sekä lyhyen että pitkän matkan lentoliikenteen polttoainekustannusten ja päästöjen vähentämiseksi tutkitaan kuitenkin muitakin ratkaisuja, mukaan lukien sähköhybridilentokoneita. Polttoaineen kulutusta voitaisiin näin vähentää kenties kymmenyksellä, yhden tutkimuksen mukaan enintään 12 prosenttia.⁴¹

3.2.3 Vaihtoehtoiset polttoaineet ovat tarpeellisia, mutta vain osaratkaisu

Vaihtoehtoiset polttoaineet tulevat olemaan tarpeen ilmailussa ja merenkulussa, mutta ne eivät käytännössä tule olemaan vaihtoehto maaliikenteessä. Biopolttoaineiden raaka-aineita ei yksinkertaisesti riitä korvaamaan kuin pieni murto-osa edes maailmassa nykyisin käytetystä öljystä, saati ennustetusta liikenteen energiankulutuksesta (ks. laatikko 1).

Sähköllä tuotettu vety ja vedystä tuotetut nestemäiset sähköpolttoaineet ovat teknisesti mahdollisia liikenteen polttoaineita, mutta maaliikenteessä sähköliikenne tulee todennäköisesti voittamaan halvempien ajokilometrien vuoksi. Vetyä käyttävät polttokenoautot ovat sähköautoja paljon kalliimpia, ja vedyn jakeluinfrastruktuurin rakentaminen nostaisi vetyautoilun hintaa entisestään.⁴²

Perimmäinen ongelma sekä vedyssä että sähköpolttoaineissa on se, että niiden tuottaminen vaatisi paljon energiaa. Akkutekniikan kehittyessä energia on järkevämpi tankata suoraan akkuun. Taulukko 3 esittää tuoreen laskelman vaihtoehtoisten polttoaineiden energiatehokkuudesta.⁴³

Jos sähköauto kulkee tietyllä määrällä akkuun ladattua sähköä 100 kilometriä, sama sähkömäärä vedyksi muutettuna riittää vetypolttokenoa käyttävän auton kuljettamiseen vain noin 43–53 kilometrin matkan. Nestemäiseksi sähköpolttoaineeksi eli "sähköbensiniiksi" muutettuna sama määrä sähköä riittää vain 13–17 kilometrin ajeluun.

³⁸ Schäfer ym. 2019. ³⁹ Schäfer ym. 2019. ⁴⁰ Schäfer ym. 2019. ⁴¹ Donateo ja Spedicato 2017. ⁴² Baxter 2020. ⁴³ Malins 2022.

Taulukko 3. Vaihtoehtoisten polttoaineiden energiatehokkuus.

Lähteen Malins (2022) mukaan.

Ajoneuvon käyttövoima	Samalla sähkömäärällä pääsee
Suora sähkö	100 km
Vetypolttokeino	43–53 km
Sähköbenssiini	13–17 km

LAATIKKO 1: Miten paljon öljyä voidaan korvata biopolttoaineilla?

BIOPOLTTOAINEET OVAT kasvien, eläimien tai mikrobien tuottamaa ainetta, jota poltetaan joko suoraan tai jalostettuna.

Tunnetuin biopolttoaine on polttopuu. Nestemäisistä biopolttoaineista yleisimmät ovat etenkin maissista valmistettu etanoli, eri lähteistä jalostettu biodiesel ja eloperäistä ainetta hajottavien bakteerien tuottama biokaasu eli biometaani.

Teoriassa mitä tahansa eloperäistä ainetta voidaan käyttää biopolttoaineiden valmistukseen. Käytännössä kannattavia raaka-aineiden lähteitä on kuitenkin vähemmän. Muuhun käyttöön kelpaamattomista jätevirroista voidaan tuottaa pieniä määriä biopolttoaineita, etenkin jätteitä mädättämällä tuotettua biokaasua ja rasvajätteistä jalostettua biodieseliä. Sopivia jätevirtoja on kuitenkin hyvin rajallisesti (katso myös laatikko 2).

Esimerkiksi Euroopan unionissa biopolttoaineilla katettiin vuonna 2020 noin viisi prosenttia kaikesta liikenteen energiasta.⁴⁴ Biopolttoaineita, mukaan lukien biokaasu, kulutettiin yhteensä noin 169 terawattitunnin edestä. Niistä vain 44 prosenttia tuotettiin EU:ssa, loppujen tullessa pääasiassa Kaakkois-Aasiasta (32 %) ja Keski- ja Etelä-Amerikasta (9 %).

Voidaan myös arvioida, paljonko peltopinta-alaa tarvittaisiin, jos öljytuotteet haluttaisiin korvata bioperäisillä nesteillä ja kaasuilla. Vuonna 2023 maailman yhteenlaskettu öljyn kulutus oli noin 37 340 miljoonaa öljybarrelia (n. 5 937 miljardia litraa), energiasisällöksi muutettuna noin 63 480 terawattituntia (TWh).⁴⁵ Tuoreen arvion mukaan EU:n biopolttoaineiden, mukaan lukien biokaasu, tuotanto vaatii keskimäärin noin 50 000 hehtaaria viljelyskelpoista maata tuotettua terawattituntia kohden.⁴⁶

Maailman öljynkulutuksen korvaaminen biopohjaisilla tuotteilla vaatisi siis noin 3,174 miljardia hehtaaria maatalousmaata.⁴⁷ Tällaisia maa-aloja on mahdotonta löytää maailmassa, jossa peltopinta-alaa on yhteensä vain noin 1,63 miljardia hehtaaria.⁴⁸

⁴⁴ Fehrenbach ym. 2023. ⁴⁵ IEA 2023, Oil 2023: Analysis and Forecast to 2028. ⁴⁶ Fehrenbach ym. 2023.

⁴⁷ Suomalaisten koti- ja ulkomaanliikenteeseen ja kuljetuksiin käyttämien polttoaineiden (vuonna 2021 arviolta 74 TWh) korvaaminen biopolttoaineilla vaatisi vastaavan laskelman mukaan noin 3,7 miljoonaa peltohehtaaria. Luonnonvarakeskuksen (2023) mukaan Suomessa kuitenkin oli viljelyskäytössä vuonna 2022 yhteensä vain noin 2,3 miljoonaa hehtaaria. ⁴⁸ Ritchie ja Roser 2021.

LAATIKKO 2: Biokaasu ja biopolttoaineet Suomessa

HARVAAN ASUTUSSA Suomessa biopolttoaineiden teoreettinen potentiaali asukasta kohden on maailman suurimpia. Esimerkiksi ominaisuuksiltaan maakaasua vastaavan, pääosin maatalouden jätteistä valmistetun biokaasun teoreettiseksi enimmäispotentiaaliksi on Suomessa arvioitu noin 24 terawattituntia (TWh) vuodessa. Tämä olisi hieman yli puolet vuonna 2021 Suomen kotimaanliikenteessä poltetuista polttoaineista (47,23 TWh) tai noin kolmannes kaikista suomalaisten yhteensä käyttämistä liikennepolttoaineista (ulkomaanlennot ja meriliikenne huomioiden arviolta 74 TWh). Liikennekäytössä yksi terawattitunti kaasua riittäisi noin 100 000 henkilöauton tai 2500 raskaan ajoneuvon vuosittaiseen kulutukseen.⁴⁹

Jos lasketaan vain ne jätevirrat, joiden kerääminen ja hyötykäyttö on arvioitu taloudellisesti kannattavaksi, biokaasun *teknistaloudellinen* potentiaali jää noin kymmeneen terawattituntiin.⁵⁰ Se olisi vain hieman yli viidennes kotimaanliikenteen polttoaineista.

Todellisuudessa biokaasua on tuotettu 2020-luvun alussa vuosittain alle yksi terawattitunti, ja siitäkin osa on jouduttu polttamaan pois kaasun kysynnän vähäisyyden vuoksi.⁵¹ Osa kaasusta käytetään sähkön ja lämmön tuotantoon. Tulevaisuudessa osa saatetaan käyttää myös teollisuudessa.

Liikenteen ilmastotavoitteiden täyttämiseksi Liikenteen ilmastopolitiikan työryhmä esitti vuonna 2018, että biokaasun liikennekäyttö olisi vuonna 2030 2,5 terawattituntia ja vuonna 2045 10 terawattituntia.⁵² Sähköautojen nopea kehitys tekee kuitenkin etenkin jälkimmäisestä tavoitteesta epätodennäköisen.

Biokaasulle on siltikin tarvetta esimerkiksi sähkön ja lämmön kulutushuippujen kattamisessa. Biokaasun etuna tässä tarkoituksessa on se, että biokaasua eli metaania on merkittävästi vetyä helpompi ja halvempi varastoida pitkiäkin aikoja. Biopohjaisen metaanin rinnalla ja täydentäjänä voidaan käyttää myös vedystä tuotettua niin sanottua synteettistä metaania.

Biopolttoaineet kilpailevat aina pinta-alasta ja biomassasta, jota voitaisiin käyttää esimerkiksi ruoan tuotantoon tai säästää elossapitojärjestelmien eli elävien ekosysteemien ravinnoksi ja turvapaikaksi. Siksi biopolttoaineista ei voi olla laajamittaiseksi ratkaisuksi energiaongelmiin, vaikka etenkin jätevirroista tuotettujen polttoaineiden käyttö on yksi osa ratkaisua.

3.3 Päänsärkynä erityisesti kaukolämmön yhteistuotannon korvaaminen

Ehkäpä suurin haaste nykyisen energiajärjestelmän uudistamisessa on kaupunkien lämmitys. Suomessa käytetään asutuskeskusten lämmittämiseen kansainvälisesti katsoen poikkeuksellisen paljon kaukolämpöä. Se on monella tapaa hyvä ratkaisu. Kaukolämmön yhteistuotantolaitokset, joissa lämmön lisäksi tuotetaan myös sähköä, käyttävät polttoaineen tehokkaasti: kokonaisuutena hyötykäyttöön saadaan jopa 90–95 prosenttia polttoaineen energiasisällöstä. Yhteistuotantolaitokset ovat myös tärkeitä sähkön tuottajia sydäntalven kylmien, usein vähätuulisten jaksojen aikana.

⁴⁹ Mutikainen 2020. ⁵⁰ Marttinen ym. 2015 ja Mutikainen 2020. ⁵¹ Alm 2022. ⁵² Alm 2022.

Ongelmana on kuitenkin kestävä polttoaineen löytäminen. Aiemmin paljon käytetystä kivihiilestä on luovuttava viimeistään vuonna 2029. Kivihiilen vaihtoehtona on lyhyellä tähtäimellä käytännössä puuperäisten polttoaineiden kuten hakkeen poltto. Suurten kaupunkien kuten Helsingin ja Tampereen tarvitsemat määrät puupolttoaineita on kuitenkin vaikea hankkia kestävästi ja edullisesti. Toisinaan ratkaisuksi ehdotettu turve on EU:n päästökaupamaksujen vuoksi vieläkin kalliimpaa, eikä sen saatavuus ole taattu.⁵³

Mitään nopeaa yksittäistä ratkaisua ongelmaan ei ole olemassa. Lähimpänä yksittäistä ratkaisua olisi kaukolämmön tuottaminen pienillä, yksinkertaisilla ydinreaktoreilla, mutta ne ovat vasta suunnitteluasteella.

Todennäköisempää on, että ongelma ratkaistaan yhdistelmällä monia osaratkaisuja. Osa lämmöstä voitaneen tuottaa esimerkiksi lämpöpumpuilla, aurinkolämmöllä, sekä vetyä elektrolyysillä tuottavien laitosten, datakeskusten ja muiden yritysten hukkalämmöstä. Lämpöä tullaan myös varastoimaan esimerkiksi kallioon louhittuihin lämpövarastoihin. Osa kulutuksesta voitaneen kattaa energiatehokkuutta kasvattamalla. Myös sähkön ylituotannosta lämpöä tekevät sähkökattilat tulevat yleistymään ja osaltaan auttavat vaihtelevan tuotannon tasapainottamisessa.⁵⁴

LAATIKKO 3: Sähköistyminen tehostaa energian käyttöä

SUOMALAISET KÄYTTIVÄT vuonna 2021 energiaa joko 307,4 terawattituntia, 377,3 terawattituntia, tai 438,6 terawattituntia.⁵⁵ Vaikka luvut eroavat toisistaan, kaikki ne ovat oikein. Syynä on se, että energian käyttöä voidaan tilastoida monella eri tavalla. Tärkeimmät tilastointitavat ovat *primäärienergia* ja *energian loppukäyttö*.

Yllä olevista luvuista pienin kuvaa energian loppukäyttöä eli energiaa, joka moninaisten siirto- ja muuntohäviöiden jälkeen todellisuudessa tekee hyödyllistä työtä yrityksissä, kotitalouksissa, ja muissa käyttökohteissa. Se sisältää sähkön, kaukolämmön, sekä lämmitykseen, liikenteeseen ja teollisuuden prosesseihin käytetyn polttoaineen kulutuksen niiltä osin, kun energiasältöä kyetään todellisuudessa hyödyntämään.

Primäärienergia tai energian kokonaiskulutus kertoo, miten paljon energiaa kulutamme yhteensä, kun huomioimme myös energian tuotannossa, siirrossa ja erilaisissa muunnoksissa hukkaan joutuvan energian. Energian kokonaiskulutus on siksi aina energian loppukäyttöä suurempaa. Energiatehokkuuden parantuessa ero loppu- ja kokonaiskulutuksen välillä vähenee.

53 Turpeen katoavaa roolia Suomen energijärjestelmässä käsitellään tarkemmin Sorsa-säätiön raportissa *Myytinmurtajaiset osa 2* (Korhonen 2023). Turpeen energiakäyttö on ollut kaikissa EU-maissa laskussa jo pitkään päästökaupan tehtyä siitä kannattamatonta, ja Suomeakin enemmän turvetta polttanut Irlanti lopetti käytön jo kokonaan (Soimakallio ym. 2020). Turpeen käytön jatkamiseksi tarvittavat tuet maksaisivat todennäköisesti jo muutamassa vuodessa enemmän kuin turpeen käytön lopettamiseksi voimalaitoksilta vaadittavat investoinnit yhteensä (AFRY 2020). Turpeen käyttöä perustellaan usein huoltovarmuudella, mutta maine on osin perustelematon: turpeen tuotannon nopea kasvattaminen on aina ollut vaikeaa, vaikka kysyntää olisikin. Vakavassa, tuontia ja vientiä rajoittavassa kriisissä luonnollisempi ja vähemmän erikoistunutta kalustoa vaativa polttoaine olisi metsäteollisuudelta käyttämättä jäävä puu. Huoltovarmuuskysymyksestä katso etenkin Pöyry 2019. **54** Malkki 2022. **55** Tilastokeskus 2022.

Kokonaiskulutus voidaan kuitenkin laskea useilla eri tavoilla. Keskeinen kysymys kokonaiskulutuksen tilastoinnissa on se, miten ominaisuuksiltaan toisistaan poikkeavat energiamuodot tulisi ynnätä yhteen. Mitään yhtä oikeaa tapaa ei ole.

Yllä mainituista luvuista toinen, 377,3 terawattituntia, on energian kokonaiskulutus Tilastokeskuksen käyttämällä laskutavalla. Siinä vesivoima sekä tuuli- ja aurinkosähkö sekä sähkön tuonti on laskettu kokonaiskulutukseen sellaisenaan. Sen sijaan kotimaisen ydinsähkön tuotanto on jaettu luvulla 0,33 (ts. kerrottu kolmella). Näin tehdään siksi, koska uraanipolttoaineesta joudutaan vapauttamaan noin kolme yksikköä lämpöenergiaa jokaista ydinvoimalan loppujen lopuksi tuottamaa sähköenergiayksikköä kohden – tai toisin sanoen, ydinvoimalan hyötysuhde oletetaan laskelmassa 33 prosentiksi. Koska kokonais- eli primäärikulutuksessa pyritään huomioimaan tuotannon häviöt, sähkön-tuotannon kertominen kolmella on perusteltu ratkaisu.

Vaikeampi kysymys on, miten yksinomaan sähköä tuottavien vesi-, tuuli- ja aurinkovoimaloiden tuotanto tulisi huomioida. Tilastokeskus on päättänyt laskea nämä kokonaiskulutukseen sellaisinaan.

Kansainvälisissä vertailuissa paljon käytetty, vuoteen 1965 saakka ulottuva Statistical Review of World Energy muuntaa ydinvoiman lisäksi muidenkin vain sähköä tuottavien voimaloiden sähköntuotannon primäärienergiaksi jakamalla tuotetun sähkön määrän tehokkuuskertoimella (0,406 vuonna 2021).⁵⁶ Tehokkuuskertoimen perustuu fossiilisia polttoaineita polttavien voimaloiden keskimääräiseen hyötysuhteeseen, ja tekniikan kehittymisen vuoksi se lasketaan vuosittain uudelleen. Tehokkuuskertoimella korjattu primäärienergiatilasto kertoo siis sen, miten paljon fossiilisia polttoaineita tulisi polttaa vastaavan energiamäärän tuottamiseksi. Kun Suomen primäärienergiankulutus lasketaan tällä tavalla, tuloksena on 438,6 terawattituntia.

Tilastointitapojen ero on hyvä ymmärtää, jotta sekaannuksilta välttytään. Jos vain sähköä tuottavien voimaloiden energiantuotanto ynnätään energian kokonaiskulutustilastoon ilman mitään korjauskertoimia, näiden energianlähteiden osuus kokonaisuudesta näyttää pienemmältä kuin korjauskertoimia käytettäessä. Tämä voi olla kätevää myös silloin, jos tavoitteena on esimerkiksi poliittisista syistä vähätellä esimerkiksi tuuli- ja aurinkosähkön panosta energiahuoltoon. Toisaalta myös korjauskertoimien käyttö on omiaan synnyttämään väärinkäsityksiä.

Energian käytön koko kuva selviää vain tarkastelemalla sekä kokonaiskulutusta että loppukäyttöä yhtä aikaa. Kun sähköstä tulee tärkeämpi energiankantaja, energian käytön tehokkuus kasvaa: sähköllä toimivat laitteet ovat lähes aina polttoaineita tarvitsevia paljon energiatehokkaampia. Esimerkiksi sähköautot muuttavat hyödylliseksi liike-energiaksi 64–89 prosenttia niihin ladatusta sähköstä, kun taas bensiiniautot muuttavat liikkeeksi tavallisesti alle 25 prosenttia tankkiin tankatun polttoaineen energiasisällöstä.⁵⁷ Sähköistymisen edetessä energian kokonaiskulutus voikin jopa *laskea*, vaikka todellisuudessa hyödyllisesti käytetyn energian määrä – energian loppukäyttö – pysyy ennallaan tai peräti *lisääntyy*.

⁵⁶ Energy Institute 2023. ⁵⁷ Jacobson 2021.

4. Vähähiilinen energiajärjestelmä tulee, mutta kuinka nopeasti?

"Vielä pari vuotta sitten uusiutuvan energian visioille naureskeltiin energia-alalla yleisesti. Ei naureta enää." – Keväällä 2023 haastateltu energiajärjestelmien asiantuntija

VAIN VUOSIKYMMEN sitten vähähiilistä energiajärjestelmää pidettiin yleisesti enemmänkin toiveena kuin realismina, ja täysin tai lähes täysin tuuli- ja aurinkoenergian varaan laske-neita toivottomina idealisteina.

Tekniikan kehitys on kuitenkin edennyt odotuksiakin nopeammin.

Tätä kirjoittaessa, kesällä 2023, maailman johtavat energia-alan asiantuntijat ja asiantuntijaelimet pitävät vähähiilistä energiajärjestelmää selviönä. Niin yliopistojen, tutkimuslaitosten kuin yksityisten yritystenkin tuottamat laskelmat päätyvät hyvin samanlaisiin johtopäätöksiin: mitään ylivoimaista teknistä estettä vähähiiliselle energiajärjestelmälle ei ole.⁵⁸ Ennemmin tai myöhemmin vähähiilinen energiajärjestelmä tulee olemaan myös selvästi fossiilista energiajärjestelmää halvempi vaihtoehto. Jos huomioimme ilmastonmuutoksen aiheuttamat vahingot ja riskit, tämä on totta jo nyt.

Sekä asiantuntijoiden että suuren yleisön piirissä yleinen oletus on, että siirtymä tulee kyllä tapahtumaan, mutta hitaasti ja rauhallisesti seuraavan 30–50 vuoden aikana. Tähän mennessä siirtymä onkin edennyt piinallisen hitaasti (Kuvat 8 ja 9).⁵⁹

Tässä osiossa selitetään, miksi vihreä siirtymä saattaa osoittautua kiihtyvästi eteneväksi *vihreäksi humahdukseksi*. Jos hyvin käy, uusi, vähähiilinen energiajärjestelmä saattaa olla asiallisesti ottaen todellisuutta jo lähivuosikymmeninä. Suomessa sähköjärjestelmä on jo melko puhdas, ja henkilöliikenne voisi olla puhdasta jo 2030-luvulla. Muilla sektoreilla ja monissa muissa maissa siirtymä vie pidempään..

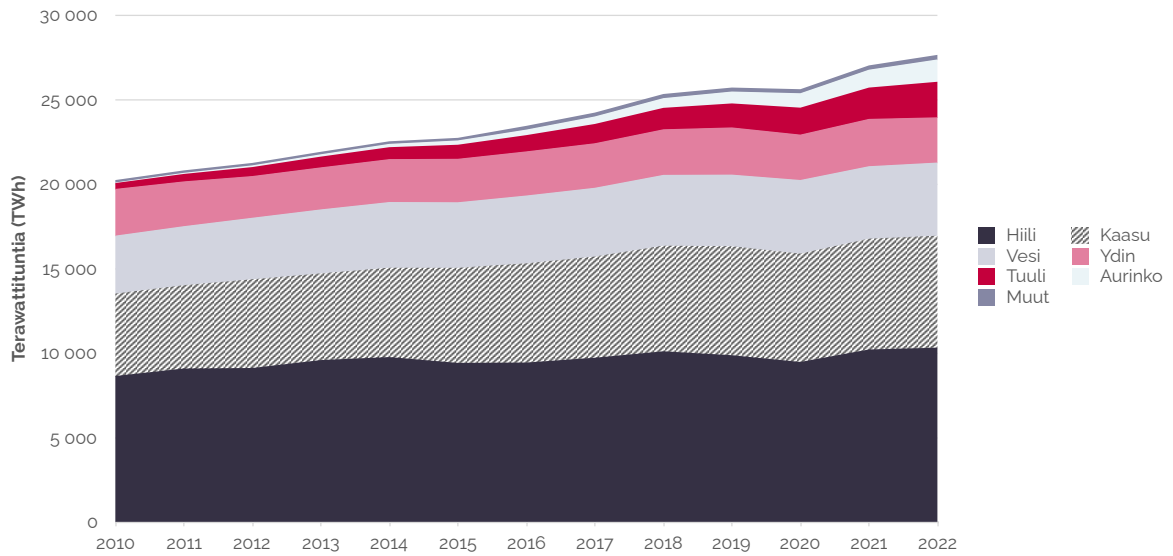
Muutoksen tiellä on kuitenkin monia epävarmuuksia. Siirtymä todennäköisesti myös etenee eri nopeuksilla: vaikka siirtymä tapahtuisikin joissain maissa humahduksena, toisissa maissa se saattaa viedä kauan. Vastaavasti, siirtymä voi edetä joillain talouden sektoreilla nopeasti, ja toisilla hitaasti.

Kiihtyvän siirtymän mahdollisuus on kuitenkin niin kiinnostava ja vihreän humahduksen mahdolliset seuraukset niin suuria, että siitä on syytä keskustella.

Suomen ja muiden yhteiskuntien olisi syytä varautua siihen mahdollisuuteen, että itseään kiihdyttävä siirtymä myllertää ainakin joitain aloja ja elinkeinoja hyvinkin nopeasti.

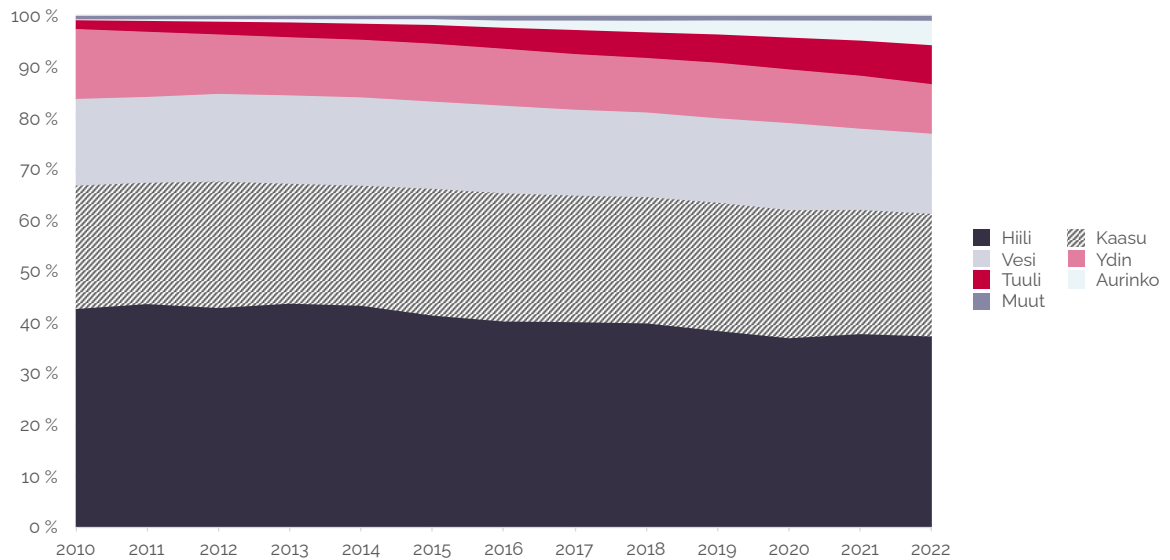
⁵⁸ Aalto ym. 2021; Breyer ym. 2022. ⁵⁹ Energy Institute 2023.

Kuva 8. Maailman sähköntuotanto yhteensä.



Aineistolähde Energy Institute 2023.

Kuva 9. Eri lähteiden osuus maailman sähköntuotannosta.



Aineistolähde Energy Institute 2023.

4.1 Monet muutokset ovat pitkään hitaita, ja sitten yllättävän nopeita

Kuuluisan sanonnan mukaan historiassa on vuosia vailla tapahtumia, ja viikkoja, jolloin tapahtuu vuosikymmeniä. Sanonta tavoittaa mainiosti monien suurten muutosten *epälineaarisen* luonteen.

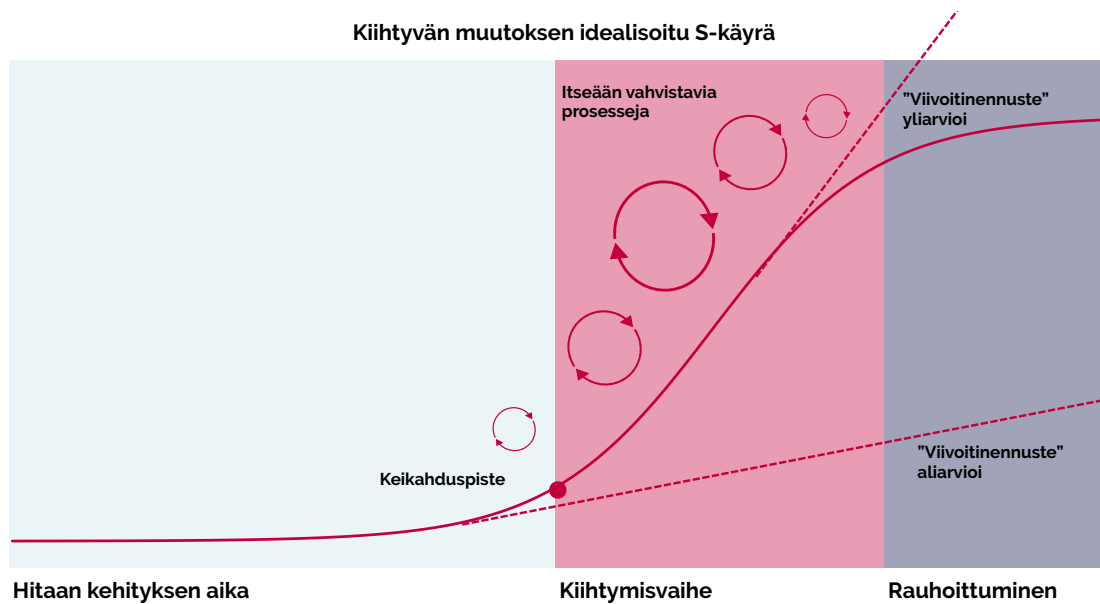
Epälineaarille muutoksille on ominaista, että muutos etenee jopa huomaamattoman hitaasti, kunnes se saavuttaa *keikahduspisteen* ja alkaa etenemään yllättävän, joskus pelottavankin nopeasti. Epälineaariset ilmiöt ovat tavallisia niin luonnossa kuin yhteiskunnissakin. Kulkutaudin leviäminen väestössä ensin hitaasti ja sitten, riittävän monen saatua tartunnan, humahduksenomaisesti on malliesimerkki epälinearisesta ilmiöstä.

Epälineaarisen muutoksen tärkein edellytys täyttyy, jos muutos voi aiheuttaa lisää muutosta. Näin on esimerkiksi, jos tartunnan saaneet voivat tartuttaa toisia, tai jos jokainen uusi käyttäjä tekee uudesta tekniikasta, kuten uudesta sosiaalisen median palvelusta, entistä houkuttelevamman. Tällöin muutoksen nopeus voi kasvaa, ja muutoksesta tulla kiihtyvää.

Mikään muutos ei tietenkään kiihdy loputtomiin. Esimerkiksi kulkutaudin leviäminen loppuu viimeistään sitten, kun tartunnalle alttiita ei enää ole. Uusien tekniikoiden leviäminen hidastuu viimeistään sitten, kun kaikki ovat jo ottaneet tekniikan käyttöön. Enemmän tai myöhemmin muutosnopeus hidastuu. Lopputuloksena on epälineaarille muutoksille tunnusomainen *S-käyrä* (Kuva 10).⁶⁰

Ihmisillä on vahva taipumus olettaa ympäristössä ja yhteiskunnissa tapahtuvien muutosten olevan lineaarisia.

Kuva 10. Kiihtyvän muutoksen idealisoitu S-käyrä.



Epälineaaristen ilmiöiden yleisyydestä huolimatta ihmisillä on vahva taipumus olettaa ympäristössä ja yhteiskunnissa tapahtuvien muutosten olevan *lineaarisia*, toisin sanoen tasaisia ja ennustettavia. Jos muutos kuitenkin on todellisuudessa epälineaarinen, seurauksena on muutoksen ali- tai yliarviointi.

Mikäli epälineaarisen muutoksen etenemistä ennustetaan lineaarisesti silloin, kun muutos on hitaan etenemisen vaiheessa, tuloksena on muutoksen pahasti aliarvioiva ennuste, kuten kuvassa hitaan kasvun vaiheesta vedetty suora viiva tai "viivoitinennuste" (Kuva 10). Jos ennuste tehdään yhtä suoraviivaisesti muutoksen kiihtymisvaiheessa, seurauksena voi olla muutoksen valtava yliarviointi.

Epälineaarisen muutoksen nopeuden ja lopullisen syvyyden ennustaminen on vaikeaa, vaikka ilmiö tiedettäisiinkin epälineaariseksi. Ennustamista vaikeuttaa entisestään se, että tosielämän muutokset eivät yleensä noudata tarkasti yllä olevan kuvan kaltaista kaunista, idealisoitua S-käyrää.⁶¹

Tekniikan historia tarjoaa runsaasti esimerkkejä molempiin suuntiin epäonnistuneista ennusteista. Eräs tunnetuimmista on legendaariseksi tietokoneiden valmistajaksi nousseen IBM:n johtajan vuonna 1943 esittämä arvio, jonka mukaan tulevaisuuden maailmassa saattaisi olla tarvetta ehkä *yhteensä* viidelle tietokoneelle.⁶²

4.2 Kuinka nopeasti vihreä humahdus voi edetä?

Aikaisemmat energiasiirtymät ovat edenneet hitaasti ja epätasaisesti. Uuden energiaressurssin käyttöönotto ensimmäisistä kokeiluista globaalisti merkittäväksi energialähteeksi on vienyt säännöllisesti vuosikymmeniä.⁶³ Esimerkiksi esiteollisen biologisen energijärjestelmän korvaaminen pääasiassa kivihiiheen perustuvalla energijärjestelmällä

⁶¹ Dattee 2007; Modis 2007. ⁶² Strohmeyer 2008. ⁶³ Smil 2016.

kesti Euroopassa 96–160 vuotta, ja pääosin kivihiileen ja höyrykoneisiin perustuneen järjestelmän korvaaminen pääosin öljyyn, kaasuun ja sähköön perustuvalla järjestelmällä 47–69 vuotta.⁶⁴

Yksittäisissä maissa muutokset ovat kuitenkin olleet joskus hyvinkin nopeita. Eräitä historiallisia esimerkkejä nopeista muutoksista energiasektorilla on listattu alla (Taulukko 4). Mennyt ei kuitenkaan ole tae tulevasta, sillä ihmisten kyky muuttaa maailmaa on kasvanut.

Lisäksi nykytilannetta vastaavaa painetta muuttaa energiajärjestelmä globaalisti ja nopeasti ei ole koskaan aiemmin ollut. Ilmastokriisi ja fossiilisen energian saatavuudesta heränneet huolet ovat konkretisoituneet sääntelyksi, päästömaksuiksi ja vähähiilisen energian tuiksi, joille on historiassa vain vähän, jos lainkaan suoria vertailukohtia.

Taulukko 4. Esimerkkejä nopeista siirtymistä energiasektorilla.

Tekniikka	Maa	Aikaväli	Lähteet
Öljy sähkön tuotannossa	Kuwait	1946–1955	Sovacool 2016
Ilmastointi	Yhdysvallat	1947–1970	Sovacool 2016
Maakaasu	Iso-Britannia	1948–1977	Arapostathis ym. 2013
Maakaasu	Alankomaat	1959–1971	Sovacool 2016, Napp ym. 2017
Etanoliautot	Brasilia	1973–1985, 2004–2009	Grad 2006, Sovacool 2016
Ydinvoima	Ranska	1974–1982	Sovacool 2016, Napp ym. 2017
Yhteistuotanto	Tanska	1976–1981	Sovacool 2016
Tuulivoima	Tanska	1977–2008	Napp ym. 2017
Paremmat liedet	Kiina	1983–1998	Sovacool 2016
Energiatehokkaat loisteputket	Ruotsi	1991–2000	Sovacool 2016
Hiili sähkön tuotannossa	Kanada	2003–2014	Sovacool 2016
Nestekaasuliedet	Indonesia	2007–2010	Sovacool 2016

⁶⁴ Sovacool 2016.

Taulukko 5. Esimerkkejä nopeista siirtymistä energiasektorilla: keskimääräiset kasvunopeudet.

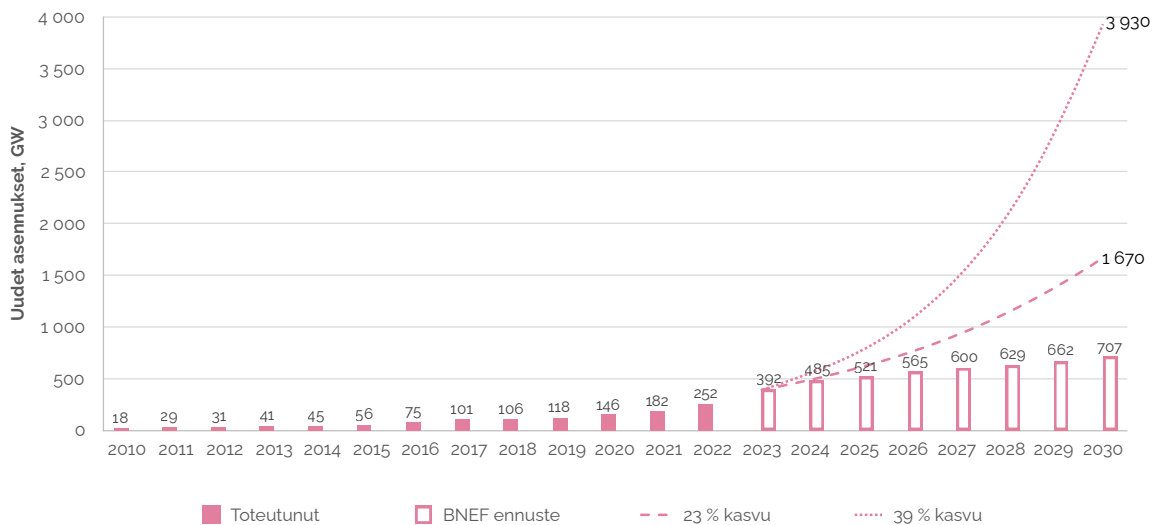
Mukailtu lähteestä Napp ym. 2017.

Tekniikka	Maa	Aikaväli	Kasvu vuodessa
Maakaasu	Alankomaat	1965–1975	41 %
Tuulivoima	Tanska	1977–2008	20 %
Ydinvoima	Ranska	1977–1997	19 %

Alla olevissa kuvissa (Kuva 11, Kuva 12) on esitetty kaksi kirjoitushetkellä tuoretta ennustetta maailman tuuli- ja aurinkovoiman rakentamisnopeuden kehittymisestä vuoteen 2030 saakka, sekä laskelmat, jos kasvu onkin ennustettua nopeampaa. Kuvien varovaiset ennusteet ovat peräisin aurinkopaneelimarkkinoita seuraavan BloombergNEF:in sekä Maailman tuulienergianeuvosto GWEC:in kirjoitushetkellä tuoreimmasta ennusteesta.⁶⁵ Nopeampi kasvu on laskettu historiallisesti toteutuneiden pitkän ja lyhyen aikavälin kasvuennätysten mukaan.

Kuvassa 13 on laskettu arvioitu vuotuinen sähköntuotanto yllä mainittujen ennusteiden perusteella. Periaatteessa tuuli- ja aurinkovoiman yhteenlaskettu sähköntuotanto voisi olla vuonna 2030 enemmän kuin maailman kaikki sähköntuotanto yhteensä oli vuonna 2022. Todellisuudessa muutosta jarruttaa esimerkiksi kannattavuuden heikentyminen ja siirtoverkkojen rakentamisnopeus (katso myös luku 4.4). On myös syytä muistaa, että vain noin viidennes nykyisin käytetystä energiasta on sähköä – vaikka osuus kasvaakin.

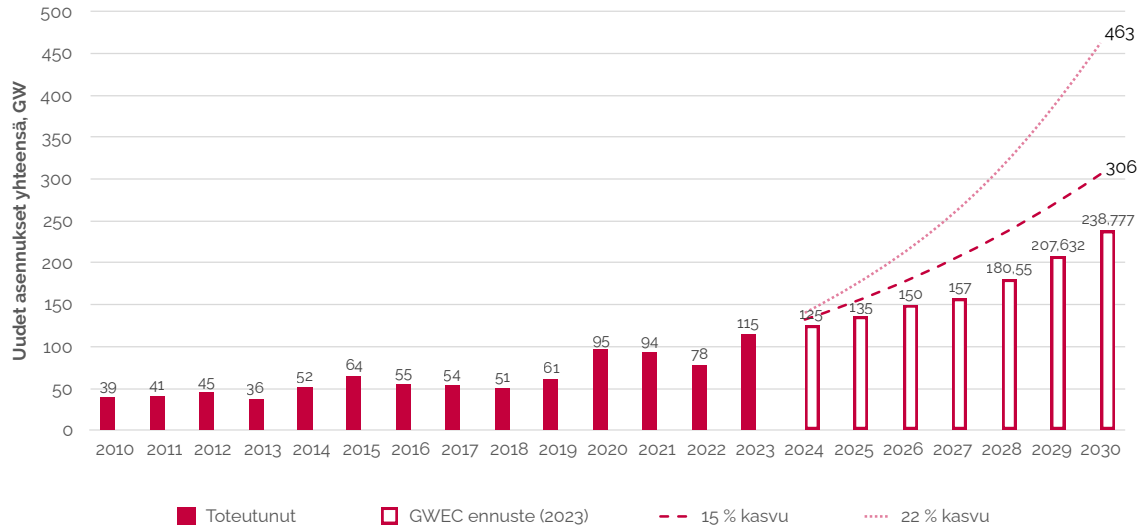
Kuva 11. Aurinkosähkön vuotuiset asennukset ja kolme eri ennustetta niiden kehittymisestä.



BNEF:in ennuste lähteestä Chase 2023. 23 % kasvunopeus vastaa aurinkosähkön asennusten keskimääräistä kasvua välillä 2010–2023. 39 % kasvunopeus vastaa asennusten kasvua välillä 2022–2023.

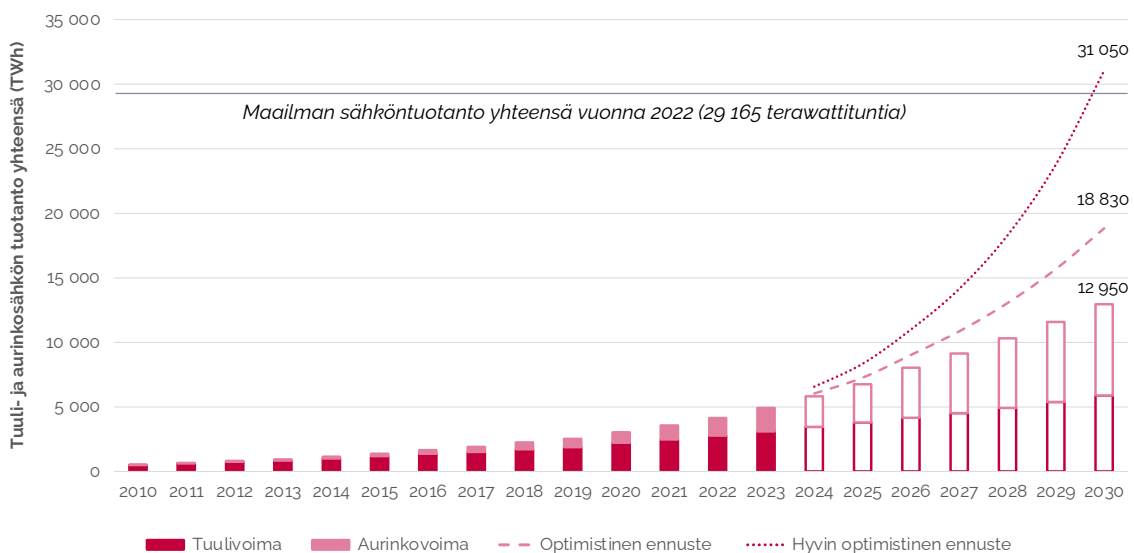
⁶⁵ GWEC 2023; Chase 2023; Energy Institute 2023.

Kuva 12. Tuulivoiman asennukset vuosittain ja kolme ennustetta asennusten kehittymisestä.



GWEC:in ennuste lähteestä GWEC 2023. 15 % kasvunopeus vastaa lähteessä arvioitua kasvunopeutta vuosille 2023–2028. 22 % kasvu vastaa tuulivoima-asennusten keskimääräistä kasvunopeutta välillä 2001–2010.

Kuva 13. Arvio tuuli- ja aurinkosähkön yhteistuotannosta yllä mainittujen ennusteiden toteutuessa.



Perustuu lähteisiin Chase 2023, GWEC 2023 ja omiin laskelmiin (katso teksti ja kuvat 11 ja 12). Aurinkosähkön kapasiteettikertoimen oletetaan kasvavan 13 prosentista vuonna 2022 14 prosenttiin vuodesta 2026 alkaen. Tuulivoiman kapasiteettikertoimeksi oletetaan 35 prosenttia.

4.3 Miksi siirtymän nopeus voi yllättää?

Jäljellä olevat haasteet vähähiilisen energiajärjestelmän rakentamisessa ovat normaalin insinööriyön piiriin kuuluvia ongelmia, kuten voimaloiden ja siirtolinjojen rakentaminen ja sähköverkon tasapainon ylläpito tuotannon ja kulutuksen vaihdellessa. Ongelmien ratkaisu on täysin mahdollista olemassa olevilla tekniikoilla: uusia tieteellisiä tai teknisiä läpimurtoja ei tarvita.⁶⁶ Kysymys on lähinnä siitä, miten nopeasti uutta tekniikkaa voidaan valmistaa ja asentaa. Tässä luvussa esitetään perusteita optimismiin: miksi vihreä siirtymä voi edetä humahduksenomaisesti.

4.3.1 Aurinkopaneelien, akkujen ja sähköautojen tuotanto kasvaa ennusteita nopeammin

Yksi keskeisimmistä ennakoitua nopeamman siirtymän puolesta puhuvista todisteista on aurinkopaneelien, akkujen ja sähköautojen valmistuskapasiteetin ja tuotannon odotuksia paljon nopeampi kasvu.

Esimerkiksi Kansainvälinen energiajärjestö IEA ennusti virallisissa raporteissaan aurinkosähkön kehityksen väärin *jokaisessa* vuosien 2002 ja 2018 välillä julkaistussa raportissaan.⁶⁷ Virheet eivät edes olleet pieniä. Maailman tärkein energia-alan järjestö julkaisi tuona aikana ainakin neljätoista ennustetta siitä, miten nopeasti aurinkosähköä rakennettaisiin vuosien 2030 ja 2050 välisenä aikana. *Jokainen* näistä kaukaiseen tulevaisuuteen sijoittuneista ennusteista ylitettiin viimeistään vuoden sisällä ilmestymisestään, useimmat jo samana vuonna.

IEA korjasi ennusteitaan vuonna 2020, mutta aliarvioi kehitystä edelleen. Järjestön toukokuussa 2021 julkaisema optimistinen, maailman kasvihuonekaasupäästöt vuoteen 2050 mennessä nollaava "Net Zero by 2050"-suunnitelma edellyttää aurinkopaneelien tuotannon kasvavan tasaisesti ja rauhallisesti niin, että vuonna 2030 paneeleita valmistetaisiin ja asennettaisiin yhteensä 650 gigawatin (GW) nimellistehon verran.⁶⁸ Todellisuudessa 650 gigawatin raja ylitettiin vuonna 2023, peräti seitsemän vuotta etuajassa, eikä kasvu näytä loppuvan.⁶⁹ Vuonna 2023 sijoitukset aurinkoenergiaan olivat ensimmäistä kertaa suuremmat kuin sijoitukset öljyntuotantoon, ja paneelien tuotantokapasiteetin odotetaan ylittävän tuhannen gigawatin haamurajan vuoden 2024 aikana.⁷⁰

Paneelituotannon kasvun merkitystä havainnollistaa vertailu vielä äskettäin maailman tärkeimpään yksittäiseen vähähiiliseen energialähteeseen – ydinvoimaan. Vuonna 2022 maailman 438 siviilikäytössä ollutta ydinreaktoria tuottivat sähköä yhteensä 2 684 terawattituntia (TWh).⁷¹ Kun aurinkopaneelitehtaiden käyttöasteeksi oletetaan 70 prosenttia, vuodelle 2024 ennustettu tuhannen gigawatin valmistuskapasiteetti tarkoittaisi, että

⁶⁶ Katso esimerkiksi Breyer ym. 2022 tai Aalto (toim.). 2021. Optimistinen mutta perusteltu yksityiskohtainen katsaus esitetään esimerkiksi lähteessä Jacobson 2021. Suomessa myös kantaverkkoyhtiö Fingrid uskoo vähähiilisen energiajärjestelmän syntyvän jopa yllättävän helposti, vaikka monenlaisia käytännön ongelmia pitääkin sen vuoksi ratkoa (Fingrid 2023). ⁶⁷ Hunt 2020. ⁶⁸ IEA 2021: Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. ⁶⁹ IEA 2023: Is There Enough Global Wind and Solar PV Manufacturing to Meet Net Zero Targets in 2030? ⁷⁰ IEA 2023: Is There Enough Global Wind and Solar PV Manufacturing to Meet Net Zero Targets in 2030? ⁷¹ IEA 2023: Electricity Market Report 2023.

maailman aurinkopaneeliasennukset kasvaisivat noin 700 gigawattia. Kun huomioidaan, että aurinkopaneelit tuottavat sähköä keskimäärin noin 11–16 prosenttia vuoden tunneista, aurinkosähkön tuotanto kasvaisi noin 675–980 terawattitunnin verran.⁷² Toisin sanoen, vaikka aurinkopaneelien valmistuskapasiteetti ei kasvaisi vuoden 2024 jälkeen enää lainkaan, koko maailman ydinvoimatuotantoa vastaava määrä aurinkosähköä voitaisiin silti lisätä energialähteiden joukkoon vajaan neljän vuoden välein.

Myös liikenteen sähköistämiseen ja sähkön lyhytaikaiseen varastointiin tarvittavien akkujen valmistuskapasiteetti kasvaa huikkea vauhtia. Esimerkiksi vuoden 2020 jälkeisenä kahtena ja puolena vuonna kiinalaiset akkuvalmistajat ovat onnistuneet *kahdeksan-kertaistamaan* tuotantonsa. Uusia tehtaita rakennetaan edelleen jopa kiihtyvällä nopeudella, vaikka esimerkiksi vuonna 2022 akkuja tuotettiin jo lähes viidennes enemmän kuin niitä ehdittiin myydä tai asentaa.⁷³

Akkujen tuotannon kasvu on edistänyt sähköautojen tuotannon kasvua. IEA:n kirjoitus-hetkellä tuoreimman arvion mukaan sekä aurinkopaneelien että sähköautojen akkujen valmistuskapasiteetti on jo nyt Net Zero-suunnitelmassa vuonna 2030 edellytetyllä tasolla.⁷⁴ Muut sektorit ovat kuitenkin vielä jäljessä tavoitteistaan.

Esimerkiksi tuulivoimaloita rakennetaan edelleen liian hitaasti.⁷⁵ Tuulivoimaloita valmistavien tehtaiden enimmäistuotannoksi arvioitiin vuonna 2023 enintään noin 163 gigawatin (GW) nimellistehon verran uusia tuulivoimaloita, mutta kapasiteetista käytettiin vain noin 115 gigawattia.⁷⁶ Rakentamista hidastaa korkojen ja rakennuskustannusten nousu.⁷⁷ Pidemmällä tähtäimellä kysynnän odotetaan piristyvän, ja uutta valmistuskapasiteettia tarvittaneen viimeistään 2020-luvun puolivälissä.⁷⁸ Teknisiä esteitä valmistusmäärien kasvattamiseen ei ole. Jopa kokonaan uuden tuulivoimalatehtaan pystyttäminen vaatii vain noin 2–3 vuotta.⁷⁹

Raaka-aineiden saatavuus voi aiheuttaa pitkäkestoisempia, mutta mitä todennäköisimmin ratkaistavissa olevia pullonkauloja. Alaluvussa 4.3 käydään tarkemmin läpi siirtymää hidastavia tekijöitä, mukaan lukien sekä raaka-ainekysymys että riittävyyshuolia synnyttävä niin kutsuttu *sikasykli*.

4.3.2 Sarjatuotanto takoo hinnat matalaksi

Odotettua nopeamman siirtymän tiellä onkin loppujen lopuksi ennen kaikkea yksi töyssy – hinta. Jos hinnalla ei olisi ollut väliä, vähähiiliseen energiajärjestelmään olisi voitu siirtyä jo vuosikymmeniä sitten. Kiihtyvän siirtymän puolesta puhuu kuitenkin alun perin erään lentokoneinsinöörin vuonna 1936 sarjatuotannosta tekemä havainto, joka tunnetaan hänen mukaansa Wrightin lakina.⁸⁰ Lyhyesti sanoen, Wrightin laki ennustaa, että *mitä enemmän jotain asiaa tehdään, sitä halvemmalla se opitaan tekemään*.⁸¹

Esimerkiksi vuonna 1886 patentoitu automobiili oli neljännesvuosisadan ajan lähinnä rikkaiden leikkikalua. Käsityönä pienissä pajoissa rakennetut ”hevosettomat vaunut” olivat

⁷² Vuodessa tuotetun energian määrä saadaan kertomalla asennettu nimellisteho ensin vuoden tuntien lukumäärällä (24 h × 365 = 8 760 h) ja sitten kertomalla tulos tuotannon tasaisuutta kuvaavalla kapasiteetti-kertoimella, tässä tapauksessa 11–16 prosenttia tai desimaalilukuna 0,11–0,16. ⁷³ Li, Dempsey ja White 2023.

⁷⁴ IEA 2023: Tracking Clean Energy Progress 2023. ⁷⁵ IEA 2023: Is There Enough Global Wind and Solar PV Manufacturing to Meet Net Zero Targets in 2030? ⁷⁶ GWEC 2023. ⁷⁷ Vihanta 2023. ⁷⁸ GWEC 2023.

⁷⁹ Rystad Energy 2023. ⁸⁰ Wright 1936. ⁸¹ Hax ja Majluf 1982; Wright 1936.

Ongelmien ratkaisu on täysin mahdollista olemassa olevilla tekniikoilla: uusia tieteellisiä tai teknisiä läpimurtoja ei tarvita.

niin kalliita, että tavalliset työtätekevät eivät voineet edes haaveilla niistä. Kaikki kuitenkin muuttui, kun uuden sukupolven autotehtailijat tarttuivat teollisen vallankumouksen suurimpaan vasaraan: liukuhihnan ja tieteellisen työnjaon mahdollistamaan suursarjatuotantoon.

Henry Fordin laadukkaaksi kansanautoksi suunnittelema Model T nousi hyvästä syystä sarjatuotannon symboliksi. Ensimmäiset T-mallit myytiin vuonna 1909 tehdastyöläisen liki kahden vuoden keskipalkkaa vastanneeseen 950 dollarin kappalehintaan.⁸² Sarjatuotannon suunnittelussa vierähti vielä neljä vuotta, mutta kun liukuhihna saatiin vuonna 1913 käyntiin, muutos oli nopeaa: vuonna 1916 myyntihinta oli enää 360 dollaria. Edes inflaatio ei kyennyt pysäyttämään kehitystä. Vuonna 1926 tehdastyöläisen keskimääräinen vuosipalkka oli yli kaksinkertaistunut 1 280 dollariin, mutta T-malli maksoi enää 290 dollaria. Kun T-mallin valmistus seuraavana vuonna lopetettiin, niitä oli myyty yli 15 miljoonaa kappaletta, ja Fordin tehtaat tuottivat yli puolet maailman kaikista uusista autoista.

Kehityksen taustalla ei ollut varsinaisia teknisiä läpimurtoja. Hinta saatiin alas määrätietoisella insinööriytyöllä. Kun tuotetta valmistetaan suurempia määriä, sen valmistuksen järjeistämiseen kannattaa käyttää enemmän rahaa. Suurempia sarjoja varten kannattaa suunnitella ja rakentaa tehokkaampia ja juuri kyseistä työvaihetta varten suunniteltuja koneita ja työkaluja. Jos tuotteita valmistetaan tuhansittain tai miljoonittain, pieniäkin kustannussäästöjä kannattaa etsiä. Valmistusmäärien kasvaessa kasvaa myös tietämys siitä, miten tuote ylipäättään kannattaa valmistaa, ja miten sekä tuotetta että sen valmistavuutta voitaisiin parantaa.

Yksi teknisten tieteiden mielenkiintoisimmista havainnoista on, että hintakehitys voidaan useissa tapauksissa ennustaa kohtalaisen luotettavasti etukäteen. Myös nimellä *oppimiskäyrä* tunnettu Wrightin laki sanoo, että kun valmistettu määrä kaksinkertaistuu, valmistuskustannukset vähentyvät tietyn määrän – esimerkiksi kymmenen prosenttia.⁸³

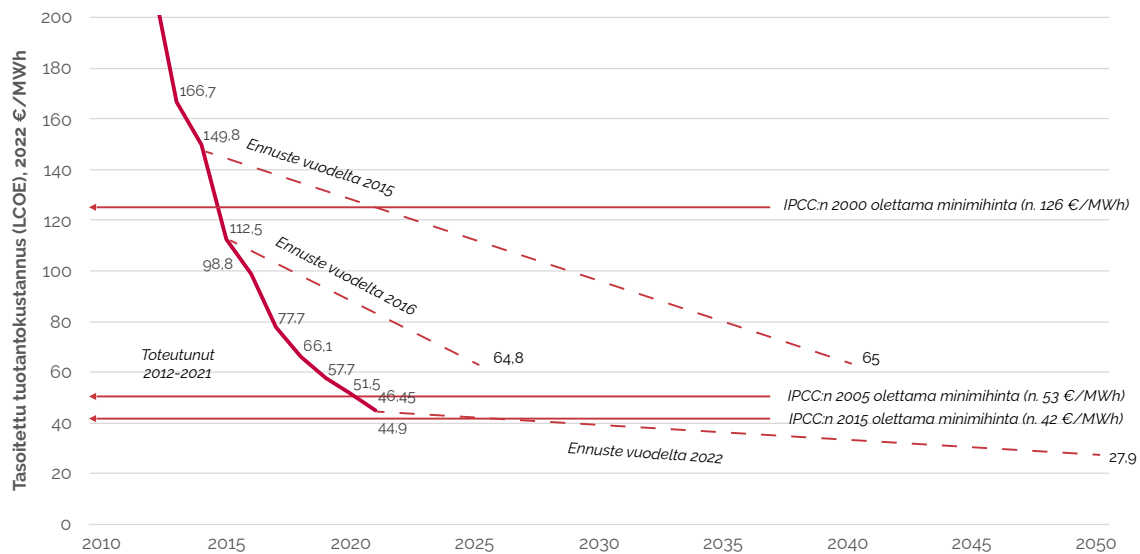
Wrightin lakia enemmän tai vähemmän noudattava kehitys on havaittu tähän mennessä käytännössä jokaisessa tuotteessa, jonka hintakehitystä on seurattu.⁸⁴ Esimerkiksi lentokoneiden hinta on laskenut jokaisen tuotantomäärän kaksinkertaistumisen myötä noin 15 prosenttia, ja elektroniikkaosien noin 5–10 prosenttia.⁸⁵

Jos vihreä siirtymä osoittautuu yllättävän nopeasti eteneväksi vihreäksi humahdukseksi, syynä tulee olemaan ennen kaikkea Wrightin lain synnyttämä positiivinen, itseään vahvistava pyörre.

Uusiutuvan energian, akkujen, sähköautojen ja muun uuden energijärjestelmän vaatimien tekniikoiden hinta oli vielä vuosikymmen sitten niin korkea, että epäilykset siirtymän toteutettavuudesta olivat ymmärrettäviä. Jopa monet alaa seuranneet aliarvioivat karkeasti, miten nopeasti kasautuva ja kiihtyvä muutos voi laskea hintoja ja muuttaa maailmaa (Kuva 14).

⁸² Fordin historiasta Rae ja Binder 2023. Mainitut keskipalkat lähteestä King 1930. ⁸³ Hax ja Majluf 1982; Nagy ym. 2013; Way ym. 2022. ⁸⁴ Nagy ym. 2013; Way ym. 2022. ⁸⁵ NASA 2012.

Kuva 14. Ennusteita aurinkosähkön hinnasta ja toteutunut hinta.



Toteutunut kehitys lähteestä IRENA 2023, Renewable Energy Statistics 2023. Ennusteet BNEF 2015, IRENA 2016, DNV 2022. Hintalattiat laskettu IPCC:n IAM-malleissa käytettyjen, lähteessä Way ym. 2022 (Supplementary Information, taulukko S20) esitettyjen paneelien minimihintojen perusteella.

Vuonna 2022 julkaistu tutkimus energialähteiden historiallisesta ja ennustetusta hintakehityksestä kuvaa kehityksen aliarviointia. Siinä tutkijat kävivät läpi 2 905 kansainvälisen ilmastopaneeli IPCC:n käyttöön vuosien 2010 ja 2020 välillä laadittua ennustetta aurinkosähkön hintakehityksestä. Niissä aurinkosähkön hinnan odotettiin laskevan keskimäärin 2,6 prosenttia vuodessa. Optimistisimmatkin ennusteet arvioivat hinnan laskun olevan hieman alle kuusi prosenttia vuodessa. Todellisuudessa aurinkosähköjärjestelmien hinta laski tänä aikana keskimäärin 15 prosenttia vuodessa.⁸⁶ Ehdottomana minimihintana pidetty hintalattia toisensa jälkeen on rikkoutunut (Kuva 14), mutta hintojen lasku jatkuu edelleen.

Seurauksena on jo ollut itseään voimistava ilmiö. Halvempia aurinkopaneeleja ja muita tekniikoita on kannattanut käyttää enemmän. Suurempi kysyntä on kasvattanut sarjakokoja ja tehnyt suuremmista tehdasinvestoinneista kannattavia. Tuotantomäärien kasvaessa hinta on laskenut Wrightin lain mukaisesti – ja tekniikoita on kannattanut käyttää entistä enemmän.

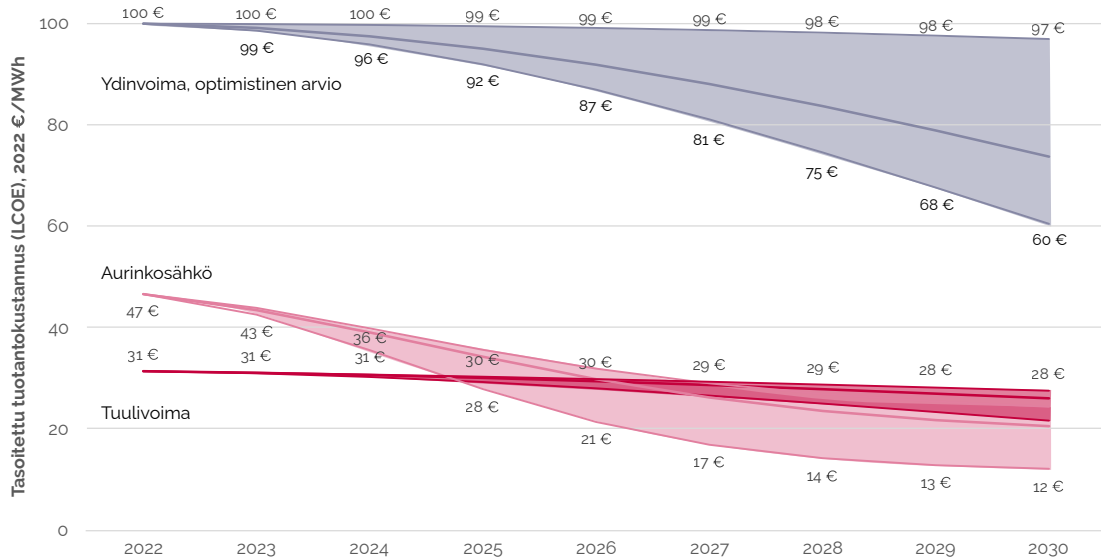
Sama ilmiö, hieman hitaampana, takoo alas myös maa- ja merituulivoiman, energian varastointitekniikoiden, vetyelektrolyysereiden, sähköautojen ja muiden uuteen energiajärjestelmään tarvittavien tekniikoiden hintaa. Pyörre pyörii vuosi vuodelta nopeammin. Voi olla, että pyörteestä tulee pyörremyrsky, joka pyyhkäisee vanhan energiajärjestelmän tieltään. On toki myös mahdollista, että olemme siinä vaiheessa S-käyrää, jossa optimismi on liian suurta.

Alla oleva kuva esittää ennusteen tuuli-, aurinko-, ja ydinvoiman mahdollisesta hintakehityksestä 2030-luvulla (Kuva 15). Laskelman pohjana ovat yllä esitetyt arviot tuuli- ja aurinkovoiman asennusnopeudesta sekä ydinvoiman osalta IEA:n arvio ilmastotavoitteen vaatimasta ydinvoiman rakentamisnopeudesta (keskimäärin kolme prosenttia

⁸⁶ Way ym. 2022.

vuodessa vuoteen 2030 saakka). Wrightin lain mukainen oppimisvaikutus on laskettu tuuli- ja aurinkovoimalle varovaisesti ja ydinvoimalle optimistisesti.⁸⁷

Kuva 15. Mahdollinen hintakehitys havainnollistettuna.



Asennusmäärien kehitys laskettu lähteiden Chase 2023 ja GWEC 2023 perusteilla (katso kuvat 11–13). Tuuli- ja aurinkosähkön hinta 2022 lähteestä IRENA 2023. Hintaa laskeva oppimisvaikutus lähteistä Kost ym. 2021, DNV 2022, ja Lovering ym. 2016. Katso myös alaviite 87.

4.3.3 Venäjän hyökkäys ja ilmastokriisin kiihtyminen kasvattavat painetta toimia

Suuret kriisit saavat aikaan suuria muutoksia. Siirtymä vähähiiliseen energiajärjestelmään ei vaikuta olevan poikkeus. Venäjän raakalaismainen hyökkäys Ukrainaan helmikuussa 2022 ja sen yritykset kiristää Ukrainaa tukeneita maita energiatoimituksia rajoittamalla laukaisivat Euroopassa vakavan energiakriisin.⁸⁸ Vaikka leuto talvi helpotti ongelmia ja

⁸⁷ Tuulivoiman oppimisnopeus (learning rate) varovaisen arvon mukaan 5 % (Kost ym. 2021), aurinkovoiman 26 % (DNV 2022). Varovaisuuden lisäämiseksi oppimisnopeuden oletetaan vaikuttavan vain osaan (enintään 75 %) kustannuksista, koska esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmien hinnasta vain noin puolet on aurinkopaneelin hintaa. Ydinvoiman oppimisnopeus 18 % laskettu tutkimuksen Lovering ym. 2016 perusteella yhdestä optimistisimmasta historiallisesta tapauksesta, Etelä-Korean ydinenergiaohjelmasta vuosien 1989–2008 välillä. Tuuli- ja aurinkovoiman hinnat vuonna 2022 ovat maailman painotettuja keskihintoja raportista IRENA 2023, Renewable Power Generation Costs in 2022. Ydinvoiman hinta on karkea arvio, joka on pyöristetty 100 euroon yksinkertaisuuden vuoksi. Tuoreehkot arviot ydinsähkön tasoitettusta tuotantokustannuksesta (LCOE) vaihtelevat alle 50 eurosta yli 170 euroon megawattitunnilta. Katso esimerkiksi Vakkilainen ja Kivistö (2017) ja Lazard (2023). Vertailun vuoksi, kantaverkkoyhtiö Fingrid arvioi perinteisen ydinvoiman hinnaksi Suomessa 84,5 €/MWh vuonna 2035 (Fingrid 2023). Jos pieniä SMR-reaktoreita saadaan siihen mennessä sarjavalmistukseen, niiden tuottaman sähkön hinnaksi arvioitiin 31–43,9 €/MWh. Tällöin hintakehitys olisi jokseenkin kuvan optimistisimmasta päästä. ⁸⁸ *Myytinmurtajaiset osa 2*, Korhonen 2023.

kriisistä selvittiin pessimistisimpiin ennusteisiin verrattuna hyvin, se kasvatti merkittävästi sekä fossiilisista riippumattoman energijärjestelmän houkuttelevuutta että julkisia ja yksityisiä sijoituksia uusiin tekniikoihin.

Yhtenä esimerkkinä, vedyn tuotanto sähköä käyttävällä elektrolyysilla sai kriisistä valtavan pirstysruiskeen. Elektrolyysi on uuden energijärjestelmän kriittinen ja toistaiseksi liian hitaasti edennyt osa. Hidas kehitys johtuu ennen kaikkea siitä, että elektrolyysilla tuotettu "vihreä" vety on ollut paljon kalliimpaa kuin fossiilisesta maakaasusta tehty "harmaa" vety.

Kun vedyn tuotanto ei ole ollut kilpailukykyistä, sijoitukset elektrolyysilaitteiden tuotantoon ja tuotekehitykseen ovat jääneet tarvittavaa vähäisemmiksi. Sarjatuotanto ei ole pääsyt jauhamaan hintoja alemmaksi, ja seurauksena on ollut muna-kana-tyyppinen ongelma: elektrolyysilaitteiden hinta saataisiin todennäköisesti laskemaan, jos niitä rakennettaisiin enemmän, mutta elektrolyysilaitteita ei rakenneta, kun niiden hinta on liian korkea.

Talvi 2022–2023 mullisti laskelmat. Ennen sotaa vallinneilla maakaasun hinnoilla, noin 20–30 euroa megawattitunnilta, harmaan maakaasuvedyn hinta oli noin puolet vihreän elektrolyysivedyn hinnasta.⁸⁹ Syksyllä 2022 kaasun hinta nousi kuitenkin jopa 300 euroon megawattitunnilta. Vaikka kaasun hinta onkin laskenut odotuksia nopeammin ja on kirjoitushetkellä enää noin 40 euroa megawattitunnilta, kriisi sai niin yksityiset sijoittajat, valtiot, kuin Euroopan unioninkin liikkeelle.

Toinen poliittista painetta kasvattava tekijä on ilmaston lämpeneminen ja ilmastomuutosten haittavaikutusten kasvu.⁹⁰ Helleaallot, myrskyt, tulvat, kuivuudet ja muut äärimmäiset sääilmiöt ovat yleistyneet, valtameren lämpötila nousee hälyttävästi ja Etelänapamannerta ympäröivä jääpeite on tänä vuonna huvennut niin paljon, että vastaavan tapahtuman todennäköisyydeksi on arvioitu yksi seitsemässä ja puolessa miljoonassa vuodessa.⁹¹

Nähtäväksi jää, kuinka paljon meneillään olevat kriisit loppujen lopuksi vaikuttavat vihreän siirtymän etenemisnopeuteen. Se on viime kädessä poliittinen kysymys. Siirtymän kiihdyttäminen on ihmisten käsissä: jos haluamme päästä fossiilisista eroon nopeammin, työkalut siihen ovat jo olemassa.

LAATIKKO 4: Nopea siirtymä voi olla hidasta halvempi

YKSI WRIGHTIN LAIN ja kiihtyvän muutoksen seuraus on se, että *nopea muutos voi olla hidasta halvempi*. Nopea muutos on hidasta edullisempi jokseenkin automaattisesti, jos hitaan muutoksen ympäristövaikutukset – suurempi määrä ilmastoa muuttavia kasvihuonekaasuja sekä niiden aiheuttamia riskejä huomioidaan.

Muutama äskettäinen tutkimus on kuitenkin tarkastellut asiaa tarkemmin ja todennut, että hidastelu saattaa tulla selvästi kalliimmaksi, vaikka ympäristövaikutuksia ei edes huomioitaisi.⁹² Tähän on useampia syitä.

Jos siirtymässä hidastellaan, turvallisena pidetty *hiilibudjetti* eli kasvihuonekaasupäästöjen turvallinen maksimimäärä ylitetään nopeasti, ja päästöjen vähentämiseksi

⁸⁹ Calthrop 2022. ⁹⁰ Hansen ym. 2023. ⁹¹ Weise ja Coi 2023. ⁹² Euroopan tilannetta on tarkastellut esimerkiksi Victoria ym. 2020. Maailmanlaajuisesti katso esimerkiksi Way ym. 2022.

Energiatehokkuushankkeet olisivat maksaneet noin 60–65 miljardia punttaa, mutta säästäneet vuosittain noin kymmenen miljardia.

joudutaan todennäköisesti tekemään nopeita ja kalliita päätöksiä. Nopeammassa mutta tasaisessa siirtymässä muutos on rauhallisempaa, eikä esimerkiksi ennen taloudellisen käyttöiän päättymistä kannattamattomina romutettavia virheinvestointeja ehditä tekemään yhtä paljon.

Nopeammassa siirtymässä myös vähähiilisen energijärjestelmän muista hyödyistä, kuten vähäisemmästä ilman saasteisiin liittyvästä sairastavuudesta ja kuolleisuudesta, päästäisiin nauttimaan aiemmin.⁹³

Nopeampi siirtymä sitä paitsi kasvattaisi uuden tekniikan valmistusmääriä nopeammin, jolloin tekniikasta tulisi Wrightin lain mukaisesti halvempaa nopeammin. Yksinkertais-tetulla mutta suuntaa antavalla mallilla tehty simulaatio maailman energijärjestelmän kehityksestä antaa tällöin selkeän tuloksen: nopea siirtymä olisi hidasta halvempi.⁹⁴

Nopeampaa siirtymää puoltavat myös ilmastonmuutokseen ja fossiilisiin polttoaineisiin liittyvät riskit ja epävarmuudet. Emme tosiasiaassa tiedä tarkasti, miten suuria riskejä otamme jatkamalla fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

Epävarmuus voidaan hinnoitella rahoitusmatematiikan keinoin. Jos epävarmuus hinnoitellaan, siirtymä olisi todennäköisesti rationaalista tehdä mahdollisimman nopeasti, ennen kuin mikään suurempi riski ehtii realisoitua.⁹⁵

Uusi energiakriisi on vaarana niin kauan, kun yhteiskuntamme ovat riippuvaisia fossiilista polttoaineista. Siirtymän kiihdyttämiseen käytetyt varat olisivat hyvä sijoitus, jos niillä vältettäisiin yksikin kriisi.

Epävarmuuksia ja riskejä vähentämään pyrkivän lähestymistavan eduista saatiin mainio esimerkki talvella 2022–2023. Kun Venäjän hyökkäys realisoi fossiilisiin polttoaineisiin liittyneen talous- ja turvallisuuspoliittisen riskin, vihreässä siirtymässä pisimmällä olleet maat, kuten Suomi, selvisivät kriisistä selvästi fossiiliriippuvaisempia maita paremmin.

Maat, joissa siirtymää on tietoisesti hidastettu, olivat sen sijaan ongelmassa. Tunnetuin esimerkki lienee Saksa, jonka päätöstä sulkea ydinvoimalat ennen fossiilisia voimaloita on ilmastokriisin oloissa vaikea käsittää. Toinen varoittava esimerkki saadaan Iso-Britanniasta, jossa konservatiivihallitus leikkasi vuonna 2016 "viherrumpaksi" ("green crap") kutsumansa hankkeet valtion budjetista lähes kokonaan. Talouslehti Financial Times julkaisi marraskuussa 2022 välitilinpäätöksen: leikkausten käytännössä katsoen pysäyttämät energiatehokkuushankkeet olisivat maksaneet noin 60–65 miljardia punttaa, mutta säästäneet vuosittain noin kymmenen miljardia.⁹⁶

Sekä Financial Times että laskelman tehneet Warwickin yliopiston tutkijat panivat myös merkille, että maan hallituksen jakamat energiatuet olivat jo kriisivuoden 2022–2023 kuuden ensimmäisen kuukauden aikana tulleet maksamaan veronmaksajille huikeat 31 miljardia punttaa. Vaikka energiatehokkuushankkeet eivät olisikaan torjuneet energiakriisiä kokonaan, tukea olisi varmasti tarvittu selvästi vähemmän.

⁹³ Victoria ym. 2020. ⁹⁴ Way ym. 2022. ⁹⁵ Daniel ym. 2019. ⁹⁶ Kommenda ym. 2023. Artikkelin perustuu suurelta osin tutkimukseen Fetzer ym. 2023.

LAATIKKO 5: Aurinkosähkö voitti jo – mitä tekee teollisuus?

JO NYT VOIDAAN ENNUSTAA, että aurinkosähköstä tulee muutamassa vuosikymmenessä ihmiskunnan tärkein energialähde.

Harva tekniikka hyöttyy sarjatuotannosta niin paljon kuin aurinkopaneelit. Valmistus-tekniikan nyrkkisääntöihin kuuluu, että tuotteista saadaan sitä halvempia, mitä vähemmän niissä on liikkuvia osia. Aurinkosähköjärjestelmä ei tarvitse välttämättä yhtäkään liikkuvaa osaa. Wrightin laki puolestaan sanoo hintakehityksen riippuvan ennen kaikkea valmistetusta määrästä. Niinpä hinta laskee eniten, jos valmistettavat tuotteet ovat pieniä, modulaarisia, moneen eri käyttöön mahdollisimman vähäisin muutoksin sopivia.

Aurinkokennot, joista aurinkopaneelit kootaan, ovat juuri tällaisia. Yksittäistä kennoa voidaan käyttää sellaisenaan jonkin pienen laitteen virtalähteenä, tai niitä voidaan koota esimerkiksi 12, 36, 60 tai 72 kennon paneeleiksi. Niinpä yksittäisten kennojen valmistusmäärät nousevat huikkeiksi.

Esimerkiksi Olkiluoto 3:n EPR-tyyppinen ydinreaktori tuottaa vuosittain saman verran sähköä kuin noin 2,8 miljardia yksittäistä aurinkokennoa. Sitä varten valmistettiin kuitenkin vain yksi paineastia ja vain yksi turbiini. Koko maailmassa on valmistunut tai rakenteilla yhteensä vain kuusi EPR-tyyppistä reaktoria – vain kuusi paineastiaa, turbiinia ja muuta erityisesti EPR-reaktoria varten suunniteltua osaa.

Kun valmistusmäärät ovat pieniä, Wrightin lainkin vaikutukset jäävät pieniksi. Kun valmistusmäärät mitataan miljardeissa, sarjatuotanto laskee hintoja nopeasti. Niinpä aurinkopaneelien hinta laskee, kun taas ydinvoiman hinta on jopa noussut.⁹⁷

Aurinkopaneeleita monimutkaisemmissa ja siksi sarjavalmistuksesta vähemmän hyötyvissä uusiutuvan energian tekniikoissa kehitys on ollut hitaampaa. Esimerkiksi tuulivoimalat ovat silti olleet jo vuosien ajan halvin tapa lisätä sähköntuotantoa myös Suomessa.⁹⁸

Maantieteen ja vuodenaikojen asettamien rajoitteiden vuoksi Suomi ei ole aurinkosähkölle otollisinta aluetta, ja tuulivoima tulee todennäköisesti olemaan noin 2020-luvun puolivälistä alkaen pitkälle tulevaisuuteen saakka maamme tärkein yksittäinen sähkön lähde.

Aurinkosähkön voittokululla tulee silti olemaan vaikutuksia Suomeenkin. Sen tuotanto lisääntyy meilläkin. Sähköautojen yleistyminen lisää paneelien houkuttelevuutta, kun omaa energiaa voidaan tankata auton akkuun ilman siirtomaksuja. Houkuttelevuus vain lisääntyy, kun yhä useampaa sähköautoa voi käyttää kodin energiavarastona.

Kenties merkittävimmät vaikutukset saattavat kuitenkin aiheutua siitä, että energiaa paljon tarvitsevan teollisuuden katse tulee ennemmin tai myöhemmin suuntautumaan etelään. Kirjoitushetkellä Suomi houkuttelee teollisuusinvestointeja edullisen puhtaan sähkön ja valtavan tuulivoimapotentialin ansiosta. Aurinkosähkön hinnan lasku tekee kuitenkin aurinkoisemmista maista vuosi vuodelta houkuttelevampia.

Jos aurinkosähkön hinta laskee merkittävästi, yllättäviä hyötyjä voivat olla Espanjan kaltaiset maat, joissa valtava tuulivoimapotentiali yhdistyy valtavaan aurinkovoimapotentialiin ja suureen määrään säätövoimaksi sopivaa vesivoimaa. Espanjan ja osittain myös muun Euroopan erityisenä etuna on vieläpä se, että tuuli- ja aurinkovoima tukevat toisiaan: hämäränä aikana yleensä tuulee, tyyninä päivinä yleensä paistaa.

Suomella on toistaiseksi hyvät kortit, mutta ei välttämättä loputtoman kauan.

⁹⁷ Katso esimerkiksi Lovering ym. 2016. Ydinvoiman kustannusylitysten syistä ja niihin puuttumisesta katso etenkin OECD NEA 2020. ⁹⁸ Vakkilainen ja Kivistö 2017.

4.4 Mitkä tekijät voivat hidastaa muutosta?

Muutosta kiihdyttävien voimien lisäksi on myös muutosta hidastavia ja jarruttavia tekijöitä. Seuraavassa esiteltävät ilmiöt saattavat yksin tai yhdessä muiden tekijöiden kanssa vaikuttaa muutosta hidastavasti. Lista ei ole täydellinen: myös muut tekijät voivat hidastaa muutosta.⁹⁹

4.4.1 Uusiutuvien kasvu voi törmätä kannattavuuden kannibalisaatioon

Etenkin tuuli- ja aurinkovoiman mutta vähemmässä määrin myös ydinvoiman hidasteista mahdollisesti suurimpia on *kannibalisaatioksi* kutsuttu ilmiö. Se syntyy liian monen voimalan tuottaessa sähköä samaan aikaan. Tällöin sähköstä maksettava hinta putoaa. Mitä enemmän samanlaisia, samaan aikaan sähköä tuottavia voimaloita rakennetaan, sitä alemmaksi kyseisten voimaloiden tuottaman sähkön keskimääräinen myyntihinta tippuu.

Kannibalisaatio vaikuttaa kaiken sähköntuotannon kannattavuuteen, mutta se on erityisesti ongelma tuuli- ja aurinkovoimalle. Tuulivoimalat tuottavat sähköä tuulisina aikoina, ja aurinkovoimalat vain valoisaan aikaan.¹⁰⁰ Toisin kuin muut voimalat, ne eivät voi säästää tuulta tai aurinkoa käytettäväksi aikana, jolloin sähköstä maksettaisiin enemmän. Sekä tuulisuus että etenkin päivänvalo ovat lisäksi ajallisesti vahvasti *korreloituneita*: kun yhdessä osassa Eurooppaa on päivä, muuallakin on päivä, ja jos Suomessa tuulee, yleensä ainakin Tanskassa mutta usein jopa Espanjassa tuulee myös.

Sekä tuuli- että aurinkovoimaloiden tuotannon marginaali- eli rajakustannus on lisäksi hyvin pieni. Tuuli- ja aurinkovoimaloiden kustannukset ovat pitkälti kiinteitä (rahoituskulut, huoltokustannukset ja niin edelleen) eli ne eivät riipu juuri lainkaan siitä, tuottaako voimala sähköä vai ei. Näin ei ole esimerkiksi kallista kaasua polttavassa kaasuvoimalassa, jonka kannattaa tuottaa sähköä vain, jos sähköstä saatava hinta ylittää polttoainekulut ja voimalan käytöstä ja kulumisesta aiheutuvat kustannukset.

Tuuli- ja aurinkovoimaloiden kannattaakin tuottaa sähköä, vaikka sähköstä maksettaisiin vain hyvin vähän. Jos sähköntuotannosta on ylitarjontaa, halvimman tuotannon marginaalikustannus määrää sähkön hinnan. Niinpä tuuli- tai aurinkovoiman lisääminen laskee sähkön hintaa tuulisina ja aurinkoisina tunteina. Jos tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoa on kysyntää enemmän, hinta putoaa helposti nolnaan – tai joissain tapauksissa jopa negatiiviseksi.¹⁰¹ Esimerkiksi Espanjassa on ennustettu aurinkosähkön tuotannon kannabilisoivan tuloistaan yli 75 prosenttia jo vuonna 2026.¹⁰² Vaikka aurinkopaneelien hinta laskeekin nopeasti, kannibalisaatio leikkaa uusasennusten kannattavuutta – ellei sähkölle keksitä käyttöä, josta kannattaa maksaa rahaa.

⁹⁹ Katso esimerkiksi Napp ym. 2017, tai Aalto (toim.) 2021. ¹⁰⁰ On kuitenkin syytä muistaa, että tuuliturbiinien korkeat tornit nostavat ne maanpintaa huomattavasti tuulisemmalle vyöhykkeelle. Jos aivan tarkkoja ollaan, teoriassa aurinkopaneelit voivat myös tuottaa *hieman* sähköä jopa Kuun valossa. Käytännössä tällä ei ole merkitystä. ¹⁰¹ Negatiiviset sähkön hinnat ovat mahdollisia silloin, kun sähkön tarjonta ylittää kysynnän, mutta joidenkin voimaloiden on kannattavampaa maksaa ylijäämätuotannon käyttäjille kuin vähentää tuotantoaan. Näin voi käydä esimerkiksi silloin, kun sähköverkossa on paljon vanhoja, tasaiseen tuotantoon suunniteltuja hiilivoimaloita, tai kun vesivoimalat joutuvat juoksuttamaan tulva-aikana mahdollisimman paljon vettä samaan aikaan kun tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoa on paljon. Negatiiviset hinnat voivat johtua myös tuista, jotka tekevät sähkön tuotannon kannattavaksi voimaloiden omistajille sähköstä maksettusta hinnasta riippumatta. Esimerkiksi Alankomaissa ja Saksassa uusiutuvan energian tuet ovat osin tällaisia. Suomessa vastaavia tukia ei ole jaettu koskaan – onneksi. ¹⁰² Ortiz 2023.

Tuulivoima kärsii kannibalisaatiosta hieman aurinkosähköä vähemmän. Vuonna 2017 tehdyn ennusteen mukaan kannibalisaatio kasvaa jopa 40 prosenttiin, kun tuulivoiman osuus sähkön tuotannosta on 30 prosenttia.¹⁰³ Ennuste näyttää pitävän karkeasti sanoen kutinsa: Matti Leppäsen keräämien tilastotietojen mukaan kannibalisaatio oli Suomessa tammi-elokuussa 2023 keskimäärin 24 prosenttia, kun tuulivoiman osuus sähkön tuotannosta oli 18 prosenttia.¹⁰⁴

Kannibalisaatio on sähkön yleisen hintatason laskun, korkojen nousun ja turbiinien hintojen nousun ohella yksi syy, miksi Suomen tuulivoimarakentaminen on tätä raporttia kirjoittaessa hidastumassa. Vuoden 2023 ensimmäisen yhdeksän kuukauden aikana ei tehty yhtään uutta investointipäätöstä.¹⁰⁵ Vanhojen päätösten varassa tullaan kuitenkin rakentamaan merkittäviä määriä tuulivoimaa vielä vuoteen 2026 saakka. Tarvittaessa rakentaminen voidaan aloittaa uudelleen nopeasti.

Kannibalisaatiota voidaan haluttaessa hillitä poliittisin päätöksin. Kannibalisaatio on ongelma vain, jos sähkölle ei ole käyttäjiä. Edistämällä sähköä käyttävän teollisuuden investointeja tai esimerkiksi energiavarastoja vähennetään myös kannibalisaation vaikutuksia.

Julkinen sektori voi parhaimmillaan olla erinomainen koordinoimaan uusia hankkeita ja siten purkamaan investointien hidasteeksi helposti nousevia pullonkauloja. Jos esimerkiksi vetyä tuottavia elektrolyysereitä kannattaa rakentaa käyttämään enimmäkseen tai jopa täysin tuulisen ja aurinkoisen ajan sähköä ja edes osa elektrolyysin hukkalämmöstä saadaan myytyä kaukolämmöksi, sekä uusiutuvaa sähköä tuottavat, elektrolyysereiden omistajat, että kaukolämmön käyttäjät hyötyvät.

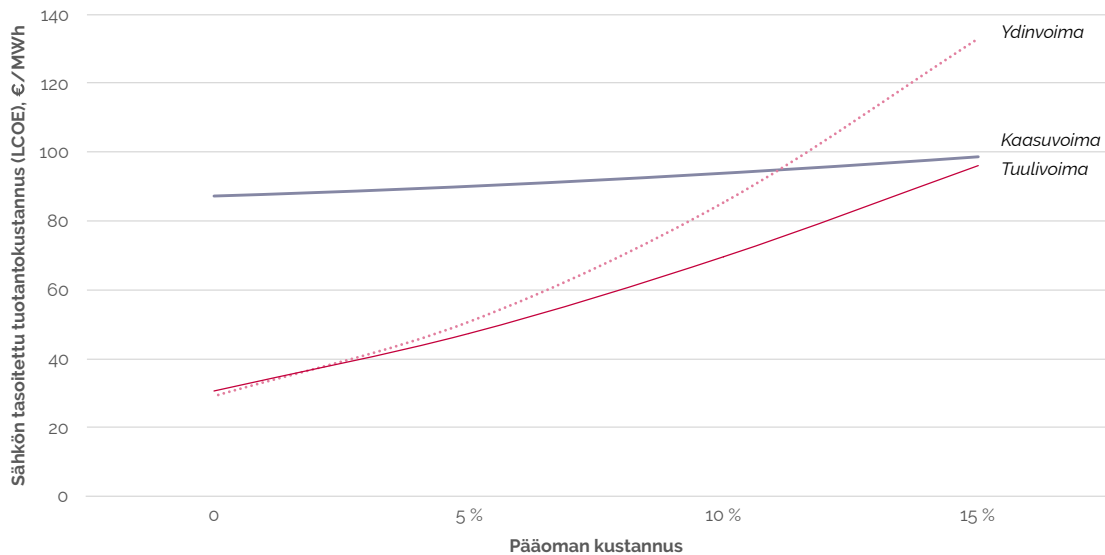
4.4.2 Korkojen nousu hidastaa investointeja

Korkojen nousu on omiaan hidastamaan siirtymää vähähiiliseen energiajärjestelmään. Syynä on ennen kaikkea se, että suurin osa vähähiilisen energiajärjestelmän tekniikasta on luonteeltaan pääomavaltaista: rakentamiskustannukset ovat suuret, mutta käyttökustannukset pienet. Fossiilisen tuotannon tekniikat ovat yleensä pääomakustannuksiltaan vähähiilisiä tekniikoita pienempiä, mutta niiden käyttökustannukset ovat etenkin polttoainekustannusten vuoksi suuremmat.

Pääomavaltaisen infrastruktuurin rakentamisen kannattavuus riippuu suuresti investointilaskelmissa käytettävästä korkotasosta. Laskennallinen kannattavuus heikentyy nopeasti, jos korkotaso nousee. Fossiilivoimaloiden kannattavuus ei kärsi korkojen noususta läheskään yhtä paljon (Kuva 16). Sähköntuottajilta vaadittujen korkojen nousu noin kolmesta jopa yli 12 prosenttiin oli esimerkiksi Tshernobylin onnettomuutta tärkeämpi syy siihen, miksi kooltaan ja rakentamiskustannuksiltaan pienet maakaasuvoimalat yleistyivät ja ydinvoiman rakentaminen pysähtyi länsimaissa 1980- ja 1990-luvulla.¹⁰⁶

103 Wisser 2017. **104** Leppänen 2023. **105** Vihanta 2023. **106** Suurin syy tuottajilta vaadittujen korkojen nousuun oli Yhdysvalloissa 1970-luvulla alkanut, Euroopassa 1990-luvulla loppuun viety sähkömarkkinoiden vapauttaminen eli deregulaatio. Ennen deregulaatiota sähkön tuotanto oli useimmissa maissa käytännössä monopolisoitu. Suuret sähköyhtiöt, joiden asiakkaila ei ollut vaihtoehtoja, saivat rahoitusta edullisesti; deregulaation pirstomilla markkinoilla rahoituksen hinta nousi merkittävästi. Katso esimerkiksi IEA/OECD 1998; Korhonen 2023; Kuka murhasi ydinvoiman, ja miten?

Kuva 16. Korkotason vaikutus sähkön tasoitettuun tuotantokustannukseen (LCOE).



Laskettu lähteen Vakkilainen ja Kivistö (2017) hintatietojen sekä Suomen ilmasto- ja energiastrategian taustatutkimuksissa käytettyjen kaasun ja päästöoikeuksien hinnan perusteella vuonna 2020 valmistuvalle voimalalle.

4.4.3 Talouden taantuma ja poliittinen epävarmuus tekevät investoinneista epävarmoja

Uuden energiantuotannon rakentaminen kannattaa vain, jos tuotannolle on kysyntää. Taantumaa ajautuvissa talouksissa teollinen tuotanto ja muu toimeliaisuus vähenee. Energian kulutuksen kasvu hidastuu, ja kulutus voi jopa vähentyä.

Vuosien 2007–2008 pankkikriisin aiheuttaman taantumana vuoksi ennakoitua vähemmän kasvanut sähkön kysyntä oli tärkein syy esimerkiksi Suomessa vuosien 2009 ja 2021 välillä vallinneeseen poikkeuksellisen halvan sähkön ja sitä kautta vähäisten tuotanto-investointien kauteen.¹⁰⁷

Taantumat vaikuttavat myös epäsuorasti. Ne voivat johtaa elvytykseen, jossa parhaimmillaan suositaan vihreitä investointeja. Toisaalta taantumat toimivat poliittisen radikalismien ja populismin kasvualustana. Kun siihen yhdistyy fossiili-intressien lobbausvalta, seurauksena voi olla fossiilisten polttoaineiden käytön lisääminen tai niiden katoamisen hidastaminen lyhytnäköisen talouskasvun tavoittelun nimissä. Jo pelkkä riski politiikan tempoilusta on omiaan lisäämään uuteen tekniikkaan tehtävien sijoitusten epävarmuutta.

Korkojen nousun, taantumana ja poliittisen epävarmuuden vaikutukset ovat kaiken lisäksi useimmiten kertautuvia: jos useampi niistä vaikuttaa samanaikaisesti, niiden sijoituksia hidastava yhteisvaikutus on suurempi kuin minkään vaikutus olisi yksittäin esiintyessään.

¹⁰⁷ Vehviläinen ja Kara 2015.

Sekä korkojen nousun että investointien epävarmuutta lisäävien tekijöiden vaikutusta voidaan pienentää julkisilla tuilla ja muulla investointien epävarmuutta vähentävällä politiikalla, kuten sitoutumisella tiukkoihin ilmastotavoitteisiin. Sijoittajan näkökulmasta tuet, suotuisat lait ja valtion tahtotilaa ilmentävät sitoumukset vähentävät sijoituksiin aina liittyvää riskiä tappioista. Koska sijoittajat haluavat saada sijoitukselleen riskejä vastaavan tuoton, riskejä vähentävä politiikka pienentää investointien rahoituskustannuksia ja siten tekee sijoituksista houkuttelevampia. Esimerkiksi Ruotsin uusi hallitus onkin siksi jo luvannut lainatakauksia uusia ydinvoimaloita rakentaville, joskaan toistaiseksi kukaan ei ole vielä tarttunut tarjoukseen. Ydinvoiman tilannetta käsitellään tarkemmin luvussa 5.9.

4.4.4 Raaka-aineita riittänee, mutta sikasyklit voivat tehdä siirtymästä töyssyisen

Uuden energijärjestelmän rakentaminen vaatii valtavia määriä sekä yleisiä että harvinaisia raaka-aineita. Raaka-ainepulan onkin säännöllisesti povattu jopa pysäyttävän siirtymän tai ainakin hidastavan sitä. Suomessa huomiota on herättänyt etenkin Geologisen tutkimuskeskuksen 2021 julkaisema laskelma, jonka mukaan siirtymän vaatimien akkujen tuotanto vaatisi Maapallon tunnettuja mineraalivarantoja enemmän nikkeliä, kobolttia, litiumia ja grafiittia.¹⁰⁸

Laskelmat ovat aina hyödyllisiä, mutta vain yhtä tarkkoja kuin niitä varten tehdyt oletukset. Esimerkiksi yllä mainittu tulos saadaan aikaan olettamalla, että tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon tasaamiseksi tarvitaan yhteensä 574 terawattitunnin (TWh) energia-varasto. Varaston koko ei perustu energijärjestelmän toimintaa simuloiviin malleihin, vaan oletukseen, että uusi energijärjestelmä vaatii varaston, jolla voitaisiin tyydyttää koko maailman kaikki sähkönkulutus neljän viikon ajan. Lisäksi on oletettu, että energia varastoitaisiin vain paljon raaka-aineita tarvitseviin litium-ioniakkuihin.¹⁰⁹

Energijärjestelmän toiminnan simulointi muuttaa oletusta oleellisesti. Uusimpien mallinnusten mukaan energiavarastoja tarvitaan jopa yllättävän vähän, ja vain pieni osa energiasta kannattaa varastoida akkuihin.¹¹⁰ (Energiavarastojen tarvetta käsitellään tarkemmin luvussa 5.8). Realistisempi oletus akkujen tarpeelle lähes täysin tuuli- ja aurinkovoimaan perustuvassa energijärjestelmässä olisi noin kuuden tunnin kulutusta vastaava määrä – alle prosentti yllä mainitusta.

Vihreän siirtymän vaatimien raaka-aineiden määrä ja hankintaan liittyvät ongelmat ovat vilkkaita tutkimusaiheita.¹¹¹ On selvää, että tarvittavat raaka-ainemäärät ovat valtavia, ja niiden hankkiminen tulee tuottamaan monenlaisia pulmia. Tuotannon nopea kasvattaminen tulee aiheuttamaan päänvaivaa erityisesti ympäristövahinkojen, epäoikeudenmukaisuuksien ja geopoliittisten riskien välttämiseksi.

Useimpien arvioiden mukaan siirtymä ei kuitenkaan pysähdy raaka-aineiden puutteeseen, ja pullonkaulat jäävät väliaikaisiksi.¹¹² Tärkein syy on se, että raaka-aineiden

108 Michaux 2021. Raportin uutisoinnista esimerkkinä vaikkapa Westrén-Doll 2022. **109** Geologisen tutkimuskeskuksen raportin perkaamisesta kunnia kuuluu erityisesti Visa Siekkiselle. **110** Katso esimerkiksi Climate Change Committee 2023; Jorgenson ym. 2022; Koivunen ym. 2022, tai tarkemmin luku 5.7. **111** Kaksi tuoretta katsausta ovat ETC 2023 ja IEA 2022. **112** Käytännössä jokainen laajempi selvitys toteaa saman asian, vaikka joidenkin materiaalien saatavuus voikin aiheuttaa merkittäviä päänsärkyjä – enemmän kuitenkin geopoliittisten syiden kuin materiaalien riittävyyden johdosta. Esimerkkeinä vaikkapa ETC 2023 ja IEA 2022.

hinta ohjaa niiden käyttöä. Kun raaka-aineet ovat runsaita ja siksi halpoja, uusien raaka-ainelähteiden etsimiseen, käytön tehostamiseen ja korvaaviin ratkaisuihin ei kannata panostaa. Hinnan noustessa tilanne muuttuu, ja mahdolliset pullonkaulat kannattaa ratkaista.

Mennyt ei tietenkään ole tae tulevasta, mutta historialliset esimerkit antavat syyntä uskoa, että tekniikka ja yhteiskunnat sopeutuvat raaka-ainerajoitteisiin jopa yllättävän hyvin.¹¹³ On silti lähes mahdotonta ennustaa tarkasti, miten raaka-aineiden pullonkaulat ohitetaan.

Raaka-aineiden hinta asettaa rajan tekniikoiden hinnalle. Esimerkiksi aurinkopaneeli ei voi maksaa vähemmän kuin siihen kuuluvien materiaalien hinta yhteensä. Tekniikan kehittyessä tarvittavien raaka-aineiden määrä kuitenkin yleensä vähenee. Myös raaka-aineiden tuotantotekniikka kehittyy, tehden raaka-aineiden tuotannosta halvempaa.

Uudet tekniikat saattavat tehdä joistain harvinaisista ja kalliista raaka-aineista jopa kokonaan tarpeettomia. Esimerkiksi kriittisenä akkumateriaalina pidettyä kobolttia ei välttämättä tarvita akkuihin lainkaan. Maailman suurin sähköautovalmistaja Tesla ilmoitti keväällä 2022, että yli puolet sen uusista autoista käytti jo täysin kobolttivapaita akkuja, ja osuuden odotetaan kasvavan.¹¹⁴

Raaka-aineiden saatavuus tulee silti vaikuttamaan siirtymän etenemiseen.

Uuden energijärjestelmän tarvitsemien raaka-aineiden, komponenttien ja tuotteiden hinta aaltoilee, kun tuotantoa on hetkittäin joko liikaa tai liian vähän. Aaltoilu johtuu ennen kaikkea siitä, että tuotannon kasvattaminen ei onnistu käden käänteessä, vaikka kysyntä kasvaakin. Viive kysynnän ja tuotannon kasvun välillä saa mahdollisesti aikaan ilmiön, jossa kysynnän tuotantoa nopeampi kasvu nostaa hintaa, hinnan nousu johtaa ylituotantoon ja ylituotanto puolestaan hinnan romahdukseen. Ilmiöstä käytetään usein nimeä *sikasykli* (hog cycle tai pork cycle), koska ensimmäiset sitä käsitelleet tutkimukset selvittivät sianlihan hinnan vaihteluita.¹¹⁵

Sikasyklit sekä hidastavat että nopeuttavat siirtymää, mutta pitkällä aikavälillä vaikutukset pääosin kumoavat toisensa. Esimerkiksi vuonna 2022 raaka-aineiden hinnan nousu katkaisi hetkeksi uusiutuvan energian ja akkujen (ja sitä kautta sähköautojen) hinnan pitkään jatkuneen laskun.¹¹⁶ Vaikutus jäi kuitenkin väliaikaiseksi: sekä akkujen että erityisesti aurinkopaneelien hinnat ovat laskeneet jo selvästi.¹¹⁷

Vaikka sikasyklit eivät katkaisekaan siirtymän tarvitsemien tekniikoiden pitkän aikavälin laskevaa hintatrendiä, niillä voi olla vaikutusta esimerkiksi siihen, mitkä tekniikat nousevat johtavaan markkina-asemaan. Sikasyklit antavat myös painoarvoa sekä liian optimistisille että liian pessimisteille ennusteille: kehityksen nopeutta on helppo yliarvioida sikasyklin romahdusvaiheessa, ja helppo aliarvioida nousuvaiheessa.

Siirtymän edetessä yhä suurempi osa raaka-aineista tullaan saamaan vanhoja laitteita kierrättämällä. Ennen pitkää tavoitteena on oltava yhteiskunta, joka selviää lähes ilman kaivoksia ja neitseellisiä raaka-aineita. Muuten mikään määrä teknisiä ihmeitä ei koskaan riitä. Tällaiseen kiertotalousyhteiskuntaan on kuitenkin vielä matkaa.

113 Tarkemmin esimerkiksi Korhonen 2017. **114** Lambert 2022. **115** Breimyer 1959. **116** BNEF 2022.

117 Schachinger 2023.

4.5 Voisiko jokin aivan uusi tekniikka muuttaa kaiken?

Teknologisen muutoksen nopeutta ja suuntaa on vaikea ennustaa. Olemassa olevien tekniikoiden kehitystä voi jossain määrin ennakoida. Niiden voi hyvällä syyllä odottaa kehittyvän *inkrementaalisesti* eli pieni askel kerrallaan. Niiden tehokkuutta parannetaan askel askeleelta lähemmäksi fysiikan lakien sallimia rajoja, ja niiden muita ominaisuuksia kehitetään vastaamaan paremmin käyttäjien tarpeita. Samaan aikaan niiden hinta laskee sarjatuotannon ja kilpailun vaikutuksesta. Yksittäiset inkrementaaliset parannukset ovat pieniä, mutta niiden vaikutukset kasautuvat. Askel kerrallaan pääsee kauas. Tässä raportissa esitellyt ennusteet perustuvat nimenomaan olemassa olevien tekniikoiden nähtävissä olevaan inkrementaaliseen kehitykseen.

Radikaalia kehitystä on sen sijaan lähes mahdoton ennustaa. Periaatteessa jokin tekninen läpimurto voisi mullistaa myös energiasektorin. Keksintöjen tie käytössä olevaksi tekniikaksi on kuitenkin pitkä ja kivinen. Moni laboratorio-olosuhteissa toimiva keksintö on osoittautunut epäkäytännölliseksi laboratorion ulkopuolella. Silloinkin kun keksintöä kyetään soveltamaan käytännössä, täysin uuden keksinnön kypsyttely edes ensimmäisiin kaupallisiin sovelluksiin vaatii lähes aina vähintään vuosikymmenen, usein pidempään. Ensimmäisistä kaupallisista sovelluksista siihen, että uuteen keksintöön perustuva tekniikka on merkittävässä roolissa yhteiskunnassa tai esimerkiksi energiajärjestelmässä, voidaan tarvita useita vuosikymmeniä.

Esimerkiksi yhdessä energiasektoria käsitelleessä tutkimuksessa havaittiin, että laboratoriomittakaavassa demonstroidun keksinnön tie ensimmäiseksi kaupalliseksi tuotteeksi on vaatinut 5–37 vuotta, ja laajamittaiseen kaupalliseen käyttöön on tarvittu tämän jälkeen vielä 8–46 vuotta.¹¹⁸ Koko matka laboratoriossa demonstroidusta keksinnöstä laajamittaiseen käyttöön vaatii yhteensä 20–70 vuotta.¹¹⁹

Tämän vuoksi on vastuullista lähteä oletuksesta, että suuria alkuinvestointeja vaativalla energiasektorilla lähitulevaisuudessa käytettävät tekniikat on jo keksitty. Teoriassa mahdolliset läpimurrot, kuten halpa fuusiovoima, huoneen lämpötilassa toimiva suprajohde tai mullistukset energian varastoinnissa on syytä ottaa ylimääräisinä iloisina yllätyksinä.

¹¹⁸ Gross ym. 2018. ¹¹⁹ Eri tutkimuksissa käytetään eri määritelmiä mm. sille, mitä "laajamittainen käyttö" tai ylipäätään "keksintö" tarkoittaa. Mainitussa tutkimuksessa "laajamittainen käyttö" määriteltiin hetkeksi, jolloin tekniikkaan perustuvia tuotteita oli käytössä 20 prosenttia kyseisten tuotteiden historiallisesti suurimmasta lukumäärästä.

5. Uusi energiajärjestelmä on sähköinen, pääosin uusiutuva järjestelmä

"[Kaikki] sähkön edut johtavat samaan kaksihaaraiseen... strategiaan:

Puhdistetaan sähköntuotanto

Sähköistetään kaikki."

– David Roberts, 2016

RIIPPUMATTA SIITÄ, mitä keinoja tulevaisuudessa energian tuotantoon käytetään, tulevaisuuden energiajärjestelmä tulee olemaan ennen kaikkea sähköinen. Käytännössä kaikki, mikä vain voidaan sähköistää, tullaan ennemmin tai myöhemmin sähköistämään. Pääosin uusiutuvalla sähköllä puhdistetaan ensin sähköntuotanto, sitten todennäköisesti lämmitys ja liikenne, ja lopuksi materiaalien tuotanto, joko suoraan tai sähköllä tuotettua vetyä apuna käyttäen.

Syynä on se, että sähkön tuottaminen hiilivapaasti ja kestävästi on niin paljon muita vaihtoehtoja helpompaa ja halvempaa. Esimerkiksi biopolttoaineita ei voi mitenkään riittää kaikkien nykyään käytettyjen fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen, vaikka biopolttoaineet ovatkin osa ratkaisua (katso myös Laatikko 1).

Se, mitä ei voida suoraan sähköistää, voidaan usein sähköistää epäsuorasti esimerkiksi sähköllä tuotetun vedyn avulla. Kun fossiilisten polttoaineiden käytöstä ennen pitkää luovutaan, sähköllä tuotetusta vedystä ja siitä valmistetuista monimutkaisemmista kemikaaleista tulee esimerkiksi kemianteollisuuden keskeisiä raaka-aineita.

Tässä luvussa käydään läpi, miltä siirtymä ja uusi energiajärjestelmä todennäköisesti nykytiedon valossa näyttävät.

5.1 Siirtymä on evolutiivinen

On tärkeä ymmärtää, että koko energiajärjestelmää ei tarvitse muuttaa kerralla, eikä kaikkia ongelmia ole pakko ratkaista etukäteen. Siirtymä etenee evolutiivisesti askel kerrallaan, ja ongelmat ratkaistaan sitä mukaa kun niiden ratkaiseminen kannattaa. Esimerkiksi säätövoimaa ei kannata rakentaa odottamaan vuosia etukäteen. Osa nyt keskusteluissa suurina ongelmina esitetyistä haasteista, kuten suurten energiavarastojen rakentaminen, voivat osoittautua pelättyä paljon vähäisemmiksi kysymyksiksi.

Siksi ei kannata käyttää liikaa aikaa kysymykseen siitä, miten viimeiset tipat fossiilisia polttoaineita korvataan. Siirtymän vaikein ja kallein osuus tulee olemaan viimeiseksi jäävä ehkäpä viiden tai kymmenen prosentin osuus energiankulutusta. Tähän kuuluu luultavasti ainakin pitkän matkan lento- ja laivaliikenne ja osa teollisuuden prosesseja. Vielä ei tiedetä tarkasti, miten vaikeimmin korvattavat fossiilisten polttoaineiden käyttökohteet korvataan, mutta ratkaisulla ei ole niin kiire.

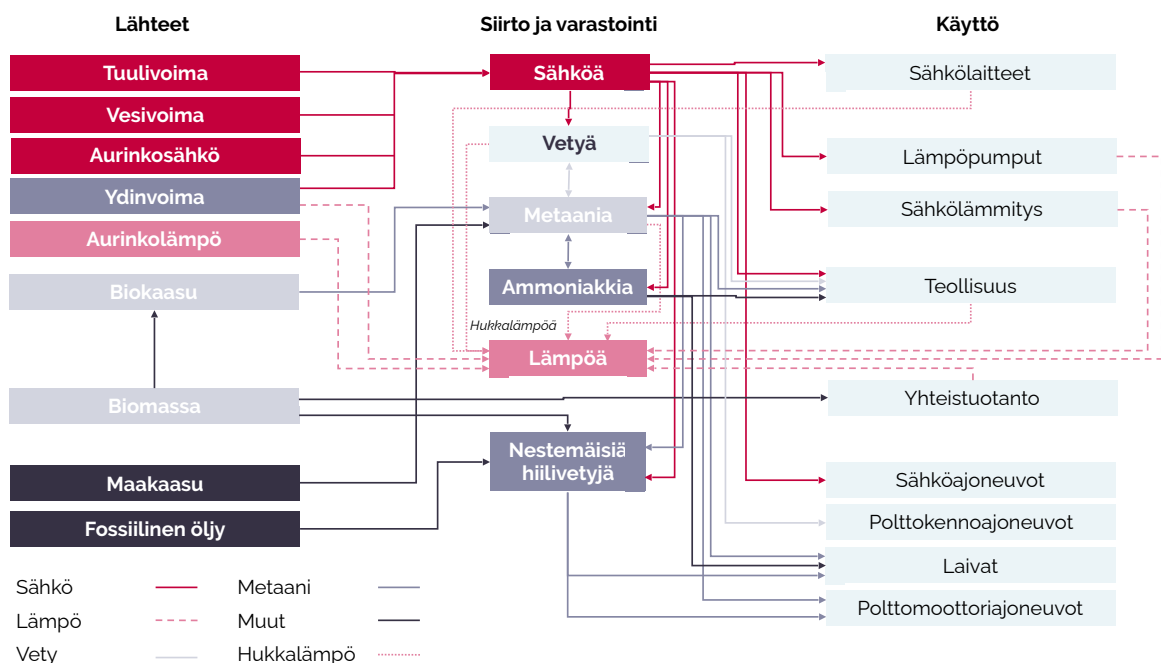
Vaikka siirtymä etenisikin humauksena, muiden, helpompien käyttökohteiden korvaamisessa menee silti vähintään noin 20 vuotta. Jo vuosikymmenen kuluttua olemme

kuitenkin viisaampia, ja tekniikka on kehittynyt. Kahdenkymmenen vuoden kuluttua meillä on todennäköisesti hyvä käsitys siitä, miten viimeiset fossiilipisarat korvataan – tai onko kenties järkevämpää hyväksyä pieni määrä fossiilisten polttoaineiden käyttöä, jos ympäristötavoitteisiin päästään muuten.

5.2 Erillisistä sektoreista ja kansallisista järjestelmistä yhteen eurooppalaiseen energiajärjestelmään

Kaiken sähköistämisen rinnalla toinen siirtymän suurista linjoista on energiajärjestelmän sektoreiden – sähköjärjestelmän, lämpöjärjestelmän, polttoainejärjestelmän – lisääntyvä *sektori-integraatio* yhdeksi energiajärjestelmäksi. Lisääntyvä integraatio niin maiden sisällä kuin maiden välilläkin on avain uusiutuviin nojaavaan energiajärjestelmään (Kuva 17). Laajeneva yhteistyö on myös halvan energian edellytys: omavaraiseen energiantuotantoon pyrkiminenkin tulisi mitä todennäköisimmin ainakin teollisuudelle liian kalliiksi.¹²⁰ Suomi on ollut jo vuosia osa laajempaa eurooppalaista energiajärjestelmää, eikä yksinomaan Suomen energiajärjestelmästä keskustelu olekaan enää kovin mielekäs. Venäjän hyökkäyksestä aiheutunut energiakriisi kuitenkin oli muistutus siitä, ettei energiajärjestelmää tule rakentaa liian riippuvaiseksi mistään yksittäisistä maista.

Kuva 17. Kaaviokuva vähähiilisestä energiajärjestelmästä.



Varastoinnin osuutta on yksinkertaistettu kaavion selvyyden vuoksi.

¹²⁰ Laajemman, jopa Euroopan laajuisen energiaverkon hyödyt ovat niin ilmeisiä, että vakavasti otettavaa tutkimusta omavaraisen energiatuotannon kustannuksista on vaikea löytää. Osviittaa kuitenkin saadaan esimerkiksi energiajärjestelmän ääriaraja-arvoja hakeneista tutkimuksista. Katso esimerkiksi Ruhnau ja Qvist 2022.

Integroidussa, *älykkäässä energijärjestelmässä* tuotannon ja kulutuksen piikkejä tasoitetaan siirtämällä energiaa sektorilta toiselle. Suomessa tärkeimmässä roolissa tulee olemaan sähkö- ja lämpösektorin yhteispeli, siirtoyhteydet Ruotsiin ja sieltä muualle Eurooppaan, ja uusien teollisten prosessien joustavuus. Kun sähköä on paljon ja se on halpaa, sillä voidaan esimerkiksi lämmittää erilaisia lämpövarastoja ja tuottaa suurempia määriä teollisuuden prosessien tarvitsemää vetyä. Kun sähkö on kallista, lämpöä ja vetyä otetaan varastoista. (Varastoja käsitellään tarkemmin alaluvussa 5.10.)

Integroidussa järjestelmässä käytetään järjestelmän eri sektoreiden hyviä puolia ratkaisemaan kunkin yksittäisen osan heikkoudet. Hyvänä esimerkkinä tästä on tuuli- ja aurinkovoiman yhteispeli: lukuun ottamatta lyhyttä keskitalven aikaa, Euroopan sääoloille on tyypillistä, että tuulettomina päivinä paistaa aurinko, ja hämärinä aikoina tuulee. Kun keskisessä Euroopassa paistaa aurinko, sähkö on jo nyt halvempaa Suomessakin.

Suuri osa energiasiirtymään liittyvistä väärinymmärryksistä aiheutuu siitä, että tulevaisuuden integroidun energijärjestelmän osia ei ajatella *uudenlaisen järjestelmän osina*, vaan niitä pidetään vanhan fossiilisen järjestelmän erillisten sektoreiden osien suorina korvikkeina. Jos esimerkiksi irrallista tuulivoimalaa tai tuulipuistoa ajattelee vain yksittäisen fossiilisia polttoaineita polttaneen voimalan suorana korvikkeena, tuulivoima on helppo tyrmätä: tuulivoiman tuotantoa kun ei voi hallita samalla tavalla yksinkertaisesti ja suoraviivaisesti.

Tämä olisi kuitenkin vastaava *kategoriavirhe* kuin tietokoneen näppäimistön vertaaminen mekaaniseen kirjoituskoneeseen. Irrallisena pelkkä näppäimistö on toki kirjoittajalle hyödytön, mutta liitettynä tietokoneeseen, *järjestelmä* voittaa kirjoituskoneen lähes millä tahansa mittarilla. Myös tuulipuisto on osa suurempaa järjestelmää, johon tulee siirtymän edetessä kuulumaan myös esimerkiksi sähkön kulutusta automaattisesti sääteleviä ja energiaa eri muodoissa varastoivia järjestelmiä sekä vaihtoehtoisia tuotantomuotoja.

Vähähiilinen energijärjestelmä tulee olemaan monen pienemmän osajärjestelmän muodostama *järjestelmä*. Sitä ei pidä ajatella vanhan, erillisiin siloihin perustuneen energijärjestelmän ehdoilla. Taulukossa 6 on lueteltu tärkeimmät osajärjestelmät.

*Vähähiilinen energia-
järjestelmä tulee olemaan
monen pienemmän osa-
järjestelmän muodostama
järjestelmä.*

Taulukko 6. Keskeiset osaratkaisut sähkön tuotannon ja kulutuksen yhteensovittamiseksi vähähiilisessä energiajärjestelmässä.

Muokattu lähteestä Breyer ym. 2022.

Osaratkaisu	Selite
Tuuli- ja aurinkovoiman ylläpitäminen	Rakennetaan huippukulutusta enemmän tuotantoa ja tarvittaessa "juoksetetaan" eli jätetään käyttämättä ylimääräinen tuotanto.
Siirtoyhteyksien vahvistaminen	Rakennetaan siirtoyhteyksiä maiden ja alueiden välillä.
Kulutusrakenteen muuttaminen	Siirretään kulutusta vähäisen tuotannon hetkiltä suuremman tuotannon hetkille. Kulutusjoustoa ovat esimerkiksi teollisuuden tarpeen mukaan säätyvät prosessit, sähköautojen älykäs lataus ja sähkön hinnan mukaan säätyvä huoneistojen lämmitys.
Sähköautojen akkujen käyttäminen (V2G)	Latauksessa olevien sähköautojen akuissa olevaa energiaa voidaan siirtää verkkoon.
Tarkoitusta varten rakennetut energiavarastot	Pumppuvoimalat (veden pumppaaminen vesivoimalan patoaltaaseen, kun sähkö on halpaa), vetyvarastot, lämpövarastot, akut ja muut energiavarastot.
Sektori-integraatio	Hyödynnetään tuotannon ja kulutuksen mukaan joustavasti esimerkiksi hukkalämpöjä ja muita virtoja.
Vedyn ja metaanin tuotanto (P2G)	Tuotetaan elektrolyysillä vedestä vetyä ja vedystä edelleen helpommin varastoitavissa olevaa metaania silloin, kun sähkö on halpaa. Käytetään varastoja, kun sähkö on kallista.
Muut varastoitavat polttoaineet	Pääosin perinteiset, Suomessa etenkin puupohjaiset polttoaineet, joita voidaan käyttää esimerkiksi talven kulutushuippujen kattamiseen. Pieniä määriä fossiilisia polttoaineita voidaan todennäköisesti käyttää, jos järjestelmästä saadaan muuten vähähiilinen.

Tuotannon ja kulutuksen vaihteluiden yhteensovittaminen on tätä kirjoittaessa hyvin yleinen tutkimusaihe niin akateemisesti kuin yrityksissä.¹²¹ Energiajärjestelmän toimintaa simuloivista malleista on tullut yksityiskohtaisempia kuin ne olivat vielä vuosikymmen sitten.¹²² Realistisemmat mallit ovat lisänneet luottamusta siihen, että vähähiilinen energiajärjestelmä saadaan toimimaan edullisesti. Näin on silloinkin, kun kylmät ja pimeät talvet pitkin vähätuulisine jaksoineen huomioidaan.¹²³

¹²¹ Breyer ym. 2022. ¹²² Energiajärjestelmämalleista kiinnostuneet voivat nykyisin rakentaa omia järjestelmämalleja avoimeen lähdekoodiin perustuvien mallinnustyökalujen avulla. Yksi johtavista avoimista järjestelmämalleista, PyPSA, tarjoaa jopa nettiselaimessa toimivan, hieman yksinkertaistetun mutta silti monipuolisen Euroopan laajuisen energiajärjestelmämallin osoitteessa <https://model.energy/scenarios/>. ¹²³ Aalto (toim.), 2021.

Kasvava osa tutkimustuloksista esittää, että enimmäkseen tai jopa yksinomaan uusiutuviin nojaava järjestelmä voisi olla kokonaisuutena myös halvin vaihtoehto.¹²⁴ Tätä käsitystä tukee osaltaan myös yksityisten sijoittajien osoittama mielenkiinto nimenomaan uusiutuvaan energiaan.

Lopullinen järjestelmä tulee kuitenkin muodostumaan evolutiivisesti pala kerrallaan, ja esitetyt visiot vastannevat todellisuutta vain osittain. Suunnittelu on kuitenkin hyödyllistä, vaikka yksityiskohtaiset suunnitelmat eivät toteutuisikaan: vain suunnittelu voi paljastaa haasteet ennen kuin niistä tulee ongelmia.

5.3 Fossiilitaloudesta vetytalouteen?

Vety ei ole energialähde, mutta se tulee olemaan erittäin tärkeä raaka-aine. Vedyllä ja sen avulla tehdyillä tuotteilla voidaan todennäköisesti korvata suuri osa niistä fossiilisten polttoaineiden nykyisistä käyttötarpeista, mitä ei voida suoraan sähköistää. Vedyn tuotanto sähköllä vedestä elektrolyysiä käyttäen tulee kasvamaan suureksi teollisuudenalaksi.¹²⁵

Vedyn tuotanto on myös yksi lupaavimmista kulutusjoustojen lähteistä.¹²⁶ Elektrolyysilaitokset pyrkivät käyttämään sähköä eniten silloin, kun se on halpaa, ja vähentämään tai jopa lopettamaan käytön kokonaan, jos hinta nousee liikaa. Koska elektrolyysi vaatii erittäin paljon sähköä, myös joustopotentiaalia on paljon. Potentiaalia rajoittaa kuitenkin toistaiseksi elektrolyysilaitteistojen korkea hinta. Kalliita laitteita kannattaa käyttää mahdollisimman paljon, vaikka sähkö olisikin kallista. Sarjatuotanto laskee kuitenkin myös elektrolyysilaitteistojen hintaa.¹²⁷

Hintasyistä johtuen vetyä tullaan käyttämään sähkön tuotannossa tai liikenteessä polttoaineena vain vähän.¹²⁸ Niin kauan, kun vedylle on parempia käyttötarkoituksia, sitä ei kannata polttaa.

Vetyä, sähköä, ja esimerkiksi biomassan polttamisesta tai muista biotalouden prosesseista vapautuvaa hiilidioksidia käyttäen tullaan tuottamaan muun muassa ammoniakkia ja erilaisia kaasumaisia ja nestemäisiä hiilivetyjä ennen kaikkea teollisuuden tarpeisiin, ja pienemmissä määrin polttoaineiksi. Näillä kaasu- ja nestepolttoaineilla korvataan ennen pitkää fossiiliset polttoaineet niissä käyttökohteissa, joita ei voida syystä tai toisesta sähköistää.

Yksi syy, miksi Suomi houkuttelee tällä hetkellä vetytekniikoihin sijoittavia, on itse asiassa bioperäinen eli *vihreä* hiilidioksidi. Hiilidioksidin kerääminen talteen esimerkiksi sellutehtaiden savupiipuista on paljon helpompaa kuin sen kerääminen vaikkapa ulkoilmasta. Vihreä hiilidioksidi on kilpailuvaltti esimerkiksi nestepolttoaineiden valmistuksessa, koska siitä tuotetut polttoaineet lasketaan yleensä päästöttömiksi.

124 Yhteenveto esimerkiksi lähteessä Breyer ym. 2022. **125** Vaikka energiajärjestelmä haluttaisiin puhdistaa vain osittain, vedyn tuotannosta tulee merkittävää teollisuutta. Esimerkiksi Breyer ym. 2023 laskevat, että energiajärjestelmän täydellinen siivoaminen fossiilisista polttoaineista vuoteen 2050 mennessä saattaisi vaatia ainakin 61 737 terawattitunnin (TWh) verran elektrolyysillä tuotettua "vihreää" vetyä. Verrattuna elektrolyysereiden arvioituun 0,007 terawattitunnin yhteistehoon vuoden 2021 lopussa (IRENA 2022), kasvunäkymät ovat periaatteessa valoisat. Elektrolyysilaitteiden lisäksi tarvittaisiin hieman uutta sähköntuotantoa, yhteensä 88 233 TWh – jonkin verran maailman nykyistä yhteenlaskettua sähköntuotantoa (vuonna 2022 noin 29 185 TWh) enemmän. **126** Katso esimerkiksi Fingrid 2023. **127** Kustannussäästöjen potentiaalista esimerkiksi IRENA 2020. Arvio tulevasta hintakehityksestä löytyy esimerkiksi lähteestä Way ym. 2022. **128** Katso esimerkiksi Baxter 2020; Baldino ym. 2021; Breyer ym. 2023.

5.4 Polttaminen vähenee, mutta ei lopu

Saunan kiukaita ja takkoja energiasiirtymä ei uhkaa, eikä polttaminen todennäköisesti koskaan lopu kokonaan. Suomessa ja muissa maissa, joissa kestävästi korjattavissa olevaa biomassaa on runsaasti saatavilla, bioenergia etenkin erilaisten jätevirtojen muodossa tulee olemaan osa energiantuotantoa vielä kauan.

Myös pieniä määriä fossiilisia polttoaineita tullaan luultavasti käyttämään kauan muun energiantuotannon täydentäjänä ja käyttötarkoituksiin, joita on kaikkein vaikein korvata millään muulla. Jos käyttömäärät saadaan tarpeeksi pieniksi, ilmastotavoitteisiin voidaan silti päästä esimerkiksi lisäämällä hiilinieluja.

Polttamisesta tulee kuitenkin muuta energiantuotantoa täydentävä, lähinnä lämmityksen, lentokoneiden ja laivojen tarvitsema poikkeus. Polttamista saatetaan rajoittaa myös terveys- syistä, sillä esimerkiksi puun poltto voi heikentää kaupunkialueiden ilmanlaatua merkittävästi.

5.5 Pohjoismaat ovat siirtymässä erinomaisessa asemassa

Jouston ja muiden ratkaisujen ansiosta tuuli- ja aurinkosähkön tuotannon vaihtelevuus kyetään todennäköisesti ratkaisemaan Pohjoismaissa edullisin keinoin ainakin tämän vuosikymmenen loppupuolelle saakka.¹²⁹

Pohjoismaiden etuna on pääosin hyvä sähkönsiirtoverkko, tasaisesti perusvoimaa tuottava ydinvoimakapasiteetti, ja vesivoiman kyky tuottaa sähköä silloin, kun sitä tarvitaan. Etenkin Ruotsin ja Norjan vuoristojen jyrkkiin laaksoihin rakennetut vesivoimalat ovat mainioita säätövoiman lähteitä ja energiavarastoja: yksinomaan Norjan altaisiin voidaan varastoida Suomen vuotuista sähkönkulutusta enemmän sähköä.¹³⁰

Toinen todennäköisesti merkittävä ratkaisu tuotannon ja kulutuksen tasaamiseksi on energian varastointi lämpönä. Pohjoismaissa lämmön varastointi on jo nyt kannattavaa liiketoimintaa. Uusia lämpövarastoja ja halvasta sähköstä lämpöä tekeviä halpoja sähkökattiloita rakennetaankin nyt nopeasti.

5.6 Sähkökatkojen riski vähenee, vaikka vaihteleva tuotanto lisääntyy

Suomessa sähkön toimitusvarmuus pysyy erittäin hyvällä tasolla ja jopa kasvaa Energia- viraston viimeisimmän selvityksen mukaan ainakin vuoteen 2027 saakka.¹³¹ Toisin sanotuna, sähkökatkojen vaara *vähenee*, vaikka vaihtelevan tuotannon ennustetaankin lisääntyvän edelleen. Tulos on merkillepantava myös siksi, että sähkön toimitusvarmuudelta vaadittavaa tasoa kiristettiin Suomessa vuonna 2022 maailmanlaajuisestikin katsottuna tiukaksi.¹³²

129 Suomen näkökulmasta katso AFRY 2023. **130** Patoaltaan kyky varastoida energiaa riippuu siitä, paljonko patoaltaaseen mahtuu vettä, ja vesivoimalan käytettävyyys säätövoimana siitä, kuinka suuret vedenpinnan vaihtelut altaassa ja padon ylä- ja alapuolisessa vesistössä sallitaan. Jyrkkärinteiset vuoristolaaksot ja -joet sallivat yleensä suuremmat vaihtelut, koska piripintaankaan täytetty allas ei jätä veden valtaan paljon tyhjää allasta suurempaa maapinta-alaa. Suomen vesivoimaloiden kyky varastoida energiaa on pienempi maaston tasaisuuden vuoksi: sama määrä vettä peittäisi suurempia maa-alueita. **131** AFRY 2023. **132** Energiavirasto 2022.

Toimitusvarmuuden mittarina käytetty niin sanottu tehovajeen odotusarvo LOLE (Loss Of Load Expected) saa Suomessa olla nykyisin vain 2,1 tuntia vuodessa, kun esimerkiksi Saksassa se voi olla jopa yli viisi tuntia.¹³³ Euroopan sähköverkko-operaattoreiden tekemä ennuste toimitusvarmuuden kehittymisestä on samansuuntainen Energiaviraston laskelmien kanssa.¹³⁴

Yksi syy hyvään toimitusvarmuuteen on se, että Suomessa on varauduttu Olkiluoto 3:n häiriöihin jo vuosia ennen kuin reaktori lopulta saatiin käyttöön. Kun sähköverkko selviää valtavan 1 600 megawatin voimalaitoksen äkillisestä häiriöstä, vähäisemmistä häiriöistä selviäminen ei tuota suuriakaan ongelmia.

Varautuminen on ollut melko edullista. Suomessa rahat verkon vakauden varmistamiseksi tarvittaviin investointeihin on kerätty sähkönkäyttäjiltä kerättävällä kantaverkkomaksulla.¹³⁵ Vaikka verkkoinvestointeja tarvitaan 2020-luvulla tavallista enemmän, painetta kantaverkkomaksun korottamiseksi ei kantaverkkoyhtiö Fingridin arvion mukaan ole.¹³⁶ Vuonna 2023 kantaverkkomaksu jätettiin jopa kokonaan perimättä puolen vuoden ajalta, koska Fingrid sai talven 2022–2023 energiakriisin aikana poikkeuksellisen suuria tuloja sähkönsiirrosta.

5.7 Säättövoima saadaan toistaiseksi ennen kaikkea joustosta ja olemassa olevista voimaloista

Sähkön kulutuksen sekä tuuli- ja aurinkovoiman tuotannon kasvu samaan aikaan vanhojen voimaloiden käytöstä poistumisen kanssa aiheuttavat tarpeen ylläpitää myös joustavaa sähköntuotantokapasiteettia. Esimerkiksi Energiaviraston selvityksessä arvioidaan, että vuoteen 2024 mennessä joustavaa kapasiteettia (tuotantoa ja joustoa yhteensä) on lisättävä noin 200–400 megawattia (MW).¹³⁷ Tämä vastaa noin yhden keskikokoisen maakaasuvoimalan tai suurehkon puuta polttavan voimalan tehoa.

Kulutusjoustot ovat selvästi halvin joustavan kapasiteetin lähde, mutta joustavuutta on toistaiseksi varsin vähän. Seuraavaksi edullisin tapa kattaa lähivuosien tarve on vanhojen polttovoimalaitosten käyttöä jatkaminen.¹³⁸ Etenkin kaukolämmön yhteistuotantovoimalat ovat näillä näkymin välttämättömiä talven kylmien kausien sähkön ja lämmön tuottamiseksi ainakin 2020-luvun ajan. Energiatehokkuuden kasvu, lämpö- ja muiden energiavarojen yleistyminen ja vahvistuvat siirtoyhteydet tekevät polttovoimaloista kuitenkin vuosi vuodelta vähemmän kriittisiä.

Paljon puhuttu säättövoiman tarve voidaan tämänhetkisen tiedon valossa kattaa enimmäkseen tai jopa kokonaan kulutusjoustolla, Ruotsista uuden Aurora Line -siirto-
linjan kautta saatavalla sähköllä, lämpövarastoilla ja olemassa olevilla voimaloilla. Uusia voimaloita tarvitaan Suomessa säättövoimaksi kantaverkkoyhtiö Fingridin ja Energiaviraston arvioiden mukaan aikaisintaan 2020-luvun lopulla.¹³⁹ Tekniikan kehityksestä ja tuuli- ja aurinkovoiman rakentamisnopeudesta riippuen uutta tuotantotehoa saatetaan silloin tarvita varovaisesti arvioituna 100–300 megawatin (MW) verran. On kuitenkin aivan mahdollista, että ongelma ratkaistaan jopa kokonaan muilla keinoin, etenkin jos energian varastointitekniikoiden hinta laskee.

¹³³ Aurora 2021. ¹³⁴ ENTSO-E 2022. ¹³⁵ Lassila 2023. ¹³⁶ Lassila 2023. ¹³⁷ Energiavirasto 2022.

¹³⁸ Energiavirasto 2022. ¹³⁹ AFRY 2023.

5.8 Energian varastointia tarvitaan yllättävän vähän

Energian varastointia pidetään usein energiasiirtymän akilleenkantapäänä, sillä sähköä ei voi varastoida sellaisenaan tarvetta odottelemaan samaan tapaan kuin esimerkiksi fossiilisia polttoaineita. Esimerkiksi Suomen sähköjärjestelmä on kuitenkin jo lähes täysin hiiletön, ja se toimii mainiosti jo nyt. Järjestelmä jopa selvisi talvesta 2022–2023 ilman sähkökatkoja, vaikka Venäjän tuonti oli vastannut aiemmin noin kymmenesosaa sähkönkulutuksesta. Nykyään isoja ongelmia aiheuttavat lähinnä ydinvoimaloiden käyttökatkot, vaikka ainoat merkittävät energiavarastot ovat puu, jäte, ja vesivoimaloiden patoaltaat. Vähähiilinen järjestelmä on siis mahdollista toteuttaa jopa ilman uusia energiavarastoja.¹⁴⁰

Uusista energiavarastoista tulee kuitenkin vuosi vuodelta houkuttelevampia sijoituskohteita, kun sähkön hinnan vaihtelut todennäköisesti lisääntyvät ja energiavarastojen hinta laskee.

Silti uusimman tutkimuksen perusteella varastojen tarve näyttää jäävän verraten pieneksi. Esimerkiksi varastointitarpeen ylärajaa arvioineessa tutkimuksessa todettiin, että vaikka Saksa katkaisisi sähkön viennin ja tuonin kokonaan eikä käyttäisi biomassaa polttavia voimaloita varavoiman lähteenä, täysin uusiutuviin perustuva energiajärjestelmä selviäisi vaikeimmistakin sääoloista noin 24 päivän kulutusta vastaavilla varastoilla.¹⁴¹

Realistisemmissä skenaarioissa varastojen tarve jää paljon pienemmäksi. Iso-Britannian energiajärjestelmän tulevaisuutta selvittänyt laaja katsaus totesi varastoja tarvittavan todennäköisesti noin 15 tunnin kulutuksen kattamiseksi.¹⁴² Yhdysvalloissa kuuden ja puolen tunnin varastointikapasiteetti riittäisi 94-prosenttisesti uusiutuviin perustuvan sähköjärjestelmän tarpeisiin.¹⁴³ Jos maan kantaverkon vahvistamiselle ei olisi esteitä, vahvasti aurinkovoimaan perustuva järjestelmä voisi toimia jopa täysin ilman varastoja.¹⁴⁴

Vaikka Suomi on kylmä ja talvisin pimeä maa, mallinnusten mukaan varastojen tarve jäänee meilläkin kohtuulliseksi. Eräissä tutkimuksissa arvioitiin energiavarastojen tarvetta Suomessa olettaen, että sähkö tuotetaan kokonaan vähähiilisesti ja puupolttoaineiden käyttö energian tuotantoon lopetetaan lähes kokonaan.¹⁴⁵ Mallissa sallittiin ainoastaan selluteollisuuden jätteenä syntyvän mustalipeän polttaminen metsäteollisuuden oman energiankulutuksen tarpeisiin, eikä selluteollisuuden laajentamista sallittu. Tutkimuksessa ei myöskään huomioitu kulutusjouston mahdollisuutta mitenkään.

Näistä ankarista rajoitteista huolimatta Suomen sähkösaannin varmistamiseksi ei välttämättä olisi tarvittu lainkaan varastoja. Jopa skenaariossa, jossa Suomi luopui ydinvoimasta kokonaan, varastoja tarvittiin vain 13 tunnin sähkönkulutusta vastaava määrä. Toisessa tutkimuksessa esitetyn optimistisen arvion perusteella voidaan laskea, että se voitaisiin teoriassa kattaa miltei kokonaan käyttämällä sähköautojen akkuja kaksisuuntaisina energiavarastoina (niin sanottu V2G).¹⁴⁶

Tutkimuksista voidaan vetää muutamia yleisiä johtopäätöksiä. Energiavarastojen tarpeeseen vaikuttaa merkittävästi 1) tuuli- ja aurinkovoiman osuus tuotannosta, 2) siirtoverkkojen jyrkkyys, 3) kulutuksen joustavuus ja 4) miten harvinaisiin sääilmiöihin halutaan varautua.

Varastojen tarve on selvästi suurin skenaarioissa, jotka nojaavat yksinomaan uusiutuvaan energiaan. Varastoinnin tarve voi vähentyä jopa merkittävästi, jos edes pieni osa energiasta tuotetaan muilla keinoin. Tästä syystä esimerkiksi Iso-Britanniaa käsitelleessä

140 Kiitos tästä erinomaisesta huomiosta kuuluu Jani-Petri Martikaiselle. **141** Ruhnau ja Qvist 2022.

142 Climate Change Committee 2023. **143** Jorgenson ym. 2022. **144** Tong ym. 2021. **145** Koivunen ym. 2022.

146 Child ja Breyer 2016.

selvityksessä hyväksyttiin, että maakaasulla tuotetaan jatkossakin noin kaksi prosenttia vuosittain tarvittavasta sähköstä.¹⁴⁷ Päästötavoitteet voidaan todennäköisesti saavuttaa tästäkin huolimatta. Suomessa kannattanee maakaasun sijaan käyttää ennen kaikkea jätettä ja puupolttoaineita.

Jos uusiutuvien tukena on jonkin verran ydinvoimaa, varastojen tarve voi olla radikaalisti pienempi. Jopa täysin uusiutuvaan energiaan perustuva energijärjestelmä on kuitenkin mahdollinen. Näin on varsinkin silloin, jos siirtoyhteydet maiden ja alueiden välillä ovat vahvat, ja kulutus joustaa. Etenkin siirtoyhteyksien vahvistaminen on usein oleellisesti varastointia halvempaa

Siirtoyhteyksien jatkuva vahvistuminen huomioidaan uudemmissa tutkimuksissa hyvin.¹⁴⁸ Kulutusjoustojen vaikutuksia on arvioitu kuitenkin vasta harvoin. Syynä on ollut etenkin se, että toistaiseksi kulutusjouston potentiaali on arvioitu varsin vähäiseksi.¹⁴⁹ Vuosi 2022 kuitenkin osoitti, että kotitalouksienkin jousto voi olla merkittävää, ja kulutusjouston uskotaan lisääntyvän selvästi uusien teollisuusinvestointien myötä.¹⁵⁰

Esimerkiksi paljon sähköä kuluttavat vetyelektrolyysilaitokset ja datakeskukset pyritään jo nyt suunnittelemaan niin, että ne voivat vähentää sähkönkulutustaan sähkön ollessa kallista, ja kasvattaa tuotantoaan, kun sähkö on halpaa.

Sähkön varastoinnin tarve riippuu vahvasti myös siitä, miten harvinaisiin tilanteisiin haluamme varautua. Täydellinen varautuminen sähkökatkoilta tulisi äärettömän kalliiksi, joten niiden riskiä kannattaa jossain määrin sietää.

5.9 Entäpä ydinvoima?

Ydinvoima olisi periaatteessa erinomainen tapa tuottaa suuria määriä vähähiilistä energiaa. Sillä voitaisiin tuottaa sähkön ohella myös kaukolämpöä tai jopa korkeita lämpötiloja esimerkiksi vedyn tuottamiseksi ja teollisten prosessien käyttöön. Ydinvoiman turvallisuus ja jätteen loppusijoitus ovat myös asiallisesti ottaen ratkaistuja ongelmia.¹⁵¹

Miksi ydinvoiman rakentaminen silti takkuu?

5.9.1 Ydinvoimasta olisi hyötyä, mutta ei välttämättä omistajalleen

Energiajärjestelmien tutkimuksessa toistuva tulos on, että järjestelmä, jossa on sekä uusiutuvaa tuotantoa että ydinvoimaa, on todennäköisesti kokonaisuutena halvempi kuin järjestelmä, jossa on vain jompaa kumpaa.¹⁵² Esimerkiksi tuoreessa Suomea koskeneessa tutkimuksessa laskennallisesti pienimmät kokonaiskustannukset saavutettiin yhdistelmällä, jossa ydinvoimalla tuotettiin noin 38 prosenttia käytetystä sähköstä, lopun ollessa uusiutuvaa tuotantoa.¹⁵³ Nämäkin laskelmat ovat toki herkkiä niissä käytetyille oletuksille esimerkiksi vaihtoehtojen määrästä ja hinnoista.

Ydinvoima lähtökohtaisesti vähentää tarvetta sekä uusiutuvan tuotannon kulutusta suuremmalle ylirakentamiselle että energian varastoinnille.¹⁵⁴ Etenkin tuulivoima-

¹⁴⁷ Climate Change Committee 2023. ¹⁴⁸ Esimerkkeinä vaikkapa tässä luvussa mainitut tutkimukset.

¹⁴⁹ Esimerkiksi Koivunen ym. (2022) käyttivät tätä perustelua. ¹⁵⁰ Näin uskotaan esimerkiksi Fingridin tuoreimmassa tulevaisuustarkastelussa (Fingrid 2023). ¹⁵¹ Ydinvoiman ominaisuuksia käydään tarkemmin läpi esimerkiksi lähteessä Partanen ja Korhonen 2016. ¹⁵² Esimerkiksi Sepulveda ym. 2018; Zappa ym. 2019; Koivunen ym. 2022. ¹⁵³ Koivunen ym. 2022. ¹⁵⁴ Sepulveda ym. 2018; Zappa ym. 2019; Koivunen ym. 2022.

rakentamisen tarpeen väheneminen vähentää myös ympäristölle aiheutunutta haittaa. Vanhojen ydinvoimaloiden käyttö ja käyttöiän jatkaminen toisin sanoen kannattaa. Uudet ydinvoimalat voisivat tehdä energijärjestelmästä kokonaisuutena halvemmän ja ympäristöystävällisemmän, jos niitä kyetään rakentamaan kilpailukykyiseen hintaan. Jos energijärjestelmää rakennettaisiin kokonaisuutta ajatellen, ydinvoimaa olisi helpompi perustella.

Näistä ydinvoiman järjestelmälle kokonaisuutena tuottamista hyödyistä ei kuitenkaan makseta juuri mitään. Energijärjestelmää rakentavat lähes yksinomaan voittoa tavoittelevat, joskin monesti osin julkisesti omistetut yritykset, jotka ensi sijassa *osaoptimoivat* omaa tulostaan.

Käytännössä monet voimalahankkeet ovat osoittautuneet kalliiksi ja riskialttiiksi investoinneiksi omistajilleen. Ydinvoimahankkeiden taipumus viivästyä suunnitellusta aikataulusta on pahentanut ongelmaa merkittävästi. Ydinvoimala on valtava, pääoma-intensiivinen investointi, joka alkaa tuottaa omistajalleen tuloja vasta valmistuttuaan.

Pieninä sarjoina tai jopa yksittäiskappaleina rakennetut ydinvoimalat eivät myöskään ole päässeet kunnolla osalliseksi sarjatuotannon kustannuseduista. Tavallisesti uusien voimaloiden hinta laskee sitä mukaa kun niitä rakennetaan enemmän, mutta ydinvoiman hinnalla on ollut taipumus nousta ajan myötä.¹⁵⁵

Tilanne voisi muuttua, jos riittävän suuri määrä suhteellisen samankaltaisia ydinvoimaloita rakennettaisiin sarjatuotantona. Esimerkiksi Ranskan ja Etelä-Korean pitkälti valtiovetoiset ydinvoimahankkeet ovat tässä myös onnistuneet.¹⁵⁶

5.9.2 Kuka ottaisi riskin ydinvoiman sarjatuotannon käynnistämiseksi?

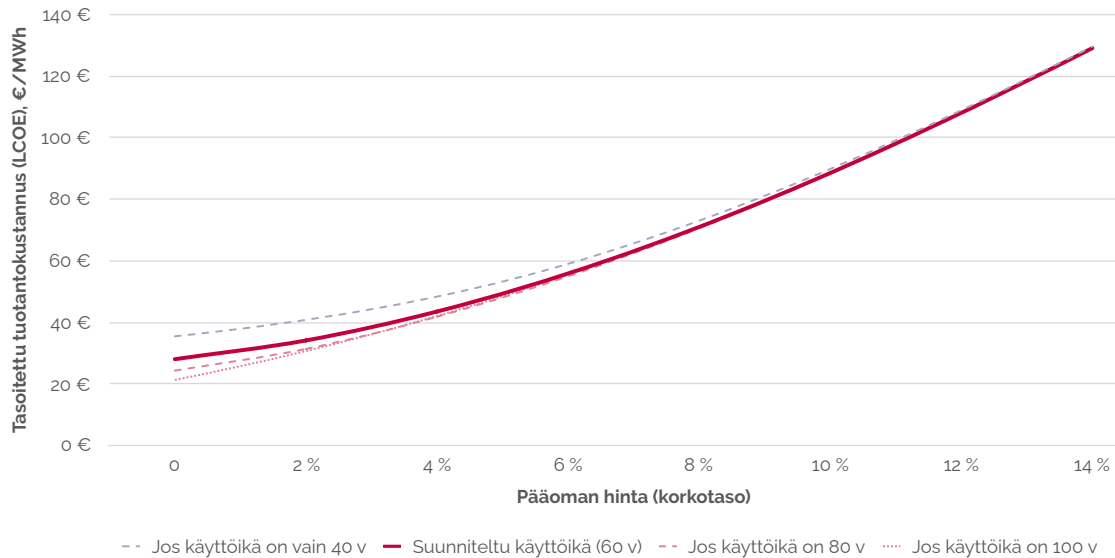
Etenkin prototyyppiydinreaktoreiden rakentamisen kannattavuus on kuitenkin hyvin epävarmaa, ja esimerkkejä epäonnistumisista riittää. Ydinvoimarakentamisen alkuaikojen kustannusylitykset ovat surullisen kuuluisia, ja ne toistuivat esimerkiksi Olkiluoto 3-hankkeessa. Ranskalaisen Arevan rakentama EPR-reaktorin prototyyppi valmistui yli 13 vuotta myöhässä ja maksoi noin kaksi kertaa arvioitua enemmän.¹⁵⁷

Vaikka aikataulut ja kustannusarviot pitäisivätkin kutinsa, energijärjestelmän nopea muutos tekee sijoituksesta silti epävarman. Lupaprosessin aloittamisesta uuden ydinreaktorin käyttöönottoon kuluu optimistisessäkin tapauksessa 8–9 vuotta. Todellisuudessa kukaan ei tiedä tarkasti, mitä sähkö maksaa 2030-luvulla, saati sijoituksen takaisinmaksuun vaadittujen vuosien tai vuosikymmenien aikana.

Sähkön hinnan lisäksi muita epävarmoja muuttujia ovat esimerkiksi korkotaso ja poliittiset riskit. Sijoittajat tietävät hyvin, että yksikin suuri ydinvoimaonnettomuus voi sulkea ydinvoimaloita jopa maailman toisella puolella. Korkotasolla on taas erittäin suuri merkitys nimenomaan ydinvoiman kannattavuuteen (Kuva 18, katso myös alaluku 4.4.2 ja Kuva 16).

¹⁵⁵ Lovering ym. 2016. Yksityiskohtainen selvitys ydinvoiman kustannusylitysten syistä ja niiden korjaamisesta löytyy lähteestä OECD NEA 2020. ¹⁵⁶ Lovering ym. 2016; OECD NEA 2020. ¹⁵⁷ Laitinen ja Niemi 2022.

Kuva 18. Korkotason (pääoman hinnan) ja käyttöiän vaikutus ydinsähkön laskennallisiin tuotantokustannuksiin. Käyttöiän merkitys on yllättävänkin pieni.



Kaikki sijoitukset ovat tietenkin epävarmoja. Ydinvoimala on kuitenkin valtava sijoitus. Esimerkiksi Puolan vuonna 2021 järjestämän kilpailutuksen voitti kuusi voimalaa yhteensä 31,3 miljardin dollarin (vuoden 2022 euroissa noin 28,3 miljardia) hintaan luvannut yhdysvaltalainen Westinghouse.¹⁵⁸ Yhden voimalan hinnaksi tulisi siis noin 4,7 miljardia euroa – jos kuusi voimalaa rakennetaan ja kustannusarviossa pysytään.

Ei olekaan ihme, että ydinvoimalan rakentamiseen tarvittavia eduskunnan periaatepäätöksiä ei jonoteta. Yksityisten sijoittajien kiinnostuksen herättämiseksi tarvittaisiin todennäköisesti veronmaksajan väliintuloa, tavalla tai toisella.

Tällä hetkellä valtio ja kunnat ovat vähintään epäsuorasti merkittäviä omistajia kaikissa Suomen ydinvoimaloissa. Valtio omistaa esimerkiksi enemmistön Loviisan ydinvoimalan omistavasta Fortumista, ja voisi periaatteessa vaikuttaa siihen, että yhtiö rakentaisi lisää ydinvoimaa. Lievempiä väliintulon tapoja olisivat esimerkiksi veronmaksajan lupaama takuu ydinsähköstä maksetulle hinnalle tai muu suora tuki, tai lainatakaus. Jos valtio takaa voimalan rakentamiseksi otetun lainan, ydinvoiman hintaan ratkaisevasti vaikuttavat rahoituskustannukset jäävät pienemmiksi. Jos aikataulu ja budjetti pitävät, lainatakaus ei välttämättä maksaisi veronmaksajalle kovin paljon. Toisaalta, jos projekti ajautuu vaikeuksiin, lasku voi olla suuri.

Ei ole selvää, miten suuria tukia ydinvoimahankkeiden houkuttelemiseksi vaaditaan. Syksyllä 2022 Ruotsin uusi hallitus päätti edistää ydinvoiman rakentamista tarjoamalla yhteensä 400 miljardin Ruotsin kruunun (n. 33,6 miljardia euroa) lainatakaukset ydinvoimaan sijoittaville.¹⁵⁹ Päätöksiä uusista hankkeista ei kuitenkaan ainakaan toistaiseksi ole. Elokuussa 2023 Ruotsin ilmasto- ja ympäristöministeri lupasi hallituksen huolehtivan

¹⁵⁸ Lassila 2023: Ydinvoimaloita tehdään Eurooppaan nyt "melkein sarjatuotantona". ¹⁵⁹ WNN 2022.

kymmentä perinteistä reaktoria vastaavan ydinvoimatuotannon lisärakentamisesta. Tieto kuitenkin poistettiin vaivihkaa hallituksen nettisivuilta.¹⁶⁰

On myös syytä huomata, että yhteisellä sähkömarkkina-alueella voimaloiden rakentaminen yhdessä maassa vaikuttaa voimalahankkeiden kannattavuuteen toisissa maissa. Vaikutukset vahvistuvat siirtoyhteyksien vahvistuessa. Jos Ruotsissa todella rakennetaan useita uusia reaktoreita, uusia ydinvoimahankkeita voi olla vaikea saada kannattaviksi Suomessa.

5.9.3 Muuttavatko pienet modulaariset reaktorit pelin?

Nykyisin rakennettavat ydinvoimalat ovat sekä kustannuksiltaan että sähköntuotantoteholtaan niin valtavia, että menestyneimpienkin reaktorimallien sarjakoot jäävät sormilla laskettaviin lukemiin. Sarjatuotannon etujen avaamiseksi on vuosien ajan ehdotettu suurten reaktoreiden korvaamista useilla pienemmillä. Jos reaktoreista tehdään tarpeeksi pieniä, ne voitaisiin rakentaa valmiiksi tehtaassa ja kuljettaa käyttöpaikalle. Tehtaassa valmistusta ja kokoonpanoa on paljon helpompi tehostaa, ja laadunvalvonta yksinkertaistuu.

Pieninä modulaarisina reaktoreina tai englanninkielisellä lyhenteellä SMR (Small Modular Reactor) tunnetut voimalat voisivat teoriassa olla uuden energijärjestelmän tärkeä osanen. Vuoden 2023 alussa maailmassa oli käytössä kaksi määritelmään sopivaa reaktoria, yksi Venäjällä ja yksi Kiinassa. Yli kahdeksaakymmentä eri reaktorimallia kehitetään yhteensä 19 maassa, Suomi mukaan lukien.¹⁶¹ Jotkin näistä saattavat olla laajemmassa käytössä jo 2030-luvulla.

Epävarmuudet ovat silti suuria. Kustannusarviot ovat ryömineet ylöspäin takavuosien optimistisista ennusteista, ja yhden tuoreen tutkimuksen mukaan edullisinkin tutkituista 19 SMR-mallista saattaisi hävitä 2030-luvun hintakilpailun jopa tuuli- ja aurinkovoiman ja akkujen yhdistelmälle.¹⁶² Optimistisemmissä arvioissa sarjatuotetut reaktorit voisivat tuottaa 2030-luvulla sähköä noin 30–45 €/MWh hintaan.¹⁶³ Jos uusiutuvan tuotannon ja energiavarojen hinta laskee vain hitaasti tai niiden rakentaminen törmää johonkin esteeseen, hinta voisi olla hyvinkin kilpailukykyinen.

SMR-voimaloiden hinta riippuu kuitenkin vahvasti siitä, kyetäänkö niitä valmistamaan tarpeeksi suurina sarjoina ja laskeeko sarjatuotanto hintaa niin paljon ja niin nopeasti, että reaktorit eivät jää halpenevien uusiutuvien jalkoihin. Jos valmistuskustannukset eivät putoa nopeasti, yhtälö voi olla hyvin vaikea.

Sarjatuotannon aloittaminen vaatii riittävää määrää tilauksia. Arviot tehdasinvestointien kuolettamiseksi tarvittavasta sarjakoosta vaihtelevat. Yleiset arviot puhuvat muutamasta kymmenestä, kenties 40–70 reaktorista, mutta yhden arvion mukaan investoinnit kannattaisivat vasta, jos reaktoreita rakennetaan peräti 3 000.¹⁶⁴ Suuret erot arvioiden välillä kertovat osaltaan hankkeiden epävarmuudesta.

Pienten modulaaristen reaktoreiden muna-kana-ongelma ei loppujen lopuksi eroa kovinkaan paljon suurten reaktoreiden ongelmista. Kummatkin voisivat olla kilpailukykyisiä, jos niitä rakennettaisiin tarpeeksi paljon. Mutta tilauskirjat jäävät liian tyhjiksi, kunnes voimalat ovat kustannuksiltaan kilpailukykyisiä. Kehitteillä olevien projektien

¹⁶⁰ Pelli 2023. ¹⁶¹ Perera 2023. ¹⁶² Steigerwald ym. 2023. ¹⁶³ Esimerkiksi Fingrid arvioi SMR-voimaloiden tasoitetuksi tuotantokustannukseksi (LCOE) Suomessa vuonna 2035 31–43,9 €/MWh (Fingrid 2023).

¹⁶⁴ Matala arvio esitetty esimerkiksi lähteessä Harrabin 2016. Korkea arvio lähteessä BASE 2021.

runsaus pahentaa ongelmaa, eikä poliittista tahtoa yhteisen reaktorimallin standardoimiseksi näytä toistaiseksi löytyvän.

Prototyypit ja sarjatuotannon aloittamisen maksavien tilaajien löytämistä vaikeuttaa myös se, että pienten reaktoreiden käyttö- ja huoltokustannukset ovat tuotetun energian määrään suhteutettuna suurempia kuin suurten reaktoreiden. Koska suurista reaktoreista on helpompi saada kannattavia, ydinreaktoreiden koko kasvoi 1960-luvulla rakennetuista, monia nykyisiä SMR-suunnitelmia pienemmistä reaktoreista nykyisiin valtaviin jättiläisiin.

Pienille reaktoreille voi silti löytyä hyvin hyödyllisiä erikoistarkoituksia. Yksi näistä voisi olla suurten kaupunkien tarvitseman kaukolämmön tuottaminen. Suomessa etsitään parhaillaan rahoittajia tutkimuslaitos VTT:n tarkoitusta varten kehittämän LDR-50-reaktorin rakentamiseksi. Jos tilaaja löytyy, prototyyppi voisi lämmittää esimerkiksi Helsinkiä aikaisintaan vuonna 2030. Se edellyttää kuitenkin muun ohessa sitä, että Säteilyturvakeskuksen kaavailemat päivitykset ydinreaktoreiden turvallisuusmääräyksiin toteutuvat.

Koska yksi Suomen energiasiirtymän suurimmista haasteista on kaukolämmön tuotanto hiilettömästi (katso luku 3.3), ydinlämmön mahdollisuuksia tulee selvittää vakavasti, tarvittaessa jopa prototyyppihanketta suoraan tukemalla. Ydinlämmön merkitys riippuu etenkin siitä, voidaanko puupolttoaineita hankkia kestävästi ja saadaanko vetyelektrolyysin hukkalämmöstä kaukolämmön lähde.

6. Miten siirtymän oikeudenmukaisuus varmistetaan?

ENERGIASIIRTYMÄN VAIKUTUKSET ovat pitkällä tähtäimellä ylivoimaisesti positiivisia. Riippuvuus fossiilisista polttoaineista aiheuttaa suurten ympäristövahinkojen ja terveyshaittojen lisäksi riippuvuuden fossiilisia polttoaineita tuottavista, usein demokratiaan ja arvoihimme vihamielisesti suhtautuvista valtioista. Tämän riippuvuuden vähentäminen lisää itsenäisyyttämme ja heikentää maailman autokraatteja.

Siirtymän hyödyt ja haitat eivät kuitenkaan jakaudu tasaisesti. Reilun siirtymän varmistamiseksi ja siirtymän vauhdittamiseksi tarvitaan aktiivista politiikkaa, jolla hyötyjä ja haittoja tasataan. Tämän raportin fokus ei ole siirtymän oikeudenmukaisuusvaikutuksissa, mutta asian tärkeyden vuoksi lyhyt esimerkinomainen käsittely on paikallaan.

Siirtymän haitat osuvat ennen kaikkea niihin, joiden elinkeino tai elämäntapa on vahvasti sidoksissa fossiilisten polttoaineiden käyttöön. Suomessa fossiilisten polttoaineiden asema energiantuotannossa on onneksi liikennettä lukuun ottamatta hyvin vähäinen. Yksi elinkeino, jonka voi ennustaa katoavan miltei kokonaan siirtymän vuoksi, on turpeen energiakäyttö. Päästöoikeuksien hinta on tehnyt siitä kannattamatonta jo pitkään, ja Ukrainan sodan vaikutusten on arvioitu jarruttavan turpeen energiakäytön katoamista vain vähän.¹⁶⁵

Siirtymä kasvattaa painetta hyödyntää Suomen luonnonvaroja yhä voimaperäisemmin. Esimerkiksi tuulivoiman liki rakettimainen nousu johtuu suurelta osin siitä, että Suomi on lähes Saksan kokoinen mutta paljon harvempaan asuttu maa, jossa tuulivoimaa on ollut silti vain murto-osa Saksaan jo rakennetusta. Tuulivoimarakentamisen hyväksyttävyyden on tärkeä varmistaa, ja voimaloiden tulee aidosti hyödyttää niitä ihmisiä, joiden elämään ne vaikuttavat.

Siirtymän edetessä ja Euroopan unionin pyrkiessä vähentämään riippuvuuttaan ulkomaisista kriittisten materiaalien toimittajista, paine avata Suomen maaperää kaivostoiminnalle kasvaa entisestään. Etenkin EU:n kriittisten raaka-aineiden lainsäädäntökokonaisuuksien CRMA (European Critical Raw Materials Act) tulee todennäköisesti helpottamaan kaivosten perustamista.¹⁶⁶ Suomen kaivoslainsäädäntö on kuitenkin jo nyt hyvin salliva, ja kaivosten valvonta vähintäänkin herättää kysymyksiä.¹⁶⁷

165 Korhonen 2023b. **166** Blenkinsop 2023. **167** Kaivosten valvonnasta kysymyksiä herättäviä, vain vuonna 2023 julkaistuja uutisia ovat esimerkiksi toistuvat ympäristölupamääräysten rikkomukset Raahen Laivakankaan kaivoksella (Holopainen 2023), Sakatin kaivoshankkeen kemikaalilaskelmissa ilmennyt 2–10-kertainen virhe (Lavia 2023), ja Kevitsan suurkaivoksen jätealtaan suunnitelmien ja lupaehtojen vastaiset vuodot (Leisti 2023). Vielä synkempiä epäilyksiä herättää esimerkiksi uutinen, jonka mukaan kaivoksia valvovan Tukesin johtavaa kaivosasiantuntijaa epäillään kaivosyhtiöiden suosimisesta ja syytetään törkeästä virkarikoksesta, mutta se ei ole estänyt häntä jatkamasta kaivoslupien valmistelua (Leisti 2023).

LAATIKKO 7: Loppuuko bensiiniautoilu ensin maaseudulta?

SUOMEN PITKIÄ VÄLIMATKOJA pidetään yleisesti sähköautoilun yleistymisen esteenä. Toisaalta jo nykyisillä sähköautoilla voi ajaa satoja kilometrejä esimerkiksi yöllä kotona tehdyn latauksen turvin. Harva ajaa edes maalla näin pitkiä matkoja päivittäin, ja pika-latausverkosto kehittyi nopeasti.

Voikin käydä niin, että itseään kiihdyttävä ilmiö vie bensiiniautot ensin maaseudun maanteiltä.

Bensiiniautoilun tien pää saattaa tulla vastaan yllättävän nopeasti. Sähköautojen yleisyydessä etenkin kannattavuusongelmien kanssa jo nyt painivien pienten huoltoasemien ylläpitäminen vaikeutuu entisestään. Huoltoasemien kannattavuus perustuu jo nyt ennen muuta muihin palveluihin kuin polttoaineen myyntiin. Polttoainepumppu on lähinnä houkutin, joka tuo näille palveluille asiakkaita.¹⁶⁸ ABC-ketju on kuitenkin rakentanut jo tammikuusta 2022 alkaen huoltoasemia, joissa bensiinin tai dieselin tankkausmahdollisuutta ei ole enää lainkaan.¹⁶⁹

Polttoainekaupan ja ylipäätään huoltoasematoiminnan katteet ovat niin pieniä, että moni muuttotappioalueella jatkava huoltoasema todennäköisesti lopettaa toimintansa viimeistään sitten, kun toiminnan jatkaminen vaatisi merkittäviä uusia investointeja. Polttoaineiden jakeluverkko tuleekin harvenemaan, vaikka sähköautot eivät yleistyisikään. Polttoaineiden hakumatkat pitenevät ja saatavuus heikkenee, kuten esimerkiksi huoltoasemaketju Teboil varoitti jo joulukuussa 2021.¹⁷⁰

Mitä kauempaa polttoaine täytyy hakea, sitä houkuttelevammaksi sähköauto tulee. Sähköauton lataaminen omassa pihassa on vaivatonta. Maatilojen sähköliittymät mahdollistavat jopa oman pikalaturin asennuksen. Aurinkopaneelien hinnan laskiessa oma aurinkosähkö houkuttelee sähköistämiseen entisestään – ja jokainen sähköautoon vaihtava asiakas nakertaa polttoaineenmyynnin kannattavuutta.

Skenaario voi vaikuttaa kaukaa haetulta. Muutoksiin voi kuitenkin kätkeytyä keikahduspiste, jonka ylittämisen jälkeen muutos kiihtyy selvästi. Poliitikkojenkin on syytä pohtia, miten toimitaan, jos bensiinin hakumatkat kasvavat satoihin kilometreihin kauan ennen kuin koko autokanta on sähköistynyt.

¹⁶⁸ Koponen 2022; Lehmusvuori 2021. ¹⁶⁹ Lempinen 2022. ¹⁷⁰ Lempinen 2021.

7. Yhteenveto ja politiikkasuositukset

7.1 Yhteenveto

TÄSSÄ RAPORTISSA on tarkasteltu meneillään olevaa energiajärjestelmän siirtymää fossiilisesta energiajärjestelmästä vähähiiliseksi energiajärjestelmäksi. Raportissa on kaksi keskeistä sanomaa. Ensiksi energiajärjestelmässä on meneillään suurin ja nopein mullistus sitten höyrykoneiden käyttöönoton. Toiseksi siirtymässä on itseään kiihdyttäviä mekanismeja, joiden seurauksena siirtymästä voi tulla ainakin osin jopa yllättävän nopea vihreä humahdus.

Vihreä humahdus ei ole varma eikä sen nopeus ole ennalta määrätty. Poliittisilla päätöksillä on olennainen vaikutus siihen, voittavatko siirtymää kiihdyttävät vai sitä jarruttavat voimat. Suomalaisten kannalta nopeampi siirtymä olisi hidasta toivottavampi, sillä se tulisi todennäköisesti halvemmaksi ja ennen kaikkea vähentäisi ympäristön tuhoutumisesta aiheutuvia haittoja. Euroopan riippuvuuden katkaisu fossiilisia polttoaineita tuottavista valtioista lisäisi myös Suomen turvallisuutta.

Raportissa on käyty läpi sekä nykyisen että tulevan energiajärjestelmän ominaisuuksia. Tuleva energiajärjestelmä tulee olemaan nykyistä järjestelmää yhtenäisempi ja perustumaan ennen kaikkea sähköön. Käytännössä kaikki, mikä on mahdollista sähköistää, tullaan jollain aikavälillä sähköistämään. Fossiilisia ja muita polttoaineita tarvitaan kuitenkin siirtymävaiheen aikana ja pienissä määrin sen jälkeenkin.

Siirtymä uuteen vähähiiliseen energiajärjestelmään on askel kerrallaan etenevä evolutiivinen prosessi. Nykyinen energiajärjestelmä on rakentunut yli kahden vuosisadan aikana enimmäkseen pala kerrallaan, ilman yhtä suurta suunnitelmaa. Uusi energiajärjestelmä rakentuu pääosin samoin, mutta paljon nopeammin ja yhtenäisemmäksi. Silti etukäteen on mahdotonta ennustaa tarkasti, millainen järjestelmästä tulee.

Vaikka ennustaminen onkin vaikeaa, on hyviä syitä uskoa, että uusi energiajärjestelmä tulee perustumaan maailmanlaajuisesti ennen kaikkea aurinkosähköön, ja Pohjoismaissa paljolti tuulivoimaan.

Jopa täysin tai lähes täysin aurinko- ja tuulivoimaan perustuva energiajärjestelmä on mahdollinen, vaikkakin todennäköisesti monipuolisempaa järjestelmää kalliimpi. Vaihteleavan tuotannon ja kulutuksen yhteensovittamisen ongelma saadaan todennäköisesti ratkaistua kohtuullisin kustannuksin jo olemassa olevilla tekniikoilla, kuten siirtämällä energian käytön ajankohtaa, vesivoiman kaltaisella säätövoimalla sekä erilaisilla energia-varastoilla.

Ydinvoiman edut, kuten pieni ympäristö- ja materiaalijalanjälki mutta myös muut hyödyt, puoltaisivat sen pitämistä osana keinovalikoimaa. Ydinvoima on kuitenkin sijoituksena epävarma, ja yksityisten sijoittajien kiinnostus laimeaa. Merkittävä ydinvoiman lisääminen vaatisi lähes varmasti veronmaksajien suoraa tai epäsuoraa tukea. Todennäköisesti parhaiten perusteltuja olisivat kaukolämpöä tuottavan pienreaktorin prototyypin rakentamiseksi tarvittavat tuet.

Kapeastikin arvioituna, ottamatta huomioon elinkelpoisen kotiplaneettamme arvoa, energiajärjestelmän vihreän siirtymän hyödyt ylittävät sen haitat. Sekä hyödyt että haitat jakautuvat kuitenkin epätasaisesti. Jotta siirtymästä saadaan reilu, vaikutuksia on tasoitettava aktiivisesti poliittisin päätöksin.

Päätöksenteon on myös ennakoitava siirtymän vaikutuksia. Vaikka elinkeinon tukeminen voi olla väliaikaisesti tarpeen, siirtymän vaikutusten pehmentämiseksi olisi syytä tukea suoraan ihmisiä. Pohjoismainen hyvinvointivaltio luo siihen hyvät lähtökohdat. Hyvä sosiaaliturva on myös hyvä muutosturva.

Politiikalta siirtymä vaatii tasapainoilua: järjestelmä voisi hyötyä jopa merkittävästi laajemmasta poliittisesta koordinaatiosta, jolla voitaisiin vähentää haitallista osaoptimointia. Toisaalta liian joustamaton ohjaus vaikeuttaisi ratkaisujen löytämistä. Uutta järjestelmää ei kannata suunnitella tarkasti, mutta suunnitelmat tuovat sijoittajien kaipaamaa varmuutta, joka auttaa avaamaan rahahanoja.

Esimerkiksi Suomen ilmasto- ja energiastrategia on keskittynyt lähinnä tavoitteisiin. Vaikka tavoitteiden asettaminen onkin tärkeää, epävarmuus siitä, miten tavoitteisiin pyritään, aikaansaa muna-kana-ongelman. Esimerkiksi vetytalouteen investointeja hidastaa epävarmuus siitä, kyetäänkö sen tarvitsemaa fossiilitonta sähköntuotantoa rakentamaan. Toisaalta sähkön tuotantoon ei sijoiteta, jos tietoa tuotettua sähköä ostavista ei ole. Tällaisten koordinaatio-ongelmien helpottamisessa poliittiset päättäjät voivat olla suureksi avuksi.

Epävarmuutta voitaisiin vähentää suunnittelulla. Viralliset askelmerkit esimerkiksi ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi tarvittavista toimenpiteistä auttaisivat avaamaan investointeja ja helpottaisivat sekä yritysten että ihmisten varautumista muutokseen. Suunnittelu myös auttaisi poliitikkoja ja virkamiehiä ratkomaan ongelmat jo etukäteen. Suunnittelu pitää kuitenkin ymmärtää ensi sijassa joustavana varautumisena eri vaihtoehtoihin. Liittoutuneiden Euroopan-joukkoja toisessa maailmansodassa komentaneen Dwight D. Eisenhowerin tunnetun sanonnan mukaisesti, "[tarkat] suunnitelmat ovat hyödyttömiä, mutta suunnittelu välttämätöntä."¹⁷¹

Poliitikkojen pitäisi välttää takertumista yksityiskohtiin, mutta samalla esittää suuria suuntaviivoja ja järjestelmän reunaehdoja. Siirtymän ohjaamiseksi kannattaa käyttää ensi sijassa teoriassa parhaiten toimivia ratkaisuja, kuten haittaveroja ja päästökauppaa, mutta politiikan on ensi sijassa oltava pragmaattista. Jos teoriassa parhaita vaihtoehtoja ei voida syystä tai toisesta käyttää, myös toiseksi tai kolmanneksi parhaita vaihtoehtoja on syytä ainakin harkita. Etenkin uuden tekniikan kohdalla nämä tarkoittavat joskus myös suoraa tukia.

7.2 Poliittikasuositukset

Vihreän humahduksen vauhdittamisen ja sen oikeudenmukaiseen toteutukseen tarvitaan aktiivista politiikkaa niin Suomessa kuin kansainvälisesti esimerkiksi EU:n tasolla. Seuraavassa on esitetty raportin keskeiset poliittikasuositukset. Kalevi Sorsa -säätio tulee seuraavissa raporteissaan keskittymään tarkemmin oikeudenmukaisen siirtymän edellyttämiin politiikkatoimiin.

¹⁷¹ Quote Investigator 2017.

1. Vihreä humahdus eli energiasektorin yllättävän nopea muutos on huomioitava yhtenä mahdollisena skenaariona. Muutoksen nopeutta ja erityisesti merkkejä sen kiihtymisestä on seurattava aktiivisesti.
2. Tarkat suunnitelmat ovat todennäköisesti virheellisiä, mutta siirtymän suunnittelu olisi sekä sijoitusten vauhdittamisen että poliittisen päätöksenteon kannalta hyödyllistä. Siirtymän ajaksi tarvittaisiin poikkihallinnollinen, pysyvä yksikkö, joka kykenee laatimaan ja päivittämään erityisesti Suomea koskevia suunnitelmia askelista, joilla esimerkiksi ilmastotavoitteisiin päästään.
3. Poliitikoilta kaivattaisiin ennen kaikkea suuntaviivoja ja reunaehtoja, joiden sisällä uusi järjestelmä pääsisi syntymään evolutiivisesti.
4. Yllättävän nopean muutoksen edellyttämiä politiikkatoimia on kuitenkin valmisteltava etukäteen. Esimerkkejä toimista ovat niin sanottujen kapasiteettimarkkinoiden tai vastaavien järjestelyjen luominen nykyisten energian tuotantoon ja myyntiin keskittyneiden sähkömarkkinoiden tueksi ja joustavat tukimekanismit muutoksesta kärsiville ihmisille ja alueille.¹⁷²
5. Energiapolitiikan on oltava pitkäjänteistä ja esimerkiksi hintapiikkeihin tulee reagoida harkiten. Haittojen korjaamiseksi on tavallisesti tehokkaampaa tukea suoraan eniten kärsiviä ja edistää investointeja haittoja vähentävään tekniikkaan, kuin puuttua esimerkiksi sähkömarkkinoiden toimintaan. Näin toimien myös riski odottamattomista sivuvaikutuksista jää pienemmäksi.
6. Energiapolitiikassa tulee keskittyä ensimmäisiin lyhyellä aikavälillä toteutettaviin askeleisiin, joihin voidaan aktiivisesti vaikuttaa. Vaikeammat kysymykset, kuten fossiilisten polttoaineiden viimeisten käyttökohteiden korvaaminen, kannattaa ratkaista myöhemmin, kun ymmärrys uudesta energijärjestelmästä on kasvanut, tekniikka kehittynyt ja ennen kaikkea tekniikan hinta on laskenut.
7. Sähkön toimitusvarmuudesta ääriolosuhteissa ja sen hinnasta on syytä käydä avointa keskustelua. Miten harvinaisista sääolosuhteista tai muista odottamattomista tapahtumista sähköverkon tulisi selvitä? Mitä varautuminen maksaisi, ja missä määrin sähkökatkoja voidaan sietää?

KIRJOITTAJA

Janne M. Korhonen on Kalevi Sorsa-säätiön oikeudenmukaisen siirtymän asiantuntija. Korhonen on tutkinut kestävyys siirtymän eri puolia vuodesta 2007, keskittyen erityisesti energiasektoriin.

¹⁷² Nykyisin esimerkiksi Pohjoismaiden sähkömarkkinat ("sähköpörssi") ovat niin sanottuja energy only-markkinoita, joilla käydään kauppaa vain tuotetusta sähköstä. Energy only-markkinoiden potentiaalinen ongelma on, että kannustimet ylläpitää suhteellisen harvoin tarvittavaa tuotantokykyä eli kapasiteettia voivat olla liian pienet. Tällöin sähkön hintapiikit ja pahimmassa tapauksessa riittämättömän tuotannon aiheuttamat sähkökatkot voivat nousta merkittäväksi ongelmaksi. Kapasiteettimarkkinoilla, -maksuilla ja -mekanismeilla tarkoitetaan energy only-markkinoiden toiminnan muuttamista niin, että kapasiteetin ylläpidosta maksettaisiin jonkinlainen korvaus. Haittapuolena on kuitenkin sopivien mekanismien ja reunaehtojen kehittäminen niin, että järjestelmän hyödyt saadaan maksimoitua ilman odottamattomia sivuvaikutuksia, kuten sitä, että mekanismeista tulee tahaton rahastusautomaatti. Mekanismien suunnittelu vaatii erittäin hyviä tietoja sähkömarkkinoiden tosiasiallisesta toiminnasta, ja muutokset on harkittava tarkkaan. Kapasiteettimarkkinoita kokeilleiden maiden kuten Iso-Britannian kokemukset eivät ole yksinomaan rohkaisevia. Katso esimerkiksi Aurora 2021.

Lähteet

- Aalto, P. (Toim.). (2021). *Electrification: Accelerating the energy transition*. Academic Press.
- Aalto, P., Haukkala, T., Kilpeläinen, S., & Kojo, M. (2021). Introduction: Electrification and the energy transition. Teoksessa P. Aalto (Toim.), *Electrification* (ss. 3–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822143-3.00006-8>
- AFRY. (2020). *Selvitys turpeen energiakäytön kehityksestä Suomessa: Raportti työ- ja elinkeinoministeriölle*. AFRY. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/selvitys-turpeen-energiakaytto-vahene-massa-nopeasti-lahivuosina>
- AFRY, & Ketonen, M.-M. (2023). *Resource Adequacy Assessment Until 2033. Report to Energy Authority*. AFRY Management Consulting. <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/158131816/+selvitys+s%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4n+resurssien+riitt%C3%A4vyydest%C3%A4+vuoteen+2033.pdf/33b8021d-5b91-5c5b-1ec0-29c00ab04911/AFRYn+selvitys+s%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4n+resurssien+riitt%C3%A4vyydest%C3%A4+vuoteen+2033.pdf?t=1682512099666>
- Akhter Naqvi, A., Awan, Z., Shaikh, A. A., Ab, F., Raza, F., & Ahad, I. (2022). Aprotic lithium air batteries with oxygen-selective membranes. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 11. <https://doi.org/10.1007/s40243-021-00205-w>
- Alm, M. (2022). *Uusiutuva energia– biokaasulla kohti hiilineutraalia tulevaisuutta* (2022:1; TEM toimialaraportit). Työ- ja elinkeinoministeriö. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-951-3>
- Arapostathis, S., Carlsson-Hyslop, A., Pearson, P. J. G., Thornton, J., Gradillas, M., Laczay, S., & Wallis, S. (2013). Governing transitions: Cases and insights from two periods in the history of the UK gas industry. *Energy Policy*, 52, 25–44. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.016>
- Aurora. (2021). *The impact of weather in a high renewables power system*. Aurora Energy Research. https://auroraenergy.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2021/03/Aurora_Weather-Years-Strategic-Insight-Report_excerpt_120321-002-CO.pdf
- Baldino, C., O'Malley, J., & Searle, S. (2021). *Hydrogen for heating? Decarbonization options for households in the European Union in 2050* (s. 12). The International Council on Clean Transportation.
- Barnard, M. (2023, tammikuuta 30). *China's Purchasing Power Advantage & Wright's Law Mean Its Green Investments Go A Lot Further*. CleanTechnica, 30.1.2023. Saatavilla <https://cleantechnica.com/2023/01/30/chinas-purchasing-power-advantage-wrights-law-mean-its-green-investments-go-a-lot-further/> [Viitattu 20.9.2023]
- BASE. (2021). *Small Modular Reactors—Was ist von den neuen Reaktorkonzepten zu erwarten?* Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE). https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/neue_reaktoren/neue_reaktoren_node.html

- Basma, H., Buysse, C., Zhou, Y., & Rodriguez, F. (2023). *Total cost of ownership of alternative powertrain technologies for Class 8 long-haul trucks in the United States*. The International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/tco-alt-powertrain-long-haul-trucks-us-apr23/>
- Basma, H., Saboori, A., & Rodriguez, F. (2021). *Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe: Battery electric versus diesel*. The International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/total-cost-of-ownership-for-tractor-trailers-in-europe-battery-electric-versus-diesel/>
- Baxter, T. (2020). *Hydrogen cars won't overtake electric vehicles because they're hampered by the laws of science*. The Conversation, 3-6.2020. Saatavilla <http://theconversation.com/hydrogen-cars-wont-overtake-electric-vehicles-because-theyre-hampered-by-the-laws-of-science-139899> [Viitattu 20.9.2023]
- Bleakley, D. (2023, huhtikuuta 21). *World's largest battery maker announces major breakthrough in energy density*. The Driven, 21.4.2023. Saatavilla <https://thedriven.io/2023/04/21/worlds-largest-battery-maker-announces-major-breakthrough-in-battery-density/> [Viitattu 20.9.2023]
- Blenkinsop, P. (2023). EU raw material targets need money and faster permits, sector chief says. *Reuters*, 16.5.2023. Saatavilla <https://www.reuters.com/markets/commodities/eu-raw-material-targets-need-money-faster-permits-sector-chief-says-2023-05-16/> [Viitattu 20.9.2023]
- BNEF. (2015). *New Energy Outlook 2015*. Bloomberg New Energy Finance.
- BNEF. (2022). Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh. *BloombergNEF*, 6.12.2023. Saatavilla <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/> [Viitattu 20.9.2023]
- Breimyer, H. F. (1959). Emerging Phenomenon: A Cycle in Hogs. *Journal of Farm Economics*, 41(4), 760. <https://doi.org/10.2307/1234844>
- Breyer, C., Khalili, S., Bogdanov, D., Ram, M., Oyewo, A. S., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Solomon, A. A., Keiner, D., Lopez, G., Østergaard, P. A., Lund, H., Mathiesen, B. V., Jacobson, M. Z., Victoria, M., Teske, S., Pregger, T., Fthenakis, V., Raugei, M., ... Sovacool, B. K. (2022). On the History and Future of 100% Renewable Energy Systems Research. *IEEE Access*, 10, 78176–78218. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193402>
- Breyer, C., Lopez, G., Bogdanov, D., & Laaksonen, P. (2023). The role of electricity-based hydrogen in the emerging power-to-X economy. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.170>
- Calthrop, E. (2022). *How does the energy crisis affect the transition to net zero?* European Investment Bank. <https://www.eib.org/en/stories/energy-crisis-net-zero-transition>

- Chase, J. (2023). *3Q 2023 Global PV Market Outlook*. BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/3q-2023-global-pv-market-outlook/>
- Chauhan, S., Hans, M., Rittstieg, M., & Zafar, S. (2023). *Why the economics of electrification make this decarbonization transition different*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/why-the-economics-of-electrification-make-this-decarbonization-transition-different#/>
- Child, M., & Breyer, C. (2016). The Role of Energy Storage Solutions in a 100% Renewable Finnish Energy System. *Energy Procedia*, 99, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.094>
- Climate Change Committee. (2023). *Delivering a reliable decarbonised power system*. Climate Change Committee. <https://www.theccc.org.uk/publication/delivering-a-reliable-decarbonised-power-system/>
- Craig, B. (2020). *The Future of Batteries in the Marine Sector: What Lies Beyond the Horizon?* University of Southampton. <https://www.southampton.ac.uk/~assets/doc/The%20Future%20of%20Batteries%20in%20the%20Marine%20Sector.pdf>
- Daniel, K. D., Litterman, R. B., & Wagner, G. (2019). Declining CO2 price paths. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(42), 20886–20891. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817444116>
- Dattee, B. (2007). Challenging the S-curve: Patterns of Technological Substitution. *Druid Summer Conference 2007*, 0–35.
- DNV. (2022). *Energy Transition Outlook 2022: A global and regional forecast to 2050* (Energy Transition Outlook). DNV (Det Norske Veritas). https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download.html?utm_source=Google&utm_medium=Search&utm_campaign=eto22&gad=1
- Donateo, T., & Spedicato, L. (2017). Fuel economy of hybrid electric flight. *Applied Energy*, 206, 723–738. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.229>
- Enerdata. (2023). *Share of electricity in total final energy consumption*. World Energy & Climate Statistics - Yearbook 2023. <https://yearbook.enerdata.net/electricity/share-electricity-final-consumption.html>
- Energiateollisuus. (2022). *Sähkön hankinta energialähteittäin 2007-2021*. Energiateollisuus ry. https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/sahkon_hankinta_energiالاhteittain_2007-2021.html
- Energiateollisuus. (2023). *Energiavuosi 2022 Sähkö*. Energiateollisuus ry. https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energiavuosi_2022-sahko.html#material-view
- Energiavirasto, Hämäläinen, H., & Nurmi, S. (2022). *Energiaviraston ehdotus asetuksen (EU) 2019/943 mukaiseksi luotettavuusstandardiksi* (Muistio 214/040000/2022). Energiavirasto. <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/13026619/Energiaviraston+p%C3%A4ivitetty+ehdotus+valtioneuvostolle+luotettavuusstandardista.PDF/35ac4bfd-11de-74f7-eff9-3a66begbdcc5/>

Energiaviraston+p%C3%A4ivitetty+ehdotus+valtioneuvostolle+luotettavuusstandardista.pdf?t=1647937046571

Energy Institute. (2023). *2023 Statistical Review of World Energy*. Energy Institute. <https://www.energyinst.org/statistical-review/home>

ENTSO-E. (2022). *European Resource Adequacy Assessment 2022 Edition*. ENTSO-E. <https://www.entsoe.eu/outlooks/eraa/2022/>

ETC. (2023). *Material and Resource Requirements for the Energy Transition*. Energy Transitions Commission. <https://www.energy-transitions.org/publications/material-and-resource-energy-transition>

Eurostat. (2023). *Database–Purchasing power parities* [dataset]. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/purchasing-power-parities/database>

FAO. (2004). *Human energy requirements: Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation* (FAO Food and Nutrition Technical Report Series 1). Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/3/y5686e/y5686e00.htm>

Fehrenbach, H., Bürck, S., & Wehrle, A. (2023). *The Carbon and Food Opportunity Costs of Biofuels in the EU27 plus the UK*. ifeu, Transport & Environment. <https://www.transportenvironment.org/discover/biofuels-an-obstacle-to-real-climate-solutions/>

Fetzer, T., Gazze, L., & Bishop, M. (2022). *How large is the energy savings potential in the UK?* (644; CAGE Working Paper). University of Warwick. https://warwick.ac.uk/fac/soc/economics/research/centres/cage/publications/workingpapers/2022/how_large_is_the_energy_savings_potential_in_the_uk/

Fingrid. (2023). *Sähköjärjestelmävisio 2023*. Fingrid. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/sahkomarkkinat/2023/fingrid_sahkojarjestelmavisio_2023.pdf

Grad, P. (2006). Biofuelling Brazil: An Overview of the Bioethanol Success Story in Brazil. *Refocus*, 7(3), 56–59. [https://doi.org/10.1016/S1471-0846\(06\)70576-5](https://doi.org/10.1016/S1471-0846(06)70576-5)

Gross, R., Hanna, R., Gambhir, A., Heptonstall, P., & Speirs, J. (2018). How long does innovation and commercialisation in the energy sectors take? Historical case studies of the timescale from invention to widespread commercialisation in energy supply and end use technology. *Energy Policy*, 123, 682–699. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.061>

GWEC. (2023). *Global Wind Report 2023*. Global Wind Energy Council. https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/04/GWEC-2023_interactive.pdf

Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (2023). *El Nino and Global Warming Acceleration*. 14.6.2023. Saatavilla <http://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2023/ElNino2023.14June2023.pdf> [Viitattu 20.9.2023]

- Harrabin, R. (2016). The nuclear industry: A small revolution. *BBC News*, 23.3.2016. Saatavilla <https://www.bbc.com/news/business-35863846> [Viitattu 20.9.2023]
- Hax, A. C., & Majluf, N. S. (1982). Competitive Cost Dynamics: The Experience Curve. *Interfaces*, 12(5), 50–61. <https://doi.org/10.1287/inte.12.5.50>
- Hepperle, M. (2012). *Electric Flight – Potential and Limitations*. Energy Efficient Technologies and Concepts of Operation, Lisbon, Portugal, 22.10.2022. Saatavilla <https://elib.dlr.de/78726/> [Viitattu 20.9.2023]
- Holopainen, H. (2023). *Ely-keskus hakee Raahen Laivakankaan kultakaivoksen ympäristölupien peruuttamista – raportteja puuttuu ja kiviaineksen käsittelyssä hankaluuksia*. Yle Uutiset, 7.8.2023. Saatavilla <https://yle.fi/a/74-20044038> [Viitattu 20.9.2023]
- Hughes, J. (2018). *Toyota Develops World's Most Thermally Efficient 2.0-Liter Engine*. The Drive. Saatavilla <https://www.thedrive.com/tech/18919/toyota-develops-worlds-most-thermally-efficient-2-0-liter-engine> [Viitattu 20.9.2023]
- Hunt, T. (2020). *Has the International Energy Agency finally improved at forecasting solar growth?* Pv Magazine USA. Saatavilla <https://pv-magazine-usa.com/2020/07/12/has-the-international-energy-agency-finally-improved-at-forecasting-solar-growth/> [Viitattu 20.9.2023]
- IEA. (2021). *Net Zero by 2050—A Roadmap for the Global Energy Sector* [Special Report]. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IEA. (2022). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- IEA. (2023a). *Electricity Market Report 2023*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>
- IEA. (2023b). *Is there enough global wind and solar PV manufacturing to meet Net Zero targets in 2030?* (Renewable Energy Market Update). International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023/is-there-enough-global-wind-and-solar-pv-manufacturing-to-meet-net-zero-targets-in-2030>
- IEA. (2023c). *Oil 2023: Analysis and forecast to 2028*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/oil-2023>
- IEA. (2023d). *Tracking Clean Energy Progress 2023 – Analysis*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>
- IEA/OECD. (1998). *Projected Costs of Generating Electricity: 1998 Update*. OECD and IEA. <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/768-projected-costs.pdf>

- IRENA. (2016). *The Power to Change: Solar and Wind Cost Reduction Potential to 2025*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/The-Power-to-Change-Solar-and-Wind-Cost-Reduction-Potential-to-2025>
- IRENA. (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5C climate goal*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>
- IRENA. (2023a). *Renewable energy statistics 2023*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023>
- IRENA. (2023b). *Renewable Power Generation Costs in 2022*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
- Jacobson, M. Z. (2021). *100% clean, renewable energy and storage for everything*. Cambridge University Press.
- Jorgenson, J., Frazier, A. W., Denholm, P., & Blair, N. (2022). *Storage Futures Study: Grid Operational Impacts of Widespread Storage Deployment* (NREL/TP-6A40-80688, 1840718, MainId:77472; s. NREL/TP-6A40-80688, 1840718, MainId:77472). <https://doi.org/10.2172/1840718>
- Juopperi, H. (2023). *Pohjoisessa sähköbussien määrän ennakoidaan kasvavan nopeasti – Oulun ensimmäiset sähköbussit on otettu käyttöön tänä kesänä*. Yle Uutiset, 4.8.2023. Saatavilla <https://yle.fi/a/74-20043718> [Viitattu 20.9.2023]
- Kander, A., Malanima, P., & Warde, P. (2014). *Power to the People: Energy in Europe over the Last Five Centuries*. Princeton University Press.
- King, W. I. (1930). *The national income and its purchasing power*. National Bureau of Economic Research; HathiTrust. <https://hdl.handle.net/2027/mdp.39015035957292?urlappend=%3Bseq=97>
- Kleidon, A. (2016). *Thermodynamic foundations of the Earth system*. Cambridge University Press.
- Koivunen, T., Syri, S., & Veijalainen, N. (2022). Contributing factors for electricity storage in a carbon-free power system. *International Journal of Energy Research*, 46(2), 1339–1360. <https://doi.org/10.1002/er.7252>
- Kommenda, N., Hollowood, E., & Arenas, I. de la T. (2022). How much money could you save by making your house more energy efficient? *Financial Times*, 16.11.2022. Saatavilla <https://ig.ft.com/uk-energy-efficiency-gap/> [Viitattu 20.9.2023]
- Koponen, J. (2022). *Bensan kallistumisen seuraus tämäkin: Huoltoasemayrittäjillä on yhä isommat rahat kiinni varastoissaan*. Yle Uutiset, 6.10.2022. Saatavilla <https://yle.fi/a/3-12479643> [Viitattu 6.9.2023]

- Korhonen, J. M. (2017). *Constructed solutions to constructed constraints: Resource scarcities and technological change* [PhD thesis]. Aalto University School of Business.
- Korhonen, J. M. (2023a). Kuka murhasi ydinvoiman, ja miten? *ATS Ydintekniikka*, 52(1), 16–23.
- Korhonen, J. M. (2023b). *Myytinmurtajaiset osa 2: Yhdeksän kysymystä ja vastausta vuoden 2022 energiakriisistä*. Kalevi Sorsa-säätiö. <https://sorsafoundation.fi/vuoden-2022-energiakriisi/>
- Kost, C., Shammugam, S., Fluri, V., Peper, D., Memar, A. D., & Schlegl, T. (2021). *Levelized Cost of Electricity- Renewable Energy Technologies*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/cost-of-electricity.html>
- Laitinen, J., & Niemi, L. (2022). "Omistajat saavat ihan reilusti rahaa" – Muuttuiko kalliiksi parjattu Olkiluoto 3 hetkessä huippuinvestoinniksi? *Helsingin Sanomat*, 9.8.2022. Saatavilla <https://www.hs.fi/talous/art-2000008990961.html> [Viitattu 20.9.2023]
- Lambert, F. (2022). *Tesla is already using cobalt-free LFP batteries in half of its new cars produced*. *Electrek*, 22.4.2022. Saatavilla <https://electrek.co/2022/04/22/tesla-using-cobalt-free-lfp-batteries-in-half-new-cars-produced/> [Viitattu 20.9.2023]
- Lassila, A. (2023a). Ydinvoimaloita tehdään Eurooppaan nyt "melkein sarjatuotantona", Puola haluaa kuusi. *Helsingin Sanomat*, 1.2.2023. Saatavilla <https://www.hs.fi/talous/art-2000009349257.html> [Viitattu 20.9.2023]
- Lassila, A. (2023b). Tuleeko Suomesta tuulivoiman banaanivaltio vai uusiutuvan sähkön Norja? *Helsingin Sanomat*, 14.6.2023. Saatavilla <https://dynamic.hs.fi/2023/tuulivoima/> [Viitattu 20.9.2023]
- Lavia, R. (2023). "Sulfaattia puuttuu roimasti" – Sakatin kaivoshankkeen kemikaali- laskelmissa on 2-10-kertainen laskuvirhe. *Lapin Kansa*, 24.7.2023, sivu 4.
- Lazard. (2023). *2023 Levelized Cost of Energy+*. Lazard. <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/>
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., ... Wilcox, L. J. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
- Lehmusvuori, V. (2021). *Liiketoimintojen kannattavuuslaskelma huoltoasemayritykselle* [Tampereen ammattikorkeakoulu]. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/500729/Lehmusvuori_Velimatti.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Leisti, T. (2023a). *Virkamiestä syytetään törkeästä virkarikoksesta – jatkaa yhä kaivoslupien valmistelua*. Yle Uutiset, 4.6.2023. Saatavilla <https://yle.fi/a/74-20034988> [Viitattu 20.9.2023]

- Leisti, T. (2023b). *Kevitsan suurkaivoksen jäteallas vuotaa metalleja pohjavesiin – viranomaisia huolettaa nyt myös pintavesien saastuminen*. Yle Uutiset, 13.9.2023. Saatavilla <https://yle.fi/a/74-20048867> [Viitattu 20.9.2023]
- Lempinen, T. (2021). Teboil väläyttää valtiolle maaseutuasemien osalta jopa lappua luukulle, jos polttoaineen hintaa nostetaan rajusti. *Ilta-Sanomat*, 4.12.2021. Saatavilla <https://www.is.fi/autot/art-2000008451050.html> [Viitattu 20.9.2023]
- Lempinen, T. (2022). Länsiväylä: ABC-ketju on ryhtynyt avaamaan toimipaikkoja, joista ei saa enää lainkaan bensiiniä eikä dieseliä. *Ilta-Sanomat*, 10.1.2022. Saatavilla <https://www.is.fi/autot/art-2000008528570.html> [Viitattu 20.9.2023]
- Leppänen, M. (2023). *Ketju tuulivoiman kannibalisaatiosta*. Twitter, 12.2.2023. Saatavilla <https://twitter.com/majulepp/status/1624840849522675717> [Viitattu 20.9.2023]
- Li, G., Dempsey, H., & White, E. (2023). China's battery plant rush raises fears of global squeeze. *Financial Times*, 3.9.2023. Saatavilla <https://www.ft.com/content/b6038e51-7b5b-4f97-a5da-9202e71562fc> [Viitattu 20.9.2023]
- Li, Q., Yang, Y., Yu, X., & Li, H. (2023). A 700 W·h·kg⁻¹ Rechargeable Pouch Type Lithium Battery. *Chinese Physics Letters*, 40(4), 048201. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/40/4/048201>
- Lovering, J. R., Yip, A., & Nordhaus, T. (2016). Historical construction costs of global nuclear power reactors. *Energy Policy*, 91, 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.011>
- Luonnonvarakeskus. (2023). *Käytössä oleva maatalousmaa 2022* [dataset]. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/kaytossa-oleva-maatalousmaa/kaytossa-oleva-maatalousmaa-2022>
- Malanima, P. (2020). *World Energy Consumption: A Database, 1820-2018 (2020 revision)*. Harvard University. <https://histecon.fas.harvard.edu/energyhistory/DATABASE%20World%20Energy%20Consumption.pdf>
- Malins, C. (2022). *Efficient Energy: The relative efficiency of renewable energy use in vehicles with different drivetrains*. Cerulogy. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/02/Cerulogy_Efficient-Energy_Feb2022.pdf
- Malkki, E. (2022). *Suomalaisen kaukolämmön nykytila, kehityssuunnat ja tulevaisuus* [Master's thesis, LUT]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022080853121>
- Marttinen, S., Luostarinen, S., Winquist, E., & Timonen, K. (2015). *Rural biogas: Feasibility and role in Finnish energy system* (1.1.3-4; Cleen Oy Research Report). Cleen Oy. <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/543444>
- Michaux, S. P. (2021). *Assessment of the Extra Capacity Required of Alternative Energy Electrical Power Systems to Completely Replace Fossil Fuels* (42/2021; GTK Open File Work Report). Geological Survey of Finland. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/42_2021.pdf

- Modis, T. (2007). Strengths and weaknesses of S-curves. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(6), 866–872. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2007.04.005>
- Morris, J. (2020, heinäkuuta 4). *Why Hydrogen Will Never Be The Future Of Electric Cars*. Forbes, 4.7.2020. Saatavilla <https://www.forbes.com/sites/jamesmorris/2020/07/04/why-hydrogen-will-never-be-the-future-of-electric-cars/> [Viitattu 20.9.2023]
- Mutikainen, M. (2020). *Biokaasun tuotannosta liikennekäyttöön – Missä tökkii?* Energiavirasto Uusiutuvan energian ajankohtaispäivä 21.1.2020. Saatavilla <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/16249680/Biokaasu-tuotannosta-liikennek%C3%A4ytt%C3%B6%C3%B6n-Mutikainen-Mirja.pdf/gb75a422-3831-74a6-91c0-131455a20bf6/Biokaasu-tuotannosta-liikennek%C3%A4ytt%C3%B6%C3%B6n-Mutikainen-Mirja.pdf> [Viitattu 20.9.2023]
- Nagy, B., Farmer, J. D., Bui, Q. M., & Trancik, J. E. (2013). Statistical Basis for Predicting Technological Progress. *PLoS ONE*, 8(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052669>
- Napp, T., Bernie, D., Thomas, R., Lowe, J., Hawkes, A., & Gambhir, A. (2017). Exploring the Feasibility of Low-Carbon Scenarios Using Historical Energy Transitions Analysis. *Energies*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/en10010116>
- NASA. (2012). *Learning Curve Calculator*. NASA Cost Estimating Web Site (archive.org). Saatavilla <https://web.archive.org/web/20120830021941/http://cost.jsc.nasa.gov/learn.html> [Viitattu 20.9.2023]
- OECD NEA. (2020). *Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders*. OECD. <https://doi.org/10.1787/33ba86e1-en>
- Ortiz, D. (2023). *Pressure on Spanish solar economics as ambition escalates*. S&P Commodity Insights, 2.8.2023. Saatavilla <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/research-analysis/pressure-on-spanish-solar-economics-as-ambition-escalates.html> [Viitattu 20.9.2023]
- Panzar, M. (2023). *Euroopan halvinta sähköä saa pian Suomessa, nauttaa asiantuntija – tällaisia sähkösopimuksia ekspertit suosivat nyt*. Yle Uutiset, 18.7.2023. Saatavilla <https://yle.fi/a/74-20040655> [Viitattu 20.9.2023]
- Parkes, R. (2023). *Hydrogen will 'almost always' lose out to battery-electric in German rail transport: Train manufacturer*. Hydrogen Insight, 22.8.2023. Saatavilla <https://www.hydrogeninsight.com/transport/hydrogen-will-almost-always-lose-out-to-battery-electric-in-german-rail-transport-train-manufacturer/2-1-1504868> [Viitattu 20.9.2023]
- Partanen, R., & Korhonen, J. M. (2016). *Musta hevonen: Ydinvoima ja ilmastonmuutos*. Kosmos.
- Pelli, P. (2023). *Aftonbladet: Lupaus ydinvoimasta katosi Ruotsin hallituksen sivuilta*. *Helsingin Sanomat*, 29.8.2023. Saatavilla <https://www.hs.fi/talous/art-2000009817926.html> [Viitattu 20.9.2023]

- Perera, J. (2023). IAEA ups support for SMRs. *Nuclear Engineering International*, 18.1.2023. Saatavilla <https://www.neimagazine.com/features/featureiaea-ups-support-for-smrs-10528638/> [Viitattu 20.9.2023]
- Pöyry. (2019). *Huoltovarmuus energiamurroksessa. Raportti Huoltovarmuuskeskukselle*. Pöyry Management Consulting. https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/files/f4f69b682d-52266d80ce67a1228afb06dbf81fc7/huoltovarmuus_energiamurroksessa.pdf
- Quote Investigator. (2017). *Plans Are Worthless, But Planning Is Everything*. Quote Investigator, 18.11.2017. Saatavilla <https://quoteinvestigator.com/2017/11/18/planning/> [viitattu 19.9.2023]
- Rae, J. B., & Binder, A. K. (2023). Ford and the assembly line. Teoksessa *Encyclopedia Britannica*. Britannica. <https://www.britannica.com/technology/automotive-industry/Ford-and-the-assembly-line>
- Rapid Transition Alliance. (2022, heinäkuuta 8). *Making waves: Electric ships are sailing ahead*. Rapid Transition Alliance. <https://rapidtransition.org/stories/making-waves-electric-ships-are-sailing-ahead/>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2021). *Land Use*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/global-cropland>
- Roberts, D. (2016). *The key to tackling climate change: Electrify everything*. Vox, 19.9.2016. Saatavilla <https://www.vox.com/2016/9/19/12938086/electrify-everything> [Viitattu 20.9.2023]
- Ruhnau, O., & Qvist, S. (2022). Storage requirements in a 100% renewable electricity system: Extreme events and inter-annual variability. *Environmental Research Letters*, 17(4), 044018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4dc8>
- Rystad Energy. (2023). *The State of the European Wind Energy Supply Chain*. Rystad Energy. [https://www.review-energy.com/fileuploads/user/FINAL%20Rystad%20Energy%20-%20Wind%20Supply%20Chain%20Report-WEB.\[1\].pdf](https://www.review-energy.com/fileuploads/user/FINAL%20Rystad%20Energy%20-%20Wind%20Supply%20Chain%20Report-WEB.[1].pdf)
- Schäfer, A. W., Barrett, S. R. H., Doyme, K., Dray, L. M., Gnadl, A. R., Self, R., O'Sullivan, A., Synodinos, A. P., & Torija, A. J. (2019). Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. *Nature Energy*, 4(2), Article 2. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0294-x>
- Sepulveda, N. A., Jenkins, J. D., de Sisternes, F. J., & Lester, R. K. (2018). The Role of Firm Low-Carbon Electricity Resources in Deep Decarbonization of Power Generation. *Joule*, 2(11), 2403–2420. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.08.006>
- Smil, V. (2016). Examining energy transitions: A dozen insights based on performance. *Energy Research & Social Science*, 22, 194–197. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.017>
- Smil, V. (2017). *Energy and civilization: A history*. The MIT Press.

- Soimakallio, S., Sankelo, P., Kopsakangas-Savolainen, M., Sederholm, C., Auvinen, K., Heinonen, T., Johansson, A., Judl, J., Karhinen, S., Lehtoranta, S., Räsänen, S., & Savolainen, H. (2020). *Turpeen rooli ja sen käytöstä luopumisen vaikutukset Suomessa*. Sitra. <https://www.sitra.fi/app/uploads/2020/06/turpeen-rooli-ja-sen-kaytosta-luopumisen-vaikutukset-suomessa-tekni- nen-raportti.pdf>
- Sovacool, B. K. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 13, 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020>
- Steigerwald, B., Weibezahn, J., Slowik, M., & von Hirschhausen, C. (2023). Uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies: A model-based analysis of small modular reactors. *Energy*, 281, 128204. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128204>
- Strohmeier, R. (2008). The 7 Worst Tech Predictions of All Time. *PCWorld*, 31.12.2008. Saatavilla https://www.pcworld.com/article/532605/worst_tech_predictions.html [Viitattu 20.9.2023]
- SVK. (2022). *Kortsiktig marknadsanalys 2022* (3235; Svk 2022). Svenska kraftnät. <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2022/kortsiktig-marknadsanalys-2022.pdf>
- Tervola, J. (2023). Yhdellä autolla säästää yli 40 000 euroa vuodessa polttoainekuluissa – Logistiikkayritys hankki sähkörekan ja 2,45 MWh kotimaisen sähkövaraston. *Tekniikka&Talous*, 10.8.2023. Saatavilla <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/yhdella-autolla-saastoa-yli-40000-euroa-vuodessa-polttoainekuluissa-logistiikkayritys-hankki-sahkorekan-ja-2-45-mwh-kotimaisen-sahko-varaston/e7875c10-c004-4a6d-b7a7-a7dcde030be6> [Viitattu 20.9.2023]
- Tilastokeskus. (2022a). *Energian hankinta ja kulutus*. Tilastokeskus. <https://stat.fi/tilasto/ehk>
- Tilastokeskus. (2022b). *Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin*. Tilastokeskus. <https://www.stat.fi/tilasto/ehi>
- Tong, D., Farnham, D. J., Duan, L., Zhang, Q., Lewis, N. S., Caldeira, K., & Davis, S. J. (2021). Geophysical constraints on the reliability of solar and wind power worldwide. *Nature Communications*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26355-z>
- Traficom, Mäntynen, J., Riku, H., & Pajarre, M. (2022). *Sähköinen lentäminen Suomessa – Edellytykset, mahdollisuudet ja kehitysnäkymät* (16/2022; Traficomin tutkimuksia ja selvityksiä). Traficom. <https://www.traficom.fi/fi/julkaisut/sahkoinen-lentaminen-suomessa>
- Vakkilainen, E., & Kivistö, A. (2017). *Sähkön tuotantokustannusvertailu* (66; LES, Energiateknikka Tutkimusraportti). Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-124-0>
- Vehviläinen, I., & Kara, M. (2015). *Miten varmistetaan sähkönsaanti poikkeusoloissa? Selvitys Suomen huoltovarmuusreservistä* (Fortumin Energiakatsaus Marraskuu 2015). Fortum. <https://www.fortum.fi/media/2015/11/fortumin-uusin-energiakatsaus-ehdottaa-huoltovarmuusreservia-poikkeusolojen-varalle>

- Victoria, M., Zhu, K., Brown, T., Andresen, G. B., & Greiner, M. (2020). Early decarbonisation of the European energy system pays off. *Nature Communications*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20015-4>
- Vihanta, A. (2023). *Tuulivoimarakentamisen kulta-aika on ohi: Suurin kysyntä on tyydytetty ja uudet investoinnit jäissä*. Yle Uutiset, 12.9.2023. Saatavilla <https://yle.fi/a/74-20048410> [Viitattu 20.9.2023]
- Way, R., Ives, M. C., Mealy, P., & Farmer, J. D. (2022). Empirically grounded technology forecasts and the energy transition. *Joule*, 6(9), 2057–2082. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.009>
- Weise, Z., & Coi, G. (2023). This summer is what climate change looks like, scientists say. *Politico*, 25.7.2023. Saatavilla <https://www.politico.eu/article/climate-change-summer-2023-heat-wave/> [Viitattu 20.9.2023]
- Westrén-Doll, J. (2022). Irti sokeasta uskosta. *Helsingin Sanomat*, 12.9.2022. Saatavilla <https://www.hs.fi/visio/art-2000009037120.html> [Viitattu 20.9.2023]
- Wilkinson, B. H. (2005). Humans as geologic agents: A deep-time perspective. *Geology*, 33(3), 161–164. <https://doi.org/10.1130/G21108.1>
- Wiser, R. (2017, marraskuuta). *Value of Wind: Other Measures to Avoid the Value Drop* [Conference presentation]. IEA Wind Technology Collaborative Platform, Lyngby, Denmark. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/139941854/Wiser_Wind_ValueMitigation.pdf
- WNN. (2022, lokakuuta 17). *New Swedish government seeks expansion of nuclear energy* [News]. <https://world-nuclear-news.org/Articles/New-Swedish-government-seeks-expansion-of-nuclear>
- World Energy Council, & Wyman, O. (2022). *World Energy Trilemma Index 2022*. World Energy Council. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2022.pdf?v=1669842216
- World Resources Institute. (2023, heinäkuuta 25). *Climate Watch*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/initiatives/climate-watch>
- Wright, T. P. (1936). Factors Affecting the Cost of Airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3(4), 122–128. <https://doi.org/10.2514/8.155>
- Zappa, W., Junginger, M., & van den Broek, M. (2019). Is a 100% renewable European power system feasible by 2050? *Applied Energy*, 233–234, 1027–1050. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.109>

IMPULSSEJA-SARJAN AIKAISEMPIA JULKAISUJA

Lauri Finér

Ihana kamala perintövero. 12 ehdotusta perintö- ja lahjaveron korjaamiseksi

Elokuu 2023 (50 s.)

Anna Rajavuori

Mitä eriarvoisuudelle tehdään tulevalla vaalikaudella?

Maaliskuu 2023 (31 s.)

Heikki Liimatainen:

Liikenneköyhyyden ilmenemismuodot ja miten ongelmiin voidaan puuttua

Syyskuu 2022 (30 s.)

Mikko Lievonen:

Suomi koronan jälkeen

Kesäkuu 2022 (24 s.)

Hannu Tanninen, & Matti Tuomala:

Onko kehysmenettely finanssipolitiikkaa ohjaava vai kahlitseva väline?

Kesäkuu 2022 (29 s.)

Mikko Lievonen & Maija Mattila:

Yksinasuvat esiin! Miten huomioida yksinasuvat politiikassa

Marraskuu 2021 (25 s.)

Heikki Hiilamo:

Koronakriisin sosiaalinen velka.

Miten pandemia vaikuttaa laaja-alaiseen hyvinvointiin?

Lokakuu 2021 (26 s.)

Pauli Rautiainen et al.:

Otetaan eläinten oikeudet vakavasti

Syyskuu 2021 (30 s.)

Pekka Peltola:

Työajan lyhentämisen pitkä perinne – ja tulevaisuus

Heinäkuu 2021 (18 s.)

Pekka Peltola:

Lyhyemmän työajan kokeilut suomessa 1996–1999.

6•6-Malli oli menestys

Kesäkuu 2021 (19 s.)