

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 95/2024

Aurinkovoimaloiden rakentamisen vaikutuksia ilmastoon, metsiin ja metsätalouteen

Aurinkometsä -hankkeen loppuraportti

Timo Muhonen (toim.)



Aurinkovoimaloiden rakentamisen vaikutuksia ilmastoon, metsiin ja metsätalouteen

Aurinkometsä -hankkeen loppuraportti

Timo Muhonen (toim.)

Kirjoittajat:

Ashrafal Alam, Arto Haara, Musharof Khan, Harri Kilpeläinen, Ilkka Leinonen, Jussi Leppänen, Jukka-Pekka Myllykangas, Anne Tolvanen ja Antti Wall



POHJOIS-KARJALA *Maakuntaliitto*

Aurinkometsä -hanketta rahoitti Pohjois-Karjalan maakuntaliitto Alueellisten innovaatioiden ja kokeilujen käynnistäminen (AIKO) -määrärahalla.

Viittausohje:

Muhonen, T. (toim.) 2024. Aurinkovoimaloiden rakentamisen vaikutuksia ilmastoon, metsiin ja metsätalouteen : Aurinkometsä -hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 95/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 52 s.

Viittausohje yksittäiseen artikkeliin:

Haara, A. & Kilpeläinen, H. 2024. Puustolaskentaskenaariot. Julkaisussa: Muhonen, T. (toim.) 2024. Aurinkovoimaloiden rakentamisen vaikutuksia ilmastoon metsiin ja metsätalouteen : Aurinkometsä -hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 95/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s 10–22.



ISBN 978-952-380-988-8 (Verkojulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkojulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-988-8>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Ashraf Al Alam, Arto Haara, Musharof Khan, Harri Kilpeläinen, Ilkka Leinonen, Jussi Leppänen, Jukka-Pekka Myllykangas, Anne Tolvanen ja Antti Wall

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2024

Julkaisu vuosi: 2024

Kannen kuva: Microsoft kuvapankki

Tiivistelmä

Ashraful Alam¹, Arto Haara², Musharof Khan³, Harri Kilpeläinen², Ilkka Leinonen¹, Jussi Leppänen¹, Timo Muhonen², Jukka-Pekka Myllykangas¹, Anne Tolvanen⁴ ja Antti Wall⁵

¹ Luonnonvarakeskus, Helsinki

² Luonnonvarakeskus, Joensuu

³ Luonnonvarakeskus, Savonlinna

⁴ Luonnonvarakeskus, Oulu

⁵ Luonnonvarakeskus, Kokkola

Aurinkovoiman ilmastovaikutukset

Aurinkometsä -hankkeessa kahden case-tarkastelun (Paiholan ja Kyyrönsuon suunnittelualueet) ja asiantuntijatyön pohjalta arvioitiin aurinkovoimaloiden rakentamisen, siitä aiheutuvan maankäytön muutoksen sekä energiantuotannon vaikutuksia. Tarkastelu painottui erityisesti ilmastovaikutuksiin. Työn tuloksena esitellään elinkaariarviointiin (LCA) pohjautuva menetelmä, jonka avulla aurinkovoimalan rakentamisen kokonaisilmastovaikutukset arvioitiin. Sitä varten määritettiin alueille suunniteltujen aurinkovoimaloiden tuottaman sähkön elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt, joiden perusteella laskettiin aurinkosähkön kokonaispäästökerroin (kg CO₂e/MWh).

Puuston ja maaperän hiilivaraston muutokset laskettiin kahdessa eri skenaarioissa: 1. Alueelle rakennetaan aurinkovoimala ja 2. Business-as-usual eli nykyinen maankäyttö (metsätalous) jatkuu.

Tarkastelua varten päästöt jaettiin seuraaviin osa-alueisiin:

1. Voimalan rakentaminen ja käyttö

Voimalaitoksen kaikki elinkaariset päästöt jaettiin kahteen kategoriaan:

- a) Aurinkovoimalan materiaalit ja komponentit (aurinkopaneelien valmistus, invertteri, muuntaja, asennusrakenne, sähkötarvikkeet ja kaapelit)
- b) Kierrätettävien materiaalien käytöstä poisto (alumiini, elektroniikkaromu, jättekartonki ja polyeteeni, PVC, teräs ja rauta)

Päästökertoimen laskemista varten arvioitiin aurinkovoimalaitoksen elinikäinen (30 vuotta) sähköntuotanto, joka Paiholan tapauksessa on 1 500 GWh ja Kyyrönsuon tapauksessa 3 090 GWh.

2. Puuston hiilivaraston menetys maankäytön muutoksen seurauksena

Oletuksena on, että voimala-alueella oleva puusto poistetaan voimalan rakentamisen seurauksena ja hiilivaraston menetys arvioitiin puuston tilavuuden (m³) perusteella. Muunto- ja laajennuskertoimien (Luku 4.1.2. sivu 30) avulla puuston tilavuus muunnetaan hiilidioksidiksi (CO₂).

3. Maaperän hiilivaraston menetys maankäytön muutoksen seurauksena

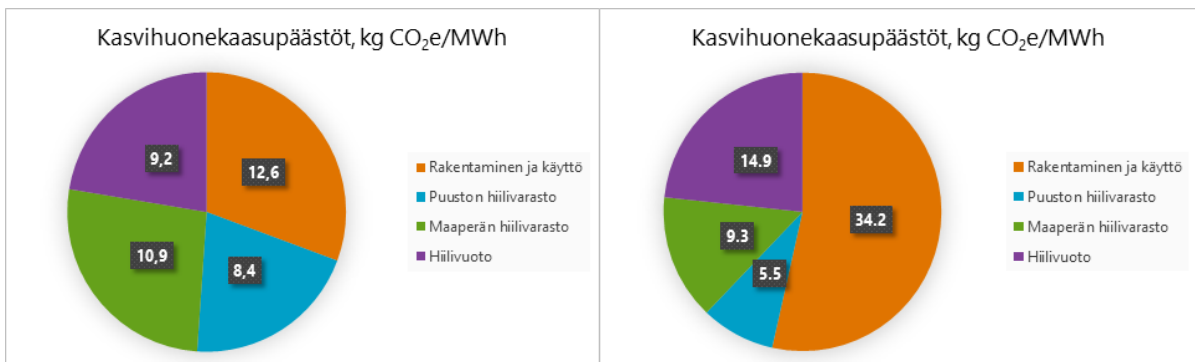
Maaperän hiilivaraston menetys arvioitiin maaperän hiilivaraston muutosten perusteella eri aikaskaalalla siirryttäessä metsätaloudesta aurinkovoimalaan. Aluksi "Business-as-usual" -tilanne, eli talousmetsän maaperän hiilivaraston kehitys mallinnettiin 100 vuoden ajalle. Sen jälkeen maaperän hiilivarasto mallinnettiin tilanteessa, jossa paikalle rakennetaan aurinkovoimala, ja hiilisyötteen päätyminen maaperään estyy. Näiden kahden prosessin välinen ero kertoo suoraan maaperän hiilivaraston muutoksen.

4. Hiilivuoto

Hiilivuodon riski eli mahdolliset epäsuorat maankäytön muutokset, on välttämätöntä ottaa huomioon energiaratkaisujen ja muiden maankäyttöön perustuvien toimenpiteiden ympäristövaikutusten tarkastelussa. Tässä tapauksessa hiilivuoto huomioitiin menetettyjen hakkuiden siirtymisenä alueelle, jossa hakkuita ei muuten suoritettaisi. Myös hiilivuodon osalta lähtöoletus oli, että maankäytön muutos on pysyvä, joten hakkuiden oletettiin myös pysyvästi siirtyvän muualle. Hakkuiden siirtymisen aiheuttama hiilivaraston menetys arvioitiin seuraavasti:

Hiilivuoto, MgCO₂ = (Potentiaalinen puuston hiilivarasto - Talousmetsän puuston hiilivarasto) + (Potentiaalinen maaperän hiilivarasto - Talousmetsän maaperän hiilivarasto)

Pienimmät päästöt syntyvät, kun alue on luonnostaan vähäpuustoinen (niukkaravinteinen) eli kasvupaikka on karu ja sen maa- tai metsätalouskäyttö on vähäistä, jolloin syntyy vähän hiilivuotoa. Turvemaiden osalta haitallisia vaikutuksia syntyy silloin, jos alueen vesitaloutta muutetaan niin, että päästöt lisääntyvät. Esimerkiksi ojittamattomia turvemaita ei kannata kuivata aurinkovoimalan rakentamisen takia.



Kuva 1. Aurinkovoimalan tuottamat elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt: Paihola (vasen), Kyyrönsuo (oikea).

Tulokset osoittavat, että aurinkovoimalla (Paihola 41,1 kg CO₂e/MWh, Kyyrönsuo 63,9 kg CO₂e/MWh), kuten muillakin fossiilittomilla energianlähteillä tuotetun sähkön kasvihuonekaasupäästöt ovat vain murto-osa fossiilisella energialla tuotetun sähkön päästöistä (esim. maakaasu, öljy, hiili 700–1 000 kg CO₂e/MWh). Tulosten perusteella on selvää, että aurinkovoima on yksi vähäpäästöisistä energiamuodoista siitä huolimatta, että maankäytön muutokset, mukaan lukien hiilivuoto, kasvattavat aurinkovoiman päästökerrointa. Tämän vuoksi

aurinkovoiman tuottama, fossiilisen energian korvaamisella saavutettava ilmastoehyöty on moninkertainen voimalan rakentamisen aiheuttamiin päästöihin verrattuna.

Aurinkovoima vs. metsätalous

Verrattaessa maa- ja metsätalousalueiden maankäyttöä aurinkosähkön tuotantoon yhteenvertaamalla tarkastelussa nousivat mm. seuraavat näkökohdat:

Aurinkovoimalalla on kolme erilaista maankäyttötarvetta: 1) rakennuspaikka (voimala-alue), 2) huoltotieyhteydet ja 3) sähkönsiirtoyhteydet sähköverkon sähköasemalle. Näistä vain voimala-alueen perustaminen perustuu puhtaasti vapaaehtoiseen sopimukseen maanomistajan kanssa. Voimala-alueen toimijalle muodostuu tie- ja sähkönsiirto-oikeudet, jotka muodostavat lunastuslain perusteella korvattavia tulonmenetyksiä ja käyttörajoitteita muille maanomistajille. Lunastuslaki on parhaillaan uudistumassa.

Pellot aurinkovoimala-alueena eivät vuokrattuina oikeuta viljelijätukiin, mutta hallintaoikeuden säilyttävillä sopimuksilla viljelijätukien saaminen on mahdollista. Metsissä saatetaan periä alueelle myönnettyjä metsätalouden tukia takaisin. Vuokratulot ovat sekä maatalousmaan että metsän osalta maataloustuloa, joka ilman maatalouden nettovarallisuutta on ansiotuloa.

Metsätaloudessa Kyyrönsuon (140 ha) tuoton arvio on ennen veroja 70–160 euroa/ha/vuosi ja Paiholan (55 ha) 230–280 euroa/ha/vuosi tulevien vuosikymmenien aikana. Ne vastaavat 3,3–3,5 prosenttia tuottoa ennen veroja metsäkiinteistön arvioidulle markkina-arvolle. Molempien tilojen markkina-arvot vastaavat suuruusluokaltaan noin yhden hehtaarin aurinkopaneeli-investointia.

Sähköntuottajan maanvuokrana mitattu maksukyky aurinkovoimalan maa-alueesta näyttäisi muodostuvan melko pienellä positiivisella riskillä noin kymmenkertaiseksi verrattuna metsätalouden tuottoon. Aurinkosähkön myyntihinnan vaihteluissa on lisääntyvää epävarmuutta aurinkosähkötuotannon kasvaessa. Vuokrataso on ilmeisesti toistaiseksi kilpaillut menestyksellä pellonvuokrien kanssa.

Ainakin osa aurinkosähkön tuottajista pyrkii ensisijaisesti ostamaan ja toissijaisesti vuokraamaan voimala-alueet maanomistajilta.

Monimuotoisuus

Aurinkovoiman monimuotoisuusvaikutuksista on toistaiseksi vain vähän tutkimustietoa, ja Suomesta se puuttuu kokonaan. Seuraavassa luetellaan aurinkovoiman rakentamisen vaikutuksia kansainvälisten tutkimusten pohjalta:

- Metsäympäristöjen häviäminen ja pirstoutuminen rakentamisen seurauksena: muutokset fyysisessä ympäristössä
- Mahdollinen aitaus aiheuttaa kulkuesteen monille maanisäkkäille
- Muutokset mikroilmastossa: paneelien aiheuttamat varjostuksen, lämpötilan ja kosteuden vaihtelut, jotka vaikuttavat mm. kasvillisuuteen, kukintaan ja pölytykseen.
- Jos linnut, jotka käyttävät vettä laskeutumisen- ja nousuympäristönä, erehtyvät luulemaan aurinkopaneelialueita vesiympäristönä, niiden törmäyskuolleisuus voi lisääntyä.
- Ekologinen ansa hyönteisille: paneelien heijastama polarisoitu valo voi erehdyttää jotkut vesihyönteiset munimaan paneeleihin, jolloin koko niiden jälkeläistö tuhoutuu.

Keinoja, joilla aurinkovoimaa ja monimuotoisuutta voidaan sovittaa yhteen:

- Sijainninohjaus: Aurinkovoimalat sijoitetaan alueille, jotka eivät ole monimuotoisuuden kannalta tärkeitä. Tällaisia alueita voivat olla maatalousmaat, teollisuusalueet tai jo ennestään heikentyneet ekosysteemit, joissa voimaloiden rakentaminen aiheuttaisi vähemmän häiriöitä. Metsäympäristöjä, joissa aurinkovoiman aiheuttamat muutokset ovat suurimmat, tulisi välttää.
- Alueen monikäyttö: aurinkopaneelien alla voidaan myös kasvattaa pölyttäjälajistoa suosivaa kasvillisuutta, mehiläistarhausta aurinkovoimakentille, normaalia korkeammat paneelirakenteet sallivat esimerkiksi lampaiden laiduntamisen paneelien alla.

Hiilikartta

Hankkeen yhtenä tavoitteena oli selvittää työkaluja, joilla voidaan arvioida maankäytön muutoksesta aiheutuvia ilmastovaikutuksia. Hankkeessa testattiin paikkatietopohjaista Kaavoittajan hiilikartta -työkalua, jonka tarkoituksena on tukea kuntia ja kaavoittajia arvioimaan kaavoituksessa tehtävien päätösten vaikutuksia hiilivarastoihin ja -nieluihin. Puuston hiilivaraston muutosten osalta tulokset olivat varsin hyvin linjassa Aurinkometsä -hankkeen laskelmien kanssa. Sen sijaan maaperän hiilivaraston muutosten osalta Hiilikartta- ja Aurinkometsä -laskelmien erot olivat suuremmat, mikä pääosin johtunee eri lähtöaineistoista, joita laskennoissa käytettiin.

Hiilikartan kehitystyö jatkuu edelleen ja keskeisimpiä tulevaisuuden kehityskohteita ovat niidenomaan uusiutuvan energian maankäyttövaikutusten arvioinnin parantaminen.

Asiasanat: aurinkoenergia, elinkaarianalyysi, hiilidioksidi, ilmasto, maankäyttö, metsämaa, monimuotoisuus, puusto, päästöt

Sisällys

1. Johdanto	9
2. Puustolaskentaskenaariot.....	10
2.1. Yleistä puustolaskelmista.....	10
2.2. Laskentamenetelmät ja -työkalut.....	12
2.2.1. Puustolaskentaskenaariot.....	12
2.2.2. Laskentamenetelmät.....	12
2.3. Case-tapausten kuvaukset ja tulokset.....	13
2.3.1. Laskenta-aineiston muodostaminen.....	13
2.3.2. Paiholan suunnitelma-alueen tulokset.....	15
2.3.3. Kyyrönsuon suunnitelma-alueen tulokset	17
2.4. Päätelmät.....	20
3. Aurinkovoimalan rakentamisen aiheuttama muutos maaperän kasvihuonekaasujen taseissa	23
3.1. Laskennan menetelmät	23
3.2. Tulokset	24
4. Aurinkovoimalan kokonaisilmastovaikutukset	27
4.1. Menetelmät.....	27
4.1.1. Voimalan rakentaminen ja käyttö.....	27
4.1.2. Puuston hiilivaraston menetys.....	28
4.1.3. Maaperän hiilivaraston menetys.....	29
4.1.4. Hiilivuoto	29
4.2. Tulokset	29
4.3. Johtopäätökset	30
5. Metsätalous vs. aurinkosähkön tuotanto	34
5.1. Maankäyttömuotojen hehtaariperusteinen vertailu	34
5.2. Hehtaarin metsätaloudellinen arvo	34
5.3. Aurinkovoimalan maankäyttötarve ja sähköntuotanto	37
5.4. Aurinkovoimalan kannattavuus maanvuokrana	39
5.5. Yhteenveto	44
Viitteet.....	45
6. Aurinkovoiman monimuotoisuusvaikutukset	47
6.1. Mikä on tiedon taso?.....	47
6.2. Vaikutukset monimuotoisuuteen.....	47

6.3. Miten voidaan sovittaa yhteen aurinkovoima ja monimuotoisuus?.....	48
7. Kaavoittajan hiilikartta – työkalu käytännön toimijoille.....	50
7.1. Tausta.....	50
7.2. Aineisto.....	50
7.3. Työkalun käyttö aurinkovoiman rakentamisen maankäytön muutosten arviointiin	51

1. Johdanto

Lähtökohtana aurinkovoimaloiden suunnittelussa ja rakentamisessa on ollut se, että ne tulisi ensisijaisesti sijoittaa jo rakennettujen alueiden yhteyteen, puuttomille alueille tai joutomaille lähelle olemassa olevia energiansiirtoverkkoja. Tällaisia alueita ovat esim. entiset turvetuotantoalueet. Kasvava kiinnostus aurinkovoimaloiden perustamiseen on johtanut siihen, että niitä on suunniteltu osin tai kokonaan metsäisille alueille. Näissä tilanteissa erityisesti maankäytön suunnittelusta vastaavilla ja maanomistajilla on noussut tarve saada tietoa ja tukea päätöksentekoon aurinkovoimaloiden perustamisen elinkaarisista vaikutuksista alueiden hiilitaseisiin, monimuotoisuuteen ja taloudelliseen kestävyYTEEN.

Aurinkometsä -hankkeessa kahden case-tarkastelun (Paiholan ja Kyyrönsuon suunnittelualueet) ja asiantuntijatyön pohjalta arvioitiin aurinkovoimaloiden rakentamisen ja siitä aiheutuvan maankäytön muutoksen sekä energiantuotannon vaikutuksia. Tarkastelu painottuu aurinkovoimaloiden rakentamisen ilmastovaikutuksiin. Sitä varten määritettiin alueille suunniteltujen aurinkovoimaloiden tuottaman sähkön elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt, joiden perusteella laskettiin aurinkosähkön kokonaispäästökerroin (kg CO₂e/MWh).

Työn tuloksena esitellään elinkaariarviointiin (LCA) pohjautuva menetelmä, jonka avulla aurinkovoimalan rakentamisen kokonaisilmastovaikutukset arvioidaan (Luku 4). Tarkastelua varten tarvittavat puuston ja maaperän hiilivaraston muutosten laskentamenetelmät ja laskennan tulokset eri skenaarioissa (1. aurinkovoimala ja 2. metsänkasvatus/nykyinen maankäyttö jatkuu) esitellään luvuissa 2 ja 3.

Ilmastovaikutusten lisäksi luvussa 5 pohditaan aurinkovoimalan rakentamista metsänomistajan näkökulmasta sekä tehtiin kirjallisuustarkastelu aurinkovoimaloiden rakentamisen vaikutuksista metsien monimuotoisuuteen (Luku 6).

Aurinkovoimalan rakentamisen ilmastovaikutusten laskeminen vaatii suunnittelualueen puuston ja maaperän hiilivarastomuutosten laskennan lisäksi myös tietoa aurinkovoimalan rakentamisen ja käytön aikaisista päästöistä sekä arvion aurinkoenergian tuotantomäärästä. Koko prosessin tiedonhankinta ja laskennat vaativat usein paljon resursseja ja osaamista. Hankkeen yhtenä tavoitteena oli selvittää työkaluja, joilla vaikutusarvioita voidaan tehdä. Luvussa 7 esitellään Kaavoittajan hiilikartta -työkalu, jota testattiin suunnittelualueiden puuston ja maaperän hiilivaraston muutosten arviointiin.

2. Puustolaskentaskenaariot

Arto Haara ja Harri Kilpeläinen

2.1. Yleistä puustolaskelmista

Mikäli suunnitellulla aurinkovoimala-alueella sijaitsee metsämaata, tarvitaan tietoa tämän alueen metsävaratiedoista, kasvupaikoista, hakkuumahdollisuuksista ja puuston kehityksestä hiililaskentaa, suunnittelua ja päätöksentekoa varten. Tällöin metsätalous tai mahdollisesti suojelakin nähdään vaihtoehtoisena maankäyttömuotona, johon alueen käyttöä aurinkovoimala-alueena verrataan. Metsävaratiedot sisältävät laskenta-aineistot voivat olla tarkkuudeltaan hyvinkin erilaisia. Yksinkertaisimmillaan voidaan käyttää pelkkää metsämaan kokonaispinta-alaa, joka saadaan esimerkiksi erilaisilla paikkatietomenetelmillä karttatiedoista rajaamalla. Tällöin käytetään keskimääräisiä hiilitaseen ja metsätalouden tuoton arvoja. Mikäli suunnittelualueelta halutaan tämän lisäksi erottaa turve- ja kangasmaiden osuudet, voidaan käyttää esim. GTK:n avointa suotyyppien paikkatietoaineistoa (GTK 2023) pinta-alojen määrittämisessä.

Metsäkeskuksen avoin metsävaratieto (Suomen Metsäkeskus 2024a) käsittää monenlaisia aineistoja, joita voidaan hyödyntää puustotietojen ja hakkuumahdollisuuksien laskenta-aineistona. Metsävarakuvioaineistot sisältävät kuviokohtaiset tiedot puustosta, kasvupaikasta ja ehdotetuista toimenpiteistä. Kuvioaineistot ovat saatavana avoimesti metsätietostandardin mukaisessa xml-formaatissa ja paikkatietoaineistoina. Kuvioaineistot sisältävät kuitenkin vain yksityismetsien metsävarakuviot. Lisäksi nämä tiedostot ovat saatavilla karttalehdittäin ja paikkatietoaineistot kunnittain, jolloin suunnittelualueen kuvioiden poimintaan niistä tarvitaan jokin apuohjelma tai paikkatieto-osaamista. Paikkatietoaineistoissa kuviotiedot ovat tietokanta-tauluissa, joista sitten käyttäjän on poimittava rajaamaltaan alueelta haluamansa tiedot. Metsäkeskuksen avoin hila-aineisto sisältää kohdealueiltaan tulkitut puustotiedot kaikilta metsäkuvioilta riippumatta siitä, ketkä ne omistavat (16 m *16 m hilat). Hilatiedoissa ei kuitenkaan näy elinympäristötietoa, joten se on tuotettava eri lähteistä yhdistämällä.

Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) koealat ovat puusto- ja kasvupaikkatiedoiltaan tarkkaan mitattuja maastokoealoja (Luonnonvarakeskus 2024a). Koealaverkko on kuitenkin niin harva, että VMI-aineisto soveltuu lähinnä aurinkovoimaloiden rakentamisen vaikutusten arviointiin vähintään maakuntatasolla. VMI-koealoja ja satelliittikuvainformaatiota hyödyntäen LUKEssa on tuotettu myös kunnittaisia metsävarakarttoja monilähdeinventoinnilla (MVMI). Kartat pyritään päivittämään kahden vuoden välein ja niitä voi katsella luokiteltuina Paikkatietoikkunassa (Maanmittauslaitos 2024. <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi>) ja ne löytyvät numerisessa muodossa LUKEn karttapalvelusta (Luonnonvarakeskus 2024b). Paikkatietoanalyysillä karttoja voi rajata suunnittelualueille ja saada näin puusto- ja kasvupaikkatiedot. MVMI-aineistosta voi muodostaa myös varsinaisia suunnittelun laskenta-aineistoja, mutta aineiston käsittely voi olla hyvinkin työteliästä.

Tarkat ja ajantasaiset metsävaratiedot voi myös saada omalla tai toimeksiannoksi annetulla inventoinnilla, mutta tällöin varsinkin maastoinventoinnin kustannukset voivat muodostua helposti hyvin suuriksi. Joissakin tapauksissa aurinkovoimalan suunnittelualueelta voi olla saatavilla metsänomistajakohmainen Metsään.fi-data, joka sisältää avoimen metsätiedon tiloittain, ja jos käytössä on esimerkiksi ForestKIT-metsäsuunnitteluohjelmisto, voi sillä nopeasti laskea ja raportoida puuston ja maaperän hiilivarastoja sekä puuston hiilitasetta (ForestKIT 2024).

Metsään.fi -dataa ei ole saatavilla isoilta julkisilta organisaatioilta kuten Metsähallitukselta, kunnilta ja kaupungeilta, mutta useimmiten löytyy kerätyt metsävaratiedot, joita sitten hallitaan jollain metsäsuunnitteluohjelmistolla kuten ForestKIT ja Metsähallituksella metsävara- ja suunnittelujärjestelmä Silvia.

Aurinkovoimala-alueen suunnitteluvaiheessa tarvitaan tietoa päätöksentekoa varten puuston hakkuista ja maaperän hiilivarastojen ja -nielujen muutoksista johtuvista päästöistä. Puuston hiililaskelmat eri aurinkovoimalahankkeissa ovat olleet hyvin eritasoisia. Kalajoen ja Alavieskan alueelle suunnitellun Marjanevan aurinkovoimalahankkeen ympäristövaikutusten arvioinnin (YVA) tarvehankintahakemuksessa arvioitiin vähäisiksi ilman mitään arviointia (Ramboll 2023). Metsäkeskuksen metsävaratietoja hyödynnettiin lähinnä metsien ja turvemaiden kartoituksessa sekä kasvillisuuden ja luontotyyppien inventoinnissa. Ilmatar Energy Oy:n YVA-selvityksessä aurinkovoimalahankkeesta Alajärven kaupungin ja Kyyjärven kunnan alueelle kasvihuonekaasuvaikutukset eri maankäyttömuodoissa (voimala, talousmetsä, suojelu) laskettiin käyttämällä Satakunnan keskimääräisiä puusto- ja hakkuutietoja (Suomen ympäristökeskus 2024). Metsäkeskuksen kuviotietoja hyödynnettiin maaperän hiilivaraston muutoksen laskennassa, missä suunnittelualueet luokiteltiin kivennäismaan eri luokkiin ja turvemaiden turvepeltoihin ja suotyyppeihin. Lisäksi Metsäkeskuksen luontoaineistoja (Metsäkeskus 2024b) hyödynnettiin arvokkaiden kasvillisuuskuvioiden kartoituksessa.

Sweco Finland Oy:n Kristiinankaupungin aurinkovoimalan suunnittelutarvehakemuksessa puuston poiston vaikutukset hiilinieluun arvioitiin hankkeesta poistuvan puuston ja sen hiilen sitomispotentiaalin määrä (Wolfram 2023). Arvioinnissa hyödynnettiin Corine Land Cover (2018) maanpeiteaineistoa sekä Suomen ympäristökeskuksen puunkäytön hiililaskuria (Niemi & Soimakallio 2021). Poistuvan puuston tilavuus arvioitiin perustuen Luken (VMI13 2019-2020) maakuntakohtaiseen puuston keskitilavuuteen Pohjanmaan metsämaalla. Kosken kunnan alueella sijaitsevan Verhonkulman aurinkovoimalahankkeen ympäristöselvityksessä vaikutukset metsien hiilinieluun ja varastoon huomioitiin laskemalla hankkeessa poistuvan puuston ja sen hiilensidontapotentiaalin määrä (Kumpula ym. 2023). Metsäalueen lähtöaineistona käytettiin Corine Land Cover 2018 maanpeiteluokkia ja Varsinais-Suomen keskimääräisiä alueellisia metsävaratietoja.

Huittisten aurinkovoimalan kasvihuonekaasuvaikutusten selvityksessä kasvupaikkatietoja käytettiin maaperän hiilivaraston muutoksen arvioinnissa (Klemola 2022). Turvemaat luokiteltiin edelleen suotyyppeihin. Alueen tunteva metsäalan ammattilainen arvioi alueen puukuutiomäärät, mutta hiililaselaskelmissa käytettiin kuitenkin Satakunnan keskimääräisiä puustoarvoja. Puuston poistamisen, talousmetsähakkuiden ja maaperän päästöjen arvioinnissa käytettiin VMI-aineiston keskimääräisiä tunnuksia (mm. vuotuinen kasvu, keskitilavuus, hakkuut, luonnollinen poistuma) Satakunnan alueelta. Lisäksi kasvillisuuden inventoinnissa hyödynnettiin mm. Metsäkeskuksen erityisen tärkeiden elinympäristökuvioiden paikkatietoaineistoa.

Tämän raportin toisena kohteena olevan Kyyrönsuon suunnittelualueen puuhakkuiden vuoksi menetettävää hiilinielua arvioitiin puolestaan Metsäkeskuksen avointen metsävaratietojen perusteella (Forus 2024). Samoin Lepästensuon aurinkovoimalan hiililaselävityksessä käytettiin puuhakkuiden vuoksi menetettävän hiilinielun sekä hakattavan puuston menetetyn hiilivaraston arvioinnissa Metsäkeskuksen avoimia metsävaratietoja (Rauta 2023).

Näyttää siltä, että metsäisten suunnittelukohteiden osalta lupaviranomaiset vaativat yhä enenevässä määrin suunniteltujen hankkeiden vaikutusten arviointia hiilitaseisiin ennen

varsinaista päätöksentekoa, vaikka yleensä ei vielä edellytetäkään varsinaista YVA-menettelyä. Esimerkiksi Silokallion aurinkovoimahankkeen alustavan hakemuksen käsittelyssä ELY-keskuksesta edellytettiin ilmastotavoitteiden toteutumisen vaikutusten arviointia (Varsinais-Suomen ELY-keskus 2024a). Samoin Karvialle sijoittuvan Rannankylän aurinkoenergiaprojektin jatko-suunnittelussa ELY-keskus katsoi, että jatkosuunnittelussa on tarpeellista arvioida määrällisesti ja laadullisesti hankkeen ilmastopäästöjä (Varsinais-Suomen ELY-keskus 2024b).

2.2. Laskentamenetelmät ja -työkalut

2.2.1. Puustolaskentaskenaariot

Aurinkometsä -hankkeen Paiholan ja Kyyrönsuon suunnitelma-alueiden puustotiedot laskettiin kahdessa skenaariovaihtoehdossa. Skenaariossa 1 suunnitelma-alueille rakennetaan aurinkovoimalat ja kaikki alueilla oleva puusto poistetaan laskennan aloitusvuonna vuonna 2024. Koska alueet siirtyvät pois metsätaloukskäytöstä, puuston kehitystä ei arvioitu Aurinkovoimala-skenaariossa vuoden 2024 jälkeiselle ajanjaksolle.

Skenaariossa 2 oletettiin, ettei aurinkovoimaloita rakenneta suunnitelma-alueille ja alueilla metsätaloukskäyttö jatkuu laskelmien keston ajan. Tässä Metsänkasvatus-skenaariossa alueiden metsiä käsitellään puuntuotannollisesti kestävänsä metsäsuunnitelman mukaan. Laskelma-alueena tavoitteena suurin mahdollinen nettotulo 4 prosentin laskentakorolla, kun puuston tilavuuden, metsän tuottoarvon, hakkuukertymien ja nettotulojen ei oleteta pienenevän laskennan aikana.

2.2.2. Laskentamenetelmät

Puustotiedot laskettiin MELA2016-ohjelmistolla (Hirvelä ym. 2017) Pohjois-Karjalan alueelle laadittujen MELA Tulospalvelu 2023 -laskelmien (Luonnonvarakeskus 2023) mukaisin määrityksin, mm. kasvun laskennan, metsänkäsittelytoimenpiteiden ja hintatietojen osalta. Aurinkovoimala-skenaariossa laskettiin vuoden 2024 mukaiset puustotiedot sekä hakkuista saatavat nettotulot ja kertymät, kun kaikki puusto poistetaan aurinkovoimala-alueilta. Metsänkasvatus-skenaario laadittiin ajanjaksolle 2024–2124, joka sisälsi ensimmäiset kahdeksan 10 vuoden pituisia laskelmakautta ja viimeisen 20 vuoden pituisen laskelmakauden. Keskeiset puuston laskentaskenaarioiden tulokset esitetään tässä raportissa 30 vuoden pituiselle ajanjaksolle 2024–2054.

Laskennassa metsänkäsittelytoimenpiteet perustuvat Tapion metsänhoitosuositukseen 2019 (Äijälä ym. 2019). Mahdollisia toimenpiteitä olivat aines- ja energiapuun korjuuta sisältävät kasvatus- ja uudistushakkuut jaksollisen kasvatuksen mukaan, kunnostusojitukset (hakkuiden yhteydessä) ja taimikonhoito. Uudistamishakkuun jälkeen toteutettiin uudistusalan raivaus ja maan pinnanmuokkaus sekä avohakkuun yhteydessä myös metsänviljely.

Laskennassa metsikkökuvioilla olivat mahdollisia puuston, kasvupaikan ja käytönrajoituksen mukaiset metsänkäsittelytoimenpiteet. Metsänkäsittely oli mahdollista vain puuntuotannon metsämaalla. Kitu- ja joutomaalla sekä puuntuotannon ulkopuolella olevalla metsämaalla ei sallittu mitään metsänkäsittelyä.

Metsätalous-skenaariossa osalta puustotietojen laskennassa oletettiin, että metsien käsittelymenetelmissä ei tapahdu muutoksia laskennan aikana, laajoja metsätuhoja ei esiinny eikä

ilmaston oleteta muuttuvan laskennan aikana. Myöskään alueiden maankäytön ei oletettu muuttuvan vuoden 2024 jälkeen, kuten esimerkiksi uusia suojelualueita ei perustettaisi eikä metsäkatoa esiintyisi.

2.3. Case-tapausten kuvaukset ja tulokset

2.3.1. Laskenta-aineiston muodostaminen

Puustolaskennan lähtöaineistot ovat peräisin Metsäkeskuksen avoimesta metsävara -tietoa-ineistosta (tiedot haettu 2/2024). Avoin metsävaratieto koostuu toimenpidetarpeiltaan, kasvu-paikaltaan ja puustoltaan yhtenäisistä metsän alueista, ns. metsikkökuvioista, metsätiloittain. Metsälain erityisen tärkeät elinympäristöt sekä muut tiedossa olevat luontoarvot ovat aineis-toissa mukana, mikäli niistä tietoja on julkisesti saatavilla. Aineistojen rajauksessa otetaan huomioon myös muista saatavilla olevista lähteistä saadut käyttörajoitustiedot.

Paiholan suunnitelma-alue sijaitsee kokonaan yhden metsätilan alueella. Kyyrönsuon alue käsittää kymmenkunta erillistä metsätilaa joko kokonaan tai osittain. Puustotiedot laskettiin vain aurinkovoimaloiden suunnitelma-alueille, jonka vuoksi alueisiin kuuluvien metsätilojen ulko-puolelle jäivät osat poistettiin laskenta-aineistosta. Lisäksi puustotietoja laskettaessa kum-paakin aurinkovoimalan suunnitelma-aluetta käsiteltiin yhtenä kokonaisuutena, eikä suunnitelmia laadittu metsätiloittain.

Paiholan aurinkovoimalan suunnitelma-alue on kooltaan 55,5 hehtaaria ja kuuluu kokonai-suudessaan metsätalousmaahan (Taulukko 1). Suunnitelma-alueen kuviot sijaitsevat koko-naan metsämaalla, sillä kitu- ja joutomaita ei alueella ole. Suurin osa alueesta on kivennäis-maata, sillä vain 1,4 hehtaaria on ojitettua turvemaata (Taulukko 2).

Kyyrönsuon 141,0 hehtaarin kokoiseen suunnitelma-alueeseen kuuluu 111,4 hehtaaria metsä-talousmaata, 1,0 hehtaaria viljelysmaata ja 28,6 hehtaaria entistä turvetuotantoaluetta (Tau-lukko 1). Aurinkovoimala-skenaariossa metsätalousmaan kokonaispinta-ala on 111,4 hehtaa-ria, josta 54,5 hehtaaria on kivennäismaata, 9,1 hehtaaria ojittamatonta turvemaata ja 47,8 hehtaaria ojitettua turvemaata (Taulukko 2). Metsämaata on kaikkiaan 106,9 hehtaaria ja jou-tomaata 4,5 hehtaaria. Metsänkasvatus-skenaariossa 28,6 hehtaaria entisestä turvetuotanto-alueesta oletettiin siirrettävän metsätalousmaaksi, jonka takia metsätalousmaan kokonais-pinta-alaksi muodostui Metsäkasvatus -skenaariossa 140,0 hehtaaria (Taulukko 2). Siirretystä alueesta 26,0 hehtaaria kuului metsämaahan, joka oletettiin metsitettävän vuonna 2024. Lo-pput 2,6 hehtaaria oletettiin heikkotuottoiseksi joutomaaksi, jolle ei kohdistettu laskennassa metsätaloustoimia.

Aurinkovoimaloiden suunnitelma-alueiden metsikkökuvioilla ei ollut tiedossa metsien uudista-miseen tai muuhun metsänkäsittelyyn liittyviä rajoituksia. Puustotiedot laskettiin skenaarioissa metsämaalle. Aineistotietojen mukaan kitumaita ei suunnitelma-alueilla ole, eikä puustotie-toja laskettu joutomaille.

Taulukko 1. Aurinkovoimalasuunnitelma-alueiden pinta-alat (ha) maaluokittain puustotietojen laskentaskenaarioissa. Puustotiedot laskettiin Aurinkovoimala-skenaariossa vuodelle 2024 ja Metsänkasvatus-skenaariossa vuosille 2024–2124.

Maaluokka	Paihola	Kyyrönsuo	
	Aurinkovoimala- ja metsänkasvatusskenaariot	Aurinkovoimala-skenaario	Metsänkasvatus-skenaario
Metsätalousmaa	55,5	111,4	140,0
Viljelysmaa	0,0	1,0	1,0
Entinen turvetuotanto)	0,0	28,6	0,0
Kaikki maaluokat	55,5	141,0	141,0

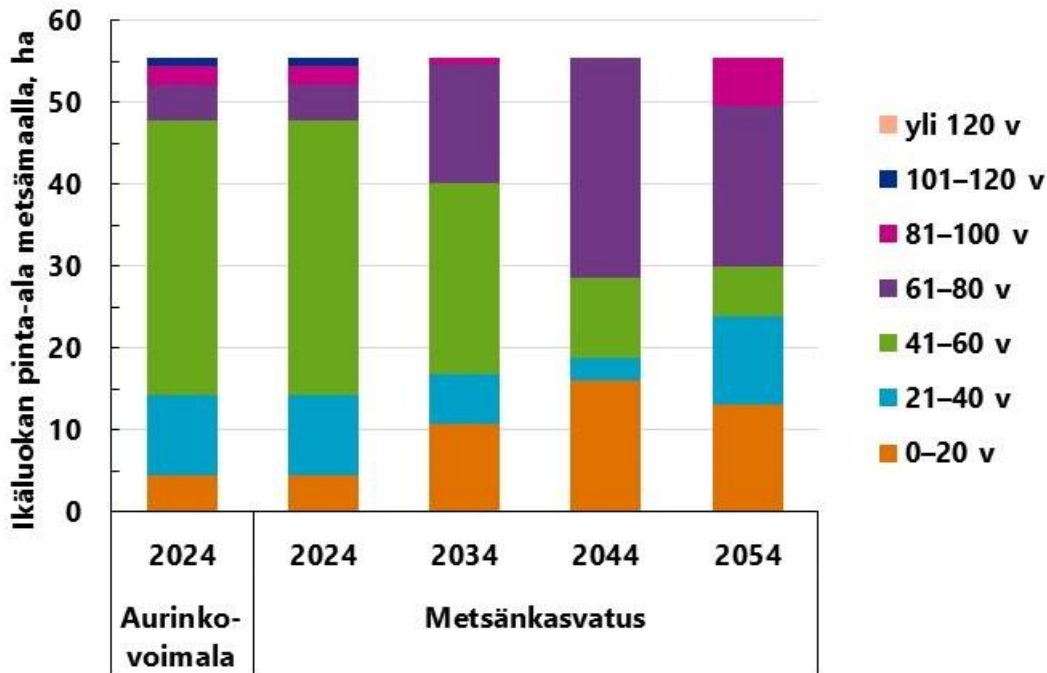
¹⁾ Kyyrönsuon alueella 28,6 hehtaaria entistä turvetuotantoaluetta siirrettiin Metsänkasvatus -skenaariossa metsätalousmaaksi.

Taulukko 2. Paiholan ja Kyyrönsuon aurinkovoimaloiden suunnitelma-alueiden pinta-alat (ha) maaluokittain ja kasvupaikoittain puustotietojen laskentaskenaarioissa. Kitumaalla sijaitsevia metsikkökuvioita ei suunnitelma-alueilla ollut.

Kasvupaikka	Aurinkovoimala-skenaario 2024			Metsänkasvatus-skenaario 2024–2124		
	Maaluokka			Maaluokka		
	Metsämaa	Jouto- maa	Yht.	Metsä- maa	Jouto- maa	Yht.
	Paiholan alue					
Kivennäismaa	54,1	0,0	55,1	54,1	0,0	55,1
Turvemaa	1,4	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0
ojittamaton	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ojitettu	1,4	0,0	1,4	1,4	0,0	1,4
Kaikki kasvupaikat	55,5	0,0	55,5	55,5	0,0	55,5
	Kyyrönsuon alue					
Kivennäismaa	54,5	0,0	54,5	54,5	0,0	54,5
Turvemaa	52,4	4,5	56,9	78,4	7,1	85,5
ojittamaton	9,1	0,0	9,1	9,1	0,0	9,1
ojitettu	43,3	4,5	47,8	69,3	7,1	76,4
josta entinen turvetuotantoalue	-	-	-	26,0	2,6	28,6
Kaikki kasvupaikat	106,9	4,5	111,4	132,9	7,1	140,0

2.3.2. Paiholan suunnitelma-alueen tulokset

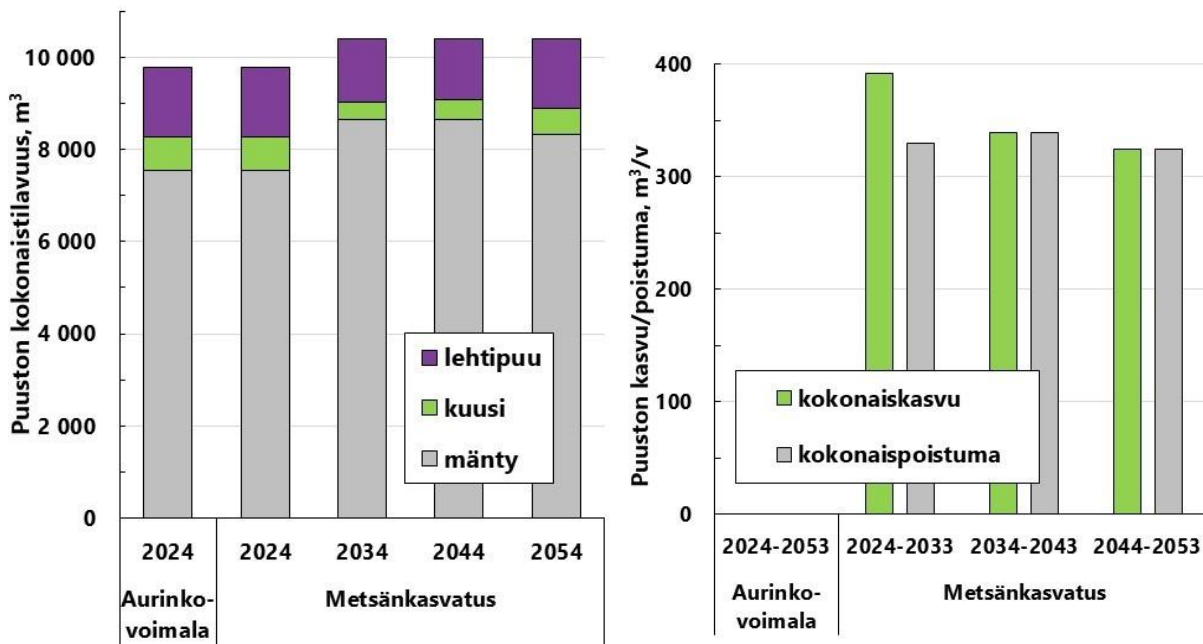
Paiholan suunnitelma-alue sijaitsee lähes kokonaan kangasmaalla, sillä vain 2,5 prosenttia pinta-alasta on ojitettua turvemaata (Taulukko 2). Metsien rakenne painottuu alkutilanteessa vuonna 2024 varttuneisiin kasvatusmetsiin (Kuva 2). Yli kaksi kolmannesta metsämaan 55,5 hehtaarin kokonaispinta-alasta kuuluu ikäluokkiin 41–80 vuotta (pinta-alana 37,3 hehtaaria). Metsikön keski-ikältään näitä nuorempien metsien osuus metsämaan kokonaispinta-alasta on neljäsos (pinta-alana 14,3 hehtaaria) ja vanhempien vain 6 prosenttia (pinta-alana 3,3 hehtaaria).



Kuva 2. Puuston ikäluokittaiset pinta-alat (ha) metsämaalla lasketuissa skenaarioissa ajanjaksolla 2024–2054 Paiholan suunnitelma-alueella.

Paiholan alueella puuston runkotilavuus on vuonna 2024 lähes 9 800 kuutiometriä, mikä vastaa 176 kuutiometrin hehtaarikohtaista keskitilavuutta. Runkotilavuudesta 77 prosenttia on mäntyä, 7 prosenttia kuusta ja 16 prosenttia lehtipuuta (Kuva 3). Kun Aurinkovoimala-skenaariossa suunnitelma-alueella tehdään avohakkuu vuonna 2024, hakkuualalta saadaan lähes 9 500 kuutiometriä tukki-, kuitu- ja energiarunkopuiksi kelpavaa runkopuuta (Kuva 4). Kolmannes tästä hakkuukertymästä on tukkipuuta ja loput kaksi kolmannesta joko kuitu- tai energiarunkopuuta.

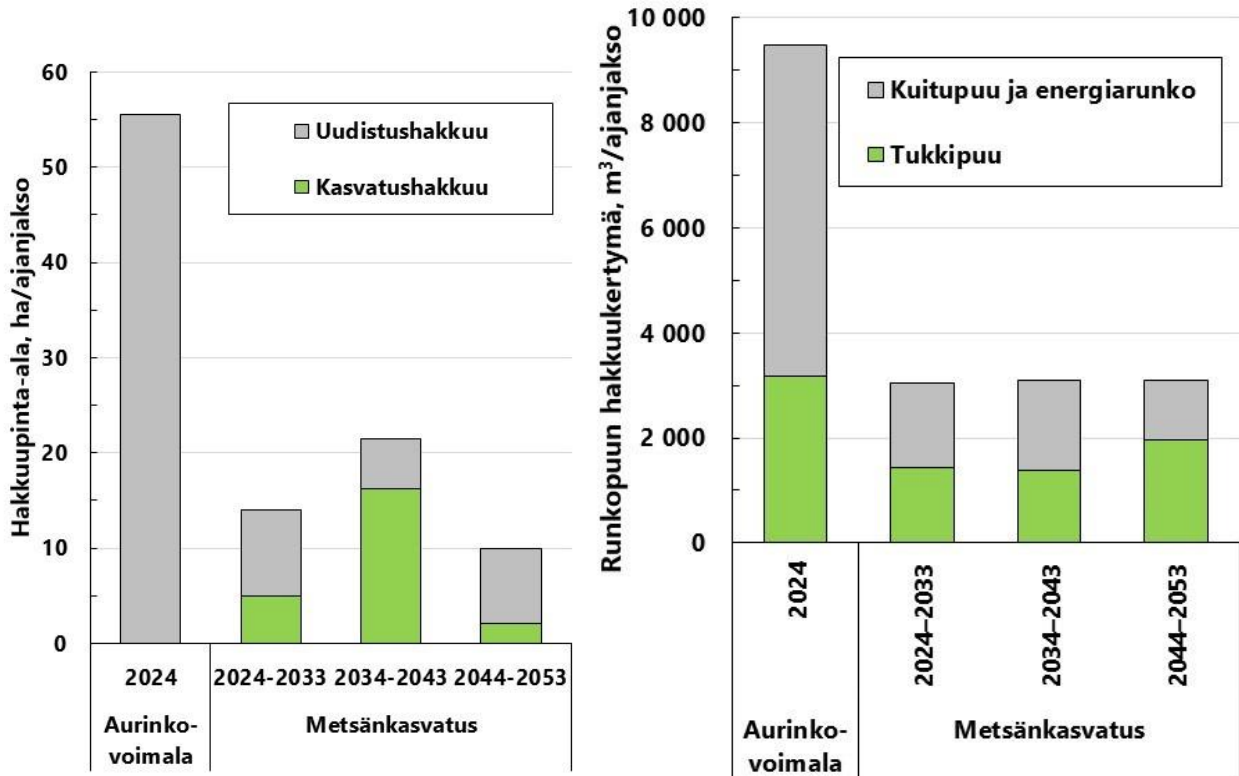
Metsänkasvatus-skenaariossa runkopuun hakkuukertymä on kullakin kymmenvuotiskaudella miltei samansuuruinen, hieman yli 3 000 kuutiometriä, josta tukkipuukertymää on alle puolet kahdella ensimmäisellä kaudella (vuosina 2024–2033 ja 2034–2043) ja lähes kaksi kolmannesta kolmannella kaudella (vuosina 2044–2053) (Kuva 4). Hakkuukertymien pysyessä samalla tasolla, uudistushakkuiden väheneminen lisää merkittävästi kokonaishakkuupinta-alaa toisella kaudella ensimmäiseen ja kolmanteen kauteen verrattuna. Metsien rakenteella onkin olennainen vaikutus hakkuiden ajoitukseen ja kohdistumiseen metsikkötasolla.



Kuva 3. Runkopuun kokonaistilavuudet (m³) puulajeittain (vasemmalla) sekä vuotuiset kokonaiskasvut ja -poistumat (m³/vuosi) (oikealla) lasketuissa skenaarioissa ajanjaksolla 2024–2054 Paiholan suunnitelma-alueella.

Metsänkasvatus-skenaariossa puuston rakenne muuttuu ajanjaksolla 2034–2054 siten, että keski-ikältään 41–60-vuotiaiden metsien osuus metsämaan kokonaispinta-alasta vähenee 60 prosentista 11 prosenttiin ja yli 60-vuotiaiden metsien osuus nousee puolestaan 14 prosentista lähes puoleen metsämaan pinta-alasta (Kuva 2.). Lisäksi uudistushakkuiden takia myös nuorimpien (0–20 vuotta) metsien pinta-alaosuus vuosina 2034–2054 on alkutilannetta suurempi.

Puuston kokonaistilavuus nousee 10400 kuutiometriin vuoteen 2034 mennessä keskitilavuuden ollessa 187 kuutiometriä hehtaarilla (Kuva 3). Ajanjaksolla 2034–2054 kokonaistilavuus pysyy samansuuruisena. Puuston kokonaiskasvu (392 m³/v) on ensimmäisellä kaudella selvästi kokonaispoistumaa (330 m³/v) suurempaa, mutta ensimmäisen kauden jälkeen kokonaiskasvu putoaa kokonaispoistuman tasolle, alle 350 kuutiometriin vuodessa (Kuva 4). Puuston kokonaispoistuma sisältää hakkuissa ja metsänhoitotoimissa kaadetun sekä luonnonpoistumana kuolleen runkopuun. Puuston vuotuinen hehtaarikohtainen keskikasvu on yli 7 kuutiometriä ensimmäisen kymmenvuotiskauden aikana, mutta jää 6 kuutiometrin tasolle seuraavien kahden laskelmakauden aikana.

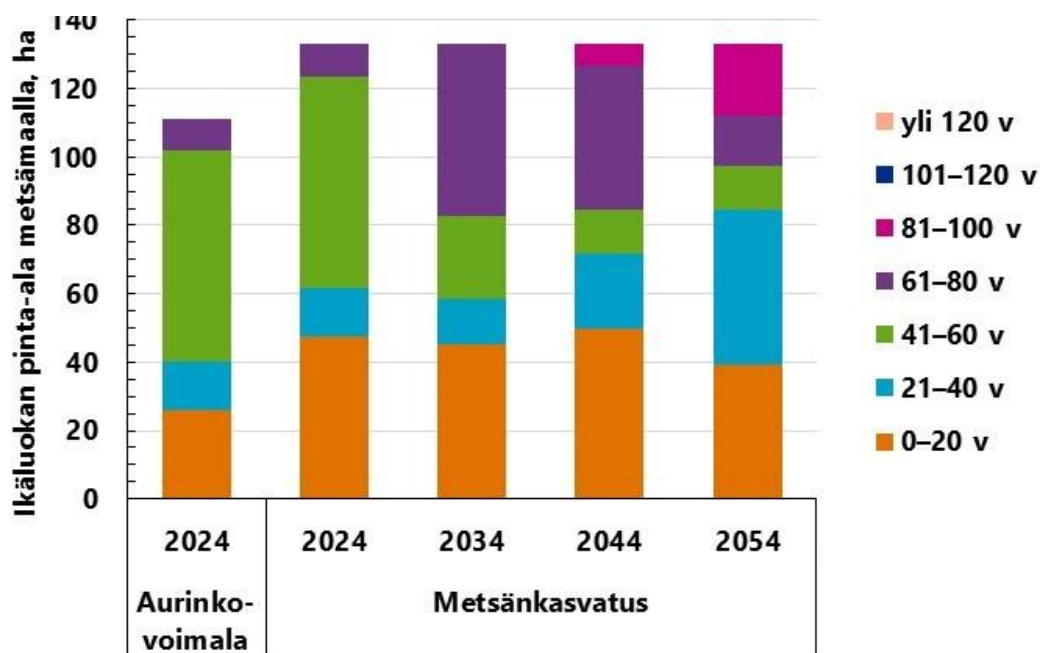


Kuva 4. Uudistus- ja kasvatushakkuiden pinta-alat (ha/ajanjakso) (vasemmalla) ja runkopuun hakkuukertymät ($\text{m}^3/\text{ajanjakso}$) (oikealla) lasketuissa skenaarioissa ajanjaksolla 2024–2053 Paiholan suunnitelma-alueella.

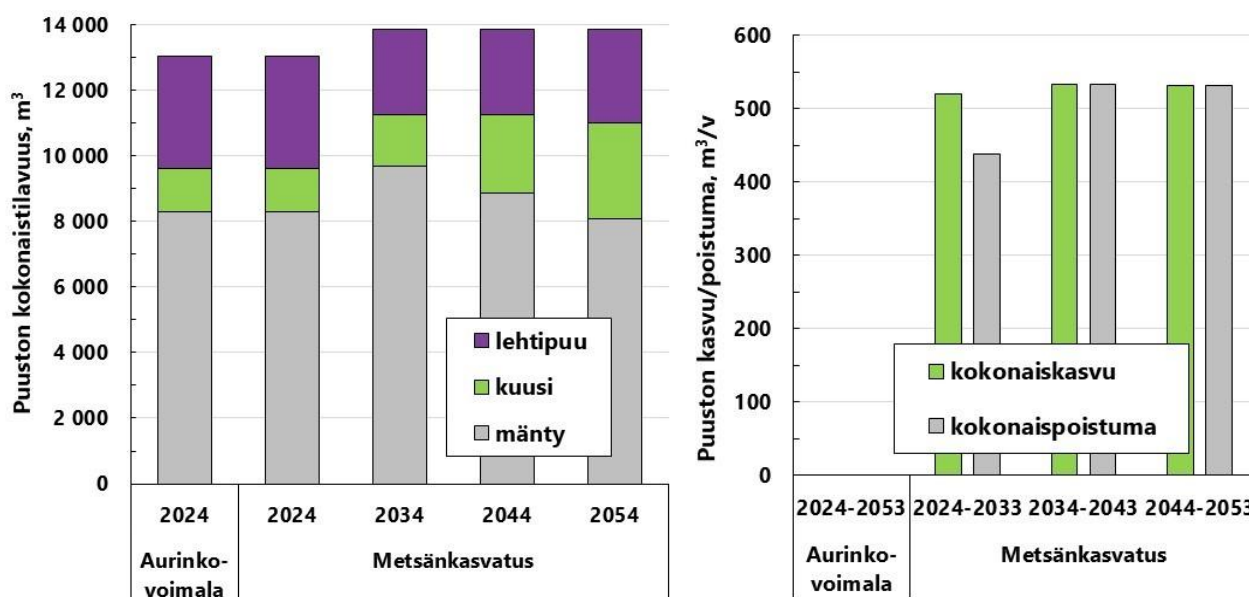
2.3.3. Kyyrönsuon suunnitelma-alueen tulokset

Kyyrönsuon suunnitelma-alueella yli puolet metsä- ja joutomaan kokonaispinta-alasta on ojitettua tai ojittamatonta turvemaata. Myös alueen metsien ikärakenne vuonna 2024 poikkeaa Paiholan alueesta nuorten metsien merkittävien pinta-alaosuuden vuoksi (Kuva 5). Metsämaan 106,9 hehtaarin kokonaispinta-alasta kolmannes on 0–40-vuotiaita (pinta-ala 35,6 hehtaaria) ja kaksi kolmannesta 41–80-vuotiaita metsiä (pinta-alana 71,4 hehtaaria). Yli 80-vuotiaita metsiä ei ole suunnitelma-alueella laskennan aloitusvuonna 2024 lainkaan. Metsänkasvatus-skenaariossa metsämaan kokonaispinta-ala lisääntyy Aurinkovoimala-skenaariosta, koska 26 hehtaaria entistä turvetuotantoaluetta metsitetään vuonna 2024. Tämä lisää ennestään nuorten 0–40-vuotiaiden metsien pinta-alaosuutta lähes puoleen metsämaan kokonaispinta-alasta vuonna 2024.

Kyyrönsuon alueella puuston runkotilavuus on vuonna 2024 yli 13 000 kuutiometriä, josta 64 prosenttia on mäntyjen, 10 prosenttia kuusten ja 26 prosenttia lehtipuiden tilavuutta (Kuva 6). Kun Aurinkovoimala-skenaariossa suunnitelma-alueella suoritetaan avohakkuu vuonna 2024, hakkuualalta saadaan yli 12 500 kuutiometriä tukki-, kuitu- ja energiarunkopuiksi kelpaavaa runkopuuta. Runkopuun hakkuukertymästä alle 3 000 kuutiometriä on tukkipuuta ja lähes 10 000 kuutiometriä kuitu- ja energiarunkopuuta.



Kuva 5. Puuston ikäluokittaiset pinta-alat (ha) metsämaalla lasketuissa skenaarioissa 2024–2054 Kyyrönsuon suunnitelma-alueella. Metsänkasvatus -skenaariossa metsämaan ala lisään-tyy 26 hehtaarilla entistä turvetuotantoaluetta, joka metsitetään vuonna 2024.

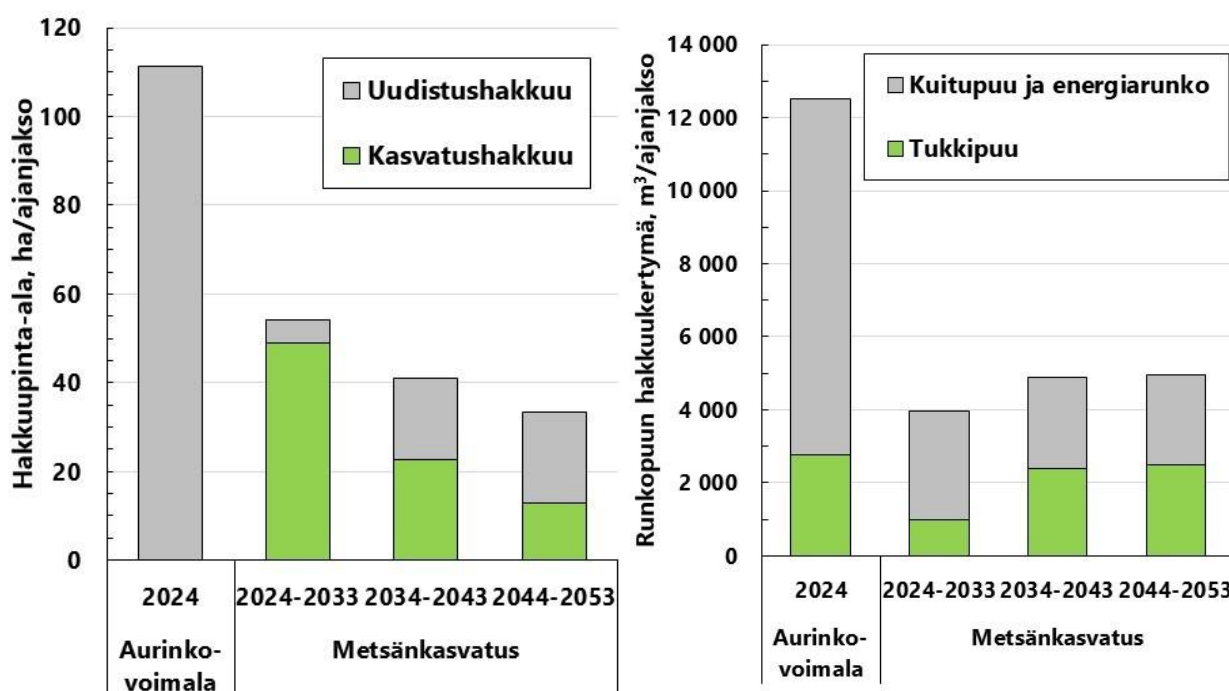


Kuva 6. Runkopuun kokonaistilavuudet (m³) puulajeittain (vasemmalla) sekä vuotuiset kokonaiskasvut ja -poistumat (m³/vuosi) (oikealla) lasketuissa skenaarioissa ajanjaksolla 2024–2054 Kyyrönsuon suunnitelma-alueella.

Metsänkasvatus -skenaariossa keski-ikältään 41–60-vuotiaiden metsien osuus on lähes puolet metsämaan kokonaispinta-alasta vuonna 2024, mutta näiden metsien osuus vähenee vajaa-seen kymmenesosaan vuoteen 2054 mennessä (Kuva 5). Yli 60-vuotiaiden metsien osuus metsämaan kokonaispinta-alasta lisääntyykin merkittävästi, 7 prosentista 38 prosenttiin, vuo-sien 2024–2034 aikana, mutta tämän jälkeen yli 60-vuotiaiden metsien osuus vähenee reiluun neljännekseen metsämaan kokonaispinta-alasta vuoteen 2054 mennessä. Nuorimpien 0–20-

vuotiaiden metsien osuudet pysyvät melko tasaisena, noin kolmanneksena metsämaan pinta-alasta, ajanjakson 2024–2054 aikana, mutta näitä vanhempien, 21–40-vuotiaiden metsien pinta-alaosuus nousee kymmenesosasta noin kolmannekseen vastaavalla tarkastelujaksolla.

Nuorten metsien merkittävästä pinta-alasta takia hakkuut painottuvat ensimmäisellä kaudella (vuosina 2024–2033) harvennushakkuisiin. Kun ensimmäisellä kaudella uudistushakkuiden kokonaispinta-ala on yli 5 hehtaaria, toisella (vuosina 2034–2043) ja kolmannella kaudella (vuosina 2044–2053) uudistushakkuiden kokonaispinta-alat nousevat kausittain 20 hehtaarin tasolle (Kuva 6). Runkopuun hakkuukertymä ensimmäisellä kaudella on lähes 4 000 kuutiometriä, josta noin neljännes on tukkipuuta. Uudistushakkuiden lisääntyessä toisella ja kolmannella kaudella runkopuun hakkuukertymä nousee 5 000 kuutiometrin tasolle ja tukkipuun osuuskin noin puoleen runkopuun hakkuukertymästä.



Kuva 7. Runkopuun kokonaistilavuudet (m^3) puulajeittain (vasemmalla) sekä vuosittaiset kokonaiskasvut ja -poistumat ($m^3/vuosi$) (oikealla) lasketuissa skenaarioissa ajanjaksolla 2024–2054 Kyyrönsuon suunnitelma-alueella.

Kyyrönsuon alueella puuston kokonaistilavuus on laskelmien alkutilanteessa yli 13 000 kuutiometriä (Kuva 6). Tämä vastaa 93 kuutiometrin hehtaarikohtaista keskitilavuutta Metsänkasvatus -skenaariossa, jossa 28,6 hehtaaria entistä turvetuotantoaluetta otetaan metsätalouksikäyttöön. Koska puuston kokonaiskasvu on ($520 m^3/v$) ensimmäisellä kaudella (vuosina 2024–2033) selvästi puuston kokonaispoistumaa ($437 m^3/v$) suurempaa, puuston kokonaistilavuus nousee lähes 14 000 kuutiometriin vuoteen 2034 mennessä puuston keskitilavuuden ollessa tuolloin 99 kuutiometriä hehtaarilla. Hakkuukertymien noustessa toisella ja kolmannella kaudella puuston kokonaispoistuma saavuttaa kokonaiskasvun tason (yli $530 m^3/v$), minkä takia puuston runkotilavuus pysyykin samansuuruisena ajanjakson 2034–2054 aikana (Kuva 6). Puuston hehtaarikohtainen keskikasvu on lähes vakiotasolla, hieman alle 4 kuutiometrissä vuodessa, koko tarkastelujaksolla 2024–2053.

2.4. Päätelmät

Aurinkovoimalan suunnitteluvaiheen alkupuolella on kartoitettava suunnittelualueella sijaitsevan metsämaan osalta, mistä ja minkä tasoisia puustotietoja on saatavilla ja miten suunnitellun aurinkovoimalan rakentamisen vaikutukset hiilitaseeseen voitaisiin huomioida. Vaikka puusto- ja kasvupaikkatiedot olisivatkin helposti saatavilla, niitä ei usein kuitenkaan käytetä enemmän hyväksi, vaan hiilitaseita ja metsätalouden tuottoja arvioidaan keskimääräisillä, esimerkiksi maakuntakohtaisilla arvioilla. Tarkemmat ennusteet puuston kehityksestä ja hiilitaseesta tuovat tarkempia ennusteita vaihtoehtoisten maankäyttömuotojen vertailuun ja aurinkovoimalan ympäristö- ja ilmastovaikutusten arviointiin. Tämä edesauttaa sidosryhmien informoimisessa ja muussa hankkeen tiedottamisessa ja voi nopeuttaa kaavoitus- ja rakennuslupaprosessia. Tarkemmat tiedot suunnittelualueen nykypuustosta, hakkuukertymistä ja metsän tuotosta ovat myös tärkeitä alueen metsänomistajille, kun he miettivät metsätilansa myynti- tai vuokrausvaihtoehtoa aurinkovoimala-alueeksi, mikäli heillä ei ole aiempaa käsitystä metsiensä arvosta ja tuotosta.

Kahdella esimerkkialueella aurinkovoimalan rakentamisen toteutuessa hakkuista saatavat puunmyyntitulot ovat lähes samansuuruiset, vaikka Paiholan alue on metsäpinta-alan osalta vain noin puolet Kyyrönsuon alueesta. Metsien kehitysluokkarakenne ja kasvupaikkajakauma vaikuttavatkin merkittävästi puuston poistamisesta aurinkovoimala-alueelta saataviin puunmyyntituloihin. Tässä raportissa tarkasteltiin suunnittelualueiden metsäalueiden puuston nykytilaa, metsien kehitystä ja niiden käytön vaikutuksia huolellisesti. Tämä antoi edelleen hyvän pohjan suunnittelualueiden maankäyttövaihtoehtojen ympäristö- ja talousvaikutusten arviointiin.

Viitteet

- Corine Land Cover 2018. Viitattu 8/2024. <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018>
- ForestKIT-metsätietojärjestelmä. Tapio. Viitattu 8/2024. <https://tapio.fi/tuotteet-ja-palvelut/forestkit/>
- Forus 2024. Kyyrönsuon aurinkovoimala. Hiilitaseselvitys. Viitattu 4/2024. <https://dynastyjulkaisu.pohjoiskarjala.net/kontiolahti/kokous/2024552-3-19712.PDF>
- GTK 2023. Ensimmäinen suotyypien paikkatietoaineisto kattaa koko Suomen suot ja turvemaat. Viitattu 8/2024. <https://www.gtk.fi/ajankohtaista/ensimmainen-suotyypien-paikkatietoaineisto-kattaa-koko-suomen-suot-ja-turvemaat/>
- Hirvelä, H., Härkönen, K., Lempinen, R. & Salminen, O. 2017. MELA2016 Reference Manual. Natural resources and bioeconomy studies 7/2017. 547 p. ISBN 978-952-326-1. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-358-1>
- Klemola, K. 2022. Huittisten aurinkovoimala Sun 2 Oy – kasvihuonekaasuvaikutukset. Cleanfi Oy. Viitattu 6/2024. <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Liite%-2017%20Kasvihuonekaasuvaikutukset%2C%20Sun2%20Oy%2C%20Huittinen.pdf>
- Kumpula, A, Mäkinen, N., Nikkarikoski, A.-M. Markuksela, K. & Ahonen, S. 2023. Ympäristöselvitys. Verhonkulman aurinkovoimahanke. Ramboll. 60 s. https://koski.fi/wp-content/uploads/2023/10/Ilmatar_Verhonkulman_aurinkovoimahankeen_ymparistoselvitys.pdf
- Luonnonvarakeskus 2023. MELA Tulospalvelu-laskelmat, VMI12-VMI13 (mittausvuodet 2017–2021). Verkkopalvelu Luonnonvarakeskus. Viitattu 2/2024. <https://www.luke.fi/mela-metsalaskelmat/>
- Luonnonvarakeskus 2024a. Valtakunnan metsien inventointi (VMI). Viitattu 8/2024. <https://www.luke.fi/fi/seurannat/valtakunnan-metsien-inventointi-vmi>
- Luonnonvarakeskus 2024b. Avoimien aineistojen tiedostopalvelu. Viitattu 8/2024. <https://kartta.luke.fi/>
- Maanmittauslaitos 2024. Paikkatietoikkuna. <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi>
- Niemi, J. & Soimakallio, S. 2021. Menetelmäkuvaus – Metsäbiomassan energiakäytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Suomen ympäristökeskus SYKE. 3 s. <https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Tyokalut/Laskurit>
- Ramboll 2023. Marjaneva aurinkovoimahanke. YVA-tarvehankintahakemus. 35 s. Viitattu 8/2024. https://poytakirjat.alavieska.fi/D10_Alavieska/kokous/2023116-4-3834.PDF
- Rauta, R. 2024. Lepästensuon aurinkovoimala. Hiilitaseselvitys. Forus. 14 s. <https://www.miehikkala.fi/content/uploads/2024/01/Lepastensuon-aurinkovoimalan-hiilitaseselvitys.pdf>

Suomen metsäkeskus 2024a. Metsävarakuvioaineisto. Viitattu 2/2024.

<https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/metsatietoaineistot>

Suomen metsäkeskus 2024b. Luontotietoaineisto. Viitattu 8/2024.

<https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/luontotietoaineistot>

Suomen ympäristökeskus 2024. Sun 2 Oy aurinkovoimala, Huittinen. Viitattu 8/2024.

<https://www.ymparisto.fi/fi/osallistu-ja-vaikuta/ymparistovaikutusten-arviointi/sun-2-oy-aurinkovoimala-huittinen>

Varsinais-Suomen ELY-keskus 2024a. Päätös ympäristövaikutusten arviointimenettelyn soveltamisesta yksittäistapauksessa Silokallion Aurinkovoimala Oy:n Silokallion aurinkovoimahankeeseen. Viitattu 8/2024. <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Silokallion%20Aurinkovoimala%20Oy%2C%20Silokallion%20aurinkovoimala-%2C%20Kokem%C3%A4ki%2C%2003052024.pdf>

Varsinais-Suomen ELY-keskus 2024b. Päätös ympäristövaikutusten arviointimenettelyn soveltamisesta yksittäistapauksessa, Rannankylän aurinkoenergiahanke. Viitattu 8/2024.

<https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/20240220%20P%C3%A4t%C3%A4t%C3%B6s%20YVA-menettelyn%20soveltamisesta%20Rannankyl%C3%A4n-%20aurinkoenergiahanke%20Karvia.pdf>

Wolfram, F. 2023. Kristiinän kaupungin aurinkovoimala. Suunnittelutarvehakemus. 42 s.

<https://www.kristinestad.fi/assets/Sidor/3/2982/Kristinestad-Solpark-Suunnittelutarvehakemus-Kristiinankaupungin-aurinkovoimala-1.pdf>

Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2019. Metsänhoidon suositukset. Tapion julkaisuja. 180 s. https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsan_hoidon_suosituksset_Tapio_2019.pdf

3. Aurinkovoimalan rakentamisen aiheuttama muutos maaperän kasvihuonekaasujen taseissa

Antti Wall

3.1. Laskennan menetelmät

Laskelmassa verrattiin metsämaan, turvetuotantoalueen sekä vetetyn (pohjaveden tason nostaminen) turvetuotantoalueen maaperän kasvihuonekaasujen (hiilidioksidi, metaani ja dityppioksidi) taseita, kun maankäyttö muuttuu aurinkosähkön tuotannossa olevaksi alueeksi. Aurinkovoimalan rakentamisen aiheuttama muutos maaperän kasvihuonekaasujen taseissa laskettiin pinta-alayksikköä (ha) kohti vähentämällä ennen aurinkovoimalan käyttöön otetun maatyypin maaperän kasvihuonekaasujen taseista aurinkovoimalan käyttöön otetun maan kasvihuonekaasujen taseet vuosittain 100 vuoden ajanjaksolla. Muutoksen vaikutus aurinkovoimalan alueen pinta-alaan laskettiin kertomalla pinta-alayksikkökohtainen kasvihuonekaasutaseiden muutos aiemman maankäyttöluokan maatyypin pinta-alalla. Vertailu perustuu vain aurinkovoimalan rakentamisesta johtuvaan maankäyttömuodon muutokseen ottamatta huomioon aurinkovoimalaitoksen rakentamisen, käytön tai ylläpidon vaikutusta.

Metsämaan kivennäismaalla maaperän hiilidioksidin tase laskettiin kansallisen kasvihuonekaasujen inventaarion Etelä-Suomen vuosien 1990–2022 päästökertoimien keskiarvolla (Statistics Finland 2024). Metsämaan turvemaiden hiilidioksidin tase laskettiin vastaavalla tavalla turvekangastyyppittäin. Turvemaiden metaanin päästökerroin laskettiin kasvihuonekaasujen inventaarion päästökertoimilla (Statistics Finland 2024) erikseen ojista ja saroilta käyttäen metsämaalle ojan osuutena 2,5 prosenttia pinta-alasta ja turvetuotantoalueelle 7 prosenttia.

Maankäytön muuttuessa metsämaasta aurinkovoimalan alueeksi puusto poistetaan ja alueelle syntyy avoimen maan pintakasvillisuus. Siksi aurinkovoimalan alueen maaperän päästö laskettiin ruohikkoalueen päästökertoimien mukaan (Statistics Finland 2024). Vetetyn turvetuotantoalueen kasvihuonekaasujen taseet laskettiin ILMAVA-raportin (Lehtonen ym. 2021) päästökertoimien mukaan, jossa on laskettu päästökertoimet kotimaisen tutkimusjulkaisujen perusteella vetetyille entisille turvetuotantoalueille. Eri kasvihuonekaasujen taseet yhteismitallistettiin hiilidioksidiekvivalenteiksi (CO₂e) käyttäen metaanin ilmastoa lämmittävän vaikutuksen kertoimena lukua 28 ja dityppioksidin lukua 265.

3.2. Tulokset

Otettaessa alue aurinkovoimalan käyttöön maaperän hiilidioksidin päästö kasvaa verrattuna aiempaan maankäyttöön erityisesti turvemaidella, paitsi jos entinen turvetuotantoalue vetetään (Taulukko 3). Otettaessa kivennäismaan metsämaa aurinkovoimalan käyttöön muuttuu maaperä pienehköstä hiilinielusta hiilineutraaliksi koska puuston tuottama hiilisyöte karikkeena poistuu ja tilalle tulee hiilineutraali pintakasvillisuus, jolloin hiilen hajoaminen on yhtä suuri kuin hiilen tuotos. Otettaessa turvemaan metsämaa uuteen käyttöön vastaavalla tavalla puuston poistaminen johtaa maaperän hiilipäästön kasvamiseen. Entisen turpeennostoalueen ottaminen uuteen käyttöön lisää myös maaperän hiilipäästöjä. Sitä vastoin, jos turpeennostoalue vetetään, muuttuu maaperä hiilen päästölähteestä hiilinieluksi, mutta metaanipäästöt kasvavat. Tämän maankäytön muutoksen nettovaikutus on voimakkaasti kasvihuonekaasuja pienentävä.

Maankäytön muutoksen vuotuinen keskimääräinen kasvu 30 vuoden aikana on Paiholan alueella 88 tonnia CO₂e verrattuna aiempaan maankäyttöön (Taulukko 4). Paiholan alueen kasvihuonekaasujen päästöjen kokonaiskasvu 30 vuoden aikana on 2 644 tonnia CO₂e ja 100 vuoden aikana 5 376 tonnia CO₂e.

Maankäytön muutoksen vuotuinen keskimääräinen kasvu 30 vuoden aikana on Kyyrönsuon alueella 796 tonnia CO₂e (Taulukko 5). Kyyrönsuon alueen kasvihuonekaasujen päästöjen kokonaiskasvu 30 vuoden aikana on 23 888 tonnia CO₂e ja 100 vuoden aikana 76 166 tonnia CO₂e. Entisen turvetuotantoalueen vettäminen pienentää merkittävästi, yli 40 prosenttia kasvihuonekaasujen päästöjen kasvua.

Taulukko 3. Muutos kasvihuonekaasujen päästöissä muutettaessa metsämaan kivennäismaa, turvemaata (a-d) ja entinen turvetuotantoalue aurinkovoimalaitoksen käyttöön pinta-alayksikköä kohti. Positiivinen luku ilmaisee päästön kasvua ja negatiivinen päästön pienentymistä.

Aiempi maankäyttö	Hiilidioksidi	Metaani	Dityppioksidi	Yhteensä
	t CO ₂ e/ha/v	t CO ₂ e/ha/v	t CO ₂ e/ha/v	t CO ₂ e/ha/v
Kivennäismaa	1,38	0	0	1,38
Ruohoturvekangas (a)	9,89	0	0	9,89
Mustikkaturvekangas (b)	8,50	0	0	8,50
Puolukkaturvekangas (c)	13,98	0	0	13,98
Varputurvekangas (d)	11,56	0	0	11,56
Turvetuotantoalue	3,94	0	0	3,94
Vetetty turvetuotantoalue	-10,76	3,11	-0,9	-8,55

Taulukko 4. Aurinkovoimalan rakentamisen aiheuttama muutos kasvihuonekaasujen päästöissä Paiholassa. Positiivinen luku ilmaisee päästön kasvua ja negatiivinen päästön pienentymistä.

Aiempi maankäyttö	Pinta-ala	Vuotuinen vaikutus	Elinkaarivaikutus 30 vuotta	Elinkaarivaikutus 100 vuotta
	ha	t CO₂ ekv	t CO₂ ekv	t CO₂ ekv
Metsämaan kivennäismaa	54,10	76	2 284	4 177
Metsämaan turvemaa	1,41	12	360	1 199
Yhteensä	55,51	88	2 644	5 376

Taulukko 5. Aurinkovoimalan rakentamisen aiheuttama muutos kasvihuonekaasujen päästöissä Kyyrönsuolla. Positiivinen luku ilmaisee päästön kasvua ja negatiivinen päästön pienentymistä.

Aiempi maankäyttö	Pinta-ala	Vuotuinen vaikutus	Elinkaarivaikutus 30 vuotta	Elinkaarivaikutus 100 vuotta
	ha	t CO₂e	t CO₂e	t CO₂e
Metsämaan kivennäismaa	54,52	77	2 301	4 210
Metsämaan turvemaa	47,77	607	18 204	60 679
Entinen turvetuotantoalue	28,60	113	3 383	11 278
Yhteensä	130,89	796	23 888	76 166
Vetetty turvetuotantoalue	28,60	-245	-7 336	-24 453
Yhteensä, mukana vetetty turvetuotantoalue	130,89	439	13 169	40 436

Viitteet

- Statistics Finland 2024. Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2022. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. Submission to the European Union. https://stat.fi/media/uploads/tup/khkinv/fi_nid_eu_2022_2024-03-15_v2.pdf
- IPCC 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasan-suren, J., Fukuda, M. & Troxler, T.G. (ed.). Published: IPCC, Switzerland.
- Lehtonen, A., Aro, L., Haakana, M., Haikarainen, S., Heikkinen, J., Huuskonen, S., Härkönen, K., Hökkä, H., Kekkonen, H., Koskela, T., Lehtonen, H., Luoranen, J., Mutanen, A., Nieminen, M., Ollila, P., Palosuo, T., Pohjanmies, T., Repo, A., Rikkonen, P., Räty, M., Saarnio, S., Smolander, A., Soinne, H., Tolvanen, A., Tuomainen, T., Uotila, K., Viitala, E.-J., Virkajärvi, P., Wall, A. & Mäkipää, R. 2021. Maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteet: Arvio päästövähennysmahdollisuuksista. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 7/2021. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 121 s.

4. Aurinkovoimalan kokonaisilmastovaikutukset

Ashraful Alam, Musharof Khan ja Ilkka Leinonen

4.1. Menetelmät

Aurinkovoimaloiden tuottamia ilmastovaikutuksia tarkasteltiin elinkaariarvioinnin (LCA) avulla. Tarkastelussa määritettiin kaikki sekä Paiholaan että Kyyrönsuolle sijoitettavien aurinkovoimaloiden tuottaman sähkön elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt. Päästöjen perusteella määritettiin sähkön kokonaispäästökerroin (kg CO₂e/MWh). Tarkastelua varten päästöt jaettiin seuraaviin osa-alueisiin: 1) voimalan rakentaminen ja käyttö, 2) puuston hiilivaraston menetys maankäytön muutoksen seurauksena, 3) maaperän hiilivaraston menetys maankäytön muutoksen seurauksena ja 4) hiilivuoto. Näissä eri osa-alueissa käytetyt laskentamenetelmät on kuvattu seuraavassa.

4.1.1. Voimalan rakentaminen ja käyttö

Paihola

Aurinkovoimalaitoksen elinikäinen sähköntuotanto on 1 500 GWh 30 vuoden ajanjaksolla.

Voimalaitoksen kaikki elinkaariset päästöt voidaan jakaa kahteen kategoriaan:

1. Aurinkovoimalan materiaalit ja komponentit: aurinkopaneelien valmistus, invertteri, muuntaja, asennusrakenne, sähkötarvikkeet ja kaapelit
2. Kierrätettävien materiaalien käytöstä poisto: alumiini, elektroniikkaromu, jättekartonki ja polyeteeni, PVC, teräs ja rauta.

Laskennat suoritettiin elinkaariarviointityökalulla SimaPro V. 9.5 (Oele et al. 2023).

FixSun Solar Finland Oy toimitti arvioinnin lähtötiedot (voimalaitoksen materiaalit ja komponentit) (Taulukko 6.). Lisäksi laskennassa käytettiin tausta-aineistoa eri lähteistä, kuten ympäristöselosteita (EPD Jolywood 2023), tieteellisiä artikkeleista (Badza et al. 2023) jaecoinvent-tietokannasta (Ecoinvent Database 2023). Tutkimukseen sisältyvät elinkaaren vaiheet on esitetty Taulukossa 7.

Taulukko 6. Elinkaaritarkastelun lähtötiedot: Paihola.

Muuttuja	Kuvaus
Voimalaitoksen teho	50 MW
Pinta-ala	55,51 ha
Sähköntuotanto	1 500 GWh
Käyttöaika	30 vuotta
Aurinkopaneelit	(575 W bifacial Si-mono). 2 278 mm x 1 134 mm. 1 500 V. 87 280 kpl
Muuntaja	50MVA. 35 kpl
Invertteri	125kVA. 400 kpl
Teräsrakenne	3 415,3 tonnia
Kaapelit	576 km

Taulukko 7. Tarkastellut elinkaaren vaiheet: Paihola

Elinkaaren vaihe	Kuvaus
A1-A3	Raaka-aineen hankinta (A1), raaka-aineiden kuljetus (A2), valmistusprosessi (A3)
A4	Lopputuotteen kuljetus
B	Aurinkopaneelien puhdistus
C	Käytöstä poisto

Kyyrönsuo

Aurinkovoimalaitoksen teho on 120 MWp ja elinikäinen sähköntuotanto on 3 090 GWh 30 vuoden ajanjaksolla (103 GWh vuodessa). Kyyrönsuon aurinkovoimalan elinkaariarviointitiedot saatiin aikaisemmasta raportista (Forus 2024). Raportin mukaan voimalaitoksen hiilijalanjälki on arvioitu perustuen Euroopan komission Level(s) -menetelmään (European Commission 2024) ja standardeihin kuten (ISO 14040:2006 ja ISO 14044:2006) sekä Ympäristöministeriön julkaisuun Rakennusten vähähiilisuuden arviointimenetelmästä (Rakennusten vähähiilisuuden arviointimenetelmä 2019). Arviointi sisältää raaka-aineiden valmistuksen ja kuljetuksen sekä komponenttien käytön ja purkamisen. Tietolähteinä ovat pääasiassa materiaalien päästötietokanta (Suomen ympäristökeskus 2024) ja ympäristötuoteseloste (EPD International AB 2023). Kokonaispäästöiksi arvioitiin 34,2 kg CO₂/MWh.

4.1.2. Puuston hiilivaraston menetys

Sekä puuston että maaperän hiilivarastojen osalta, arvioitiin varaston kokonaismenetys voimalan rakentamisen seurauksena, ja lähtöoletuksena oli, että tämä muutos on myös pysyvä. Puuston hiilivaraston menetys arvioitiin puuston runkotilavuuden (m³) perusteella. Tilavuus muunnettiin puuston kokonaisbiomassaksi käyttämällä biomassan laajennuskerrointa (Lehtonen ym. 2004) ja sen jälkeen biomassan muuntokertoimella hiileksi ja CO₂:ksi. Biomassan laajennuskerroin (BEF) muuntaa rungon tilavuuden kokonaispuun kuivaksi biomassaksi. 50 prosenttia biomassasta oletetaan olevan hiiltä, joka muunnetaan CO₂:ksi kerrotaan suhteella 44/12.

Puuston hiilivaraston menetys lasketaan yhtälöllä:

$$\text{Puuston hiilivaraston menetys, MgCO}_2 = \text{puuston tilavuus (m}^3\text{)} * \text{BEF} * 0.5 * 44 / 12 / 1000$$

4.1.3. Maaperän hiilivaraston menetys

Maaperän hiilivaraston menetys voidaan arvioida maaperän hiilivaraston muutosten perusteella eri aikaskaalalla siirryttäessä metsätaloudesta aurinkovoimalaan. Laskennassa hyödynnettiin kasvihuonekaasuinventaarion keskimääräisiä päästökertoimia ojitetuille turvemaille (Statistics Finland 2023), ojitettujen turvemaiden avohakkuiden päästöjä (Korkiakoski ym. 2023, Tong et al. 2022), sekä kangasmaiden hiilivarastojen muutosten mittauksia (Peltoniemi ym. 2004, Häkkinen ym. 2011, Rantakari ym. 2012). Lisäksi turpeen paksuudeksi oletettiin 2 metriä ja turpeen hiilisisältö arvioitiin Laine (1989) työn perusteella kasvupaikkojen mukaan. Aluksi "Business-as-usual" -tilanne, eli talousmetsän maaperän hiilivaraston kehitys mallinnettiin 100 vuoden ajalle. Sen jälkeen maaperän hiilivarasto mallinnettiin tilanteessa, jossa paikalle rakennetaan aurinkovoimala, ja hiilisyötteen päätyminen maaperään estyy. Näiden kahden prosessin välinen ero kertoo suoraan maaperän hiilivaraston muutoksen:

$$\text{Maaperän hiilivaraston menetys, MgCO}_2 = \text{Maaperän hiilivarasto [talousmetsä]} - \text{Maaperän hiilivarasto [aurinkovoimala]}$$

4.1.4. Hiilivuoto

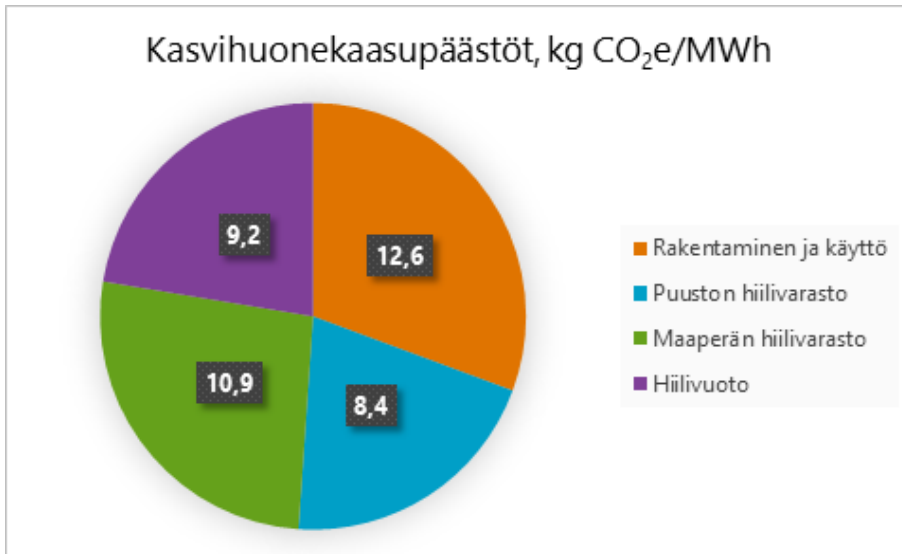
Hiilivuodon riski eli mahdolliset epäsuorat maankäytön muutokset on välttämätöntä ottaa huomioon energiaratkaisujen ja muiden maankäyttöön perustuvien toimenpiteiden ympäristövaikutusten tarkastelussa. Tässä tapauksessa hiilivuoto huomioitiin menetettyjen hakkuiden siirtymisenä alueelle, jossa hakkuuta ei muuten suoritettaisi. Myös hiilivuodon osalta lähtöoletus oli, että maankäytön muutos on pysyvä, joten hakkuiden oletettiin myös pysyvästi siirtyvän muualle. Hakkuiden siirtymisen aiheuttama hiilivaraston menetys arvioitiin seuraavasti:

$$\text{Hiilivuoto, MgCO}_2 = (\text{Potentiaalinen puuston hiilivarasto} - \text{Talousmetsän puuston hiilivarasto}) + (\text{Potentiaalinen maaperän hiilivarasto} - \text{Talousmetsän maaperän hiilivarasto})$$

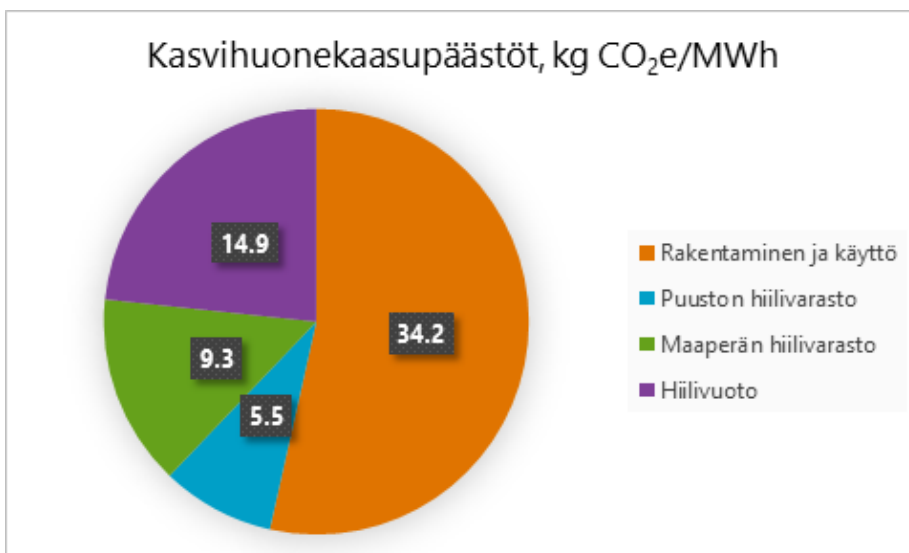
4.2. Tulokset

Elinkaariarvioinnilla määritetyt kasvihuonekaasujen päästökertoimet (kg CO₂e/MWh) osa-alueittain on esitetty kuvissa 8 ja 9. Kokonaispäästöt olivat Paiholan tapauksessa 41,1 kg CO₂e/MWh ja Kyyrönsuon tapauksessa 63,9 kg CO₂e/MWh. Merkittävin päästökertoimien eroon vaikuttanut tekijä oli erilaiset aurinkopaneelit, joita oletettiin käytettävän eri voimaloissa.

Maankäytön muutoksen aiheuttamat päästöt (puuston hiilivaraston menetys, maaperän hiilivaraston menetys ja hiilivuoto) olivat Paiholan tapauksessa 28,5 kg CO₂e/MWh ja Kyyrönsuon tapauksessa 29,7 kg CO₂e/MWh.



Kuva 8. Aurinkovoimalan tuottamat elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt: Paihola



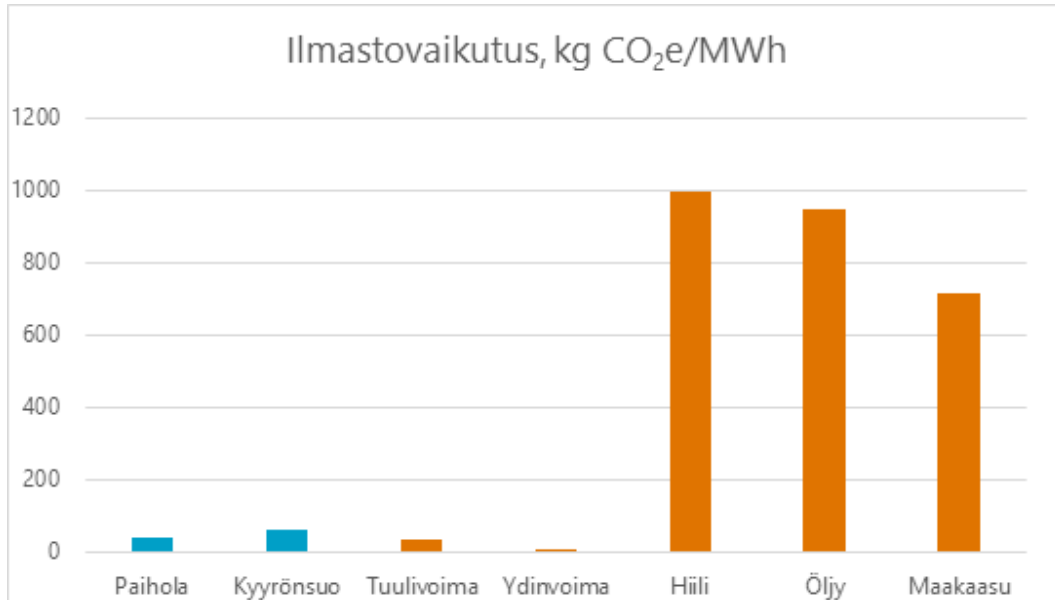
Kuva 9. Aurinkovoimalan tuottamat elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt: Kyyrönsuo

4.3. Johtopäätökset

Aurinkovoimalla tuotetun sähkön kasvihuonekaasupäästöt muodostuvat sekä aurinkovoimalan rakentamisesta ja ylläpidosta, että maankäytön muutoksen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä. Jälkimmäiset päästöt taas aiheutuvat puuston hiilivaraston menetyksestä, maaperän hiilivaraston pienenemisestä, ja epäsuorista maankäytön muutoksen päästöistä, eli hilivuodosta. Maankäytön muutosten päästöjä ei aina huomioida uusiutuvan energian päästölaskennassa, ja siksi tämä tutkimus tuotti merkittävää uutta tietoa metsään rakennettavien aurinkovoimaloiden kokonaisilmastovaikutuksista, ja erityisesti maankäytön muutoksista aiheutuvien päästöjen suuruusluokasta.

Tulokset osoittavat, että aurinkovoimalla, kuten muillakin fossiilittomilla energianlähteillä tuotetun sähkön kasvihuonekaasupäästöt ovat vain murto-osa fossiilisella energialla tuotetun

sähkön päästöistä (Kuva 10). Tulosten perusteella on selvää, että aurinkovoima on yksi vähäpäästöisistä energiamuodoista siitä huolimatta, että maankäytön muutokset, mukaan lukien hiilivuoto, kasvattavat aurinkovoiman päästökerrointa. Tämän vuoksi aurinkovoiman tuottama, fossiilisen energian korvaamisella saavutettava ilmastohyöty on moninkertainen voimailan rakentamisen aiheuttamiin päästöihin verrattuna.



Kuva 10. Hankkeessa tarkastellun kahden aurinkovoimalan (Paihola ja Kyyrönsuo) tuottaman sähkön kasvihuonekaasupäästöt verrattuna muilla energiamuodoilla tuotetun sähkön päästökertoimiin.

IPCC (2023) ja IEA (2023) ilmastoraporttien mukaan aurinkoenergia on tärkein yksittäinen ilmastotoimi, jolla ilmastonmuutosta saadaan hillittyä. Tämän tutkimuksen tulokset vahvistavat tätä näkemystä. Aurinkovoimalat tuottavat vähäpäästöistä sähköä, joka vähentää suuripäästöisen fossiilisen energian tarvetta sähköntuotannossa. On myös syytä huomata, että vaikka sähkön tuotanto on nykyisellään Suomessa vähäpäästöistä, eli fossiilisen sähköntuotannon osuus on pieni, fossiilittoman sähkön rooli kasvaa jatkuvasti ilmastonmuutoksen torjumisessa. Liikenteen päästöt muodostavat tällä hetkellä merkittävän osan Suomen kokonaispäästöistä, ja lisää fossiilitonta energiaa tarvitaan tieliikenteen sähköistämiseksi. Myös pientalojen öljylämmityksessä luopuminen ja korvaaminen fossiilittomalla sähkölämmityksellä on yksi keino vähentää päästöjä, samoin kuin teollisuuden lämmöntuotannon sähköistäminen.

Tulevaisuudessa fossiilittoman sähkön tarve voi kasvaa erityisen merkittävästi lento- ja meriliikenteessä käytettävien synteettisten polttoaineiden ja muiden fossiilittomien materiaalien valmistuksessa. Fossiilittomalla sähköllä on merkittävä rooli myös hiilinielujen tuottamisessa. Nykyiset maankäyttöön perustuvat nielut heikkenevät välttämättä lähitulevaisuudessa, syynä tähän ovat mm. metsien puuston ikääntyminen ja kasvun hidastuminen, lisääntyvät maaperän hiilidioksidipäästöt erityisesti turvemaidella sekä ilmastonmuutoksen aiheuttamat metsätuhot. Koska hiilineutraaliuden saavuttaminen edellyttää hiilinieluja, heikkeneviä maankäytön nieluja pitää tulevaisuudessa entistä enemmän korvata teknisillä hiilinieluilla. Hiilidioksidin talteenotto, joko suoraan ilmakehästä tai bioteollisuuden savukaasuista, on yksi tehokkaimmista keinoista hiilinielujen tuottamisessa. Talteenotto prosessit vaativat merkittäviä määriä sähköä, ja myös tämän vuoksi fossiilittoman sähköntuotannon, mukaan lukien aurinkovoima, lisärakentaminen lyhyellä aikavälillä on välttämätöntä.

Viitteet

- Badza, K., Soro, Y. M. & Sawadogo, M. 2023. Life cycle assessment of a 33.7 MW solar photovoltaic power plant in the context of a developing country. *Sustainable Environment Research* 33, 38 (2023). <https://doi.org/10.1186/s42834-023-00201-x>
- Ecoinvent Database 2023. <https://ecoinvent.org/>
- EPD International AB 2023. Environmental Product Declaration 2023. N-type Bifacial Double Glass Photovoltaic Modules. <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/-231f1e58-20f0-4937-de77-08dbf085b35e/Data>
- European Commission The Directorate-General for Environment 2024. Level(s) European framework for sustainable buildings. [Level\(s\) - European Commission](#)
- Forus 2024. Kyyrönsuo aurinkovoimala. Hiilitaseselvitys. Päivitetty 24.1.2024. 14 s. [2024552-3-19712.PDF](#)
- Häkkinen, M., Heikkinen, J. & Mäkipää, R. 2011. Soil carbon stock increases in the organic layer of boreal middle-aged stands. *Biogeosciences* 8(5): 1279–1289.
- IEA 2023. Net Zero Roadmap. A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal to Reach. 2023 Update. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- IPCC 2023. Sixth Assessment Report. Synthesis Report. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. [ISO 14040:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework](#)
- ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. [ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines](#)
- Korkiakoski, M., Ojanen, P., Tuovinen, J.P., Minkkinen, K., Nevalainen, O., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T. & Lohila, A. 2023. Partial cutting of a boreal nutrient-rich peatland forest causes radically less short-term on-site CO₂ emissions than clear-cutting. *Agricultural and Forest Meteorology* 332: 109–361.
- Laine, J. 1989. Classification of peatlands drained for forestry. *SUO* 40(1): 37–51.
- Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen, R. & Liski J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management*. p. 211–224.
DOI: 10.1016/j.foreco.2003.07.008
- Oele, M., Dolfing, R. & Grace, V. 2023. SimaPro 9.5. Full update instructions. Pré Sustainability. Website: <https://support.simapro.com/>. [FullUpdateInstructionsToSimaPro950.pdf](#).

- Peltoniemi, M., Mäkipää, R., Liski, J. & Tamminen, P. 2004. Changes in soil carbon with stand age—an evaluation of a modelling method with empirical data. *Global Change Biology* 10(12): 2078–2091.
- Rantakari, M., Lehtonen, A., Linkosalo, T., Tuomi, M., Tamminen, P., Heikkinen, J., Liski, J., Mäkipää, R., Ilvesniemi, H. & Sievänen, R. 2012. The Yasso07 soil carbon model—Testing against repeated soil carbon inventory. *Forest Ecology and Management* 286: 137–147.
- Statistics Finland 2023. Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2020. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol 581 (2022).
- Suomen ympäristökeskus 2024. Rakentamisen ja infrarakentamisen päästötietokannat. [CO2data.fi](https://co2data.fi)
- Tong, C.H.M., Nilsson, M.B., Sikström, U., Ring, E., Drott, A., Eklöf, K., Futter, M.N., Peacock, M., Segersten, J. & Peichl, M. 2022. Initial effects of post-harvest ditch cleaning on greenhouse gas fluxes in a hemiboreal peatland forest. *Geoderma* 426.
- Ympäristöministeriö 2019. Rakennusten vähähiilisyden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriön julkaisu 2019:22. Helsinki 2019. [Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä](#)

5. Metsätalous vs. aurinkosähkön tuotanto

Jussi Leppänen

5.1. Maankäyttömuotojen hehtaariperusteinen vertailu

Metsätalouden harjoittaminen on Suomessa yksi eniten pinta-alaa vaativista maankäyttömuodoista. Laajat metsät ovat tuottaneet merkittäviä mittakaavaetuja metsäteollisuudessa, mutta muihin maankäyttömuotoihin verrattuna myös suhteellisen alhaisen metsätalouden hehtaarikohtaisen pitkän aikavälin keskimääräisen tuloksen ja edelleen metsän metsätaloudellisen pääoma-arvon. Metsä on herkästi maankäyttömuoto, joka väistyy varsinkin rakentamisen, mutta myös maatalouden maankäyttötarpeiden vuoksi.

Kun metsätaloutta verrataan aurinkosähkön tuotantoon, luontevin tapa on tarkastella maankäyttömuotojen hehtaarikohtaisia tuloksia. Metsätalouden puuntuotantoon perustuva hehtaarikohtainen tulontuottamiskyky vaihtelee kasvuolojen vuoksi melko paljon eri osissa maata. Metsässä on toisaalta puustoon sitoutunutta pääomaa, jota säädellään hakkuilla. Yksittäisen vuoden hakkuutulo voi olla huomattavankin suuri pääoman realisoinnin takia, minkä vuoksi tarkastellaan yksittäisen metsikön keskimääräistä tuloa pitkällä aikavälillä tai yksittäisen vuoden tuloa laajalla, vaihtelevan ikäisiä metsiköitä käsittävällä alueella.

Vastaavalla tavalla kuin metsätaloudessa myös aurinkovoimaloiden sähköntuotantoon perustuva tulontuottamiskykyä on syytä tarkastella useamman vuoden keskiarvona, sillä yksittäisten vuosien tulot riippuvat sääoloista, tuotettavan sähkön hinnoista sekä aurinkovoimalan huolto- ja korjaustöistä. Myös aurinkovoiman tuotannon alueelliset erot on syytä ottaa huomioon.

Koska metsätaloudessa tulojen ajoittuminen on huomattavasti epäsäännöllisempää kuin aurinkosähkön tuotannossa, yksittäisen metsikön tapauksessa maankäyttömuotojen vertailu tulisi tehdä tulojen diskontattuna nykyarvona. Toisaalta varsinkin laajaan aurinkosähkön tuotantoon raivataan metsiä, joissa on lopulta melko eri ikäisiä metsiköitä. Tällöin keskimääräinen hehtaarikohtainen vuosittainen tulo voi olla riittävä vertailuperuste maankäyttömuodoille.

Kannattavuuserot maankäyttömuotojen välillä saattavat toisaalta olla niin suuret, että edes metsän iästä riippuva puuston edelleen kasvattamisen rajakannattavuus verrattuna päätehakkuuseen ja maankäyttömuodon muutokseen ei välttämättä ole kovin merkittävä tekijä. Jos nykyarvon laskennassa käytettävä laskentakorko vakioidaan, metsien iän suhteen tarkasteltuna kannattavimmat aurinkosähkön tuotantoon raivattavat metsiköt ovat järjestyksessä: 1. avoimet (hakkuu)alat, 2. päätehakkuukypsät metsät 3. taimikot ja 4. kasvatusmetsät. Kasvatusmetsissä korkeat energiapuun ja kuitupuun hinnat suhteessa tukkiin lisäävät nuorien kasvatusmetsien päätehakkuuiden kannattavuutta suhteessa niiden kasvattamiseen varttuneemmiksi kasvatusmetsiksi ja edelleen päätehakkuukypsiksi metsiksi.

5.2. Hehtaarin metsätaloudellinen arvo

Aurinkometsä -hankkeessa tarkasteltujen Kyyrönsuon ja Paiholan suunnittelualueiden metsävaratietojen ja MELA-laskelmien perusteella näiden metsien maapohjat, puustot ja edelleen metsätaloudelliset arvot poikkeavat selvästi toisistaan (Luku 2). MELA-laskelmien lisäksi on perusteltua tarkastella näiden alueiden arvoa metsäkiinteistöjen kauppahintamenetelmällä.

Alueiden puuntuotannon tuottamaa tuloa voidaan myös verrata Pohjois-Karjalan keskimääräiseen ja Suomen eri maakuntien keskimääräisiin tulotasoihin.

Maanmittauslaitos pitää virallista kauppahintarekisteriä edustavista kiinteistökaupoista. Edustavista, ainoastaan tai pääosin metsää sisältävistä kiinteistökaupoista julkaistaan säännöllisesti alueelliset tiedot. Maanmittauslaitoksen tiedot eivät sisällä metsien rakennepiirteitä, kuten puuston määrää ja laatua sekä maapohjaa koskevia tietoja, jotka vaikuttavat merkittävästi yksittäisessä metsäkiinteistökaupassa maksettuun kauppahintaan. Tällaiset rakennetiedot ovat metsäkiinteistökauppaan erikoistuneiden yhtiöiden ja yksityishenkilöiden keräämiä ja pääosin heidän omassa liiketoimintakäytössään.

Taulukko 8. Metsäkiinteistökaupat "Hannun hintaseurannan"¹⁾ mukaan (Liljeroos 2024).

Alue	Kaupan, kpl	Myyty, kpl	Myyty, ha	Taimikot, %	Hakkuukypsät, %	Puusto, m ³ /ha	Tukki-%	e/ha	e/m ³	Hintakerroin	Puustokerroin
Varsinais-Suomi	24	25	606	23	17	123	36	7 019	57	1,07	1,28
Satakunta	35	31	739	26	16	115	39	6 067	53	0,96	1,14
Häme-Uusimaa	55	43	1 090	24	16	128	41	7 104	56	1,02	1,22
Etelä-Karjala	42	41	856	25	15	126	38	6 202	49	0,89	1,04
Kymenlaakso	33	38	953	27	14	115	38	5 990	52	0,94	1,11
Pirkanmaa	75	67	1 739	25	16	128	39	6 269	49	1,01	1,15
Etelä-Savo	63	52	1 925	25	10	118	36	6 209	52	0,89	1,07
E- ja K-Pohjanmaa	154	125	3 038	22	16	107	31	4 126	39	0,88	1,01
Keski-Suomi	96	84	2 673	22	9	122	33	5 590	46	0,89	1,05
Pohjois-Savo	89	70	2 105	24	13	118	36	5 485	47	0,89	1,06
Pohjois-Karjala	110	85	2 783	20	15	125	35	5 784	46	0,91	1,03
Kainuu	79	56	2 564	19	8	103	30	3 271	32	0,86	0,96
Pohjois-Pohjanmaa	196	133	5 337	24	9	83	19	2 619	32	0,95	1,14
Lappi	122	78	4 471	20	11	82	19	2 043	25	0,88	1,02
Koko maa	1 173	928	30 879			109	31	4 529	42		
lisäys huhtikuu	152	83									

¹⁾ Hannun hintaseuranta 1.8.2023-30.4.2024. Seuranta kattaa noin 90 prosenttia vapaiden markkinoiden tilakau-
poista. Hintakerroin on toteutuneiden kauppahintojen ja hinnoittelun summa-arvon suhde. Puustokerroin saa-
daan, kun kauppahinta jaetaan puuston arvolla. Jos kerroin on 1,20, niin kauppahinta on 20 prosenttia puuston
arvoa suurempi.

Pääosin julkisesti saatavilla ovat Hannu Liljeroosin säännöllisesti Metsälehdessä julkaisemat metsäkiinteistöjen kauppahintatiedot "Hannun hintaseuranta", joka sisältää paitsi Maanmit-
tauslaitoksenkin kauppahintarekisterissä olevat pinta-alat myös puustoa koskevia keskeisiä
rakennepiirteitä (Taulukko 8). Metsälehdellä on verkkosivullaan myös Hannun hintaseuranta-
aineistoon eli metsäkiinteistöistä tehtyihin vertailukelpoihin kauppoihin perustuva Metsän
arvo -laskuri, joka on lehden tilaajien käytettävissä. Tätä laskuria oli mahdollista käyttää
MELA-laskelmien lisäksi Kyyrönsuolle ja Paiholaan.

Taulukko 9. Yksityismetsätalouden liiketulos 2023, euroa/ha (Luke 2024).

Maakunta	= TULOT	+ VALTION TUKI PUUNTUOTAN- TOON	Investoinnit puuntuotan- toon	Metsien hallinto ym.	- Puuntuo- tannon koko- naiskustan- nukset	= LIIKE- TULOS
KOKO MAA	191,7	3,1	16,0	5,0	21,1	173,7
1 Uusimaa	245,0	2,3	15,7	6,1	21,8	225,5
2 Varsinais-Suomi	232,7	2,7	16,7	5,9	22,6	212,9
4 Satakunta	290,9	2,8	21,2	6,2	27,4	266,3
5 Kanta-Häme	353,1	3,0	45,6	6,7	52,4	303,7
6 Pirkanmaa	288,7	2,8	23,6	6,5	30,1	261,4
7 Päijät-Häme	352,3	3,3	28,6	6,4	35,0	320,6
8 Kymenlaakso	287,5	2,9	23,4	7,7	31,1	259,3
9 Etelä-Karjala	308,2	3,1	16,8	7,2	24,0	287,4
10 Etelä-Savo	280,7	3,1	15,8	6,9	22,7	261,2
11 Pohjois-Savo	260,8	3,7	16,8	5,6	22,4	242,1
12 Pohjois-Karjala	208,3	2,3	18,6	5,0	23,6	186,9
13 Keski-Suomi	232,5	3,5	18,5	5,7	24,2	211,9
14 Etelä-Pohjanmaa	159,0	3,6	16,1	5,4	21,4	141,2
15 Pohjanmaa	180,9	3,1	14,1	4,4	18,5	165,4
16 Keski-Pohjanmaa	144,4	3,0	10,8	5,3	16,1	131,3
17 Pohjois-Pohjanmaa	104,8	3,7	9,4	3,5	12,9	95,6
18 Kainuu	94,9	2,5	14,4	3,5	17,9	79,5
19 Lappi	55,7	3,0	9,1	2,9	12,0	46,7
21 Ahvenanmaa	107,9	3,1	10,8	5,1	15,9	95,1

Useilla muillakin metsäalan toimijoilla kuten metsäyhtiöillä, pankeilla ja vakuutusyhtiöillä on metsänarvon laskureita. Monet näistä laskureista perustuvat Metsäkeskuksen ylläpitämään avoimeen metsävaratietoon, jolloin ne vaativat kiinteistönnumeron laskelman lähtötiedoksi.

Aurinkovoimaloiden maanvuokrana tuottamaa tuloa voidaan verrata metsätalouden vuosittain tuottamaan keskimääräiseen tuloon. Luonnonvarakeskus laatii yksityismetsistä yksityismetsätalouden liiketulos -tilastoa (Taulukko 9). Laskelma perustuu muiden Luken keräämien tilastojen hyödyntämiseen sekä joihinkin arvioperusteisiin tietoihin puuntuotannon rahavirtojen arvioimiseksi. Tilasto sisältää yksityismetsien lisäksi myös joidenkin muiden omistajaryhmien kuten kuntien metsiä. Tulokset voidaan esittää euroina hehtaarilla tarkasteluvuonna.

Taulukko 10. Kyyrönsuon ja Paiholan metsätaloudellisia tunnuslukuja, Metsän arvo -laskurilla arvioidut metsätaloudelliset markkina-arvot sekä korkotuotot.

Kyyrönsuo	Paihola
Ala: 140 ha	Ala: 55 ha
Puusto: 13 043 m ³	Puusto: 9 776 m ³
Tukkiosuus: 21 %	Tukkiosuus: 33 %
Nettotulo lähivuosisikymmenillä: 70*-160 euroa/ha/vuosi (ennen veroja). * Laajan suoalueen metsitys laskee alussa nettotuloa.	Nettotulo lähivuosisikymmenillä: 230–280 euroa/ha/vuosi (ennen veroja)
Metsätaloudellinen markkina-arvo: 505 000 euroa (Metsän arvo -laskuri) 3 600 euroa/ha (vertailukauppojen vaihtelu 2 890–4 530 euroa/ha) (Metsän arvo -laskuri) 39 euroa/puusto-m ³ (Metsän arvo -laskuri)	Metsätaloudellinen markkina-arvo: 413 000 euroa (Metsän arvo -laskuri) 7 500 euroa/ha (vertailukauppojen vaihtelu 7 040–10 250 euroa/ha) (Metsän arvo -laskuri) 42 euroa/puusto-m ³ (Metsän arvo -laskuri)
Korkotuotto: noin 3,3–3,5 % (ennen veroja)	Korkotuotto: noin 3,3–3,5 % (ennen veroja)

Metsän arvo -laskuri: <https://www.metsalehti.fi/metsanarvolaskuri/>

Taulukossa 10 on kuvattuna Kyyrönsuon ja Paiholan metsätaloudellisia tunnuslukuja (MELA-laskennan metsäala, puusto, tukkiosuus ja nettotulo) sekä Metsälehdessä Metsän arvo -laskurilla laskettuja markkina-arvoja. Nettotulojen ajoittumisen ja metsätilan metsätaloudellisen markkina-arvon avulla on mahdollista laskea metsätilan korkotuotto ennen veroja. Kyyrönsuon arvosta laskurilla tehty arvio on hehtaaria kohden vain puolet Paiholan arvosta. Eroa selittää puuston määrä ja rakenne sekä Kyyrönsuon suovaltaiset maapohjat. Pystypuuston kuutiometriä kohden Paiholan arvo on vain hieman korkeampi kuin Kyyrönsuolla. Metsän arvo -laskuri ei ota huomioon mahdollista asutuskeskuksen kuten Joensuun läheisyyttä, vaan arvot lasketaan Pohjois-Karjalan alueelle. Kyyrönsuolla alkuvaiheen nettotuloa laskee avoimen suoalueen metsitys, kun Paiholassa nettotulot ovat tasaisemmat ja korkeammat tulevina vuosikymmeninä.

5.3. Aurinkovoimalan maankäyttötarve ja sähköntuotanto

Aurinkovoimalan käyttöön tarvitaan vain maapohja, joten mahdollinen puusto hakataan ja myydään pois sen ikäisenä kuin se sattuu maankäytön muutoshetkellä olemaan. Metsäpohjalta joudutaan lisäksi poistamaan kantoja ja kiviä sekä tasaamaan maata. Pellot ovat yleensä melko valmiita rakennuspohjia, jolloin maanrakennustoimia ei tarvita. Ratkaisevia tekijöitä aurinkovoimalan sijoittumiselle ovat sijainti suhteessa sähkönsiirtolinjoihin tai sähkön käyttökohteeseen, maapohjan pinnanmuoto sekä osittain myös maaperän laatu. Aurinkovoimalan rakennuspaikan koko on myös yleensä suurempi kuin paneelien alle jäävä pinta-ala. Rakennuspaikalla tarvitaan vapaata huoltoalaa ja ajoväyliä sekä etäisyyttä paneelien varjostaviin tekijöihin kuten metsään tai rakennuksiin.



Kuva 11. Keravan aurinkovoimalassa 2/3 rakennuspaikan alasta on paneeleja (Maanmittauslaitos 2024).

Esimerkiksi vuonna 2016 käynnistyneen Keravan aurinkovoimalan (<https://www.keravanaurinkovoimala.fi/>) rakennuspaikan ala on noin puoli hehtaaria, mutta paneelien ala on vain 1/3 hehtaarin. Aurinkovoimalan alasta on siten noin kaksi kolmasosaa paneeleja (Kuva 11).

Keravan aurinkovoimala on kooltaan melko pieni, mutta sitä käytetään tässä esimerkkinä, koska se on ollut tuotannossa jo useita vuosia ja sen sähköntuotantotiedot ovat julkisia. Keravan aurinkovoimalan tuotanto oli vuosina 2019–2022 keskimäärin 411 MWh/ha/vuosi, jos voimalan alana käytetään koko rakennuspaikan puolta hehtaaria. Jos alana käytetään vain paneelien alaa eli noin kolmasosahehtaaria, tuotanto oli 617 MWh/ha/vuosi.

Toinen melko paljon julkisuudessa ollut ja esimerkkinä käytettävä aurinkovoimala sijaitsee Sulkavalla (Solarigo 2024, YLE 2023). Voimala-alue on raivattu kunnan omistamaan metsään ja sen rakennuspaikka on kooltaan yli seitsemän hehtaaria. Kunta on vuokrannut alan 25 vuodeksi aurinkovoimalalle. Voimala käynnistyi vuonna 2023. Voimalainvestointi oli noin kolme miljoonaa euroa eli hieman alle 450 000 euroa hehtaarilta ja siihen on saatu julkista tukea. Aurinkopaneelit olivat kaksipuolisia, ja niiden sähköntuotantotehon arveltiin hajasäteilyn talteen oton vuoksi olevan vähintään 6–8 prosenttia yksipuolisia paneeleja suurempi. Jos Keravan aurinkovoimalan tuotantolukuihin lisätään seitsemän prosenttia, niin kaksipuolisten paneelien tuotanto olisi noin 660 MWh/ha/vuosi, jos jakajana käytettäisiin vain paneelien maa-alaa.

Aurinkovoimalalla on, kuten tuulivoimalallakin, kolme erilaista maankäyttötarvetta. Niillä on myös kolme erilaista seurausta maanomistajalle. Yksittäisen aurinkovoimalan tai tuulivoimalan (1) rakennuspaikka joko vuokrataan tai ostetaan maanomistajalta vapaaehtoisella sopimuksella. Teollisuusmittakaavan aurinkovoimalan rakennuspaikka voi olla hyvinkin suuri, jopa satoja hehtaareja. Tuulivoimala tarvitsee rakennusvaiheessa korkeintaan reilun hehtaarin suuruisen alan, josta reunaosat voivat myöhemmin metsittyä ainakin tilapäisesti uudelleen.

Molemmat voimalatyypit vaativat riittävän kokoiset (2) huoltotiet sekä (3) sähkönsiirtolinjat. Sähköntuottajan voimala-alueelle muodostuu oikeudet tie- ja sähkönsiirtolinjaan yksityistielain (LVM 13.7.2018/560) ja sähkömarkkinalain (TEM 1.9.2013/588) perusteella. Huoltotiet ja sähkölinjat voidaan siten rakentaa jopa maanomistajien tahdon vastaisesti, tarvittaessa ”lunastuslakiin” perustuvalla menettelyllä (OM 29.7.1977/603). Tällöin maanomistajille korvataan täysimääräisesti taloudelliset menetykset metsätaloudesta ja muista maankäytön rajoituksista. Teitä ja sähkönsiirtolinjoja koskeva menettely on siten täysin poikkeava koko hankkeen käynnistävästä, vapaaehtoiseen sopimukseen perustuvasta voimala-aluekorvauksesta, joka voi olla

hyvinkin korkea taloudellisiin menetyksiin nähden. Lisäksi voimala-alueesta vuokraa voidaan maksaa vuosittain, kun taas tie- ja sähkölinjoista maksetaan lunastuslain mukaan kertakorvaukset.

Huoltotiet ja sähkönsiirto saattavat vaatia merkittäviä pinta-aloja varsinkin tuulivoimatuotannossa, mutta myös suurilla teollisuusmittakaavan aurinkovoimaloilla. Ensiksi sähkö siirretään maakaapeleilla muuntamolle, joka aurinkovoimalan tapauksessa sijaitsee yleensä voimala-alueella. Muuntamolta sähkö siirretään maakaapelilla tai raivatuun johtokäytävän ilmajohdoilla valtakunnallisen tai alueellisen korkeajännitelinjan sähköasemalle. Tuulivoimaloiden muuntamolle johtavat maakaapelit sijoitetaan usein huoltoteiden yhteyteen. Jos kyse on lukuisia turbiineja käsittävästä tuulivoimapuistosta, tuulivoimaloiden maakaapelit johtavat usein ensin tuulivoimapuiston yhteiselle muuntamolle, josta sähkö siirretään yleensä raivatuun johtokäytävän ilmajohdoilla tai joskus maakaapelilla alueellisen tai valtakunnallisen korkeajännitelinjan sähköasemalle. Jos tuulivoimaloita on pieni määrä ja ne ovat lähellä korkeajännitelinjaa, sähkönsiirto saatetaan tehdä suoraan jokaiselta tuulivoimalalta korkeajännitelinjan sähköasemalle.

Sekä huoltotiet että varsinkin raivattu johtokäytävä lisäävät merkittävästi voimaloiden maankäyttötarvetta. Maakaapeleilla maankäyttötarvetta kyetään taas hieman vähentämään. Lunastuslakiin perustuva ja ”yhteiskunnan välttämättömiin tarpeisiin mitoitettu” korvauskäytäntö on todennäköisesti lisännyt johtokäytävien raivausta ja ilmajohtojen käyttöä maakaapelien sijasta. Kesäkuussa 2024 annetussa Orpon hallituksen esityksessä (Eduskunta 2024) täysimääräisiä taloudellisiin menetyksiin perustuvaa korvausta esitetään muutettavaksi markkina-arvoa vastaavaksi täydeksi korvaukseksi, jota lisäksi korotettaisiin 25 prosentilla. Näistä markkina-arvoon perustuva korvaus on merkittävämpi periaatteellinen uudistus kuin 25 prosentin korotus, varsinkin jos markkina-arvo voisi pohjautua varsinaisen voimalan rakennusalueen sopimukseen perustuvaan korvaukseen.

5.4. Aurinkovoimalan kannattavuus maanvuokrana

Maanomistaja voi rakennuttaa aurinkovoimalan itse tai sitten vuokrata tai myydä rakennuspaikan aurinkovoiman tuotantoon erikoistuneelle yhtiölle. Tässä tarkastellaan aurinkovoimalan kannattavuutta maanvuokrana, jolloin maan omistuskysymykseen ei välttämättä tarvitse ottaa kantaa. Maanvuokra tai maankorko on vanha käsite, joka kuvaa maankäytön muodostamaa ylijäämää maanomistajalle. Silloin kun toimija ja maanomistaja ovat eri tahoja, kilpailullisimmissa tapauksissa toimijan maankäytöllään saavuttama ylijäämä voi päätyä kokonaisuudessaan maanomistajan saamaksi maanvuokraksi.

Aurinkovoimaloita on rakennettu vasta niin vähän, että maan tarjonnasta voimalarakentamiseen ei ole ollut niukkuutta. Vastaava tilanne oli tuulivoimaloiden rakentamisen alkuaikoina. Aurinkovoimalan vuokratuotto maanomistajalle on vaihdellut tapauskohtaisesti, mutta vuokrataso näyttäisi toistaiseksi kilpailleen menestyksekkäästi pellonvuokrien kanssa (Lundén 2023). Aurinkovoimaloilla onkin oltava maatalouskäyttöä selvästi parempi vuokrataso, sillä vuokrapellosta on useimmiten niukkuutta.

Tuulivoimala-alueita on vuokrattu ja rakennettu huomattavasti pidempään kuin aurinkovoimala-alueita. Mattilan (2023) opinnäytetyössä käsiteltiin tuulivoimaloiden vuokraehtoja, joissa oli myös suurta vaihtelua. Vuokrataso oli kuitenkin noussut selvästi viimeisten kymmenen vuoden aikana. Tuulivoimarakentamiseen soveltuvien maa-alueiden niukkuuden

lisääntymisen lisäksi myös tuulivoimaloiden nimellistehot ovat kaksinkertaistuneet ja ovat nykyään noin 6 MW/tuulivoimala. Tuulivoimatuotannossa vuokraa saatetaan maksaa myös tuulivoimalaa ympäröiville metsää kasvaville alueille (tuulentuotantoalue).

Koska aurinkovoimaloiden maksamista maanvuokrista tai kiinteistökaupoista ei ole tarkempia tietoja, aurinkovoimaloiden maksukykyä on perusteltua tarkastella yksinkertaisen herkkyyksianalyysin avulla.

Herkkyyksianalyysin lähtötiedot, joilla saavutetaan nollatulos:

- Investointi 500 000 euroa/ha
- Investoinnin tuottovaatimus 5 % (sis. pääoman koron ja poiston)
- Tuotanto 500 MWh/ha/vuosi
- Sähkön myyntihinta 0,05 euroa/kWh (50 euroa/MWh) = Tulos on 0 euroa/ha/vuosi

Investoinnin noin 500 000 euron/ha suuruusluokka on johdettu Sulkavan noin seitsemän hehtaarin kokoisesta aurinkovoimalasta. Lopullinen investointikulu Sulkavalla jäi tästä noin kymmenesosan pienemmäksi. Investoinnin tuottovaatimus on laskettu yksinkertaistetusti siten, että se sisältää sekä pääoman koron että pääoman kulumisen (poiston). Tällöin ei tarvitse ottaa kantaa investoinnin pitoaikaan ja jäännösarvoon. Tuottovaatimus voidaan muuntaa annuiteetilaskelmaksi, jossa alussa pääoman koron osuus on suuri ja poisto (lainan lyhennys) kasvaa vähitellen, kunnes investointi on poistettu kokonaan (laina lyhennetty). Esimerkiksi viiden prosentin tuottovaatimus investoinnille vastaa 2,9 prosentin korkoa pääomalle ja 30 vuoden pitoaikaa investoinnille. Jos investoinnin pitoaika kasvaa 40 vuodeksi, pääoman korko kasvaa 3,9 prosentiksi. Jos investoinnilla on jäännösarvo, ja aurinkopaneelit esimerkiksi myydään käytettyinä, investointia ei tarvitse poistaa loppuun asti ja pitoaika lyhenee. Myös tällöin korko pääomalle voi kasvaa.

Sähköntuotanto 500 MWh/ha/vuosi on mitoitettu varovaisesti siten, että aurinkovoimala-alueella voi olla myös paneeleista vapaita alueita, esimerkiksi aukeita varjostamattomia alueita voimalan eteläpuolella. Jos vuokrattu voimala-alue olisi täysin paneelien kattama, tuotanto voisi olla jopa lähellä 700 MWh/ha/vuosi. Tällöin aurinkovoimalan eteläpuolella tulisi olla muussa maankäytössä joka tapauksessa aukeana säilyvä alue, kuten pelto, avosuo tai vesistö. Sähkön myyntihinta viisi senttiä/kWh on valittu sähkön tukkuhintojen ja tuotantokustannusten kompromissina. Suuruusluokka on myös lähellä sähkön siirtohintoja.

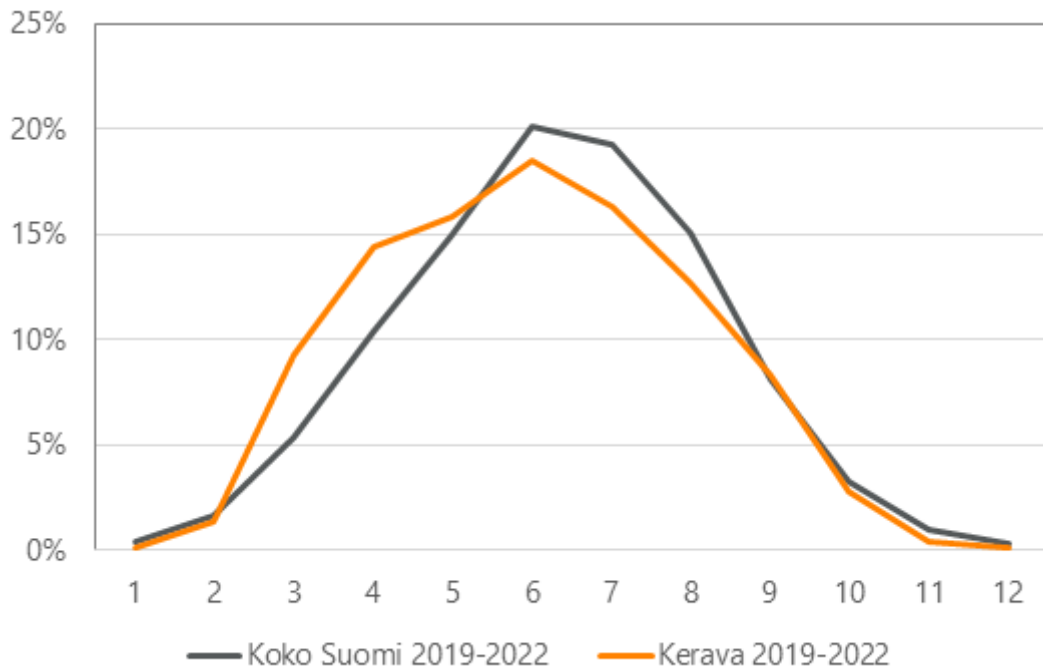
Herkkyysslaskelmataulukoista voidaan havaita, että jos investoinnin tuottovaatimus tai investointikulu laskevat, tulos ja maksukyky maa-alueista kasvavat nopeasti (Taulukko 11). Samoin tapahtuu, jos sähkön myyntihinta tai tuotanto nousevat. Samalla havaitaan, että aurinkovoimalan maksukyky maanvuokrana voi melko pienen positiivisen riskin toteutuessa olla jo noin kymmenkertainen metsästä saatavaan tuloon nähden (Taulukko 9, sivu 38).

Sekä aurinkovoimassa että tuulivoimassa tärkeimmät vaikutettavissa olevat kannattavuustekijät ovat investoinnin tuottovaatimuksen painaminen alas ja sähkön myyntihinnan varmistaminen. Investointikuluun ja vuosituotantoon on hankalampi vaikuttaa, sillä vaikka myös aurinkopaneelit kehittyvät ja halpenevat, investointi tehdään senhetkisellä teknologialla ja hinnalla. Toisaalta korvausinvestointeja voi helpottaa, jos vanhemmillakin paneeleilla on jälkimarkkinat käytettyinä.

ja aurinkovoimatuotannon yhteensovittamisesta on kokemuksia esimerkiksi kotieläinten kuten lampaiden laiduntamisessa, niittykasvien viljelyssä sekä joissakin varjostusta kaipaavien erikoiskasvien tuotannoissa.

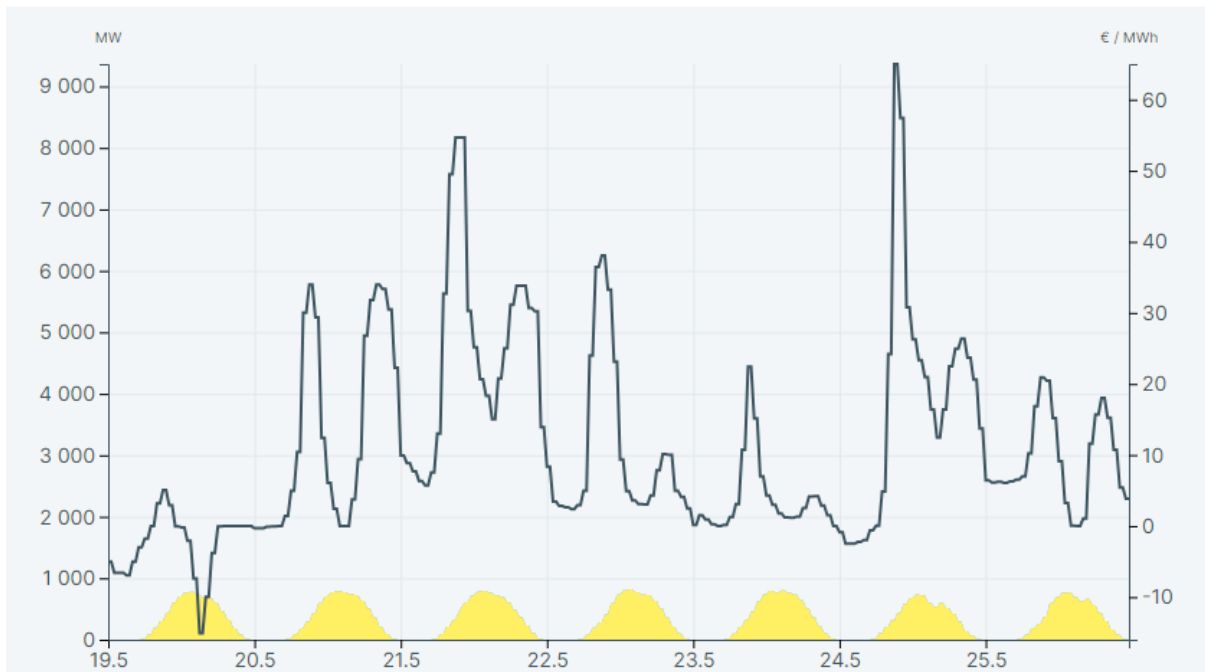
Jos maanviljelijä vuokraa peltoalueen aurinkovoimalatoimijalle, maanviljelijän saamat vuokratulot ovat vielä kuluvana vuonna verotuksessa maataloustuloja. Ne jaetaan maatalouden nettovarallisuuden perusteella verotettaviksi ansio- ja pääomatuloiksi. Myös metsästä tai vaikkapa tilan suoalueesta saadut maanvuokratulot ovat vielä kuluvana vuonna maataloustuloja. Mutta jos metsänomistaja ei ole myös maanviljelijä, hänellä ei yleensä ole maatalouden nettovarallisuutta. Silloin metsänomistajan tilastaan saamat vuokratulot ovat aina ansiotuloja. Vuodesta 2025 alkaen maa- ja metsätalouden maanvuokratulojen verotus muuttuu (HE 75/2024 vp). Rakennusten rakennelmien ja niiden rakennuspaikkojen maanvuokratulot eivät enää ole maatalouden tuloja vaan pääomatuloja. Jos metsänomistaja itse rakentaisi aurinkovoimalapuiston ja vuokraisi sen operaattorille, tulot olisivat siis edelleenkin maataloustuloja. Mutta jos hän vuokraisi vain maapohjan operaattorin rakentamalle aurinkovoimalalle, tulot olisivat pääomatuloja. Metsäalueelle raivattavalle aurinkovoimala-alueelle mahdollisesti saadut metsätalouden tuet saatetaan periä takaisin, jos tukien myöntöön liittyvä hoito- ja kunnossapitovelvoite on vielä voimassa. Toisaalta aurinkovoimaloita voidaan raivata metsiin ilman Euroopan unionin merkittävästi lisääntyntä metsiä koskevaa sääntelyä. EU:n metsäkaatoasetus säätelee raivausta maatalouskäyttöön.

Aurinkovoimaloiden sähköntuotanto on suurinta kesällä ja talvikuukausina tuotantoa ei juuri ole. Pimeään yöaikaan voimalat eivät tuota sähköä. Näillä molemmilla tekijöillä on kasvavaa vaikutusta sähkön myyntihintaan. Sähkön hinta on usein korkein talvella pakkasjaksoilla. Aurinkovoimalalle tärkeiden huhti-syyskuun sekä valoisan päivääjän sähkön myyntihinnat ovat olleet laskussa. Toisaalta Keravan aurinkovoimalan pitkien tuotantotietojen perusteella jo maaliskuunkin tuotanto voi olla kohtuullisella tasolla, mikä on hyvä muistaa aurinkovoimaloiden käynnistymisiä ja siten epäjatkuvuuksia sisältäviä koko Suomen aurinkosähkön tuotantotietoja tarkasteltaessa (Kuva 12). Vuorokauden sisäisessä sähköntuotannossa Suomessa on alkanut näkyä ns. "anakkäyrä", kun aurinkovoiman tuotanto on kasvanut (Kuva 13). Vuonna 2024 aurinkovoimaloiden tuotantoteho on korkeimmillaan ollut jo noin 800 MW. Ankkakäyrä tarkoittaa, että sähkön hinta laskee päivällä, kun aurinkosähköä on runsaasti markkinoilla (YLE 2024).



Kuva 12. Keravan ja koko Suomen aurinkovoimaloiden tuotannon jakautuminen kuukausittain (1–12), keskimäärin vuosina 2019–2022, %. (Keravan aurinkovoimala 2024, Energiategollisuus 2024).

Tänään
 Päivä:
 Ajanjakso:
 Päivä
Viikko
Kuukausi



Kuva 13. Suomessa olevien aurinkovoimaloiden hetkellinen tuotantoteho (MW, vasen akseli) ja sähkön markkinahinta (euroa/MWh, oikea akseli) yhdellä aurinkoisella viikolla toukokuussa 2024 (Fingrid 2024).

Sähkön myyntihintojen laskiessa ja vaihdellessa sähkön siirtohintojen merkitys aurinkosähkön tuotannon kannattavuudelle on todennäköisesti kasvamassa. Aurinkosähkön tuotannon lisääntyessä sähköntuottajien on koko ajan kannattavampaa käyttää itse tai myydä tuotanto suoraan läheisille sähkökäyttäjille mahdollisimman pienin siirtokustannuksin. Samoin sähkön varastointi akkuihin tai muunto varastointikelpoisiksi energiamuodoiksi muuttuu koko ajan kannattavammaksi. Tilastokeskuksen mukaan Suomessa käytettiin vuonna 2023 noin 80 TWh sähköä. Suomen koko energiankulutus oli ennakkotietojen mukaan 366 TWh (Suomen virallinen tilasto 2023), joten sähköllä voidaan tulevaisuudessa korvata muita energialähteitä merkittävästi. Suunnilleen yhden vuoden avohakkuita vastaavalla pinta-alalla (160 000 ha, Luke 27.9.2023) ja varovaisesti arvioidulla tuotannolla 500 MWh/ha/vuosi aurinkovoimalat voisivat tuottaa jo koko Suomen nykyisen sähkökäytön määrän 80 TWh verran sähköä.

5.5. Yhteenveto

Aurinkovoimalalla on kolme erilaista maankäyttötarvetta: 1) rakennuspaikka (voimala-alue), 2) huoltotieyhteydet ja 3) sähkönsiirtoyhteydet sähköverkon sähköasemalle. Näistä vain voimala-alueen perustaminen perustuu puhtaasti vapaaehtoiseen sopimukseen maanomistajan kanssa. Voimala-alueen toimijalle muodostuu tie- ja sähkönsiirto-oikeudet, jotka muodostavat lunastuslain perusteella korvattavia tulonmenetyksiä ja käyttörajoitteita muille maanomistajille. Lunastuslaki on parhaillaan uudistumassa.

- Pellot aurinkovoimala-alueena eivät vuokrattuina oikeuta viljelijätukiin, mutta hallinto-oikeuden säilyttävillä sopimuksilla viljelijätukien saaminen on mahdollista. Metsissä saatetaan periä alueelle myönnettyjä metsätalouden tukia takaisin. Maanvuokratulot ovat sekä maatalousmaan että metsän osalta vielä vuonna 2024 maataloustuloa, joka ilman maatalouden nettovarallisuutta on ansiotuloa. Vuodesta 2025 alkaen maa- ja metsätalouden maanvuokratulot ovat lakimuutoksen vuoksi pääomatuloja.
- Aurinkovoimala-alue on harvoin täysin paneelien peittämää, koska tarvitaan myös aukeaa aluetta erityisesti varjostuksen vähentämiseksi. Sähköntuotanto on kaksipuoleisilla paneeleilla vähintään välillä 440–660 MWh/ha/vuosi, ja hyvin todennäköisesti enemmän.
- Metsätaloudessa Kyyrönsuon (140 ha) tuoton arvio on ennen veroja 70–160 euroa/ha/vuosi ja Paiholan (55 ha) 230–280 euroa/ha/vuosi tulevien vuosikymmenien aikana. Ne vastaavat 3,3–3,5 % tuottoa ennen veroja metsäkiinteistön arvioidulle markkina-arvolle. Molempien tilojen markkina-arvot vastaavat suuruusluokaltaan noin yhden hehtaarin aurinkopaneeli-investointia.
- Sähköntuottajan maanvuokrana mitattu maksukyky aurinkovoimalan maa-alueesta näyttäisi muodostuvan melko pienellä positiivisella riskillä noin kymmenkertaiseksi verrattuna metsätalouden tuottoon. Aurinkosähkön myyntihinnan vaihteluissa on lisääntyvää epävarmuutta aurinkosähkötuotannon kasvaessa. Vuokrataso on ilmeisesti toistaiseksi kilpaillut menestyksekkäästi pellonvuokrien kanssa.
- Ainakin osa aurinkosähkön tuottajista pyrkii ensisijaisesti ostamaan ja toissijaisesti vuokraamaan voimala-alueet maanomistajilta.
- Tuotannolla 500 MWh/ha/vuosi noin 160 000 ha aurinkovoimaloita tuottaisi koko Suomen nykyisen sähkökäytön määrän 80 TWh verran sähköä. Pinta-ala on samassa suuruusluokassa yhden yksittäisen vuoden avohakkuiden kanssa.

Viitteet

- Eduskunta 2024. Lakihankkeiden tietopaketit. Lunastuslain korvausperusteiden uudistaminen. Viitattu 8/2024. https://www.eduskunta.fi/FI/naineduskuntatoimii/kirjasto/aineis-tot/kotimainen_oikeus/LATI/Sivut/lunastuslain-korvausperusteiden-uudistaminen.aspx
- Energiateollisuus 2024. Sähkön kuukausitilastot. Viitattu 8/2024. <https://energia.fi/tilastot/sahkon-kuukausitilasto/>.
- Fingrid 2024. Sähköjärjestelmän tila. Viitattu 8/2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/>.
- HE 75/2024 vp. Hallituksen esitys eduskunnalle laeiksi maatilatalouden tuloverolain 5 ja 21 §:n sekä tuloverolain 32 §:n muuttamisesta. Viitattu 11/2024. [HE 75/2024 vp](#)
- Keravan aurinkovoimala 2024. Viitattu 9/2024. <https://www.keravanaurinkovoimala.fi/>
- Liljeroos, H. 2024. Hannun hintaseuranta: Kohti ostajan markkinoita? Metsälehti artikkeli 15.5.2024. <https://www.metsalehti.fi/artikkelit/hannun-hintaseuranta-kohti-ostajan-markkinoita/>.
- Luke 2023. Metsänhoito- ja metsänparannustyöt 2022. Viitattu 8/2024. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/metsanhoito-ja-metsanparannustyot/metsanhoito-ja-metsanparannustyot-2022>.
- Luke 2024. Yksityismetsätalouden liiketulos 2023. Viitattu 8/2024. [Yksityismetsätalouden liiketulos 2023 | Luonnonvarakeskus](#)
- Lundén, K. 2023. Peltohehtaarella voi tehdä muhkeaa tiliä vuokraamalla sen aurinkosähköfirmalle. Maaseudun Tulevaisuus 2.12.2023. <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/uutiset/aa485d7c-4975-45ae-bc99-4a07b7990542>.
- LVM 13.7.2018/560. Yksityistielaki. Annettu Helsingissä 13.7.2018. [Yksityistielaki 560/2018 - Ajantasainen lainsäädäntö - FINLEX®](#)
- Maanmittauslaitos 2024. Karttapaikka. Karttatasot – Ilmakuva. Ilmakuvasta lasketut pinta-alat 5/2024. <https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka>.
- Mattila, R. 2023. Metsätilojen arvonmääritys tuulivoima-alueilla. Opinnäytetyö. XAMK Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Luonnonvara-alan ammattikorkeakoulututkinto. Metsätalouden koulutus. 108 s. + liitteet. <https://www.theseus.fi/handle/10024/-817493>.
- OM 29.7.1977/603. Laki kiinteän omaisuuden ja erityisten oikeuksien lunastuksesta. Annettu Helsingissä 29.7.1977. [Laki kiinteän omaisuuden ja erityisten oikeuksien... 603/1977 - Ajantasainen lainsäädäntö - FINLEX®](#)
- Solarigo 2024. Viitattu 8/2024. <https://www.solarigo.fi/sunsulkava-s>.
- Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkajulkaisu] 2023. Viiteajankohta: 31.12.2023. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 8/2024]. <https://stat.fi/julkaisu/cln-2znlq68j1x0cut6ssrz1xp>

TEM 1.9.2013/588. Sähkömarkkinalaki. Annettu Helsingissä 1.9.2013.

[Sähkömarkkinalaki 588/2013 - Ajantasainen lainsäädäntö - FINLEX®](#)

YLE 2023. Eteläsavolainen Sulkava aikoo olla Suomen ensimmäinen kunta, joka kattaa sähkönkulutuksensa aurinkovoimalla. <https://yle.fi/a/74-20013044>.

YLE 2024. Aurinkopaneelit romauttavat pörssisähkön hinnan iltapäivisin – jopa miinukselle. <https://yle.fi/a/74-20088803>

6. Aurinkovoiman monimuotoisuusvaikutukset

Anne Tolvanen

6.1. Mikä on tiedon taso?

Jotta aurinkovoiman haitalliset monimuotoisuusvaikutukset voidaan ennaltaehkäistä ja minimoida, ne täytyy ensin tunnistaa. Aurinkovoiman monimuotoisuusvaikutuksista on toistaiseksi vain vähän tutkimustietoa, ja Suomesta se puuttuu kokonaan. Latiffen ym. (2023) koostejulkaisussa ilmenee, että ensimmäinen aurinkovoiman vaikutuksiin liittyvä alkuperäistutkimus julkaistiin vuonna 2010, ja julkaisut kääntyivät selkeään nousuun vasta vuonna 2020. Silti edelleen lähes puolet aurinkovoimajulkaisuista on review-artikkeleita tai muita ei-alkuperäiseen aineistoon pohjautuvia tai muihin teollisuushankkeisiin pohjautuvia tutkimuksia, mikä osoittaa, että kyseessä on varsin uusi tutkimuskenttä.

Selvitimme tässä työssä kansainvälisten julkaisujen pohjalta, millaisia vaikutuksia aurinkovoimalla on tähän mennessä todettu olevan. Työ ei ole varsinainen review-tutkimus, eikä julkaisuja koostettu systemaattisen menetelmän avulla, vaan hakemalla niitä erilaisten hakusanojen avulla Googlestä ja Google Scholarista. Tässä työssä ei myöskään käydä läpi kaikkien löydettyjen julkaisujen tuloksia, vaan pyritään luomaan yleiskuva tilanteesta.

6.2. Vaikutukset monimuotoisuuteen

Aurinkovoima vaikuttaa monimuotoisuuteen monella eri tavalla. Huomattava osa vaikutuksista aiheutuu maankäytöstä ja elinympäristöjen pirstoutumisesta. Jos voimalat rakennetaan metsäympäristöön, metsän olosuhteet häviävät ja maa tiivistyy tai muutoin muuttuu teiden ja muun rakentamisen seurauksena. Tilannetta voidaan verrata mihin tahansa muuhun rakentamiseen. Mitä suljetumpi on metsän lähtötilanne, sen suurempi on aurinkovoiman aiheuttama muutos fysikaalisessa ympäristössä ja sitä kautta monimuotoisuudessa. Mikäli alue aidataan, se muodostaa kulkuesteen monille maanisäkkäille. Jos alueella elää harvinaista tai uhanalaista lajistoa, jonka siirtyminen muualle on vaikeaa tai mahdotonta, on vaarana, että ne harvinaistuvat entisestään.

Aurinkovoimakentät muuttavat alueen mikroilmastoa (Armstrong ym. 2016). Paneelit luovat kuumia saarekkeita paneelien väliin ja varjoisia ympäristöjä niiden alle. Myös kosteusolot eroavat, koska sade ei saavuta paneelien alla olevaa aluetta. Siten paneelien alle varjoisampaan, viileämpään ja kuivempaan ympäristöön voi muodostua niukempi ja vähälajisempi kasvillisuus kuin paneelien väliselle alueelle (Armstrong ym. 2016). Kasvillisuuden myöhäisempi kukinta paneelien alla voi hyödyttää pölyttäjiä syksyllä, jolloin ravintoa on muutoin vähemmän saatavilla (Graham ym. 2021).

Kuivassa ekosysteemissä tehdyssä tutkimuksessa havaittiin, että maaperä on aurinkokentillä kosteampaa ja haihdutus vähäisempää kuin niiden ulkopuolisilla alueilla. Tämä lisäsi kasvillisuuden peittävyttä ja lajirikkautta muuhun ympäristöön verrattuna (Liu ym. 2019). Toinen, Chilessä toteutettu tutkimus osoitti taas, että aurinkokentät voivat muodostaa kuumuussaa-rekkeita, joiden ilmasto on muuta ympäristöä kuumempi. Silti myös tässä tutkimuksessa paneelien alla olevat alueet olivat muita alueita viileämpiä ja kosteampia (Suuronen ym. 2017).

USAssa tutkittiin aiemmin maatalouskäytössä olleella aurinkovoimakentällä, jolle kylvettiin heinä- ja ruohokasveja. Alueen kasvilajiston monipuolistumisen myötä myös pölyttäjyhteisöt kohentuivat muutamassa vuodessa, mikä paransi myös peltojen läheisyydessä sijaitsevien soijaviljelmien pölytystä. Toiminnalla pystyttiin siis parantamaan sekä monimuotoisuutta että ruokaturvaa energiantuotannon lisäksi (Walston ym. 2024).

Slovakiassa tarkasteltiin maatalousalueille perustettujen aurinkovoimaloiden vaikutuksia lintulajistoon ja havaittiin, että erityisesti hyönteissyöjälintujen lajisto oli monipuolisempaa kuin ulkopuolisilla alueilla. Aurinkovoimakenttien lajisto ylipäättään poikkesi ympäröivän maatalousympäristön lajistosta ja sitä kautta monipuolisti monimuotoisuutta maisematasolla (Jarcuska ym. 2024).

Aurinkopaneelit voivat lisätä lintujen törmäyskuolleisuutta, jos linnut erehtyvät luulemaan alueita vesiympäristönä ja käyttävät vettä laskeutumis- ja nousuympäristönä. Kaliforniassa tehty tutkimus osoitti, että lintujen törmäyskuolleisuus on samaa luokkaa aurinko- ja tuulivoimassa, mutta vain vähäinen kaikista muista ihmisen aiheuttamista kuolleisuuden aiheuttajista (Walston ym. 2016). Tutkimuksessa kuitenkin arvioitiin, että aurinkovoiman yleistyessä myös sen osuus lintujen törmäyskuolleisuudessa kasvaa, ja sitä kautta siitä tulee uusi ihmisen aiheuttama monimuotoisuutta heikentävä tekijä.

Vesihyönteisillä tehty tutkimus osoitti, että paneelien heijastama polarisoitu valo voi erehdyttää jotkut hyönteiset munimaan paneeleihin. Siten aurinkovoimakentistä voi näille hyönteisille tulla ekologinen ansa, koska koko niiden jälkeläistö tuhoutuu (Horváth ym. 2010). Toisaalta paneelien raidoitus ja valkeat reunat vähensivät niiden houkuttelevuutta 10–26-kertaisesti.

6.3. Miten voidaan sovittaa yhteen aurinkovoima ja monimuotoisuus?

Aurinkovoiman ja monimuotoisuuden yhteensovittaminen on mahdollista, jos huomioidaan voimaloiden suunnittelussa, rakentamisessa ja ylläpidossa monimuotoisuutta tukevia ratkaisuja. Alla luetellaan muutamia esimerkkejä.

Sijainninohjaus

Aurinkovoimalat sijoitetaan alueille, jotka eivät ole monimuotoisuuden kannalta tärkeitä. Tällaisia alueita voivat olla maatalousmaat, teollisuusalueet tai jo ennestään heikentyneet ekosysteemit, joissa voimaloiden rakentaminen aiheuttaisi vähemmän häiriöitä. Metsäympäristöjä, joissa aurinkovoiman aiheuttamat muutokset ovat suurimmat, tulisi välttää.

Alueen monikäyttö

- Aurinkovoiman ja maatalouden yhdistämisestä (agrivoltaics) on jo käytännön esimerkkejä ja sen lisääminen auttaisi myös EU:ta saavuttamaan hiilineutraalisuustavoitteita (JRC 2023).
- Aurinkopaneelien alla voidaan myös kasvattaa pölyttäjälajistoa suosivaa kasvillisuutta ja sitä kautta edistää useita eri tavoitteita Walston ym. (2024) esimerkin mukaisesti.
- Myös mehiläistarhausta voi sopia aurinkovoimakentille.

- Normaalialueita korkeammat paneelirakenteet sallivat esimerkiksi lampaiden laiduntamisen paneelien alla. Tästä on esimerkkejä myös Suomesta.
- Erityisesti Pohjois-Suomessa monet aurinkovoimakentät ovat rakenteilla turvepelloille, joiden maaperäpäästöt ovat suuret. Näille kohteille voidaan myös tehdä lisää ojitusta, joka lisää vesistöpäästöjä. Ojituksen sijaan alueille voisi soveltua vettäminen, jolloin maaperäpäästöt ja vesistökuormitus vähenisivät. Näissä tilanteissa tulisi kuitenkin varmistaa se, ettei vettäminen aiheuta muualla havaittuja ongelmia vesilinnustolle ja -hyönteisille.

Viitteet

- Graham, M., Ates, S., Melathopoulos, A.P., Moldenke A.R., DeBano S.J., Best L.R. & Higgins, C.W. 2021. Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaics ecosystem. *Scientific reports* 11: 7452. DOI: [10.1038/s41598-021-86756-4](https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4)
- Horváth, G., Blahó, M., Egri, A., Kriska, G., Seres, I. & Robertson, B. 2010. Reducing the maladaptive attractiveness of solar panels to polarotactic insects. *Conservation Biology* 24(6):1644–1653. DOI: [10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x).
- Jarčuška, B., Gálffyová M., Schnürmacher, R., Baláž, M., Mišík, M., Repel, M., Fulín, M., Kerestúr, D., Lackovičová, Z., Mojžiš, M., Zámečník, M., Kaňuch, P. & Krištín, A. 2024. Solar parks can enhance bird diversity in agricultural landscape, *Journal of Environmental Management* 351: 119902. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119902>
- JRC 2023. Agrivoltaics alone could surpass EU photovoltaic 2030 goals. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/agrivoltaics-alone-could-surpass-eu-photovoltaic-2030-goals-2023-10-12_en
- Liu, Y., Zhang, R.-O., Huang, Z., Cheng, Z., López-Vicente, M., Ma, X.-R. & Wu, G.-L. 2019. Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem. *Land Degradation & Development* 30: 2177–2186. <https://doi.org/10.1002/ldr.3408>
- Suuronen, A., Muñoz-Escobar, C., Lensu, A., Kuitunen, M., Guajardo Celis, N., Espinoza Astudillo, P., Ferrú, M., Taucare-Ríos, A., Miranda, M. & Kukkonen, J.V.K. 2017. The Influence of Solar Power Plants on Microclimatic Conditions and the Biotic Community in Chilean Desert Environments. *Environ Manage.* 60(4): 630–642. [10.1007/s00267-017-0906-4](https://doi.org/10.1007/s00267-017-0906-4)
- Walston, L.J, Hartmann, H.M. Fox, L., Macknick, J., McCall, J., Janski, J. & Jenkins, L. 2024. If you build it, will they come? Insect community responses to habitat establishment at solar energy facilities in Minnesota, USA. *Environmental Research Letters* 19: 014053. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0f72>

7. Kaavoittajan hiilikartta – työkalu käytännön toimijoille

Jukka-Pekka Myllykangas

7.1. Tausta

Hiilikartta on paikkatietopohjainen työkalu (Suomen ympäristökeskus 2024), jonka tarkoituksena on tukea kuntia ja kaavoittajia arvioimaan kaavoituksessa tehtävien päätösten vaikutuksia hiilivarastoihin ja hiilinieluihin. Se kehitettiin osana Maa- ja metsätalousministeriön "Napaa hiilestä kiinni" -toimenpidekokonaisuutta vuosina 2022–2023. Hankkeen toteuttajina olivat Suomen ympäristökeskus (Syke), Luonnonvarakeskus (Luke) ja Avoin ry. Lisäksi mukana olivat useita pilottialueita, kuten Porvoo, Tampere, Turku ja Sodankylä. Hankkeen tuloksena syntyi helppokäyttöinen selainpohjainen työkalu, jonka avulla voidaan tarkastella kaavojen aiheuttamia vaikutuksia alueellisiin hiilivarastoihin ja hiilinieluihin, mikä on tärkeää tulevaisuuden ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi.

7.2. Aineisto

Hiilikartta-työkalun laskennassa käytettävät aineistot koostuvat sekä kasvillisuuden että maaperän hiilivarastoista, joita yhdistetään paikkatietopohjaisiksi 16 x 16 metrin rasteriaineistoiksi. Laskennassa hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan kansallisen kasvihuonekaasuinventaarion (Tilastokeskus 2024) menetelmiä, mutta työkalun tulokset eivät ole suoraan vertailtavissa valtakunnallisen inventaarion tuloksiin. Tämä johtuu siitä, että Hiilikartta on suunniteltu kaavoituksen vaikutusten arviointiin paikallistasolla, eikä sen aineistoja ole tarkoitettu sovellettavaksi kansallisella tasolla.

Hiilikartan tausta-aineisto sisältää useita eri tietolähteitä, kuten esimerkiksi Geologian tutkimuskeskuksen Maati-hankkeen turpeen hiilivarastoa koskevia aineistoja, sekä Monilähteen valtakunnan metsien inventoinnin kasvupaikkatietoja ja Mammutti-hankkeen tuloksia. Maaperän hiilivarastoaineistot on luotu hierarkkisesti yhdistellen, ja ne kattavat sekä turvemaiden että kivennäismaiden hiilivarastot. Turvekankaiden osalta aineistossa on otettu huomioon ravinteisuustaso, ojitustilanne ja oletusarvot. Kivennäismaiden osalta on käytetty Luken metsämaan kasvupaikkatyyppeihin perustuvia oletusarvoja, ja maatalousmaidet hiilivarastot perustuvat tutkimuskirjallisuuteen.

Kasvillisuuden hiilivarastoaineistot sisältävät arvion muun muassa metsien, maatalousmaidet ja rakennetun ympäristön viheralueiden hiilivarastoista. Metsämaan osalta aineistot perustuvat segmentoituun MVMi-aineistoon, kun taas maatalousmaan ja rakennetun ympäristön kasvillisuuden hiilivaraston osalta on käytetty useita paikkatietoaineistoja, mallinnuksia ja kirjallisuusarvoja.

Puuston hiilinielu on laskettu Luken Motti-ohjelmiston avulla. Laskennassa käytetään kasvupaikkatyypeille määritellyjä keskimääräisiä hiilivaraston vuosimuutoksia. Oletuksena ovat nykyiset metsänhoitosuositukset ja hieman varovaisemmat harvennukset, jotka maksimoivat hiilensidonnan. Tulevaisuudessa laskentaan lisätään vaihtoehtoisia metsänhoitotapoja, kuten taalou- ja virkistysmetsien käsittelytapoja.

Tarkemman kuvauksen käytetyistä aineistoista löytää työkalun nettisivuilta osoitteesta: <https://www.syke.fi/hankkeet/hiilikartta>. Työkalun selainpohjainen käyttöliittymä avautuu osoitteesta: <https://hiilikartta.avoin.org/>.

7.3. Työkalun käyttö aurinkovoiman rakentamisen maankäytön muutosten arviointiin

Työkalun keskeinen toiminnallisuus on kaavojen ja maankäytön muutosten vaikutusten arviointi alueellisiin hiilivarastoihin ja -nieluihin. Käyttäjä voi tuoda työkaluun omia kaava-aineistojaan paikkatietotiedostoina, tai piirtää ne suoraan työkalun verkkokäyttöliittymään, ja kohdistaa ne Hiilikartan sisältämiin kaavaluokituksiin. Tämä mahdollistaa laskelmien tekemisen siitä, miten erilaiset maankäytön muutokset vaikuttavat alueen hiilitaseeseen riippuen siitä mitä alueen nykyiselle kasvillisuudelle ja maaperälle tapahtuu. Esimerkiksi, kun alueelle rakennetaan aurinkovoimala, alue muuttuu kasvipeitteemmäksi eli kasvillisuuden hiilivarastot menetetään kokonaan, mutta maaperän hiilivarasto säilyy.

Aurinkometsä -hankkeessa Hiilikarttaa käytettiin luomaan vaihtoehtoinen arvio maa-asenteisen aurinkovoimalan hiilivaikutuksista Paiholan ja Kyyrönsuon alueilla. Aikavälillä 2024–2055 vertailtiin Hiilikartan laskelmia Aurinkometsä -hankkeen laskelmiin. Hiilikartan laskelmien mukaan hiilivarastojen muutos oli Paiholassa -387 t CO₂e/ha ja Kyyrönsuolla -445 t CO₂e/ha, kun taas Aurinkometsä -mallissa vastaavat luvut olivat pienempiä: Paiholassa -279 t CO₂e/ha ja Kyyrönsuolla -292 t CO₂e/ha (Taulukko 12).

Hiilikartta arvioi puuston osalta hiilivaraston muutoksen suuremmaksi Paiholassa, mutta pienemmäksi Kyyrönsuolla, kuin Aurinkometsä -laskelmissa. Maaperän osalta hiilikartta arvioi systemaattisesti hiilivaraston menetyksen suuremmaksi kuin Aurinkometsä -laskelmat.

Taulukko 12. Hiilivaraston muutos Hiilikartan ja Aurinkometsä -hankkeen laskelmien perusteella vuosina 2024–2025, t CO₂e/ha.

	Paihola	Kyyrönsuo
Puusto		
Hiilikartta	-179	-135
Aurinkometsä	-231	-121
Maaperä		
Hiilikartta	-171	-310
Aurinkometsä	-48	-171
Yhteensä		
Hiilikartta	-387	-445
Aurinkometsä	-279	-292
Erotus	-98	-153

Puuston osalta tulokset ovat pääosin varsin hyvin linjassa Aurinkometsä -hankkeen laskelmien kanssa. Maaperän hiilivaraston muutokset Hiilikartta -laskelmien ja Aurinkometsä -laskelmien erot sen sijaan olivat suuremmat, mikä pääosin johtunee eri lähtöaineistoista, joita laskennoissa käytettiin. Erityisesti turvemaiden määrät poikkesivat Kyyrönsuon suunnittelualueella. Aurinkometsä -hankkeen laskennoissa lähtötietoina käytettiin Metsäkeskuksen avointa metsävaratietoa ja Hiilikartta -laskennassa Maati-hankkeen turpeen hiilivarastoa koskevia aineistoja, sekä Monilähteen valtakunnan metsien inventoinnin kasvupaikkatietoja ja Mammutti-hankkeen tuloksia.

Hiilikartan kehitystyö jatkuu edelleen ja keskeisimpiä tulevaisuuden kehityskohteita on niemenomaan uusiutuvan energian maankäyttövaikutusten arvioinnin parantaminen, erityisesti maaperävaikutusten osalta.

Viitteet

Suomen ympäristökeskus 2024. Kaavoittajan hiilikarttatyökalu. Julkaistu 22.1.2024. Päivitetty 28.2.2024. Viitattu 5/2024. [Suomen ympäristökeskus > Hiilikartta](#)

Tilastokeskus 2024. Kasvihuonekaasuinventaario. Päivitetty 26.3.2024. Viitattu 5/2024. [Kasvihuonekaasuinventaario | Tilastokeskus](#)



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki