



Tere Vaden^a & Antti Majava^b

Energiamurros ja metsäpinta-alan rooli suomalaisen yhteiskunnan aineenvaihdunnassa

Energy transition and the role of forest land in the metabolism of Finnish society

Energy transition presents a particular challenge for Finland, where per capita use of energy and natural resources is one of the highest in the EU. Replacing the fossil energy produced outside of Finland with domestically produced energy, creates problems for zoning, industrial division of labour, and the social acceptability of resource use. Historically, the needs of the forest sector have formed the core of industrial energy and resource use in Finland. It has been accepted that most of the harvested wood is used for energy production in the forest sector itself. Due to the energy transition and the incipient forms of pricing for carbon storage and for upholding biodiversity, forest land gains uses that are an order of magnitude more efficient and also economically alluring. The energy efficiency of forest land use is the lowest for use in bioenergy production. By using the forest area for the production of solar and especially wind power, energy efficiency increases, and in the case of wind energy a large portion of the wood growing in the area is released for other uses, either as raw material in the industry or as a resource for the ecological health of the forest itself.

Keywords: energy transition, forest use, forest land, energy efficiency, forestry, wind power

Johdanto: energiamurros ja metsäresurssi

Energiamurros eli nopea siirtyminen fossiilisen energian käytöstä vähähiilisiin energian tuotannon muotoihin on erityinen haaste Suomelle, jossa energian ja luonnonvarojen kulutus *per capita* on Euroopan unionin korkeimpia (Eurostat 2022; Kaariaho & Pirtonen 2022; Pirtonen 2022). Koska raaka-aineiden ja energian käyttö suhteessa esimerkiksi tuotettuun taloudelliseen tulokseen on runsasta, on Suomessa nähty resurssitalouden piirteitä (Vahvelainen 2016; Vadén ym. 2019). Energiamurroksen myötä resurssien merkitykset muuttuvat. Ei-fossiiliset energiantuotantomuodot ydinvoimaa lukuun ottamatta

^a BIOS-tutkimusyksikkö, tere.vaden@bios.fi

^b BIOS-tutkimusyksikkö

tyypillisesti¹ vaativat fossiilisia tuotantomuotoja enemmän maapinta-alaa ja bioenergia (kuten puu) taas erityisen paljon (Trainor, McDonald & Fargione 2016). Suomen rajojen ulkopuolella tuotettujen fossiilienergiajakkeiden korvaaminen kotimaisilla maapinta-alaan sidoksissa olevilla energiamuodoilla (aurinko- ja tuulienergia, puubiomassa) tuottaa joukon uusia kysymyksiä maankäytön suunnittelun, teollisen työnjaon, maan ja energiavirtojen omistuksen, raaka-aineiden tuotannon ja käytön sekä sosiaalisen hyväksyttävyyden kannalta. Keskitymme tässä energian tuotannon vaatimaan maapinta-alaan.

Kuten Jakob Donner-Amnell (2004, 384) on argumentoinut, pohjoismaisen hyvinvointivaltiomallin osana on toiminut erityinen pohjoismainen metsäsektorin malli. Metsäsektorista muodostui Suomessa suurin vientiala jo varhain 1900-luvulla (Kuisma 1993) ja suurena raaka-aineiden, energian ja työvoiman käyttäjänä se päätyi myös poliittisen huomion keskipisteeseen (Donner-Amnell 2004, 386). Metsäpolitiikan regimit ovat vaihtuneet, mutta muutosten läpi on pysynyt tavoite mahdollisimman suuresta puuntuotosta teollisuuden tarpeisiin (Kotilainen & Rytteri 2011, 439). Tämä polkuriippuvainen (Albrecht & Rytteri 2017) tilanne on lähtökohta energiamurrokselle, joka vaikuttaa myös metsienkäyttöön. Samaan aikaa laajempien ympäristötavoitteiden myötä hiilinieluista, monimuotoisuuspalveluista ja luontokompensatioista on muodostumassa uusia tulonlähteitä metsien omistajille (Kangas & Ollikainen 2019; Peltola ym. 2022).

Tarkastelemme artikkelissa energiamurrosta ja metsienkäyttöä sosioekologisen aineenvaihdon näkökulmasta. Yhteiskunnan sosioekologisella aineenvaihduksella tarkoitetaan sitä, miten ainetta ja energiaa otetaan käyttöön, muunnetaan ja hylätään tuotannossa ja kulutuksessa (Haberl ym. 2016). Termi ”sosioekologinen” pyrkii kiinnittämään huomion siihen, että yhteiskuntien aineenvaihdunta on yhtä aikaa aineellinen (biofysikaalinen) ja yhteiskunnallisesti (historiallisesti) määrittynyt ja että yhteiskunnallinen ja aineellinen puoli kehittyvät yhdessä ja vaikuttavat toinen toisiinsa (Fischer-Kowalski & Weisz 1996; Fischer-Kowalski & Weisz 2016). Energiamurroksessa voidaan tunnistaa nämä kaksi puolta: yhtäällä energiankäytön biofysikaaliset tekijät (muun muassa tuuli- ja auringonpaisteolosuhteet sekä tuotantoteknologia), toisaalla energiantuotannon ja -kulutuksen yhteiskunnalliset edellytykset ja muutokset (muun muassa sääntely, taloudelliset intressit ja huoltovarmuus). Sosioekologisesta näkökulmasta voidaan myös erottaa toisistaan yhteiskunnassa esiintyvät tarpeet (*needs*) ja tarpeiden tyydyttämisen järjestelmät (*systems of provision*) (O’Neill ym. 2018). Tietty tarve (esimerkiksi jonkin käyttökohteen sähkön tarve) voidaan tyydyttää erilaisilla tyydyttämisen järjestelmillä (esimerkiksi vesivoimalat ja sähköverkko tai paikallinen *offgrid*-tuotanto dieselgeneraattoreilla), joilla on erilaiset aineelliset ja yhteiskunnalliset edellytykset ja vaikutukset.

Tarkastelemme seuraavaksi ensisijaisesti sitä, mitä mahdollisuuksia energiamurros tarjoaa vallitsevassa metsienkäytön tilanteessa, ja sivuamme myös näiden mahdollisuuksien tiellä olevia esteitä. Pähkinänkuoressa muutoksen ydin on, että polttamattomien energiantuotantomuotojen myötä maa-alueille syntyy puuenergiaan verrattuna energiatehokkaampia ja mahdollisesti myös taloudellisesti houkuttelevampia käyttötapoja. Metsien käyttömuotojen muutokset samalla haastavat vallitsevan puunkäytön roolin sosioekologisessa aineenvaihdunnassa. Energiamurros on osaltaan vaikuttamassa siihen, millaisia tarpeen tyydyttämisen järjestelmiä metsäalueiden varaan muodostuu.

Käsitlemme ensin vallitsevaa metsienkäytön tilannetta julkisten tilastotietojen ja tutkimuksen valossa (luku 2). Sen jälkeen luonnehdimme energiamurroksen vaikutuksia maankäytölle (luku 3) sekä tarkemmin murroksen merkitystä maankäytön

1 Hiilen ja hiilen tuotantoon liittyvän kaasun tuotanto maanpäällisissä avolouhoksissa on maankäyttövaikutuksiltaan suurempaa kuin aurinko-, tuuli- ja geotermisen energian tuotanto. Tavanomainen öljyn- ja kaasunporaus samoin kuin maanalainen hiilikaiivostoiminta ovat maankäytöltään näitä pienempiä. Öljyn ja kaasun säröytystuotannon (*fracking*) maankäyttö on varsinkin maisematasolla huomattavasti tavanomaista tuotantoa suurempaa, mutta silti vähäisempää kuin aurinko- ja tuulivoimalla (Trainor, McDonald & Fargione 2016, 9).

energiatehokkuudelle (luku 4) ja sen perusteella arvioimme metsänkäytön mahdollisuuksia energiantuotantoon liittyvien yhteiskunnallisten tarpeiden tyydyttämisessä (luku 5). Koska energiamurros on parhaillaan käynnissä ja osittain vasta käynnistymässä, ovat esittämämme arviot väistämättä karkeita. Tarkastelemme metsäalueita ja puunkäyttöä kokonaisuutena erottelematta puunkorjuun jakeita (latvukset, oksat, rungot ja niin edelleen) sekä erilaisia metsänhoidon kiertoaikoja ja arvioimme myös käyttömuotoja, joita tällä hetkellä ei ole olemassa. Tällaisten arvioiden tarkoitus on havainnollistaa suuruusluokkia, joiden perusteella sosioekologiselle aineenvaihdunnalle voidaan hahmottaa muutospaineita, ei kuvata konkreettisia metsänkäyttömuotoja. Luvussa 6 esitämme arvioiden perusteella, millaisia mahdollisuuksia sosioekologisen aineenvaihdunnan muutokset luovat erityisesti metsienkäytön keskiössä olevalle metsäteollisuudelle, minkä jälkeen siirrymme luvun 7 loppuyhteenvedon.

Metsien- ja puunkäytön nykytilan pääpiirteitä

Metsä kattavat noin 75 prosenttia Suomen maapinta-alasta (Maa- ja metsätalousministeriö 2022). Suomen puuvarat ovat Euroopan (pois lukien Venäjä) viidenneksi suurimmat, noin 2 400 miljoonaa kuutiota (Forest Europe 2020, 269). Selvästi suurin maankäytön muoto Suomessa on metsä- ja energiäteollisuuden puunhankintaa palveleva metsätalous, joka kattaa noin 20 miljoonaa hehtaaria eli noin 60 prosenttia maapinta-alasta (Maa- ja metsätalousministeriö 2022). Puukuljetuksia palvelevaa metsäautotieverkostoa on noin 150 000 kilometriä, eli noin 33 prosenttia kaikista Suomen teistä (Greis ym. 2019). Myös merkittävä osa rautateistä ja teollisuusalueista palvelee kokonaan tai osittain metsäteollisuutta. Metsäsektorin osuus bruttokansantuotteesta oli Suomessa vuonna 2015 noin 4,2 prosenttia (Forest Europe 2020, 168), jolloin se oli EU-maiden kolmanneksi korkein. Samaan aikaan metsä- ja kosteikkoalaa raivataan Suomessa edelleen pelloiksi ja muun infrastruktuurin käyttöön, mikä aiheuttaa metsäkatoa ja huomattavia päästövaikutuksia (Assmuth ym. 2022).

Vuonna 2021 teollisuuden osuus energian kokonaiskulutuksesta oli 45 prosenttia (Tilastokeskus 2021a). Metsäteollisuuden osuus teollisuuden sähkön kulutuksesta on noin 60 prosenttia ja Suomen kokonaisenergiankulutuksesta noin 25 prosenttia. Suomi on ylivoimaisesti suurin puupohjaisen energian käyttäjä Euroopan unionissa (Forest Europe 2020, 193). Vertailun vuoksi voidaan todeta, että Suomi kuluttaa puupohjaista energiaa noin 1,5-kertaisesti Ruotsiin nähden, vaikka Ruotsin metsien vuosikasvu ja puupohjaisen tuotannon arvo ovat Suomea suuremmat (Forest Europe 2020, 190).

Viime vuosisadan metsäpolitiikkaa kuvatessaan Juha Kotilainen ja Teijo Rytteri (2011) tunnistavat kolme eri regimiä, mutta myös niiden läpi kulkevan jatkumon, jossa regimien muutokset ovat tulleet lisäyksinä teolliseen puunkäytön malliin, pikemminkin sitä vahvistaen kuin haastaen. Mahdollisimman suuri puuntuotanto teollisuuden tarpeisiin on yhä pää tavoite (mt. 2011, 439). Myös 2000-luvulla muodostunut biotalouden regimi on korostanut metsien hyvän hoidon mahdollistaman hyvän kasvun antavan tilaa lisääntyville hakkuille siitä huolimatta, että hiilinielujen rooli on ilmastopolitiikan myötä noussut keskusteluun (Toivanen 2021). Käytännön metsänhoidon ensisijaisena tavoitteena on yleisesti pidetty sahatarvaraksi kelpaavan tukkipuun kasvatusta (Mäntyranta 2019). Kuiduttavan sellu- ja paperiteollisuuden on puolestaan ollut tarkoitus hyödyntää tukkipuun kasvatuksessa tarvittavista harvennuksista saatua pienpuuta sekä sahojen sivuvirtoja. Energiapuuksi on ajateltu käytettävän vain sellaista ensiharvennus- ja hakkuutähdepuuta, jota ei voida käyttää korkeamman jalostusarvon tuotantoon (Virolainen 2017).

Sellun ja puuenergian kysynnän kasvu on johtanut kuitenkin tavoitteiden vastaiseen kehitykseen. Päätehakkuita tehdään yhä nuoremmissa metsissä (Knäivilä ym. 2020, 37). Myös sahateollisuus joutuu sopeutumaan läpimitaltaan pienemmän puun käyttöön tai tuomaan puuta Suomen ulkopuolelta (Oinaala 2018; Lavento 2020). Metsäsektorin tuotannon jalostusarvo on laskenut paperin tuotannon vähentyessä ja sellun tuotannon

sekä puun energiakäytön lisääntyessä (Hietala & Huovari 2017; Luke 2022a). Koska metsäteollisuus on suuri energian käyttäjä ja saa pääosan tarvitsemastaan energiasta puusta, ei ole yllätys, että käytännössä suurin osa Suomessa hakatusta puusta hyödynnetään nimenomaan energiana. Vuonna 2020 kaikesta korjatusta puun kuiva-aineesta (36,8 megatonnia, tästä eteenpäin Mt) energiankäyttöön päätyi 21,3 Mt (58 %) ja metsäteollisuustuotteisiin (sahatavara, kartonki, sellu, paperi) sitoutui 15 Mt (41 %) (Luke 2021a). Suurin yksittäinen energianlähde metsäteollisuudessa on puumassasta selluteollisuudessa erotettu mustalipeä, josta vuonna 2020 saatiin noin 44 TWh (terawattituntia) energiaa (Tilastokeskus 2021b).

Energiamurroksen aiheuttamat paineet maankäytölle

Taustaoletuksena seuraavissa osioissa esitettävillä arvioilla on, että Suomessa pyritään täyttämään kansainvälisten sopimusten ja Euroopan unionin asettamat päästötavoitteet ja että nykyisenkaltainen hintamekanismi ohjaa energiantuotantoa ja metsienkäyttöä myös jatkossa. Energiatehokkuus tai taloudellinen hyöty eivät suinkaan ole ainoita kriteereitä, joita on maankäyttöä pohdittaessa syytä tarkastella. Esimerkiksi luonnon monimuotoisuutta ja muita ekologisen kestävyuden ehtoja voidaan niin kutsutun vahvan kestävyuden (Heikkurinen 2014) nimissä pitää kaikkea taloudellista tehokkuutta edeltävänä (ei niille rinnakkaisena) kriteerinä. Taloustieteellisesti saman voi muotoilla toteamalla, että tietyt ekologiset tekijät, esimerkiksi jotkut niin kutsutut ekosysteemipalvelut, eivät ole korvattavissa (*non-substitutability*) millään sosiaalisen tai taloudellisen pääoman muodolla, eivätkä edes toisilla ekosysteemipalveluilla (Dasgupta 2021). Vastaavasti taloudellisesta näkökulmasta maankäytölle voi hyvinkin olla parempia kriteereitä kuin energiatehokkuus. Keskitymme kuitenkin maankäytön energiatehokkuuteen, koska energiamurros aiheuttaa siinä muutoksia, joiden biofysikaalinen puoli toteutuu riippumatta esimerkiksi siitä, millainen ilmastotavoite ja sen saavuttamiseen pyrkivät poliittiset toimenpiteet valitaan. Erilaiset arviot puuenergian hiilitaseesta (ks. esim. Ilmastopaneeli 2019) voivat vaikuttaa puuenergian rooliin suhteessa ilmastotavoitteeseen, mutta eivät metsämaan käytön energiataseeseen. Jotta energiatehokkuudella puolestaan voisi olla merkitystä esimerkiksi ilmastopolitiikalle, tulee energiatehokkuutta edes karkeasti arvioida.

Tarkastelun tarvetta korostaa, että merkittävät viimeaikaiset luonnonvarojen käyttöä koskevat päätökset ja tulevaisuuden strategiat, kuten teollisuusalojen vähähiilietikartat, ovat sisältäneet väärinkäsityksiä keskeisten biopohjaisten resurssien saatavuudesta ja käytön vaikutuksista (Toivanen ym. 2021; Majava ym. 2022). Toimet, jotka energiamurroksen tapaan tavoittelevat hiilidioksidipäästöjen vähenemistä, voivat vaikuttaa jopa väärään suuntaan. Sekä hiilen energiakäytön kieltolain että turpeen käytön vähentämiseen tähtäävien toimien vaikutusten arvioinneissa todetaan, että ne johtavat todennäköisimmin epäkestävään puunkäytön lisäämiseen, eivätkä siten tuota päästövähennyksiä (Eduskunta 2018; Soimakallio ym. 2020). Hyvät tarkoitukset kääntyvät vastakohdiksi ilman kokonaisvaltaista ymmärrystä niistä materiaalisista olosuhteista ja reunaehdoista, joihin yhteiskunta sijoittuu.

Fossiilisen energian käytön vähentäminen on ilmastotoimien keskiössä. Energian kokonaiskulutus on pysynyt Suomessa kutakuinkin vuoden 2000 tasolla (Tilastokeskus 2021a), ja Suomi on vähentänyt fossiilisten polttoaineiden käyttöä ensisijaisesti puupohjaisen energian avulla sekä kasvavalla tuuli- ja aurinkoenergian käytöllä (Ympäristöministeriö 2017). Merkittävässä roolissa ovat myös energiatehokkuustoimet. Vaikka energiatehokkuustoimien vaikutukset päästövähennyksiin voivat mitätöityä niin kutsutun Jevonsin paradoksin eli *rebound*-efektin vuoksi (tehostaminen johtaa esimerkiksi kustannusten laskun myötä kulutuksen kasvuun, ks. esim. Sorrell 2009), voidaan paradoksia torjua poliittisin toimin, kuten esimerkiksi verotuksella (Freire-Gonzales & Puig-Ventosa 2015). Lisäksi energiamurrosta jouduttaa teknistaloudellinen kehitys, jonka myötä aurinko- ja tuulivoima ovat edullisimpia energiantuotantomuotoja uutta tuotantoa rakennettaessa (IRENA 2022).

Fossiiliset energialähteet syntyvät fossiilistuneesta biomassasta. Maanalaisiin varantoihin on kertynyt miljoonien vuosien aikana kasvien yhteyttämässä muodostunutta energiaylijäämää (Smil 2017). Tuoreita biomassoja käytettäessä on tarjolla vain yhden satokauden energeettinen ylijäämä kerrallaan. Yhteyttäminen pystyy varastoimaan vain muutamia prosentteja kasvin vaatimaan maapinta-alaan kohdistuneesta auringon säteilyenergiasta (Zhu, Long & Ort 2008). Samalla yhteyttämisen tuottama energiavaranto on metsäekosysteemin olemassaolon edellytys, joten sen korjaaminen kokonaisuudessaan ihmisen käyttöön ei ole pidemmällä aikavälillä mahdollista metsää tuhoamatta.

Suomessa öljyn, maakaasun ja kivihiilen jalostus ja käyttö vaatii suhteellisen vähän maapinta-alaa, eikä se ole muodostunut näkyväksi elementiksi alueiden käytön näkökulmasta. Voimakkaimmin maankäyttöön vaikuttanut fossiiliseksi luettava polttoaine on turve, jonka käytön vaikutukset soihin ja vesistöihin osittain liittyvät laajempaan turvemaiden kuivatukseen maa- ja metsätalouskäyttöä varten (Ojanen ym. 2022). Aurinko- ja tuulivoima sekä puubiomassan käyttö vaativat huomattavia kotimaisia maa-alueita, vaikka aurinkovoiman kohdalla voidaan hyödyntää myös jo olemassa olevia rakenteita, kuten kattoja ja seiniä. Aurinkovoima vaatii auringonvalolle altistuvaa pinta-alaa, ja mitä suurempia pinta-aloja pystytään käyttämään, sitä enemmän energiaa voidaan ottaa talteen. Tuulivoima puolestaan tarvitsee sekä ilma-alaa että maa-alaa, ja samoin kuin aurinkovoiman kohdalla, tuotantoa voidaan lisätä kasvattamalla turbiinien ja tuulipuistojen kokoa. Myös tuulivoiman hiiliintensiteetin vähentäminen suosii koon kasvattamista (Bessau ym. 2019; Sattler 2020). Näin ollen energiamurroksen myötä aiemmin suomalaisten näkymättömissä tuotettu fossiilienergia korvautuu enemmän tilaa vievillä ja näkyvämmillä vähähiilisen energian tuotannon rakenteilla. Energian tuotanto tulee jälleen lähelle, osaksi jokapäiväistä maisemaa. Samalla on hyvä huomata, että suurin osa suomalaisesta luonnosta ja maisemasta on jo pitkään ollut valtaosin puumassan ja metsäbioenergian tuotannon (Maa- ja metsätalousministeriö 2022) sekä vesivoiman (Kärkkäinen & Koljonen 2021) muokkaamaa. Muutoksessa ei siis ole kyse niinkään luonnonmaisemien menettämisestä, vaan maankäytön tapojen muuttumisesta. Esimerkiksi soiden ojitus metsäalan lisäämiseksi on merkittävästi muuttanut luonnonmaisemaa aina 1900-luvun alusta lähtien, kaiken kaikkiaan noin 5,5 miljoonan hehtaarin alalla (Ojanen ym. 2020).

Myös energia- ja puumarkkinoiden muuttuva luonne asettaa haasteita metsäsektorille. Venäjän sotatoimet ja niiden vastatoimet ovat nopeuttaneet fossiilisten polttoaineiden tuonnin vähentämistä. Pyrkimys lisätä energiaomavaraisuutta ja huoltovarmuutta johtaa osaltaan kasvavaan kiinnostukseen kotimaisia energialähteitä kohtaan. Suomessa puun raaka-ainehinta on kuitenkin noussut vain joitakin kymmeniä prosentteja vuodesta 2020 syksyyn 2022, kun muiden energiapitoisten tuotteiden hinnat ovat samassa ajassa moninkertaistuneet (Luke 2022d; Tilastokeskus 2022). Myös energiapuun hinta kotitalouksille on vuodessa jopa kaksinkertaistunut (STT 2022). Metsäteollisuuden käyttämät puuvirrat ja niiden hinnat ovat tähän asti pysyneet erillään muista energiamaarkkinoista, mutta yleinen energian ja raaka-aineiden hinnannousu välittyy todennäköisesti viiveellä myös puuraaka-aineen hinnoitteluun.

Metsäteollisuus tuottaa suurimman osan tarvitsemastaan energiasta itse käyttämistään puuvirroista eikä siten kuormita Suomen energijärjestelmää. Toisaalta tämä tarkoittaa, että suurin osa metsien mahdollistamasta puupohjaisesta energiasta kuluu metsäteollisuudessa eikä ole muun yhteiskunnan käytössä. Metsäteollisuus on Suomen suurin energian käyttäjä ja myös kuluttaja, ja siten sillä olisi erinomaiset mahdollisuudet toimia voimakkaasti vaihtelevan tuuli- ja aurinkovoiman tasaajana. Nimenomaan vähähiilisen sähkön tuotannon tasaamiseen ja jalostamiseen liittyviin toimintoihin liittyy myös suurimpia tuotto-odotuksia (Känsälä & Hammar 2018; Paiho ym. 2018).

Suoran maankäytön lisäksi energiantuotannolla on ketjuuntuneita ja epäsuoria maankäyttövaikutuksia. Lähes kaikki uudet energiateknologiat tuulivoimasta sähköautojen

akkuihin vaativat runsaasti metalleja ja muita kaivannaisia, joista erityisesti harvinaisia maametalleja tuotetaan nykyisellään ekologisesti ja sosiaalisesti kestävämmillä tavoilla (IEA 2021). Pääosa tuulivoimasta rakennetaan tällä hetkellä pohjoiseen Suomeen maantieteellisesti laajalle alueelle kauas kulutuskeskittymistä (Tuulivoimayhdistys 2022). Tämä vaatii sähköverkon huomattavaa kasvattamista. Lisäksi tuulivoiman tuotannon ympärille on suunniteltu muita energian siirtotapoja, kuten vetyteknologiaa (Business Finland 2020). Nämä vaikutukset lisäävät maankäytön merkitystä ja näkyvyyttä energiamurroksen edetessä.

Eri energiamuotojen maankäytön tehokkuus

Tarkastelemme seuraavaksi karkeina arvioina, millaisia määriä energiaa tietyllä maa-alueella voidaan eri tavoin tuottaa. Koska energiamurros merkitsee aikaisempaa näkyvämpää maapinta-alan käyttöä energian tuotantoon, on haittojen hillitsemiseksi syytä pyrkiä hyödyntämään maapinta-alaa mahdollisimman tehokkaasti, jotta myös hyödyntämisen ulkopuolelle jäisi riittävästi alueita. Seuraavat karkeat arviot koskevat kokoluokkia, ja niiden tarkoitus on antaa suuntaviivoja metsäalueiden energiakäytön ekologiselle ja taloudelliselle tarkastelulle. Kokoluokkalaskelmat antavat myös mahdollisuuden arvioida, mihin suuntaan energiamurros maankäyttöä ohjaa.

Käytämme tarkastelussa energiatehokkuuden yksikkönä sitä, miten paljon maapinta-alaa tarvitaan energian tuotantoon (yksikkönä km^2/TWh). Eri energiantuotantomuotojen maankäytön tehokkuuden vertailuun liittyy useita hankalia määrittelykysymyksiä, kuten aikaskaalan valinta, järjestelmän rajojen määrittely ja yhteismitattomien vaikutusten arviointi (Smil 2015; Wachs & Engel 2021). Eri tuotantomuotojen elinkaari on hyvin erilainen, ja niiden edellytykset ja jälkiseuraamukset (sähkö- ja lämpöverkot, tiestö ja muu logistiikka, mineraalit ja muut materiaalit, jälkihoidon tarve ynnä muut) ovat hyvin erikokoisia ja -laatuisia. Käytämme tässä artikkelissa yhdenmukaisuuden vuoksi vuositason energiatuotantoa ja otamme huomioon uusiutuvan tuotannon vaihtelevuuden (vuosituotanto terawattitunteina saadaan kertomalla laitoksen kapasiteetti kapasiteettikertoimella ja vuoden tuntien määrällä).

Arvioimme ensin, millainen maankäytön energiatehokkuus koko metsien vuosittaisen hakkuupoistuman käyttämisellä olisi. Metsämaiden pinta-ala on yhteensä 26,2 miljoonaa hehtaaria (Luke 2021b), josta puuntuotannossa on noin 20 miljoonaa hehtaaria (Maa- ja metsätalousministeriö 2022). Metsien yhteenlasketuksi vuosikasvuksi on arvioitu 13. valtakunnan metsien inventoinnissa 103,5 miljoonaa kuutiometriä (Mm^3), joka on noin 4,6 kuutiometriä per hehtaari (Luke 2021c). Tällä vuosikasvulla puuntuotannossa olevan metsän vuosikasvu on luokkaa 92 Mm^3 , josta vuoden 2021 hakkuupoistuma (76 Mm^3) on noin 83 prosenttia (Luke 2022c).

Kiintokuutiosta puuta saadaan lämpöä ja sähköä tuottavassa voimalaitoksessa noin 800 kWh (kilowattituntia) sähköä ja 1 200 kWh lämpöä (Alakangas ym. 2016). Mikäli myös lämpö lasketaan kokonaisuudessaan hyödynnettäväksi, saadaan noin 76 Mm^3 hakkuumäärän energiapotentiaaliksi optimiolosuhteissa noin 150 TWh. Puun kosteus, korjuun ja kuljetuksen hävikit sekä lämmön kysynnän puute laskevat hyödyntämiskelpoisen energiasällön osuutta.

Puuenergian maankäyttövaikutuksia voidaan arvioida karkealla tasolla, kun jaetaan tuotantoon tarvittava maapinta-ala (200 000 km^2) saatavalla energiasisällöllä (150 TWh). Näin saatu puuenergian suora maankäyttövaikutus on luokkaa 1 300–1 500 km^2/TWh riippuen monista tekijöistä kuten siitä, onko sekä syntyvälle sähkölle että lämmölle kysyntää ja millaiseksi arvioidaan puuta käyttävien voimalaitosten, välivarastojen ja logistiikan tarvitsema pinta-ala.

Metsäteollisuus käyttää puuaineksen tarkkaan niin, että sen toiminnoista ei juurikaan synny energiapitoisia sivuvirtoja teollisuuden itsensä ulkopuolelle. Jos tällaisia kuitenkin on,

voidaan niiden hyödyntämisen katsoa tapahtuvan ilman merkittäviä maankäyttövaikutuksia. Myöskään muiden teollisuudessa, maataloudessa ja kuluttajasektorilla syntyvien sivuvirtojen, hukkalämpöjen ja energiapitoisten jätteiden hyödyntäminen energiana, silloin kun niitä ei voida hyödyntää pitkäkestoisempiin tuotteisiin, ei tuota oleellisia maankäyttövaikutuksia. On kuitenkin huomattava, että merkittävä osa energiapitoisista sivuvirroista on jo käytössä (Virolainen 2017). Tuotantoprosessien ja kulutuksen tehostaminen ja hukkavirtojen minimointi ovat ensisijaisia toimia, ja siten energiapitoisten sivuvirtojen määrän voi arvioida jatkossa pikemmin vähenevän kuin kasvavan.

Tuulivoima on nopeasti noussut tärkeimmäksi uudeksi energiamuodoksi, ja sen kapasiteetti lisääntyy vuosittain noin yhden ydinreaktorin (500–700 MW eli megawattia) verran (Tuulivoimayhdistys 2020a). Keskimääräisen tuulivoimalan kapasiteetti on nykyisin noin 5 MW, mikä tuottaa uusille voimaloille tyypillisellä 0,4 kapasiteettikertoimella noin 0,017 TWh sähköä vuodessa (Tuulivoimayhdistys 2020b; IRENA 2022). Koska varsinainen tuulivoimala syrjäyttää vain joitakin satoja neliöitä maata, voidaan tuulipuiston pinta-alasta suurinta osaa edelleen hyödyntää metsä- tai maataloudessa sekä muussa energiantuotannossa. Hiilineutraali Suomi 2035 -hankkeen skenaarioissa (Maanavilja ym. 2021) on tuulivoiman suoralle maankäyttövaikutukselle käytetty arvoa 1,16 km²/TWh. Luku on yläpäässä vaihteluväliä 0,34–1,37 km²/TWh, jota on esitetty yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa (Trainor, McDonald & Fargione 2016). Kainuun tuulivoimamaakuntakaavan tarkistamisen aluevaikutusten arvioinnissa (Savikko, Rintamäki & Hokkanen 2022) on esitetty, että kun lasketaan mukaan myös sähköasemien ja voimajohtojen vaatima pinta-ala, tarvitaan aluetta noin 2,32–2,9 km²/TWh. Kaavoituksessa tuulivoimaloille varataan huomattavasti isompia alueita, joiden koot vaihtelevat suuresti riippuen paikallisista olosuhteista. Esimerkiksi suunnitteluvaiheessa olevan Ponteman tuulipuiston osayleiskaavasuunnitelmassa 50:lle 8 MW tuulivoimalalle on varattu 7 840 hehtaarin maa-ala, eli noin 56 km²/TWh (Utajärvi 2022). Lestijärvellä rakennusvaiheessa olevalle 69 kappaleelle 6,6 MW voimaloita on varattu noin 6 000:n hehtaarin maa-ala, eli noin 38 km²/TWh (YIT 2022). Mainitussa yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa (Trainor, McDonald & Fargione 2016), on maisematason vaikutukseksi tuulivoimalle saatu 126,92 km²/TWh.

Viiden megawatin tuulivoimalan vuosituotanto saavutetaan Suomen oloissa noin 10 hehtaarin kokoisella aurinkovoimalalla (olettaen, että tuotto on 180 kWh per neliömetri, ks. Motiva 2022), jolloin maankäytön tehokkuus on noin 6–16 km²/TWh riippuen jalostuksen, tasaamisen ja siirron teknologioista. Jos paneelit sijoitetaan jo olemassa olevan infrastruktuurin päälle, kuten katoille, suorat maankäyttövaikutukset ovat mitättömiä. Maanpinnan tasolle asennettujen aurinkopaneelin maisematason vaikutus on luonnollisesti tuulivoimaa pienempi (Trainor, McDonald & Fargione 2016; Wachs & Engel 2021).

Tuulivoiman ja aurinkoenergian investointikustannukset ovat lähellä toisiaan, alle viisi senttiä (Yhdysvaltain dollareissa) kilowattituntia kohden (IRENA 2022). Metsäalueilla aurinkopaneelit kuitenkin syrjäyttävät alaltaan auringonvalon ja siten mahdollisuudet metsätalouteen. Tuulivoimalla muuta kasvua syrjäyttävä vaikutus jää tiestön ja muun infrastruktuurin toteuttamisesta riippuen aurinkovoimaa vähäisemmäksi.

Vesivoimaa on Suomessa rakennettu aikoinaan paljon, eikä merkittäviä uusia rakentamismahdollisuuksia enää ole. Johtuen vesistöjemme pienistä korkeuseroista ja hitaista virtaamista vaatii uuden vesivoiman rakentaminen yleensä myös patoaltaan toteuttamista. Kaavaillun Vuotoksen altaan mahdollistama sähköntuotanto olisi 0,35 TWh ja vastaisi siten noin kahdenkymmenen 5 MW tuulivoimalan vuosituottoa (Mustonen & Niskanen 1992). Tarvittavan altaan koko olisi 237 km² ja suora maankäyttövaikutus luokkaa 680 km²/TWh.

Turvetuotantoalueiden yhteenlaskettu pinta-ala oli vuonna 2021 noin 300 km², ja tästä suurin osa palveli energiaturpeen tuotantoa (Bioenergia 2022). Tältä pinta-alalta korjatulla turpeella tuotettiin noin 11 TWh energiaa (Tilastokeskus 2021). Näin ollen energiaturpeen käytön maankäytön tehokkuus on luokkaa 25–27 km²/TWh riippuen energiaturpeen osuudesta kaikesta turpeen tuotannosta. Turpeen tuotannolla on huomattavia vaikutuksia

myös valuma-alueen vesistöille ja maaperän kasvihuonekaasupäästöille (Soimakallio ym. 2020).

Talvivaaran kaivokselle on myönnetty lupa tuottaa muiden malmien louhinnan sivutuotteena uraania noin 250 tonnia vuodessa. Kaivoksen kokonaispinta-ala on noin 60 km², josta suurin osa palvelee muuta kuin uraanin tuotantoa. Karkeasti voidaan arvioida, että kaivoksen pinta-alan puitteissa voitaisiin tuottaa Suomen ydinvoimaloiden vuositasolla tarvitsema uraani, mikäli se olisi kaivoksen päätuote. Loviisan ja Olkiluodon ydinvoimala-alueiden yhteenlaskettu pinta-ala on hiukan alle 4 km². Ydinsähköä tuotetaan vuodessa yhteensä noin 22 TWh, jolloin ydinvoiman suora maankäyttövaikutus on luokkaa 2,9 km²/TWh. Kuten turpeen kohdalla, luvussa ei ole huomioitu kaivoksen vesistövaikutuksia, jotka ulottuvat laajalle (Leppänen, Luoto & Weckström 2019).

Edellisen perusteella muut kuin fossiiliset energialähteet voidaan sijoittaa niiden suorien maankäyttövaikutusten mukaiseen järjestykseen seuraavasti, keveimmin vaikuttavasta raskaimpaan:

1. Energian säästö ja käytön tehostaminen (ei maankäyttövaikutuksia)
2. Hukkavirtojen hyödyntäminen silloin, kun ne syntyvät tarpeellisesta tuotannosta, jolle ei ole tiedossa vaikutuksiltaan vähäisempää korvaajaa (ei maankäyttövaikutuksia)
3. Aurinkovoima olemassa oleviin rakenteisiin integroituna (ei maankäyttövaikutuksia)
4. Ydinvoima (2,9 km²/TWh)
5. Tuulivoima (1–10 km²/TWh, riippuen sijainnista, tuotannon tasaamisen, jalostuksen ja jakelun vaatimista rakenteista)
6. Aurinkovoima (6–16 km²/TWh riippuen sijainnista, tuotannon tasaamisen, jalostuksen ja jakelun vaatimista rakenteista)
7. Energiaturve (25–27 km²/TWh)
8. Vesivoima virtavesiä patoamalla (680 km²/TWh)
9. Puuenergia (kun käytössä on koko hakkuukertymä, ei vain jäte- ja hukkavirtoja) (1 300–1 500 km²/TWh).

Listaus koskee vain suoran maankäytön energiatehokkuutta. Lisäksi kaikkiin energia-muotoihin tarvitaan siirtoyhteydet tuotannon, jalostuksen ja kulutuksen välille. Nämä tekijät vaikuttavat järjestykseen. Lukuisat tekniset, taloudelliset, rakenteelliset ja sosiaaliset syyt voivat perustella alhaisemman maankäytön energiatehokkuuden tuotantoa. Esimerkiksi puuenergian suora pienkäyttö metsäisillä alueilla voi olla energieteisesti perusteltua. Joka tapauksessa karkea laskelma osoittaa, että suoran maankäytön energiatehokkuus on puu-energialla kaikkein alhaisin (tai kääntäen: puuenergian suora maankäyttövaikutus energian tuotannossa on kaikkein suurin). Tämä kertoo metsienkäytön muutosmahdollisuudesta: käyttämällä metsäalaa puuenergian sijaan aurinko- tai erityisesti tuulienergian tuotantoon maankäytön energiatehokkuus kasvaa, ja tuulienergian tapauksessa suuri osa metsäalueen puusta vapautuu raaka-aineeksi muuhun käyttöön tai metsän omien aineenvaihdunnallisten kiertojen resurssiksi.

Metsäpinta-ala ja energian tuotantoon liittyvien tarpeiden tyydyttämisen järjestelmät

Kuten yllä todettiin, energiatehokkuus (yhtenä aineellisena tekijänä) ei ole ainut kriteeri maankäytölle edes silloin, kun maa-alaa aiotaan käyttää energiantuotantoon. Tarkastelemme seuraavaksi kahta yhteiskunnallista tekijää: ensin metsäalan mahdollistamia taloudellisia tuloja ja toiseksi metsäalan mahdollistamaa lämmön ja liikkumisen tarpeiden tyydyttämistä. Tarkastelut ovat, kuten yllä, hyvin karkeita ja niiden päämäärä on havainnollistaa energia-murroksen vaikutusten suuruusluokkaa.

Alla olevassa taulukossa oletuksena on, että metsäpinta-ala käytettäisiin kokonaisuudessaan yhteen käyttötarkoitukseen, jossa yhtenä vaihtoehtona olisi toistaiseksi vielä puuttuva päästökauppaa vastaava kattava hiilinielumarkkina. Näin voidaan karkeasti vertailla, millaisia euromääräisiä tuloja kustakin käyttötarkoituksesta potentiaalisesti voisi seurata. Taulukon riveillä esitetyt summat eivät ole toisensa poissulkevia, koska ne kohdistuvat eri tahoille (esimerkiksi metsänomistajat ja metsäteollisuusyritykset). Lähtökohtana on käytetty metsien vuosikasvua $103,5 \text{ Mm}^3$ (Luke 2021c). On syytä muistaa, että suurin puuntuotannollisesti kestävä hakkuutaso on vuosikasvua selvästi alhaisempi, Luonnonvarakeskuksen arvion mukaan 10-vuotiskaudella 2016–2025 kaikkiaan $80,5 \text{ Mm}^3$ vuodessa (Luke 2022c), ja että ilmasto- ja monimuotoisuustavoitteiden kannalta suurimmaksi kestäväksi hakkuumääräksi on arvioitu vielä alhaisempi luku, 70 Mm^3 (WWF 2015).

Ajatus kaiken metsäpinta-alan tai puun ottamisesta yhteen käyttötarkoitukseen on kontrafaktuaalinen. Puun ja metsämaan käyttö jakautuu useisiin tarkoituksiin, ja kansallisen metsästrategian tavoitteena on suotuisten yhdistelmien hakeminen (Maa- ja metsätalousministeriö 2019). Myös esimerkiksi puunkäytön kokonaistarkastelu (puun ensisijainen käyttö ja siitä syntyvät sivuvirrat, kaskadikäyttö) ja paikallisten olosuhteiden huomioiminen jäävät karkean arvion ulkopuolelle. Joka tapauksessa taulukon hypoteettisten tuottopotentiaalien pohjalta voidaan nähdä, että metsämaan merkittävimmät tulomahdollisuudet rakentuvat tällä hetkellä tuulivoiman tuotannon, puun mahdollistaman sellun ja sahatarvan tuotannon sekä puun mahdollistaman energian tuotannon kautta. Metsien omistajille käyttö hiilinieluna olisi nykyisillä päästökaupan hinnoilla huomattavasti kannattavampaa kuin myynti energia- tai kuitupuuna. Karkeasta arviosta näkyy myös, että taloudelliset arvot ovat käyttömuodoissa hyvin eri suuruiset. Myös taloudellisen hyödyntämisen ketjut muodostuvat eri tavoin: kuiduttavan ja sahateollisuuden kaksipuolainen metsänomistajat-puun jalostajat -ketju on erilainen kuin metsänomistajat-tuulivoiman tuottajat -ketju tai yksipuolainen metsänomistajat -ketju metsäalueen toimiessa hiilinieluna nielumarkkinoilla. Koska taloudelliset edunsaajat ovat eri käyttömuodoissa erilaiset, kehityksen voi olettaa johtavan yhteiskunnallisiin ja poliittisiin eturistiriitoihin (Dasgupta 2021, 214).

Yhteiskunnallisia hyötyjä voidaan tarkastella myös ilman rahallisia määreitä. Metsäalueen varaan voidaan luoda erilaisia tarpeiden tyydyttämisen järjestelmiä (*systems of provision*) (O'Neill ym. 2018). Tarkastelemme seuraavaksi lämmitystä ja liikkumista tarpeina ja kahta erilaista metsäalan varaan rakennettua tarpeiden tyydytyksen järjestelmää. Yksi järjestelmä on puun energiakäyttö: lämmityksen tapauksessa puun polttaminen lämmön ja sähkön yhteistuotannon (CHP) laitoksessa ja liikkumisen tapauksessa nestemäisen polttoaineen tuottaminen puuaineksesta ja polttoaineen käyttö polttomoottoriautossa. Toinen järjestelmä on metsäalueelle rakennettu tuulivoima, jonka tuottamaa sähköä käytetään lämpöpumppujen välityksellä lämmityksessä ja sähköauton käyttövoimana. Edellisen esimerkin tapaan oletamme tietyn alueen, tässä tapauksessa 100 hehtaaria, olevan kokonaisuudessaan joko puuperäisen energian tai tuulienergian tuotannon käytössä. Tarkastelemme vain suoraa energiankäyttöä, emmekä koko tarpeiden tyydytyksen järjestelmän energieettistä tai ekologista kuormaa.

Taulukon 2 mukaisesti tuulivoiman käyttö mahdollistaa samalla maa-alalla kahta kertaluokkaa enemmän lämpöpumpuilla tuotettua lämpöä kuin metsien vuosikasvu mahdollistaa lämpöä. Kun sitä käytetään sähköautoissa, tuulivoima mahdollistaa kertaluokkaa suuremman ajosuorituksen kuin puun jalostaminen bioetanoliksi tai -dieseliksi ja käyttö polttomoottoriautossa. Tuulivoiman etu tarpeen tyydyttämisessä säilyy, vaikka huomioitaisiin tuulivoiman tasaamisen teknologioiden, kuten vetytalouden, maankäyttö ja tuulivoiman mahdollinen ylimitoitus vetytalouden tarpeisiin.

Taulukko 1. Arvioita tämänhetkisistä metsäalan käytön taloudellisista mahdollisuuksista.

Table 1. Estimated current economic potentials of forest area use.

Metsien vuosikasvun käyttö	Arvo (per yksikkö)	Arvo (koko vuosikasvu tai koko alue)
Sellun raaka-aineena	37 €/m ³ (A)	3 700 miljoonaa €
Selluna	250 €/m ³ (B)	26 000 miljoonaa € (K)
Tukkipuuna	65 €/m ³ (D)	6 700 miljoonaa €
Sahatavarana	200 €/ m ³ (C)	21 000 miljoonaa €
Energiapuuna	24,95 €/m ³ (E)	2 600 miljoonaa €
Puun mahdollistaman energiantuotannon arvona talven 2022–2023 hinnoilla	400 €/MWh sähkö 100 €/MWh lämpö (F)	45 000 miljoonaa € (L)
Puun mahdollistaman energiantuotannon arvona, pitkän aikavälin keskimääräisillä hinnoilla	40 €/MWh sähkö 40 €/MWh lämpö (G)	5 800 miljoonaa € (M)
Metsäalueen mahdollistaman tuulivoiman tuotannon arvona, talven 2022–2023 hinnoilla	400 €/MWh (H)	80 000 miljoonaa € (N)
Metsäalueen mahdollistaman tuulivoiman tuotannon arvona, pitkän aikavälin keskimääräisillä hinnoilla	40 €/MWh (I)	8 000 miljoonaa €
Hiilinieluna	80 €/tonni (J)	6 200 miljoonaa € (O)
Monimuotoisuusreservinä	Hintainformaatiota ei saatavilla	

Käytetyt oletukset:

- A. Hinta-arvion lähteenä Metsälehdessä julkaisema, Metsäteollisuus ry:n kokoama viikoittainen puunhinalaskuri (Metsälehti 2022).
- B. Oletettu sellun hinta 1 000 €/tonni, kun yhteen sellutonnin oletetaan kuluvan noin 4,4 kuutiota puuta (Sable ym. 2012).
- C. Arvion perustana Sahateollisuus ry:n julkaisema tilasto (Sahateollisuus 2022).
- D. Hinta-arvion lähteenä Metsälehdessä julkaisema, Metsäteollisuus ry:n kokoama viikoittainen puunhinalaskuri (Metsälehti 2022), hankintakauppa.
- E. Luonnonvarakeskuksen julkaisema energiapuun valtakunnallinen keskihinta vuonna 2021, hankintakauppa (Luke 2022e).
- F. Sähkön hinta-arvio perustuu Ylen julkaisemaan markkinaennusteeseen (Parviala 2022).
- G. Kaukolämmön hinta-arvio perustuu Energiateollisuus ry:n hintagraafeihin (Energiateollisuus 2022) ja sähkön hinta-arvio perustuu Tilastokeskuksen energian hintatilastoihin (Tilastokeskus 2022); lämmön ja sähkön hinta on laskettu ilman siirron kustannuksia.
- H. Sähkön hinta-arvio perustuu Ylen julkaisemaan markkinaennusteeseen (Parviala 2022).
- I. Sähkön hinta-arvio perustuu Tilastokeskuksen energian hintatilastoihin (Tilastokeskus 2022); hinta on laskettu ilman siirron kustannuksia.
- J. Alkusyksyn 2022 päästökaupan hiilidioksiditonin hinta (EU Carbon Tracker 2022).
- K. Tuotannon vaatima energia on hankittava ulkopuolelta.
- L. Oletuksena on, että 1 kuutio puuta tuottaa 2 MWh energiaa, joka jakautuu 60 prosenttiin lämpöä ja 40 prosenttiin sähköä (vrt. Alakangas ym. 2012).
- M. Oletuksena on, että 1 kuutio puuta tuottaa 2 MWh energiaa, joka jakautuu 60 prosenttiin lämpöä ja 40 prosenttiin sähköä (vrt. Alakangas ym. 2012).
- N. Maa-alueiden tekniseksi potentiaaliksi arvioitu noin 200 TWh, ja 90 prosenttia sen kapasiteetista sijoittuu metsämaalle.
- O. Oletuksena on, että 1 kuutio puuta sitoo 750 kiloa hiilidioksidiä.

Taulukko 2. Sadan hehtaarin metsän vuosikasvun mahdollistama energian loppukäyttö kahta eri teknis-taloudellista reittiä pitkin.

Table 2. Energy provision from one hundred hectares of forest through two different techno-economical routes.

100 ha metsää*	Sähkön ja lämmön tuotanto (MWh)	Lämmitettyjä omakotitaloja (kpl)	Ajokilometrejä henkilöautolla (km)
Käyttö puuna	386 (sähkö) 552 (lämpö)	46	1,3 miljoonaa
Käyttö tuulipuistona	17 000 (sähkö)	1500	65 miljoonaa

*Puun vuosikasvu $4,6 \text{ m}^3/\text{ha} = 460 \text{ m}^3$

Oletukset: puun energiasisältö $2 \text{ MWh}/\text{m}^3$, omakotitalon lämmön ja sähkön kulutus $20 \text{ MWh}/\text{vuosi}$; lämpöpumput säästävät 2,5-kertaisesti energiaa; puuenergian konvertointi nestemäiseksi polttoaineeksi tapahtuu hyötysuhteella 0,7 ja auton kulutus on 5 litraa sadalla kilometrillä; sähköauton hyötysuhde on 73 prosenttia ja kulutus $0,19 \text{ kWh}/\text{km}$. Laskelmassa ei ole huomioitu epäsuoria vaikutuksia, esimerkiksi akkuminaeralien louhintaa ja niin edelleen.

Energiamurroksen metsäteollisuudelle avaamia mahdollisuuksia

Edellä esitetyt suuruusluokka-arviot kertovat, että metsäpinta-alalle on energiamurroksen myötä syntymässä tarpeiden tyydyttämisen järjestelmiä, joilla on mahdollista huomattavasti tehostaa lämmityksen ja liikkumisen kaltaisten tarpeiden tyydytystä. Arvioimme seuraavaksi, millaisia mahdollisuuksia energiamurros tästä näkökulmasta avaa metsäteollisuudelle.

Kun energiamurrosta tarkastellaan sosioekologisen aineenvaihdunnan näkökulmasta, erottuu metsäteollisuus selvänä resurssi- ja energiavirtojen solmukohtana ja merkittävänä maankäytön määrittäjänä. Metsäteollisuuden puun hankinta kattaa suurimman osan Suomen maapinta-alasta, teollisuuslaitosten sijainti on logistiikan ja energiaverkkojen kannalta edullinen ja laitosten alueella on helposti käyttöön otettavia tiloja uusien energiateknologioiden ja energian varastoinnin tarpeisiin. Metsäteollisuus on metsienkäyttöä määrittävän aineenvaihdunnan ytimessä, ja sitä kautta tärkeässä asemassa myös koko Suomea koskevien energia- ja raaka-ainevirtojen käyttäjänä ja muokkaajana. Näin ollen on selvää, että yhtäältä energiamurros koskettaa metsäteollisuuden toimintaedellytyksiä ja että toisaalta metsäteollisuuden ratkaisut puolestaan vaikuttavat muiden teollisuuden sektorien ja koko yhteiskunnan aineenvaihduntaan.

Kun energiamurroksen myötä vaihtelevan tuotannon osuus kaikesta sähköntuotannosta kasvaa, syntyy tarve tuotannon tasapainottamiseen huipputuotannon ja matalan tuotannon hetkien välillä. Vuositason energiantuotantopotentiaali ei riitä energian tarpeen kattamiseen, vaan tarvitaan kyky huolehtia sähköverkon tehotasapainosta sekä energian toimitus- ja huoltovarmuudesta kulloisellakin ajanhetkellä. Tätä kyvykkyyttä voidaan vahvistaa lisäämällä sekä energian kulutuksen että tuotannon ajallisia joustoja (Paiho ym. 2018). Haasteena on riittävien joustojen toteuttaminen suurimmissa kulutuskohteissa kuten tilojen lämmityksessä, teollisuudessa ja liikenteessä. Lisäksi on löydettävä keinot ajallisesti joustamattomien tuuli- ja aurinkovoiman varastoinniseksi jatkuvasti käyttökelpoiseen muotoon. Metsäteollisuuden käyttämä energiamäärä on niin huomattava, että se osallistuu merkittävällä tavalla tuotannon ja kysynnän hallintaan (Lassila 2022), ja vaihtelevan tuotannon lisääntyessä sen rooli sähköverkon vakauttamisessa voi yhä korostua.

Tähän asti tasaisena pysyvän energiasyötteen on taannut pitkälti fossiilinen energia. Vastaavaa tasaista energiavirtaa voidaan tuottaa poltettavilla biomassoilla, lähinnä puulla ja turpeella, tai ydinvoimalla. Suunnittelu-, lupa- ja rakennusprojektien aikataulu huomioiden ydinvoimaa saadaan Olkiluodon kolmannen yksikön käyttöönoton jälkeen lisää aikaisin-taan noin kymmenen vuoden päästä. Päästökaupan hintataso on johtanut energiaturpeen

kilpailukyvyyn heikentymiseen, ja hallituksen ilmasto- ja energiastrategia tähtää turpeen energiakäytön puolittamiseen vuoteen 2030 mennessä (TEM 2022). Metsävarojen energiakäytöllä on rajansa, jotka asettuvat viimeistään puuntuotannollisesti kestävä hakuutason mukaisesti. Myös tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoa tasaavien teknologioiden, kuten vetytalouden, laaja käyttöönotto vienee useita vuosia (AFRY 2020; Business Finland 2020). Näin ollen teollisuudelle ja muulle yhteiskunnalle ei todennäköisesti ole lähitulevaisuudessa tarjolla muuta mahdollisuutta kuin ajoittain joustaa kulutuksessaan tuuli- ja aurinkovoiman syklien mukaan. Teollisten prosessien, yhteiskunnan energiatarpeiden ja vaihtelevien uusiutuvien tuotantomuotojen tiivis integroiminen ja uusien alueellisten toimintamallien optimointi voi kuitenkin tuottaa tilanteeseen helpotusta jo lähitulevaisuudessa.

Tässä tilanteessa metsäsektorille aukeaa mahdollisuus uuteen rooliin, joka yhdistää olemassa olevat edut raaka-aine- ja energiavirtojen keskiönä entistä tehokkaampaan energiantuotantoon metsäalueilla. Tuulivoiman tuotanto syrjäyttää vain osan metsäalan puuntuotannosta, ja tämän vuoksi se mahdollistaa sen, että suurempi osa puusta voidaan käyttää tuotannon raaka-aineena energiakäytön sijaan. Energiakäytöstä raaka-ainekäyttöön siirtymisen kannalta erityisen mielenkiintoinen on mustalipeään sisältyvä ligniini, jolle toisin kuin harvennuksista, puun korjuusta ja käytöstä syntyville sivuvirroille on ennustettu hyvin monenlaisia käyttötarkoituksia biomuoveista aina akkumateriaaleihin asti (Poveda-Giraldo, Solarte-Toro & Alzate 2021). Hankkimalla ja tuottamalla tuulisähköä metsäteollisuus voi tuottaa kehittyneillä lämpöpumpuilla tarvitsemiaan höyryjä (Ilmastopaneeli 2021) ja käyttää vetyelektrolyysereitä tuottamaan vetyä. Tehtaiden nykyisiä biopohjaisia virtoja voidaan yhdistää vetyyn, jolloin saadaan raaka-aineita hyvin monipuoliseen hiilivetyjen tuotantoon. Hiilivety-yhdisteitä voidaan edelleen jalostaa monenlaisiksi synteettisiksi energia- ja kemianteollisuuden tuotteiksi (AFRY 2020). Samalla metsäteollisuus voi myös toimia sähköverkon tasapainottajana käytössään olevien energiantuotannon keinojen (tuuli, biomassat, vety ja jatkojalostetut tuotteet) joustavalla yhdistelyllä.

On syytä huomata, että metsäteollisuus voi saada käyttöönsä nykyisen kaltaisen raaka-ainemäärän vain, jos fossiilinen energia ja ennustettu lisääntyvä (sähkö)energian tarve (TEM 2020) katetaan aurinko-, tuuli- ja ydinvoimalla. Näin on siksi, että hakkuukertymää ja puun energiakäyttöä ei merkittävästi voida kasvattaa ilman metsien kasvun huomattavaa kohentumista (Luke 2020). Jos fossiilisista polttoaineista saatu energia korvattaisiin kokonaan kotimaisella puuperäisellä bioenergialla, olisi vuosittaisten hakkuiden yli kaksinkertaistuttava (Michaux ym. 2022), mikä on yksin puuntuotannollisen kestävyuden kannalta mahdotonta.

Kun metsien muiden kuin sellun raaka-aineen tuotantoon liittyvien palveluiden arvo nousee samalla kun tuulivoiman määrä ja saatavuus kasvaa, voi tilanteen ennakoita johtavan jollakin aikavälillä muutoksiin myös metsäteollisuuden toimintalogiikassa ja metsäregioissa (Donner-Amnell 2004; Kotilainen & Rytteri 2011). Puun ja metsämaan hinnoittelu niiden ilmastonmuutoksen ja luontokadon torjunnalle sekä energiamurrokselle tarjoaman arvon mukaisesti (hiilensidonta, monimuotoisuus, energiapotentiaali) nostaisi puuraaka-aineen ja metsämaan hintaa ja vaikuttaisi eri käyttötarkoitusten kannattavuuteen. Tätä kirjoitettaessa Euroopan unionin päästökauppaoikeuden hinta on noin 80 euroa hiilidioksidiekvivalenttitonnilta (EU Carbon Price Tracker 2022). Mikäli hinnoittelua sovellettaisiin hiilipäästöjen ohella myös (metsäteollisuuden raaka-aineena otetun) hiilen hinnoitteluun, on 100 euroa tonnilta ylittävien hintojen arvioitu johtavan Suomessa laajamittaiseen siirtymään metsien hakkuista hiilinielujen kasvattamiseen painottuvaan metsänhoitoon (Pukkala 2020). Globaalin ilmastotavoitteiden on ennakoitu edellyttävän jopa yli 200 dollarin tonnihintaa päästöille (Hänsel ym. 2020).

Yhteenveto

Energiamurroksen vaikutuksia metsäpinta-alan käyttöön ajaa lopulta hyvin yksinkertainen biofysikaalinen seikka: yhteyttämällä syntyvien hiilivarastojen polttaminen on maankäytön tehokkuuden kannalta huomattavasti aurinko- ja tuulienergiaa heikompi vaihtoehto. Samaan aikaan metsämaan käyttöön vaikuttavat yhä enenevässä määrin myös luonnon monimuotoisuuteen, ympäristöhaittojen kompensointiin ja hiilen varastointiin liittyvät tarpeet, joiden ympärille on syntymässä myös taloudellista toimintaa. Tässä tilanteessa on syytä arvioida metsäpinta-alan käytön energiatehokkuutta, jotta energiamurros auttaisi esimerkiksi kansantaloutta luonnehtivan korkean energian ja raaka-aineiden käyttömäärän kohtuullistamisessa ja jotta riittävä määrä metsää voidaan jättää myös voimaperäisen ihmis-toiminnan ulkopuolelle.

Sosioekologisesta näkökulmasta tarkasteltuna uusiutuvan energiantuotannon energiatehokkuus verrattuna Suomessa laajasti käytössä olevaan puuenergian käyttöön avaa uusia mahdollisuuksia. Karkeasti arvioiden esimerkiksi lämmityksen ja liikkumisen kaltaisten tarpeiden tyydyttäminen metsäalueella tuotetun tuulisähkön avulla on kertaluokkaa energiatehokkaampaa kuin samojen tarpeiden tyydyttäminen puuenergiaa hyödyntäen. Karkeisiin arvioihin sisältyvien rajausten ja oletusten vuoksi on selvää, että tietyissä olosuhteissa puuenergian käyttö on (myös energieettisesti) järkevää. Silti karkea arvio kertoo, että yhteiskunnallisen aineenvaihdunnan tehokkuus ja ajan mittaan mahdollisesti myös hintainformaatio tulee ohjaamaan käyttömuotoihin, joissa energiaa on edullisempi tuottaa muilla tavoilla kuin polttamalla puuta.

Metsäteollisuus on metsiä koskevan aineenvaihdunnan keskiössä ja sitä kautta suuressa roolissa koko yhteiskunnan aineenvaihdunnassa. Metsäteollisuuden toiminnot yhdistävät energia- ja raaka-ainevirtoja, ja uusien yhdistelmien mahdollisuus korostuu, kun energiamurros uusiutuvan energian saatavuuden lisäksi edistää siirtymää puun energiakäytöstä käyttöön raaka-aineena. Metsäteollisuus toimii jo energiantuotannon ja -kulutuksen tasapainottajana, ja nämä mahdollisuudet paranevat edelleen, jos puuta käytetään entistä enemmän erilaisten synteettisten energia- ja kemianteollisuuden tuotteiksi.

Samoista syistä energieettisesti, logistisesti, sosiaalisesti ja taloudellisesti hyvien uuden energainfrastruktuurin rakentamisaikojen arvon voi ennakoita nousevan rakentamismahdollisuuksien niukkuuden lisääntyessä. Maapinta-alan kohdistuvien moninaisten käytötarpeiden ja odotusten voidaan olettaa siirtyvän maaomaisuuden arvoon. Tuulivoiman tuotantoon tai hiilensidontaan sekä luonnonarvokauppaan soveltuvien metsäalueiden arvo voi merkittävästi kasvaa, mikäli hiilimarkkina aukeaa myös hiilensidonnalle.

Kiitokset

Tutkimusta ovat rahoittaneet Koneen Säätiö ja Suomen Akatemian alaisuudessa toimiva Strategisen tutkimuksen neuvosto (336253/336259).

Lähteet

- AFRY (2020) Roadmap to Reach Carbon Neutral Chemistry in Finland by 2045. Final report. <https://kemianteollisuus.studio.crasman.fi/file/dl/i/0GtI_g/kBevzvIQojOC9zfO-Ztyug/Kemianteollisuusroadmap.pdf>. 23.10.2022.
- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J., & Korhonen, J. (2016) Properties of Indigenous Fuels in Finland. VTT Reports 272, Espoo. <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T272.pdf>>.
- Albrecht, M., & Rytteri, T. (2017) Policy failures in mobile and complex contexts: Translating EU energy policy in Finland. *Alue ja Ympäristö* 46(2) 18–31. <<https://aluejajymparisto.journal.fi/article/view/68853>>.
- Assmuth, A., Lintunen, J., Wejberg, H., Koikkalainen, K., Uusivuori, J. & Miettinen, A. (2022) Metsäkadon ilmastohaitta ja hillinnän ohjauskeinot Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 31/2022.

- Luonnonvarakeskus, Helsinki.
- Bioenergia ry (2022) Turve. <<https://www.bioenergia.fi/tietopankki/turve/>>. 5.9. 2022.
- Business Finland (2020) National Hydrogen Roadmap for Finland. <https://www.businessfinland.fi/4abb35/globalassets/finnish-customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/bf-national_hydrogen_roadmap_2020.pdf>.
- Dasgupta, P. (2021) The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review. HM Treasury, Lontoo. <<https://www.gov.uk/government/publications/final-report-the-economics-of-biodiversity-the-dasgupta-review>>. 29.10.2022.
- Donner-Amnell, J. (2004) To Be or Not To Be Nordic? How Internationalization Has Affected the Character of the Forest Industry and Forest Utilization in the Nordic Countries. Teoksessa Donner-Amnell, J., Korhonen, A. (toim.) *Politics of Forests*. Routledge, London 179–204.
- Eduskunta (2018) Hallituksen esitys HE 200/2018 vp. Hallituksen esitys eduskunnalle laeiksi hiilen energiakäytön kieltämisestä ja oikeudenkäynnistä markkinaoikeudessa annetun lain 1 luvun 2 §:n muuttamisesta. <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE_200+2018.aspx#:~:text=Esityksess%C3%A4%20ehdotetaan%20s%C3%A4%C3%A4dett%C3%A4%C3%A4ksi%20lakia%20hiilen,tuotannon%20huoltovarmuuden%20ja%20toimitusvarmuuden%20turvaamiseksi>.
- Energiatallisuus (2022) Kaukolämmön hintagraafit. <https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/kaukolammon_hintagraafit.html#material-view>. 5.9.2022.
- EU Carbon Price Tracker (2022) <<https://ember-climate.org/data/data-tools/carbon-price-viewer/>>. 5.9.2022.
- Eurostat (2022) Material Flow Accounts. <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/env_ac_mfa_sims.html>. 5.9.2022.
- Fischer-Kowalski, M. & Weisz, H. (2016) The Archipelago of Social Ecology and the Island of the Vienna School. Teoksessa Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Winiwarter, V. (toim.) *Social Ecology. Society-Nature Relations across Time and Space*. Springer, Cham 3–28. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33326-7_1
- Fischer-Kowalski, M. & Weisz, H. (1999) Society as hybrid between material and symbolic realms: toward a theoretical framework of society–nature interaction. *Advances in Human Ecology* 8 215–251.
- Forest Europe (2020) State of Europe's Forests 2020. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, Bratislava. <https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2016/08/SoEF_2020.pdf>.
- Freire-González, J. & Puig-Ventosa, I. (2015) Energy Efficiency Policies and the Jevons Paradox. *International Journal of Energy Economics and Policy* 5(1) 69–79.
- Greis, I., Perälä, M., Perälä, T. & Teppo, M. (2019) Metsänhoidon suositukset metsäteiden kunnossapitoon, työopas. Tapio Oy. <<https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon-suositukset-metsateiden-kunnossapitoon-TAPIO-2019.pdf>>.
- Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., & Winiwarter, V. (2016) *Social Ecology. Society-Nature Relations across Time and Space*. Springer, Cham.
- Heikkurinen, P. (2014) Kestävyyden käsitteen ulottuvuudet. *Tieteessä tapahtuu* 32(4) 10–16. <<https://journal.fi/tt/article/view/46149>>.
- Heiskanen, A., Kianmaa, S., Nikula, J., Ryyänen, K. & Valkeapää, A. (2015) Mitä metsä kestää? Suomen metsien ekologialoudellisesti vastuullinen hakkuupotentiaali. WWF Suomi, Helsinki.
- Hietala, J. & Huovari, J. (2017) Puupohjaisen biotalouden taloudelliset vaikutukset ja näkymät 2017. PTT Työpapereita 184. <<https://www.ptt.fi/julkaisut-ja-hankkeet/kaikki-julkaisut/puupohjaisen-biotalouden-taloudelliset-vaikutukset-ja-nakymat.html>>.
- Hänsel, M.C., Drupp, M.A., Johansson, D.J.A., Nesje, F., Azar, C., Freeman, M.C., Groom, B. & Sterner, T. (2020) Climate economics support for the UN climate targets. *Nature Climate Change* 10 781–789. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0833-x>
- IEA, International Energy Agency (2021) The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris. <<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>>.
- IRENA, International Renewable Energy Agency (2022) Renewable Power Generation Costs in 2021. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <<https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>>. 5.9.2022.
- Jegoroff, M., Arasto, A. & Tsupari, E. (2021) Katsaus Suomen teollisuuden sähköistämisen teknologisiin ratkaisuihin. Suomen ilmastopaneelin raportti 4/2021. <<https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2021/12/ilmastopaneelin-raportti-4-2021-katsaus-teollisuuden-sahkoistamisen-ratkaisuihin.pdf>>.
- Kaariaho, T. & Pirtonen, H. (2022) Materiaalivirtojen tarkempi erittely vuodelta 2021 osoittaa luonnonvarojen kulutuksen vähentyneen. *Tieto & trendit* 17.11.2022. <<https://www.stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2022/materiaalivirtojen-tarkempi-erittely-vuodelta-2021-osoittaa-luonnonvarojen-kulutuksen-vahentyneen/>>. 26.11.2022.
- Kalliokoski, T., Heinonen, T., Holder, J., Lehtonen, A., Mäkelä, A., Minunno, F., Ollikainen, M., Packalen,

- T., Peltoniemi, M., Pukkala, T., Salminen, O., Schelhaas, M.-J., Seppälä, J., Vauhkonen, J. & Kanninen, M. (2019) Skenaarioanalyysi metsien kehitystä kuvaavien mallien ennusteiden yhtäläisyyksistä ja eroista. Suomen Ilmastopaneeli, Raportti 2/2019. <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2019/02/Ilmastopaneeli_mets%C3%A4mallit_raportti_180219.pdf>.
- Kotilainen, J., & Rytteri, T. (2011) Transformation of forest policy regimes in Finland since the 19th century. *Journal of Historical Geography* 37(4) 429–439. <https://doi.org/10.1016/j.jhg.2011.04.003>
- Kniivilä, M., Hantula, J., Hotanen, J.-P., Hynynen, J., Hänninen, H., Korhonen, K.T., Leppänen, J., Melin, M., Mutanen, A., Määttä, K., Siitonen, J., Viiri, H., Viitala, E.-J. & Viitanen, J. (2020) Metsälain ja metsätuholain muutosten arviointi. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 3/2020. Luonnonvarakeskus, Helsinki. <<https://jukuri.luke.fi/handle/10024/545373>>.
- Kangas, J. & Ollikainen M. (2019) Economic Insights in Ecological Compensations: Market Analysis with an Empirical Application to the Finnish Economy. *Ecological Economics* 159 5/2019 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.01.003>
- Kuisma, M. (1993) *Metsäteollisuuden maa. Suomi, metsät ja kansainvälinen järjestelmä 1620–1920*. Suomen Historiallinen Seura ja Metsäteollisuus ry, Jyväskylä.
- Känsälä, K. & Hammar, K. (2018) Säättövoimaa tulevaisuuden sähkömarkkinoille. VTT Technical Research Centre of Finland. <<https://cris.vtt.fi/en/publications/s%C3%A4%C3%A4t%C3%B6voimaa-tulevaisuuden-s%C3%A4hk%C3%B6markkinoille>>.
- Kärkkäinen, L. & Koljonen, S. (2021) Arvio EU:n biodiversiteettistrategian 2030 vaikutuksista Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 75/2021. Luonnonvarakeskus, Helsinki.
- Lavento, D. (2020) Pieniltä sahoilta saa vielä laatupuuta rakentamiseen. *Rakennusmaailma* 25.10.2020 <<https://rakennusmaailma.fi/pienilta-sahoilta-saa-viela-laatupuuta-rakentamiseen/>>. 31.10.2022.
- Lassila, A. (2022) UPM:stä tuli vaivihkaa elintärkeä Suomen sähkömarkkinalle – Näin se näkyy. Helsingin Sanomat 31.10.2022. <<https://www.hs.fi/talous/art-2000009159511.html>>. 31.10.2022.
- Leppänen, J., Luoto, T. & Weckström, J. (2019) Spatio-temporal impact of salinated mine water on Lake Jormasjärvi, Finland. *Environmental Pollution* 247 1078–1088. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.111>
- Luonnonvarakeskus (2020) Metsien käsittelyskenaariot. Metsäteollisuus ry:n ilmastotietokartta. <https://global-uploads.webflow.com/5f33b1bfbd4fdb69d3afe623/5fd363c220057bccdf506b_Ilmastotietokartta_mets%C3%A4skenaariot_loppuraportti_Luke_16_06_2020.pdf>.
- Luonnonvarakeskus (2021a) Suurin osa puusta päättyy lopulta energiaksi, 2.12.2021. <<https://www.luke.fi/fi/uitiset/suurin-osa-puusta-paatty-lopulta-energiaksi>>. 5.9.2022.
- Luonnonvarakeskus (2021b) Metsävarat maakunnittain. <<https://www.luke.fi/fi/tilastot/metsavarat/metsavarat-maakunnittain-4>>. 5.9.2022.
- Luonnonvarakeskus (2021c) Metsien vuotuinen kasvu laski tuoreimmassa valtakunnan metsien inventoinnissa, 19.10.2021. <<https://www.luke.fi/fi/uitiset/metsien-vuotuinen-kasvu-laski-tuoreimmassa-valtakunnan-metsien-inventoinnissa>>. 5.9.2022.
- Luonnonvarakeskus (2022a) Metsäteollisuuden tuotannon bruttoarvo ja jalostusarvo. <http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__08%20Muut__Metsateollisuus/10.05_Metsateollisuuden_tuotannon_bruttoarvo_ja_px>. 5.9.2022.
- Luonnonvarakeskus (2022b) Tukkupuun hakkuissa ennätykset rikki vuonna 2021, 8.2.2022. <<https://www.luke.fi/fi/uitiset/tukkupuun-hakkuissa-ennatykset-riikki-vuonna-2021>>. 5.9.2022.
- Luonnonvarakeskus (2022c) Hakkuukertymä ja puuston poistuma 2021 (ennakko), 8.2.2022. <<https://www.luke.fi/fi/tilastot/hakkuukertyma-ja-puuston-poistuma/hakkuukertyma-ja-puuston-poistuma-2021-ennakko>>. 5.9.2022.
- Luonnonvarakeskus (2022d) Teollisuuspuun kauppa. <<https://www.luke.fi/fi/tilastot/teollisuuspuun-kauppa>>. 5.9.2022.
- Luonnonvarakeskus (2022e) Energiapuun kauppa. <http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__04%20Talous__04%20Energiapuun%20kauppa/03_Energiapuun_hinta_v_px>. 5.9.2022.
- Maanavilja, I., Tuomainen, T., Aakkula, J., Haakana, M., Heikkinen, J., Hirvelä, H., Kilpeläinen, H., Koikkalainen, K., Kärkkäinen, L., Lehtonen, H., Miettinen, A., Mutanen, A., Myllykangas, J.-P., Ollila, P., Viitanen, J. & Wall, A. (2021) Hiilineutraali Suomi 2035 – Maankäyttö- ja maataloussektorin skenaariot. Valtioneuvoston selvitys ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:63. <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-263-3>>. 14.10.2022.
- Majava, A., Vadén, T., Toivanen, T., Järvensivu, P., Lähde, V. & Eronen, J.T. (2022) Sectoral low-carbon roadmaps and the role of forest biomass in Finland's carbon neutrality 2035 target. *Energy Strategy Reviews* 41. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100836>
- Metsälehti (2022) Puun hinta. <<https://www.metsalehti.fi/puunhinta/puunhinta/>>. 5.9.2022.
- Michaux, S., Vadén, T., Korhonen, J., & Eronen J.T. (2022) Assessment of the scope of tasks to completely phase out fossil fuels in Finland. GTK, Espoo. <https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/18_2022.pdf>.
- Maa- ja metsätalousministeriö (2022) Suomen metsävarat. <<https://mmm.fi/metsat/suomen-metsavarat>>.

5.9.2022.

- Maa- ja metsätalousministeriö (2019) Kansallinen metsästrategia 2025 – päivitys. <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-453-889-3>>.
- Motiva (2022) Aurinkosähköjärjestelmän teho, 2.8.2022. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkojarjestelman_teho#:~:text=Tavallisesti%201%20piikkilowatin%20tehoisella%20j%C3%A4rjestelm%C3%A4ll%C3%A4,Suomessa%20700%E2%80%939300%20kWh%20vuodessa>. 5.9.2022.
- Mustonen, E., & Niskanen, E. (1992) Vuotos-hankkeen yhteiskuntataloudellinen kannattavuus. VATIT, Helsinki. <<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/148225/k027.pdf>>.
- Mäntyranta, H. (2019) Metsänhoito pyrkii kestävyYTEEN ja luonnonläheisyyteen, 12.6. 2019. <<https://forest.fi/fi/artikkeli/metsanhoito/#ce2be798>>. 5.9.2022.
- Oinaala, S. (2018) Pudasjärvellä jalostetaan saksalaista puuta, kun Suomesta ei löydy kunnollista. Helsingin Sanomat 5.7.2018. <<https://www.hs.fi/talous/art-2000005743993.html>>. 31.10.2022.
- Ojanen, P., Aapala, K., Hotanen, J.-P., Hökkä, H., Kokko, A., Minkkinen, K., Mylly, M., Punttila, P., Päivänen, J., Rehell, S., Turunen, J., Valpola, S. & Vähäkuopus, T. (2020) Soiden käyttö Suomessa. *Suo* 71(2) 115–124. <<https://www.suoseura.fi/ojitettujen-soiden-kestava-kaytto/soiden-kaytto-suomessa/>>.
- O'Neill, D., Fanning, A., Lamb, W. & Steinberger, J. (2018) A good life for all within planetary boundaries. *Nature Sustainability* 1 88–95 2018. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0021-4>
- Paiho, S., Saastamoinen, H., Hakkarainen, E., Similä, L., Pasonen, R., Ikäheimo, J., Rämä, M., Tuovinen, M. & Horsmanheimo, S. (2018) Increasing flexibility of Finnish energy systems—A review of potential technologies and means. *Sustainable Cities and Society* 43 11/2018 509–523. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.015>
- Parviala, A. (2022) Tässä markkinoiden varmin ennuste: Sähkön hinta kolminkertaistuu loppuvuonna, mutta keväällä nähdään hintaromahdus. Yle 7.8.2022. <<https://yle.fi/uutiset/3-12558752>>. 5.9.2022.
- Peltola, H., Heinonen, T., Kangas, J., Venäläinen, A., Seppälä, J. & Hetemäki, L. (2022) Climate-smart forestry case study: Finland. Teoksessa Hetemäki, L., Kangas, J. & Peltola, H. (toim.) *Forest Bioeconomy and Climate Change*. Managing Forest Ecosystems (MAFE) 42 183–195. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99206-4_11
- Pirtonen, H. (2022) Suomi kuluttaa luonnonmateriaalejaan huomattavasti enemmän kuin muut EU-maat – materiaalitilinpito kuvaa luonnon hyödyntämistä. *Tieto & trendit* 26.8.2022. <<https://www2.stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2022/suomi-kuluttaa-luonnonmateriaalejaan-huomattavasti-enemman-kuin-muut-maat-materiaalitilinpito-kuvaa-luonnon-hyodyntamista/>>. 5.9.2022.
- Poveda-Giraldo, J., Solarte-Toro, J. & Alzate, C. (2021) The potential use of lignin as a platform product in biorefineries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 138. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110688>
- Pukkala, T. (2020) At what carbon price forest cutting should stop. *Journal of Forestry Research* 31 713–727. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01101-1>
- Sable, I., Grinfelds, U., Jansons, A., Vikele, L., Irbe, I., Verovkins, A. & Treimanis, A. (2012) Comparison of the properties of wood and pulp fibers from lodgepole pine (*Pinus contorta*) and scots pine (*Pinus sylvestris*). *Bioresources* 7(2) 1771–1783. <<https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/2362>>.
- Sahateollisuus (2022) Sahatavaran vientihinta Suomesta. <<https://sahateollisuus.com/wp-content/uploads/2022/03/Sahatavaran-vienti-2003-2021-hinta.pdf>>.
- Sattler, M. (2020) Reducing the Carbon Footprint of Wind Energy. What Can Be Learned from Life-Cycle Studies? Teoksessa Sikdar, S., Princiotto, F. (toim.) *Advances in Carbon Management Technologies. Carbon Removal, Renewable and Nuclear Energy*. Routledge, London 425–432.
- Smil, V. (2017) *Energy and Civilization. A History*. MIT Press, Cambridge.
- Smil, V. (2015) *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*. MIT Press, Cambridge.
- 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) Turveraportti: Turpeen rooli ja sen käytöstä luopumisen vaikutukset Suomessa. Sitra, Helsinki. <<https://www.sitra.fi/app/uploads/2020/06/turpeen-rooli-ja-sen-kaystosta-luopumisen-vaikutukset-suomessa-tekninen-raportti.pdf>>.
- Sorrel, S. (2009) Jevons' paradox revisited: the evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy Policy* 37 1456–1469. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.003>
- STT (2022) Polttopuusta saa maksaa pitkän pennin – "Kuivan koivuklapin hinta on kaksinkertaistunut". Yle 24.10.2022. <<https://yle.fi/uutiset/3-12665598>>. 31.10.2022.
- Työ- ja elinkeinoministeriö (2022) Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0>>.
- Tilastokeskus (2021a) Energian hankinta ja kulutus. 14.4.2022. <<https://stat.fi/julkaisu/cku5lap681xrt0b05mz2vuoen>>. 5.9.2022.
- Tilastokeskus (2021b) Teollisuuden energiankäyttö 2020. <https://www.stat.fi/til/tene/2020/tene_2020_2021-11-01_fi.pdf>.

- Tilastokeskus (2022) Energian hinnat. <<https://www.stat.fi/tilasto/ehi>>. 5.9.2022.
- Toivanen, T., Vadén, T., Majava, A., Järvensivu, P., Lähde, V. & Eronen, J. T. (2021) Teollinen murros ekohyvinvointivaltiossa: Mitä teollisuuden vähähiilitiekartat kertovat suomalaisen kestävyysmurroksen edellytyksistä? *Alue ja Ympäristö* 50(2) 8–27. <https://doi.org/10.30663/ay.109701>
- Trainor, A.M., McDonald, R.I. & Fargione, J. (2016) Energy Sprawl Is the Largest Driver of Land Use Change in United States. *PLoS ONE* 11(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162269>
- Tuulivoimayhdistys (2020a) Tuulivoimaennusteita. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoimaennusteita>>. 5.9.2022.
- Tuulivoimayhdistys (2020b) Capacity factors of wind turbines installed in Finland 2011–2018, 28.4.2020. <<https://tuulivoimayhdistys.fi/en/ajankohtaista/publications/capacity-factors-2019>>. 5.9.2022.
- Tuulivoimayhdistys (2022) Tuulivoima Suomessa, 30.6.2022. <https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositalastot_1_6_2022.pdf>.
- Työ- ja elinkeinoministeriö (2020) Yhteenveto toimialojen vähähiilitiekartoista. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2020:52. <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-525-6>>.
- Utajärvi (2022) Ponteman tuulivoimapuiston osayleiskaava, 22.8.2022. <https://www.utajarvi.fi/sivu/fi/asuminen_ja_ymparisto/tuulivoima/ponteman_tuulivoimapuiston_osayleiskaava/>. 31.10.2022.
- Vaden, T., Lähde, V., Majava, A., Toivanen, T., Eronen, J. T. & Järvensivu, P. (2019) Onnistunut irtikykentä Suomessa? *Alue ja Ympäristö* 48(1) 3–13. <https://doi.org/10.30663/ay.76338>
- Vahvelainen, S. (2016) Materiaalivirtoja maasta taivaaseen. *Tieto & trendit* 22.3.2016. <<https://www.stat.fi/tietotrendit/artikkelit/2016/materiaalivirtoja-maasta-taivaaseen/>>. 21.10.2022.
- Violainen, P. (2017) Metsäteollisuudessa syntyvien biohajoavien jätteiden hyötykäyttötilanne ja -mahdollisuudet. Kaakkois-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Raportteja 54. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/145847/Raportteja_54_2017.pdf>.
- Wachs, E. & Engel, B. (2021) Land use for United States power generation: A critical review of existing metrics with suggestions for going forward. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 143(110911) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110911>
- YIT (2022) Tuulivoimapuisto, Lestijärvi. <<https://www.yit.fi/projektit/tuulivoimapuisto-lestijarvi>>. 31.10.2022.
- Ympäristöministeriö (2017) Finland's Seventh National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change 2017. Ministry of the Environment and Statistics Finland, Helsinki. <https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/fi_nc7_final.pdf>.
- Zhu, X-G., Long, S. & Ort, D.R. (2008) What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology* 19(2) 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.004>