

# Uusiutuvan energian arvoketjujen elinkaariarviointi



HOKE Hiilineutraalit, oikeudenmukaiset ja kokonaiskestävät energiayhteisöt Etelä-Pohjanmaalla –hanke

Osaraportti, T2.1

Päiväys 13.3.2026



**Euroopan unionin  
osarahoittama**



**ETELÄ-POHJANMAAN LIITTO**  
Regional Council of South Ostrobothnia

Tämä raportti on laadittu osana Euroopan Unionin osarahoittamaa ”Hiilineutraalit, oikeudenmukaiset ja kokonaiskestävät energiayhteisöt Etelä-Pohjanmaalla” –hanketta. EU:n ja Etelä-Pohjanmaan liiton lisäksi hanketta rahoittivat Seinäjoen ammattikorkeakoulu, Vaasan yliopisto, Helsingin yliopisto ja Vaasan ammattikorkeakoulu.

Raportin laatijat:

Kirsi Spoof-Tuomi  <https://orcid.org/0000-0002-6212-9630>

Bening Mayanti  <https://orcid.org/0000-0001-5073-7375>



## Sisälllys

<b>Tiivistelmä</b> .....	4
<b>Abstract</b> .....	5
<b>1. Johdanto</b> .....	6
<b>2. LCA: Kehys kestävyden arviointiin</b> .....	7
<b>2.1 Elinkaariarvioinnin rajaukset: Cradle-to-Grave ja Cradle-to-Gate</b> .....	7
<b>2.2 Elinkaariarvioinnin neljä vaihetta</b> .....	7
<b>2.3 Energiantuotantomuotojen elinkaaren vaiheet ja päästölähteet</b> .....	8
<b>3. Tuulivoima</b> .....	9
<b>3.1 Tavoitteet ja tutkimuksen laajuus</b> .....	9
3.1.1 Järjestelmän rajaus .....	9
3.1.2 Toiminnallinen yksikkö .....	9
<b>3.2 Inventaarioanalyysi</b> .....	10
3.2.1 Tuulisähkön tuotanto .....	10
3.2.2 Materiaalivirrat .....	10
3.2.3 Energiankulutus .....	11
3.2.4 Päästöt .....	11
<b>3.3 Vaikutusarviointi</b> .....	12
3.3.1 Vaikutusluokat .....	12
3.3.2 Ympäristövaikutusarvioinnin tulokset .....	13
3.3.3 Energian käyttö .....	15
3.3.4 Energian takaisinmaksuaika .....	15
<b>3.4 Tulosten tulkinta</b> .....	16
<b>4. Aurinkovoima</b> .....	17
<b>4.1 Tavoitteet ja tutkimuksen laajuus</b> .....	17
4.1.1 Järjestelmän rajaus .....	17
4.1.2 Toiminnallinen yksikkö .....	17
<b>4.2 Inventaarioanalyysi</b> .....	17
4.2.1 Aurinkosähkön tuotanto .....	18
4.2.2 Aurinkovoimalan keskeiset komponentit ja materiaalivirrat .....	18
4.2.3 Energiankulutus .....	19
4.2.4 Päästöt .....	19
<b>4.3 Vaikutusarviointi</b> .....	20
4.3.1 Vaikutusluokat .....	20

4.3.2 Ympäristövaikutusarvioinnin tulokset .....	21
4.3.3 Energian käyttö .....	23
4.3.4 Energian takaisinmaksuaika .....	24
<b>4.4 Tulosten tulkinta .....</b>	<b>24</b>
<b>5. Biokaasu.....</b>	<b>27</b>
<b>5.1 Tavoitteet ja tutkimuksen laajuus .....</b>	<b>27</b>
5.1.1 Järjestelmän rajaus .....	27
5.1.2 Toiminnallinen yksikkö.....	27
<b>5.2 Inventaarioanalyysi .....</b>	<b>28</b>
5.2.1 Laitoksen rakentaminen ja ylläpito .....	28
5.2.2 Syötteiden hankinta ja biokaasun tuotanto.....	28
5.2.3 Loppukäyttö .....	30
<b>5.3 Vaikutusarviointi .....</b>	<b>31</b>
5.3.1 Vaikutusluokat .....	31
5.3.2 Ympäristövaikutusarvioinnin tulokset .....	31
<b>5.4 Tulosten tulkinta .....</b>	<b>33</b>
<b>6. Metsähake .....</b>	<b>36</b>
<b>6.1 Tavoitteet ja tutkimuksen laajuus .....</b>	<b>36</b>
6.1.1 Järjestelmän rajaus .....	36
6.1.2 Toiminnallinen yksikkö.....	36
<b>6.2 Inventaarioanalyysi .....</b>	<b>36</b>
6.2.1 Keräys ja esikäsittely .....	36
6.2.2 Poltto.....	38
<b>6.3 Vaikutusarviointi .....</b>	<b>39</b>
6.3.1 Vaikutusluokat .....	39
6.3.2 Ympäristövaikutusarvioinnin tulokset .....	39
<b>6.4 Tulosten tulkinta .....</b>	<b>40</b>
<b>7. Johtopäätökset .....</b>	<b>45</b>
<b>Lähteet.....</b>	<b>48</b>
<b>LIITE 1.....</b>	<b>52</b>
<b>LIITE 2.....</b>	<b>56</b>

## Tiivistelmä

Tämä raportti esittelee kattavan elinkaariarvioinnin (Life Cycle Assessment, LCA) uusiutuvan energian tuotannolle, mukaan lukien tuulivoima, aurinkovoima ja bioenergia. Bioenergian osalta tarkastelussa oli biokaasu ja metsätähteet. Työ toteutettiin osana "Hiilineutraalit, oikeudenmukaiset ja kestävät energiayhteisöt Etelä-Pohjanmaalla" (HOKE) -hanketta. Tutkimuksen tavoitteena on tuottaa systemaattinen arvio ympäristövaikutuksista koko arvoketjun ajalta raaka-aineiden hankinnasta aina käytöstä poistoon saakka.

Arviointi toteutettiin pääosin "kehdosta hautaan" -lähestymistavalla. Toiminnallisena yksikkönä käytettiin tuuli- ja aurinkovoiman osalta 1 kilowattituntia (kWh) verkkoon toimitettua sähköä. Bioenergian kohdalla toiminnallisena yksikkönä käytetään 1 megajoule (MJ) energiaa. LCA-menetelmä noudattaa ISO-standardeja ja kattaa useita vaikutusluokkia, mukaan lukien ilmaston lämpenemispotentiaal (Global Warming Potential, GWP), luonnonvarojen ehtymisen sekä paikalliset ympäristövaikutukset, kuten happamoituminen ja rehevöityminen.

Tulosten mukaan 10 MW:n maatuulivoimalan ilmastonlämpenemispotentiaali on 7,6 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Valmistusvaihe on suurin päästöjen lähde (11,3 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh), mikä johtuu pääasiassa teräksen, betonin ja komposiittimateriaalien tuotannosta. Elinkaaren loppuvaiheessa saavutettavat kierrätysshyvytykset kuitenkin kompensoivat näitä vaikutuksia noin 34 %. Energian takaisinmaksuaika (Energy Payback Time, EPT) on lyhyt, noin 9 kuukautta, eli järjestelmä tuottaa elinkaarensa aikana noin 32-kertaisesti sen energiamäärän, joka sen valmistukseen ja ylläpitoon on kulunut.

Aurinkovoiman osalta tarkastelu kohdistui maahan asennettuihin piipohjaisiin teollisen mittakaavan laitoksiin, joiden käyttöikä on 30 vuotta. Näiden järjestelmien GWP on 48,1 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Elinkaaren loppuvaiheessa saavutettavat kierrätysshyvytykset kompensoivat vaikutuksia 25 % ja GWP laskee 36 grammaan CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Energian takaisinmaksuaika on noin 2,5 vuotta, eli järjestelmä tuottaa elinkaarensa aikana noin 12 kertaa enemmän energiaa kuin sen rakentamiseen ja kunnossapitoon kuluu. Paneelien valmistus tunnistettiin merkittävimäksi ympäristökuormituksen aiheuttajaksi. Kun aurinkosähköjärjestelmään liitetään akkuvarasto, ilmastonlämpenemispotentiaali kasvaa noin 1,6-kertaiseksi lisääntyneen materiaalityypin vuoksi.

Biokaasun osalta arviointi keskittyi paineistetun biometaanin tuotantoon ja käyttöön. Syötesekoksen koostumuksella todettiin olevan merkittävä vaikutus ilmastonlämpenemispotentiaaliin. Kun syöteestä 90 % oli lantaa, GWP-arvoksi saatiin -11,9 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ, eli prosessi sitoo hiiltä enemmän kuin vapauttaa. Tämä johtuu siitä, että biokaasuprosessi estää lannan hallitsemattomat metaanipäästöt, jotka muuten vapautuisivat ilmakehään. Syöteen muuttaminen peltobiomassapainotteisemmaksi nosti ilmastonlämpenemispotentiaalia, vaikka muissa vaikutusluokissa havaittiin erilaisia kehityssuuntia. Metsähakkeen osalta elinkaaren kokonaispäästöt olivat 2,3 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ, josta keruun ja käsittelyn osuus oli 1,4 g ja polton osuus 0,9 g. Keruu tunnistettiin keskeisimmäksi ympäristökuormituksen lähteeksi useimmissa vaikutusluokissa, vastaten 38–72 % kokonaisvaikutuksesta.

Tulokset osoittavat, että vaikka uusiutuvien energiateknologioiden käytön aikaiset päästöt ovat vähäisiä, ne eivät ole täysin päästöttömiä, sillä ympäristökuormitusta syntyy erityisesti valmistus- ja materiaalihankintavaiheissa. Laitosten käyttöiän pidentäminen – esimerkiksi tuulivoimaloiden eliniän kasvattaminen 25 vuodesta 30 vuoteen – voi vähentää kaikkia arvioituja ympäristövaikutuksia noin 17 %. Kokonaisuutena tuulivoima nousee energiatehokkaimmaksi teknologiaksi energian takaisinmaksuajan perusteella. Pohjoismainen ilmasto tarjoaa erityisiä etuja tuulivoimalle tasaisen ja voimakkaan tuulisuuden ansiosta, kun taas aurinkovoima on vahvasti riippuvainen auringon säteilystä. Tästä huolimatta kaikki tarkastellut uusiutuvan energian muodot tarjoavat merkittäviä ympäristöhyötyjä verrattuna fossiilisiin energialähteisiin.

## Abstract

This report presents a comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) of renewable energy production such as wind power, solar power, and bioenergy (biogas and forest chips)—within the framework of the "Carbon-neutral, fair and sustainable energy communities in South Ostrobothnia" (HOKE) project. The study aims to provide a systematic evaluation of environmental impacts throughout the entire value chain, from raw material procurement to decommissioning.

The assessment employs a "cradle-to-grave" approach for most technologies, utilizing a functional unit of 1 kilowatt-hour (kWh) of electricity delivered to the grid for wind and solar, and 1 megajoule (MJ) for bioenergy. The LCA methodology adheres to ISO standards, assessing multiple impact categories including Global Warming Potential (GWP), resource depletion, and local environmental impacts such as acidification, and eutrophication.

The assessment showed that a 10 MW onshore installation wind power caused GWP of 7.6 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh. The manufacturing phase is the primary source of emissions (11.3 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh), largely due to the production of steel, concrete, and composite materials. However, significant "recycling credits" at the end-of-life stage offset these impacts by approximately 34%. The Energy Payback Time (EPT) is highly efficient, at around 9 months, meaning that over its lifetime the system produces approximately 32 times the amount of energy required for its manufacturing and maintenance.

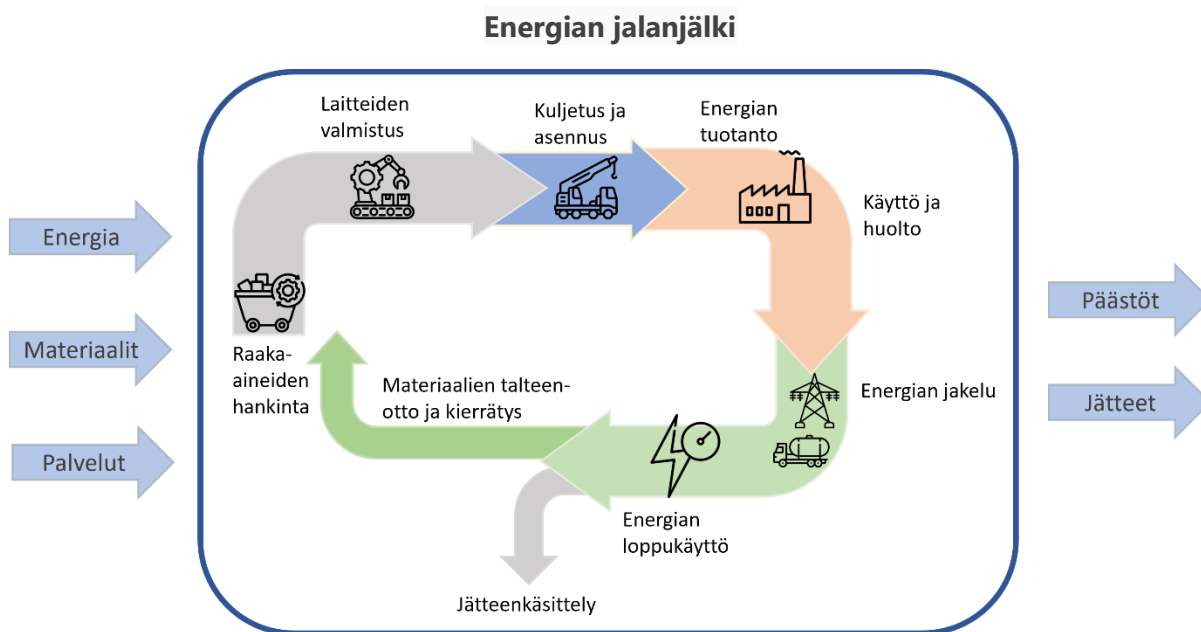
For solar power, the assessment focused on ground-mounted, silicon-based industrial-scale plants with a service life of 30 years. The Global Warming Potential (GWP) of these systems is 48.1 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh. Recycling credits achieved at the end-of-life stage offset the impacts by approximately 25%, reducing the GWP to 36 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh. The Energy Payback Time is approximately 2.5 years, meaning that over its lifetime the system produces about 12 times more energy than is required for its construction and maintenance. Panel manufacturing was identified as the most significant environmental hotspot. When battery storage is integrated into the solar power system, the Global Warming Potential increases by a factor of 1.6 due to the added material intensity.

For biogas, the assessment focused on the production and use of compressed biomethane. The composition of the feedstock mix was found to have a significant influence on GWP. When manure accounted for 90% of the feedstock, the resulting GWP was -11.9 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ, indicating that the process sequesters more carbon than it releases. This is because the biogas process prevents uncontrolled methane emissions from manure that would otherwise be released into the atmosphere. Shifting the feedstock toward a more crop-based biomass mix increased the GWP, although different trends were observed in other impact categories. For forest chips, total life-cycle emissions were 2.3 g CO<sub>2</sub>-eq/MJ, of which collection and processing accounted for 1.4 g and combustion for 0.9 g. Collection was identified as the dominant source of environmental burden across most impact categories, contributing 38–72% of the total impact.

The results demonstrate that while renewable technologies have minimal emissions during operation, they are not entirely emission-free, as environmental burdens arise particularly during the manufacturing and material procurement phases. Extending the operational lifespan of installations—such as increasing wind turbine service life from 25 to 30 years—can reduce all potential environmental impacts by roughly 17%. Overall, wind power emerges as the most energy-efficient technology in terms of energy payback time. Nordic region benefits from its typical climate that has strong consistent wind in comparison to solar panel that heavily rely on solar irradiance. Nevertheless, all analyzed forms of renewable energy offer substantial environmental benefits compared to fossil-fuel-based alternatives.

# 1. Johdanto

Tämä raportti tarkastelee HOKE-hankkeen osaraportissa 1.1 Seutukunnalliset resurssit ja vahvuudet energiahuollossa (Spoof-Tuomi, 2025) käsiteltyjen energiantuotantomuotojen ympäristö- ja kasvihuonekaasupäästövaikutuksia. Tarkastelu perustuu elinkaariarviointiin (Life Cycle Assessment, LCA), joka tarjoaa systemaattisen menetelmän vaikutusten arviointiin energiantuotantomuotojen koko elinkaaren ajalta – raaka-aineiden hankinnasta tuotantoon, käyttöön ja loppusijoitukseen saakka (kuva 1).



**Kuva 1.** Energian jalanjälki

LCA toimii hyödyllisenä työkaluna teknologioiden vertailussa, ympäristöstrategioiden suunnittelussa ja kestävän kehityksen edistämässä.

Raportin kappaleessa 2 esitellään elinkaariarvioinnin peruseriaatteet ja vaiheet. Kappaleissa 3–6 sovelletaan LCA-laskentaa aurinko-, tuuli- ja bioenergian tuotantoketjuihin, ja analysoidaan niiden ympäristövaikutuksia osana kestävän energiantuotannon kokonaisuutta. Lisäksi aurinko- ja tuulivoimalle lasketaan ns. energian takaisinmaksuaika (Energy Payback Time, EPT), joka tarkoittaa aikaa, jonka kuluessa energiantuotantojärjestelmä tuottaa yhtä paljon energiaa kuin sen rakentamiseen, ylläpitoon ja purkamiseen on kulunut koko elinkaaren aikana. Mitä lyhyempi EPT, sitä energiatehokkaampi järjestelmä on. EPT ei ota suoraan huomioon hiilidioksidipäästöjä tai muita ympäristövaikutuksia, mutta se on hyödyllinen mittari, kun arvioidaan teknologian energiakestävyyttä ja sijoituksen kannattavuutta energiantuotannon näkökulmasta. Kappale 7 kokoaa raportin keskeisimmät tulokset ja johtopäätökset.

## 2. LCA: Kehys kestävyden arviointiin

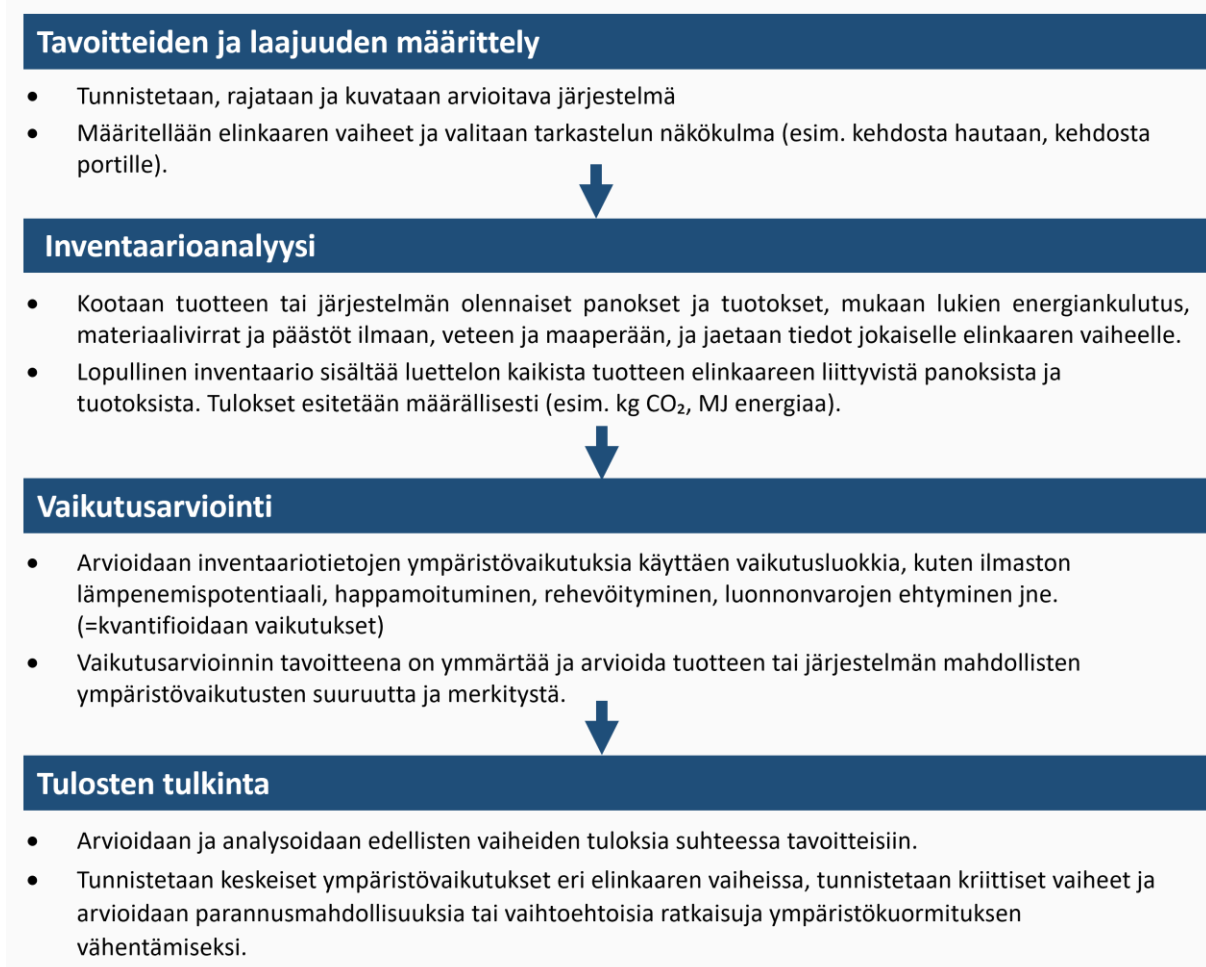
### 2.1 Elinkaariarvioinnin rajaukset: Cradle-to-Grave ja Cradle-to-Gate

Kaksi yleisintä elinkaariarvioinnin rajaustapaa ovat:

1. Cradle-to-Grave ("kehdosta hautaan")  
Tarkastelee tuotteen koko elinkaarta raaka-aineiden hankinnasta, valmistuksesta, jakelusta ja käytöstä aina loppusijoitukseen tai hävittämiseen saakka. Soveltuu esimerkiksi silloin, kun halutaan vertailla eri tuotteiden kokonaiskestävyyttä.
2. Cradle-to-Gate ("kehdosta portille")  
Rajaa tarkastelun tuotteen elinkaaren alkuvaiheisiin raaka-aineiden hankinnasta tuotteen valmistukseen saakka, mutta ei sisällä käyttöä eikä loppusijoitusta. Käytetään usein, kun halutaan arvioida tuotteen valmistuksen aikaisia ympäristövaikutuksia esimerkiksi yritysten sisäisessä kehitystyössä tai jos loppuvaiheiden päästöjä on vaikea tai mahdoton selvittää.

### 2.2 Elinkaariarvioinnin neljä vaihetta

LCA koostuu neljästä päävaiheesta, jotka määritellään kansainvälisissä ISO 14040 ja 14044 standardeissa (kuva 2).



Kuva 2. Elinkaariarvioinnin neljä vaihetta

## 2.3 Energiantuotantomuotojen elinkaaren vaiheet ja päästölähteet

Energiajärjestelmien elinkaaren aikana syntyy päästöjä useissa eri vaiheissa. Alla oleva taulukko koostaa elinkaaren keskeiset vaiheet:

**Taulukko 1.** Energiajärjestelmien elinkaaren keskeiset vaiheet

Elinkaaren vaihe	Esimerkkejä syntyvistä päästöistä
Raaka-aineiden hankinta	Kaivostoiminnasta, materiaalien valmistuksesta ja energiankulutuksesta syntyvät päästöt
Laitteiden valmistus	Aurinkopaneelien, tuuliturbiinien ja bioreaktoreiden valmistuksessa syntyvät päästöt
Kuljetus ja asennus	Logistiikkaan ja rakennus- ja asennustöihin liittyvät päästöt
Energiantuotanto	Polttoaineiden käytöstä syntyvät päästöt, prosessipäästöt
Käyttö ja huolto	Huoltotoimenpiteistä ja varaosien valmistuksesta syntyvät päästöt
Purku ja kierrätys	Jätteenkäsittelyyn ja materiaalien talteenottoon liittyvät päästöt

Raportin seuraavassa osiossa perehdytään eri energiantuotantomuotojen elinkaaren vaiheisiin sekä niihin liittyviin päästöihin ja ympäristövaikutuksiin. Analyysi keskittyy kolmeen tuotantomuotoon: aurinkovoimaan, tuulivoimaan ja bioenergiaan. Bioenergian osalta kartoitetaan sekä biokaasun tuotannon ja käytön että metsätähteiden polttoon perustuvan energiantuotannon elinkaarivaikutuksia.

Aurinko- ja tuulivoiman sekä biokaasun kohdalla tarkastelu alkaa uuden laitoksen perustamisvaiheesta. Tämä mahdollistaa teknologioiden keskinäisen vertailun koko elinkaaren ajalta. Metsähakkeen kohdalla tarkastelu on hieman erilainen: Koska Suomen kansallisen ilmastostrategien pitkän aikavälin tavoitteena on siirtyä pois polttoon perustuvasta energiantuotannosta, ei laskennassa huomioida uuden polttolaitoksen perustamista. Metsähakkeella oletetaan korvattavan pääasiassa turvetta nykyisissä laitoksissa, joten sen elinkaaritarkastelu alkaa syötteiden keräilystä ja kuljetuksista.

### 3. Tuulivoima

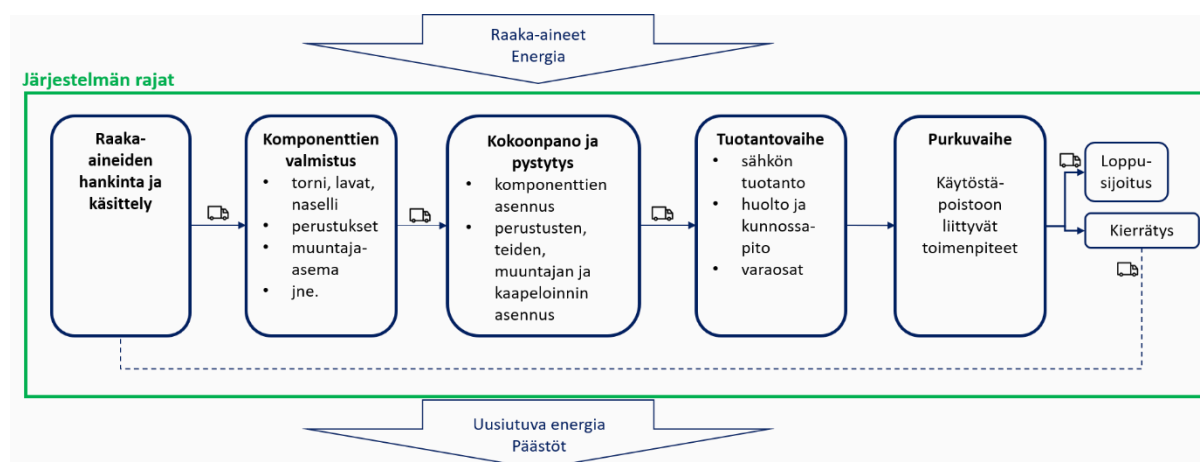
Tuulivoiman käytön aikaiset päästöt ovat hyvin vähäiset. Sen elinkaaren muissa vaiheissa – kuten materiaalien ja komponenttien valmistuksessa, kuljetuksessa, asennuksessa, huollossa ja käytöstä poistossa – syntyy kuitenkin päästöjä. Jokainen näistä vaiheista vaatii energiaa, usein fossiilisia polttoaineita, jotka vapauttavat ympäristöön haitallisia aineita.

#### 3.1 Tavoitteet ja tutkimuksen laajuus

Tässä raportissa toteutetaan elinkaarianalyysi 10 megawatin maatuulivoimainstallaatiolle, joka koostuu kolmesta Vestas 136–3.45 MW tuuliturbiinista. Turbiinien napakorkeus on 132 metriä. Sijaintiin liittyvät parametrit, kuten etäisyys sähköverkkoon (20 km), on valittu edustamaan tyypillistä maalla sijaitsevaa tuulivoimalaa.

##### 3.1.1 Järjestelmän rajaus

Järjestelmän rajaus määrittää, mitä osia, prosesseja ja vaiheita elinkaarilaskentaan sisällytetään. Toisin sanoen, se kertoo, mistä elinkaaren vaiheesta tarkastelu alkaa ja mihin se päättyy. Tuulivoiman kohdalla tarkastelu kattaa raaka-aineiden hankinnan, komponenttien valmistuksen, voimalaitoksen pystytyksen ja kokoonpanon, logistiikan, käytön ja ylläpidon sekä elinkaaren lopun hallinnan siihen pisteeseen asti, kunnes voimalaitos poistetaan käytöstä. Myös voimalaitoksen infrastruktuuri, kuten kaapelointi, tiet ja muut rakenteet, jotka ovat välttämättömiä toimivan tuulivoimalaitoksen rakentamiseksi sisältyvät tutkimukseen. Kuva 3 havainnollistaa järjestelmän rajat.



Kuva 3. Tuulivoimalan elinkaaren vaiheet.

##### 3.1.2 Toiminnallinen yksikkö

Toiminnallinen yksikkö on elinkaariarvioinnissa ja muissa ympäristövertailuissa käytettävä standardoitu mittayksikkö, joka määrittää sen määrän tai laajuuden, johon tuotteen tai prosessin ympäristövaikutukset suhteutetaan ja raportoidaan. Sen avulla varmistetaan, että eri tuotteiden ja prosessien ympäristövaikutuksia voidaan arvioida ja vertailla johdonmukaisesti ja luotettavasti.

Tuulivoiman toiminnallisena yksikkönä käytetään 1 kilowattitunti (kWh) verkkoon toimitettua sähköä. Toiminnallinen yksikkö perustuu voimalan suunniteltuun käyttöikänsä sekä koko elinkaaren aikana verkkoon syötettyyn sähkömäärään. Tuulivoimalan elinkaareksi oletetaan 25 vuotta.

## 3.2 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysissä kootaan kaikki ympäristön kannalta merkittävät energia- ja materiaalivirrat, jotka ylittävät järjestelmän rajat (energia, raaka-aineet, jätteet ja päästöt).

### 3.2.1 Tuulisähkön tuotanto

Turbiinien tuottaman sähkömäärän laskennassa hyödynnettiin Renewables.ninja (2025) verkkotyökalua. Tuulisuustietojen aikaväli on 1.1.-31.12.2024. Etelä-Pohjanmaalle asennetun Vestas 136–3.45 MW voimalan kapasiteettikerroin mainituilla ajanjaksolla on 36 %. Yhden turbiinin verkkoon syöttämän sähkömäärä on tällöin 10 608 MWh/vuosi. Laskelmassa on huomioitu siirtohäviöt 2,5 %. 25 vuoden käyttöiän aikana yhden turbiinin tuottama sähkömäärä on 265 200 MWh.

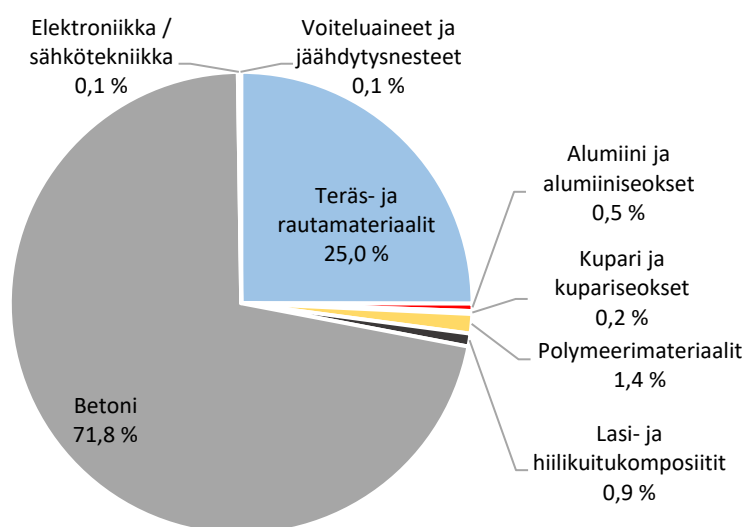
Materiaalivirtoihin, energiankulutukseen ja päästöihin liittyvä aineisto on kerätty Vestasin julkisesta LCA-raportista (Vestas, 2017).

### 3.2.2 Materiaalivirrat

Perusoletuksena on, että kaikki tuotantojärjestelmään tulevat materiaalit ovat peräisin primäärisistä eli neitseellisistä lähteistä. Poikkeuksen tähän oletukseen tekevät rauta, teräs, alumiini ja kupari. Näiden metallien osalta on huomioitu, että osa käytetystä materiaalista voi olla kierrätettyä romumetallia. Kierrätysmateriaalille on kuitenkin kohdistettu ympäristökuorma, joka vastaa joko primäärisen tuotannon vaikutuksia tai perustuu Worldsteelin määrittämään "scrap value" -arvoon. (Vestas, 2017)

Elinkaaren lopussa tuulivoimalan suuret metallikomponentit, kuten tornin osat, jotka koostuvat pääosin yhdestä materiaalista, oletetaan olevan 98-prosenttisesti kierrätettäviä. Muiden keskeisten osien, kuten generaattorin, vaihteiston ja kaapeleiden, kierrätysasteeksi arvioidaan 95 %. Muiden turbiinin metalliosien kierrätettävyys on 92 %. Kierrätettävistä metalliosista (teräs, rauta, kupari ja alumiini) annetaan ympäristöhyvitykset ns. vältettyjen vaikutusten periaatteella, jossa kierrätykselle lasketaan ympäristöhyvitys sen perusteella, että uuden materiaalin tuotanto vältetään. (Vestas, 2017)

10 MW maatuulivoimainstallaation elinkaaren materiaali-jakauma nähdään kuvassa 4. Suurin osuus käytetyistä materiaaleista on betonilla (lähes 72 %), jota seuraa teräs ja rauta (25 %). Loput 3 % koostuvat muista materiaaleista, kuten polymeerimateriaaleista, lasi- ja hiilikuidusta sekä alumiinista ja kuparista ja niiden seoksista. Taulukko 2 esittää käytettyjen materiaalien massat jaoteltuna tuulivoiman pääkomponentteihin: turbiiniin, perustuksiin sekä kaapelointiin, kytkinlaitteisiin ja muuntaajaan.



Kuva 4. 10 MW maatuulivoimainstallaation materiaali-jakauma

**Taulukko 2.** Materiaalijakauma jaoteltuna voimalan pääkomponentteihin

Materiaali	Turbiini	Perustukset	Kaapelointi, kytkinlaitteet, muuntaja	Yhteensä
Teräs- ja rautamateriaalit (t)	1 612	331	4	1 947
Alumiini ja alumiiniseokset (t)	23	0	17	40
Kupari ja kupariseokset (t)	10	0	6	16
Polymeerimateriaalit (t)	67	0	39	106
Lasi- ja hiilikuitukomposiitit (t)	70	0	0	70
Betoni (t)	0	5 582	0	5 582
Elektroniikka / sähkötekniikka (t)	11	0	0	11
Voiteluaineet ja jäähdytysnesteen (t)	6	0	1	7
<b>Yhteensä (t)</b>	<b>1 798</b>	<b>5 914</b>	<b>67</b>	<b>7 778</b>

### 3.2.3 Energiankulutus

Tuulivoimainstallaation energiankulutus voidaan jäsentää elinkaaren eri vaiheisiin seuraavasti:

Valmistusvaiheessa energiankulutus koostuu raaka-aineiden hankinnasta, komponenttien valmistuksesta sekä materiaalien kuljetuksista tuotantolaitoksilta asennuspaikalle. Tämä vaihe sisältää merkittävän osan uusiutumattoman energian käytöstä, erityisesti metallien ja betonin tuotannossa. Kokoonpano- ja pystytysvaiheen energiankulutus liittyy työmaatoimintoihin, kuten nostokaluston käyttöön ja tieyhteyksien rakentamiseen. Tuotantovaiheen aikainen energiankulutus koostuu pääasiassa huolto- ja kunnossapitotoimien energiankäytöstä, kuten huoltokaluston liikkumisesta ja varaosien logistikkasta. Purkuvaiheen energiankulutus liittyy voimalan purkamiseen, materiaalien kierrätykseen ja jätehuoltoon.

Energiankulutus mitataan primäärienergiana, joka kuvaa energian kokonaismäärää ennen sen muuntamista tai käyttöä. Arvot ilmoitetaan megajouleina (MJ).

Kuljetusten osalta Vestasin raportissa on otettu huomioon seuraavat kuljetusvaiheet:

- Raaka-aineiden kuljetus valmistajilta Vestasin alihankkijoille: maantie 600 km
- Osakomponenttien kuljetus alihankkijoilta Vestasin tuotantolaitoksille: maantie 600 km
- Voimalakomponenttien kuljetus Vestasin tehtailta asennuspaikalle: maantie 600–800 km, poikkeuksena torni, jolla merikuljetus 6200 km
- Perustusmateriaalien kuljetus: maantie 50 km
- Elinkaaren lopun kierrätykseen tai hävittämiseen liittyvät kuljetukset: maantie 200 km

Kuljetusketju edustaa tyypillistä toimitusketjua Euroopassa (Vestas, 2017).

### 3.2.4 Päästöt

Vaikka tuulivoima ei tuota päästöjä sähköntuotannon aikana, sen elinkaaren muut vaiheet, kuten valmistus, kuljetus, asennus, huolto ja purku, aiheuttavat ympäristökuormitusta. Tässä raportissa tarkastellut päästöt voidaan jaotella ilmaan ja vesistöihin kohdistuviin päästöihin seuraavasti:

Päästöt ilmaan:

- Kasvihuonekaasut: Hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>), dityppioksidi (N<sub>2</sub>O)
- Muut ilmapäästöt: Hiilimonoksidi (CO), typen oksidit (NO<sub>x</sub>), rikkidioksidi (SO<sub>2</sub>), pienhiukkaset (PM), haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC)

Päästöt vesistöihin:

- Ioniyhdisteet ja suolat: Kloridi (Cl<sup>-</sup>), natrium (Na<sup>+</sup>), natriumkloridi (NaCl), natriumsulfaatti (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), sulfaatti (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

## 3.3 Vaikutusarviointi

### 3.3.1 Vaikutusluokat

Vaikutusluokat tuulivoiman elinkaariarvioinnissa ilmenevät eri maantieteellisillä tasoilla: globaalit vaikutukset, kuten ilmastolämpenemispotentiaali ja resurssien ehtymispotentiaali, vaikuttavat maailmanlaajuisesti, kun taas alueelliset ja paikalliset vaikutukset, kuten happamoituminen tai toksisuus, ovat riippuvaisia siitä, missä päästö tapahtuu. Tässä raportissa tarkastellut globaalit vaikutusluokat ovat:

#### *Ilmastolämpenemispotentiaali (Global Warming Potential, GWP)*

- GWP on usein tuulivoiman merkittävin vaikutusluokka, vaikka itse sähköntuotanto ei aiheuta päästöjä. Suurin osa päästöistä syntyy materiaalien ja komponenttien valmistuksesta, kuljetuksesta ja asennuksesta. GWP ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalentteina (CO<sub>2</sub>-ekv) 100 vuoden aikajänteellä (GWP100).

#### *Resurssien ehtymispotentiaali (Abiotic Resource Depletion, ADP)*

- ADP arvioi uusiutumattomien luonnonvarojen kulutusta. Metallien ja mineraalien ehtymispotentiaali ilmoitetaan antimoniitti- eli stibniittiekvivalentteina (Sb-ekv). Sb-ekvivalentti viittaa antimonin harvinaisuuteen ja toimii vertailuaineena muiden mineraalien ja metallien kulutuksen arvioinnissa. Mitä harvinaisempi aine, sitä suurempi sen vaikutus Sb-ekvivalentteina. Fossiilisten energialähteiden kulutus ilmoitetaan megajouleina (MJ) ja kuvaa, kuinka paljon rajallisia fossiilisia varoja tuulivoiman elinkaari kuluttaa.

Tuulivoiman alueelliset ja paikalliset vaikutukset sen sijaintipaikalla ovat yleensä melko vähäisiä. Tässä raportissa esitetään kuitenkin myös katsaus näihin vaikutusluokkiin, jolloin saadaan kattava kuva tuulivoimalan ympäristövaikutuksista.

#### *Otsonin muodostumispotentiaali (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP)*

- POCP mittaa, kuinka paljon aineet, erityisesti haihtuvat orgaaniset yhdisteet ja typen oksidit, edistävät troposfäärin otsonin muodostumista. Alailmakehän otsoni on haitallinen ilmaansaaste, joka vaikuttaa ihmisten terveyteen, ilmaanlaatuun ja kasvillisuuteen. POCP ilmoitetaan tässä tutkimuksessa yksikössä mg NMVOC/kWh (Non-Methane Volatile Organic Compounds). Vestasin raportissa POCP ilmoitettiin etyleeniekvivalentteina, joka muunnettiin NMVOC:ksi kertoimella 1 g C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> = 2,01 g NMVOC (Arendt ym., 2020).

#### *Happamoitumispotentiaali (Acidification Potential, AP)*

- Happamoitumispotentiaali kuvaa aineiden kykyä aiheuttaa happamoitumista maaperässä ja vesistöissä. Happamoituminen vaikuttaa haitallisesti kasvillisuuteen, vesiekosysteemeihin ja maaperän mikro-organismeihin. Happamoitumispotentiaali ilmoitetaan rikkidioksidiekvivalentteina (SO<sub>2</sub>-ekv).

#### *Rehevöitymispotentiaali (Eutrophication Potential, EP)*

- Rehevöitymispotentiaali kuvaa ympäristövaikutusta, joka liittyy ravinteiden, kuten typen ja fosforin, liialliseen kertymiseen ekosysteemeihin, erityisesti vesistöihin. Tämä voi johtaa leväkukintoihin, hapettomuuteen, kalakuolemiin ja ekosysteemien tasapainon häiriintymiseen. Rehevöitymispotentiaali ilmoitetaan fosfaatti-ioniekvivalentteina (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-ekv).

#### *Ekotoksisuuspotentiaali (Ecotoxicity Potential, ETP)*

- Ekotoksisuuspotentiaali arvioi kemikaalien vaikutuksia ekosysteemeihin. Ekotoksisuuspotentiaalit ilmoitetaan 1,4-DCB-ekvivalentteina, joka tarkoittaa vaikutusta verrattuna 1,4-diklooribentseeniin.

- Makean veden ekotoksisuuspotentiaali (Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential, FAETP) kuvaa, kuinka haitalliset aineet vaikuttavat makean veden ekosysteemeihin, kuten jokiin, järviin ja puroihin.
- Meriveden ekotoksisuuspotentiaali (Marine Aquatic Ecotoxicity Potential, MAETP) kuvaa haitallisten aineiden vaikutusta meriekosysteemeihin.
- Maaperän ekotoksisuuspotentiaali (Terrestrial Ecotoxicity Potential, TETP) kuvaa, kuinka haitalliset aineet vaikuttavat maaperän eliöstöön, kuten mikrobeihin, ja kasveihin.

#### *Terveysvaikutukset ihmisiin (Human Toxicity Potential, HTTP)*

- HTTP kuvaa kemikaalien mahdollisia haittoja ihmisten terveydelle. Vestasin aineistossa HTTP ilmoitetaan 1,4-DCB-ekvivalentteina. Elinkaariarvioinnin menetelmät, kuten ReCiPe, tarjoavat karakterisointikertoimia, joilla kemikaalien päästöt voidaan muuntaa ihmisterveysvaikutukseksi DALY-yksikössä (Disability-Adjusted Life Years). DALY yhdistää menetetyt elinvuodet ja sairastavuuden yhdeksi mittariksi. 1,4-DCB-ekvivalentit muunnettiin DALY-yksikköön syöpäriskin osalta kertoimella 3,32E-06 DALY/kg 1,4-DCB-ekv ja muiden terveysvaikutusten osalta kertoimella 6,65E-09 DALY/kg 1,4-DCB-ekv (Huijbregts ym., 2016).

### 3.3.2 Ympäristövaikutusarvioinnin tulokset

Kunkin vaikutusluokan tulokset kuvataan taulukossa 3. Tulokset esitetään erikseen kullekin vaikutusluokalle neljän päävaiheen osalta:

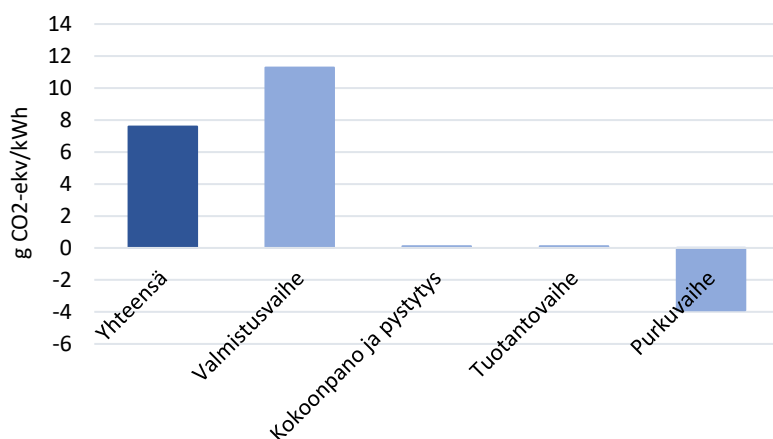
1. **Valmistusvaihe:** Sisältää raaka-aineiden hankinnan, komponenttien tuotannon tehtaalla sekä kuljetuksen asennuspaikalle.
2. **Kokoonpano- ja pystytysvaihe:** Kattaa komponenttien asennuksen, tieyhteyksien rakentamisen, kaapeloinnin ja muut infrastruktuuritoimet.
3. **Tuotantovaihe:** Sisältää voimalan huollon ja kunnossapidon koko sen käyttöajan ajan.
4. **Purkuvaihe:** Käsittää voimalan purkamisen, materiaalien kierrätyksen sekä jätehuollon.

**Taulukko 3.** Tuulivoimainstallaation elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset eri vaiheissa

Vaikutusluokka	Yksikkö	Valmistusvaihe	Kokoonpano ja pystytys	Sähkön tuotantovaihe	Purkuvaihe	Yhteensä
<b>Globaalit vaikutusluokat</b>						
<i>Ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP)</i>	g CO <sub>2</sub> -ekv/kWh	11.3	0.1	0.1	-3.9	<b>7.6</b>
<i>Resurssien ehtymispotentiaali, alkuaineet (ADP elements)</i>	mg Sb-ekv/kWh	0.22	0.0	0.01	-0.1	<b>0.13</b>
<i>Resurssien ehtymispotentiaali, fossiiliset (ADP fossils)</i>	MJ/kWh	0.13	0.01	0.0	-0.04	<b>0.10</b>
<b>Alueelliset ja paikalliset vaikutusluokat</b>						
<i>Otsonin muodostumispotentiaali (POCP)</i>	mg/NMVOc/kWh	11.5	0.2	0.2	-4.1	<b>7.7</b>
<i>Happamoitumispotentiaali (AP)</i>	mg SO <sub>2</sub> -ekv/kWh	45	0.0	0.0	-12.0	<b>33</b>
<i>Rehevöitymispotentiaali (EP)</i>	mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ekv/kWh	3.8	0.1	0.0	-0.3	<b>3.6</b>
<i>Makean veden ekotoksisuuspotentiaali (FAETP)</i>	mg 1,4-DCB-ekv/kWh	50	2.0	1.0	-2.0	<b>51</b>
<i>Meriveden ekotoksisuuspotentiaali (MAETP)</i>	g 1,4-DCB-ekv/kWh	2587	4	11	-1699	<b>903</b>
<i>Maaperän ekotoksisuuspotentiaali (TETP)</i>	mg 1,4-DCB-ekv/kWh	40	0.1	0.9	0.2	<b>41</b>
<i>Terveysvaikutukset ihmisiin (HTTP)</i>						
- syöpäriski	DALY	1,76E-08	2,32E-11	1,06E-10	-1,31E-08	<b>4,62E-09</b>
- muut terveysvaikutukset	DALY	3,52E-11	4,65E-14	2,12E-13	-2,62E-11	<b>9,25E-12</b>

## Globaalit vaikutukset

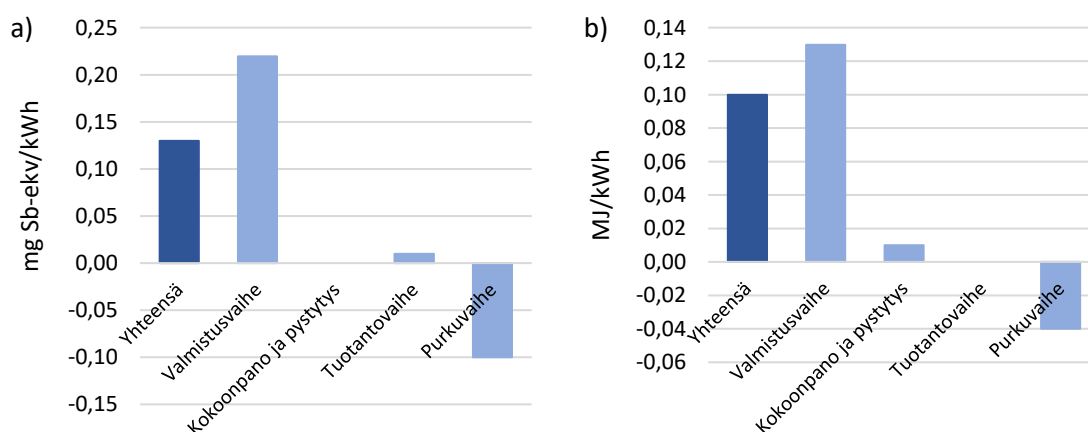
Kuva 5 esittää ilmaston lämpenemispotentiaalin tuulivoimalan tuottamaa kilowattituntia kohden. Valmistusvaihe on elinkaaren hallitsevin vaihe ilmastovaikutusten osalta. Suurimmat päästöt syntyvät erityisesti tornin, perustusten, konehuoneen, lapojen ja muiden keskeisten komponenttien tuotannosta. Elinkaaren loppuvaiheella on merkittävä negatiivinen vaikutus (-34 %), sillä se tuottaa ympäristöhyvityksiä, jotka liittyvät neitseellisten metallien tuotannon korvaamiseen kierrätetyillä materiaaleilla (rauta, teräs, kupari ja alumiini).



**Kuva 5.** Tuulivoiman elinkaarivaiheiden osuudet ilmaston lämpenemispotentiaalista (GWP)

Kuva 6a esittää uusiutumattomien luonnonvarojen (alkuaineet) ehtymispotentiaalin elinkaarivaiheittain. Valmistusvaihe hallitsee vaikutuksia, mikä johtuu erityisesti metallien käytöstä. Vaikutus liittyy erityisesti kuparin käyttöön sekä korkealujuuksisten terästen käyttöön konehuoneen osissa, kuten generaattorissa ja vaihteistossa (Vestas, 2017). Elinkaaren loppuvaiheessa kierrätyksen tuomilla ympäristöhyvityksillä on merkittävä kokonaisvaikutus (-43 %). Käyttövaiheen vaikutukset liittyvät pääasiassa turbiinin elinkaaren aikana tarvittaviin varaosien vaihtoihin.

Kuvassa 6b nähdään fossiilisten luonnonvarojen ehtymispotentiaali elinkaarivaiheittain. Tässäkin tarkastelussa valmistusvaihe aiheuttaa suurimman osan vaikutuksista.



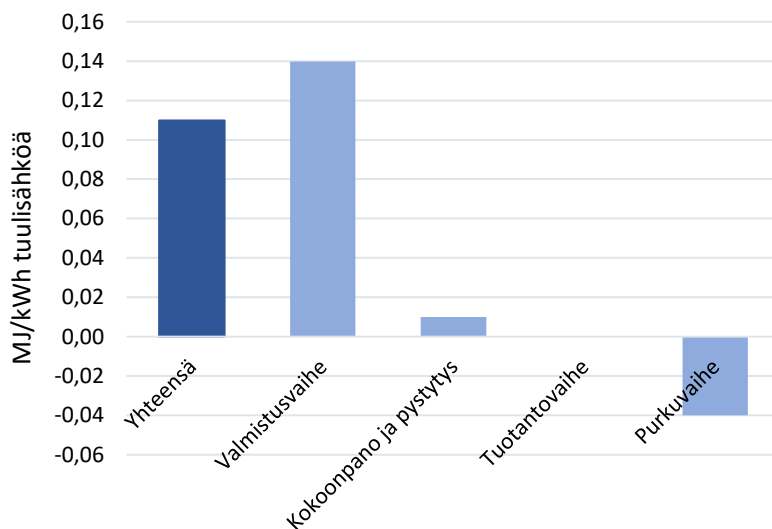
**Kuva 6.** Uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymispotentiaali per tuotettu kWh; a) alkuaineet, b) fossiiliset energialähteet

## Alueelliset ja paikalliset vaikutukset

Myös alueelliset ja paikalliset vaikutukset painottuvat voimakkaasti valmistusvaiheeseen (ks. taulukko 3). Tuulivoimainstallaation sijaintipaikkakunnalla syntyvät päästövaikutukset ovat vähäisiä ja liittyvät ensisijaisesti rakentamisvaiheeseen sekä huolto- ja logistiikkatoimintoihin. Kokoonpano-, pystytys- ja tuotantovaiheiden osuus kokonaispäästövaikutuksista on vaikutusluokasta riippuen 0–6 %, mikä korostaa valmistusvaiheen merkitystä elinkaaren aikaisessa ympäristökuormituksessa.

### 3.3.3 Energian käyttö

Kuvassa 7 nähdään primäärienergian kulutus (MJ energiaa per tuotettu kWh sähköä). Kuten muissakin elinkaariarvioinnin tuloksissa, valmistusvaihe hallitsee elinkaaren aikaisia vaikutuksia. Elinkaaren lopussa saavutettava hyvytys on -27 %.



**Kuva 7.** Elinkaaren eri vaiheiden osuus primäärienergian kulutuksesta (MJ energiaa per kWh sähköä)

### 3.3.4 Energian takaisinmaksuaika

Tuulivoiman energian takaisinmaksuaika (Energy Payback Time, EPT) tarkoittaa aikaa, jonka tuulivoimala tarvitsee tuottaakseen saman määrän energiaa kuin sen rakentamiseen, ylläpitoon ja purkamiseen on kulunut koko elinkaaren aikana. Mitä lyhyempi EPT, sitä energiatehokkaampi järjestelmä on. Vaikka EPT ei ota suoraan huomioon hiilidioksidipäästöjä tai muita ympäristövaikutuksia, se toimii mittarina arvioitaessa teknologian energiakestävyyttä ja investoinnin kannattavuutta energiantuotannon näkökulmasta.

Energian takaisinmaksuaika mitataan kuukausina ja lasketaan seuraavasti:

$$EPT = \frac{\text{tuulivoimalan elinkaaren aikainen energiantarve (MJ)} * \text{elinkaari (kk)}}{\text{sähköenergian kokonaistuotto (MJ)}}$$

Tuulivoimainstallaation energian takaisinmaksuaika tässä tutkimuksessa on 9,2 kk. Tämä tarkoittaa, että tuulivoimajärjestelmä tuottaa elinkaarensa aikana 32-kertaisesti sen määrän energiaa, jonka sen rakentaminen, ylläpito ja purkaminen vaativat. Tämä osoittaa, että tuulivoima on energiatehokas ratkaisu uusiutuvan energian tuotantoon.

### 3.4 Tulosten tulkinta

Tulokset osoittavat, että raaka-aineiden ja komponenttien tuotanto muodostavat suurimman osan voimalaitoksen ympäristövaikutuksista. Seuraavaksi merkittävin tekijä on elinkaaren lopussa saavutettava kierrätysyhvyitys, kun taas muut elinkaarivaiheet vaikuttavat vähemmässä määrin.

Elinkaaren pituus on keskeinen oletus elinkaariarvioinnissa, sillä ympäristövaikutukset suhteutetaan voimalan koko käyttöiän aikana tuottamaan energiamäärään. Käyttöiän muutoksilla on siten merkittävä vaikutus tuotetun sähkön yksikkökohtaisiin ympäristövaikutuksiin. Tässä tutkimuksessa elinkaariarvioinnissa oletettiin 25 vuoden käyttöikä. Todellinen käyttöikä voi kuitenkin vaihdella muun muassa teknologian kehityksen, huollon laadun ja käyttöolosuhteiden mukaan. Motivan (2024a) mukaan uusimpien tuulivoimaloiden käyttöikä voi olla jopa 30 vuotta. 30 vuoden käyttöiällä kaikki potentiaaliset ympäristövaikutukset laskevat 17 %.

Tulosten luetettavuuden arvioinnissa epävarmuutta liittyy kuljetusten päästöjen tarkkuuteen. Käytetyt oletukset kuljetusmatkoista ja -muodoista ovat yleistäviä eivätkä välttämättä täysin vastaa esimerkiksi Tanskasta Suomeen suuntautuvia kuljetuksia. Kuitenkin, kun tarkastellaan esimerkiksi ilmaston lämpenemispotentiaalia, kuljetusten osuus elinkaari-vaikutuksista on käytetyillä oletuksilla vain noin 10 % ( $\approx 0,75$  g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh). Näin ollen kuljetusmatkojen tarkempi määrittely ei muuttaisi ilmastovai-  
kutusten suuruusluokkaa.

Kaiken kaikkiaan tämä tutkimus tarjoaa kattavan kuvan Vestas V136-3.45 turbiineista koostuvan 10 MW:n tuulivoimainstallaation mahdollisista ympäristövaikutuksista. Elinkaariarviointi perustuu Vestasin tarkkaan tuotetietoon sekä yhtiön hyödyntämiin alan parhaisiin käytäntöihin, niin sovellettujen menetelmien kuin ympäristövaikutusten arvioinnissa käytettyjen tietoaineistojen osalta.

## 4. Aurinkovoima

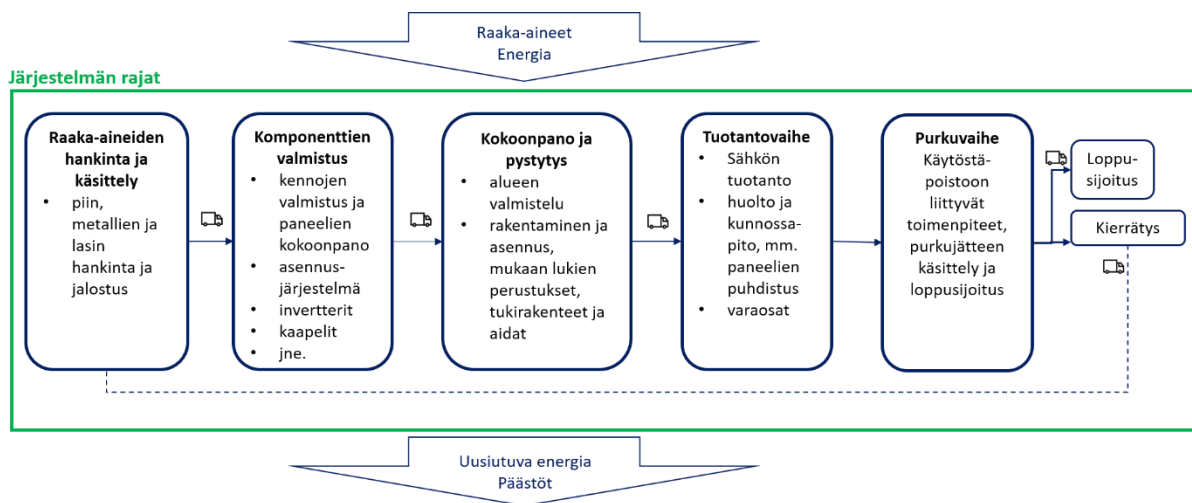
Aurinkoenergia on päästötöntä ja uusiutuvaa, mutta ei täysin vailla ympäristövaikutuksia. Aurinkopaneelien valmistuksessa käytetään edelleen harvinaisia maametalleja, joiden saatavuus voi tulevaisuudessa muodostua ongelmaksi, ellei niille kehitetä korvaavia materiaaleja. Lisäksi paneelien tuotantoprosessi aiheuttaa päästöjä ja kuluttaa energiaa.

### 4.1 Tavoitteet ja tutkimuksen laajuus

Tässä osiossa toteutetaan elinkaarianalyysi maahan asennetulle teollisen kokoluokan (>1 MW) aurinkovoimalalle. Tarkasteltavaksi teknologiaksi valittiin piikidekennoihin perustuva ratkaisu. Teknologia on vakiintunutta, ja noin 90 prosenttia markkinoilla olevista aurinkokennoista on piikidekennoja (Motiva, 2024b).

#### 4.1.1 Järjestelmän rajaus

Aurinkosähköjärjestelmän elinkaaren vaiheet esitetään kuvassa 8. Elinkaari alkaa raaka-aineiden, kuten piin, metallien ja lasin hankinnasta ja jalostuksesta. Piikiekot valmistetaan joko yksi- tai monikiteisinä, minkä jälkeen kennot käsitellään ja kootaan paneeleiksi yhdessä lasin, kehyksien ja liitäntöjen kanssa. Valmiit paneelit kuljetetaan asennuspaikalle, jossa ne kiinnitetään rakenteisiin ja liitetään sähköjärjestelmään. Käytön aikana paneelit tuottavat sähköä noin 25–30 vuotta, ja niitä huolletaan ja puhdistetaan tarpeen mukaan. Elinkaaren lopussa paneelit puretaan, materiaalit kierrätetään ja jätteet käsitellään.



Kuva 8. Aurinkovoimalan elinkaaren vaiheet.

#### 4.1.2 Toiminnallinen yksikkö

Toiminnallisena yksikkönä käytetään, kuten tuulivoimankin kohdalla, 1 kilowattitunti (kWh) verkkoon toimitettua sähköä. Voimalan elinkaareksi oletettiin 30 vuotta.

## 4.2 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysissä hyödynnettiin toissijaisia tietolähteitä, kuten tutkimusraportteja ja muita julkaistuja aineistoja. Käytetty data on luonteeltaan geneeristä, eikä perustu yksittäisen voimalan tarkoihin mittauksiin. Tämän vuoksi tulokset tarjoavat yleiskuvan aurinkovoimalan rakenteellisesta koostumuksesta, mutta eivät välttämättä vastaa tarkasti yksittäisen kohteen ominaisuuksia.

#### 4.2.1 Aurinkosähkön tuotanto

Voimalan tuottaman sähkömäärän laskennassa hyödynnettiin Global Solar Atlas -verkkotyökalua (Global Solar Atlas, 2025). Palvelu tarjoaa kattavaa tietoa aurinkoenergian potentiaalista eri alueilla maailmanlaajuisesti. Palvelun tarjoaa Maailmanpankkiryhmä (World Bank Group).

Global Solar Atlaksen mukaan Seinäjoen seudulla auringonsäteilyn määrä on 1128 kWh/m<sup>2</sup> vuodessa (ks. liite 1). Häviöt huomioiden 1 MW voimalan tuottama sähkö määrä ensimmäisenä toimintavuotena on 890 MWh vuodessa. Elinkaaren aikaisen sähkön tuotannon laskennassa huomioitiin lisäksi 0,5 % vuotuinen paneelitehon heikkeneminen. 30 vuoden elinkaaren aikana voimalan tuottama sähkömäärä on 24 852 MWh. Tätä vastaava kapasiteettikerroin on 9,5 %. Kapasiteettikerroin kuvaa voimalan keskimääräistä tuotantotehokkuutta suhteessa sen nimellistehoon.

#### 4.2.2 Aurinkovoimalan keskeiset komponentit ja materiaalivirrat

Aurinkopaneelit (PV-paneelit)

- Aurinkovoimalan näkyvin osa ovat aurinkopaneelit, jotka koostuvat useista sarjaan kytketyistä aurinkokennoista. Kennoissa auringon säteily irrottaa elektroneja puolijohdemateriaalista, jolloin syntyy sähkövirta. Teollisen mittakaavan voimaloissa paneelit asennetaan pitkiin riveihin ja kallistetaan siten, että ne saavat mahdollisimman paljon auringonvaloa päivän aikana (kuva 9).



**Kuva 9.** Teollinen aurinkovoimala

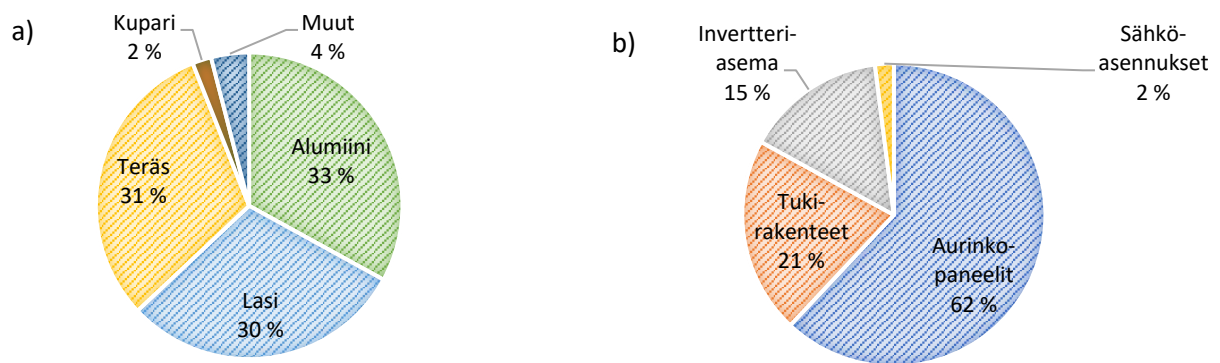
Invertterit:

- Invertterit muuttavat aurinkopaneelien tuottaman tasavirran (DC) vaihtovirraksi (AC), joka voidaan syöttää sähköverkkoon.

Asennus- ja tukirakenteet:

- Aurinkopaneelit kiinnitetään tukirakenteisiin, jotka nostavat ne irti maasta ja suuntaavat ne kohti aurinkoa. Teollisen mittakaavan voimaloissa käytetään yleisesti joko kiinteitä kallistettuja rakenteita tai yksiakselisia seurantalaitteita, jotka seuraavat auringon liikettä päivän aikana.

Kuvassa 10 on esitetty aurinkovoimalan materiaalikohtainen massajakauma. Lisäksi kuvassa havainnollistetaan tärkeimpien rakenteellisten osien – kuten aurinkopaneelien, tukirakenteiden, invertteriaseman ja sähköasennusten – suhteellinen osuus koko voimalan massasta. Materiaalivirrat perustuvat Ledan ym. (2023) varsin tuoreeseen tutkimusartikkeliin.



**Kuva 10.** a) Aurinkovoimalan materiaalikohtainen massajakauma, b) aurinkovoimalan komponenttien massajakauma

Elinkaaren aikainen energiankulutus ja päästötiedot kerättiin YK:n Euroopan talouskomission (UNECE) raportista (UNECE, 2022), jonka keskeisiin tietolähteisiin kuuluvat muun muassa UNEP:n Green Energy Choices -tutkimus sekä Ecoinvent-tietokanta. Lisäksi UNECE on täydentänyt elinkaaritietojaan ajantasaisemmalla aineistolla, joka on koottu tieteellisestä kirjallisuudesta, teknisistä raporteista ja asiantuntija-arvioista. Näiden täydennysten avulla esimerkiksi sähköntuotannon päästöt, polttoaineiden alkuperä sekä uusiutuvien energialähteiden tuotanto-olosuhteet on mukautettu vastaamaan EU28-alueen keskimääräisiä olosuhteita. Kennotyyppinä UNECE:n raportissa on monikiteinen piikkeno.

UNECE:n raportissa aurinkosähköjärjestelmien päästöt ja energiankulutus on laskettu kapasiteettikerrotoimella 12,4 %. Etelä-Pohjanmaan olosuhteissa kerroin on 9,5 %. Kun laskelmat suhteutetaan tähän alempaan arvoon, päästöt per kWh kasvavat, koska sama valmistus- ja asennuskuorma jakautuu pienemmälle tuotantomäärälle. Näin saatiin tarkempi arvio elinkaarivaikutuksista paikallisissa säteilyolosuhteissa.

### 4.2.3 Energiankulutus

Valmistusvaiheessa energiankulutus koostuu raaka-aineiden hankinnasta, komponenttien valmistuksesta sekä materiaalien kuljetuksista tuotantolaitoksilta asennuspaikalle. Kokoonpano- ja asennusvaiheen energiankulutus liittyy työmaatoimintoihin, alueen valmisteluun, rakentamiseen ja asennukseen mukaan lukien perustukset ja tukirakenteet. Tuotantovaiheen aikainen energiankulutus koostuu pääasiassa huolto- ja kunnossapitotoimien energiankäytöstä. Purkuvaiheen energiankulutus liittyy voimalan purkamiseen ja jätehuoltoon. (UNECE, 2022) Energian kulutus ilmoitetaan megajouleina (MJ).

### 4.2.4 Päästöt

Aurinkovoimalan elinkaaren aikaisista päästöistä merkittävä osa syntyy paneelien valmistusvaiheessa, erityisesti piin jalostuksessa. Päästöjen määrä riippuu voimakkaasti valmistusprosessissa käytetyistä energialähteistä. Tässä tutkimuksessa hyödynnettiin eurooppalaista dataa (UNECE, 2022), joka edustaa vähäpäästöisempää energiantuotantoa verrattuna esimerkiksi Kiinan tuotantoprofiiliin. Reichel ym. (2022) ovat osoittaneet, että EU:ssa valmistettujen aurinkopaneelimuodulien tuotannon CO<sub>2</sub>-päästöt voivat olla jopa 40 % alhaisemmat kuin Kiinassa valmistettujen paneelien. Tämä ero korostaa valmistusmaan merkitystä elinkaaripäästöjen arvioinnissa. Myös sijainnilla on merkitys, koska se määrittelee logistiikan tarpeen.

Aurinkovoiman osalta tarkasteltuja päästöjä ovat mm. kasvihuonekaasut (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), rikkidioksidi (SO<sub>2</sub>), fosfaatit (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet (NMVOC).

## 4.3 Vaikutusarviointi

### 4.3.1 Vaikutusluokat

Tässä raportissa tarkastellut aurinkovoiman globaalit vaikutusluokat ovat:

#### *Ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP)*

- Ilmastonmuutokseen vaikuttavat kasvihuonekaasupäästöt ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalentteina (CO<sub>2</sub>-ekv) 100 vuoden aikajänteellä (GWP100).

#### *Resurssien ehtymispotentiaali (ADP)*

- Metallien ja mineraalien ehtymispotentiaali ilmoitetaan antimoniittiekvivalentteina (Sb-ekv). Mineraalien ja metallien niukkuuden osalta suurin vaikutus syntyy piikenneissa käytettävistä pienistä hopeamääristä sekä inverttereissä olevasta kuparista. Fossiilisten energialähteiden kulutus ilmoitetaan megajouleina (MJ) ja kuvaa, kuinka paljon rajallisia fossiilisia varoja aurinkovoiman elinkaari kuluttaa.

Vaikka aurinkovoima itsessään ei tuota päästöjä käytön aikana, sen elinkaaren eri vaiheissa syntyy päästöjä, joilla voi olla paikallisia ja alueellisia ympäristövaikutuksia.

#### *Otsonin muodostumispotentiaali (POCP)*

- Troposfäärisen otsonin muodostumispotentiaali kuvataan yksikössä kg NMVOC/kWh. NMVOC ovat haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, jotka osallistuvat otsonin muodostumiseen alailmakehässä.

#### *Happamoitumispotentiaali (AP)*

- Rikkidioksidin (SO<sub>2</sub>) ja typen oksidien (NO<sub>x</sub>) päästöt materiaalien tuotannosta voivat aiheuttaa maaperän happamoitumista. Vaikutukset ovat alueellisia ja riippuvat päästöjen leviämisestä ilmakehän kautta. UNECE:n raportissa happamoitumispotentiaali on esitetty yksikössä mol H<sup>+</sup>-ekvivalenttia. Tässä tutkimuksessa ne muunnettiin rikkidioksidiekvivalentteihin (SO<sub>2</sub>-ekv) käyttäen muuntokerrointa 0,73 mol H<sup>+</sup>-e/SO<sub>2</sub>-ekv (Arendt ym., 2020), mikä mahdollisti tulosten yhtenäisen esitystavan raportissa.

#### *Rehevöitymispotentiaali (EP)*

- Makean veden ja meriveden rehevöityminen ilmoitetaan alkuperäisestä lähteestä poiketen fosfaatti-ioniekvivalentteina (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-ekv). Muuntokertoimina käytettiin makealle vedelle 0,33 P-e/PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-ekv (Arendt ym., 2020) ja merivedelle 2,38 N-ekv/PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-ekv.

#### *Terveysvaikutukset ihmisiin (DALY)*

- Terveysvaikutukset ihmisiin kuvataan DALY-arvolla (Disability-Adjusted Life Years), jolloin saadaan tuulivoiman kanssa yhtenäinen esitystapa. UNECE:n raportissa ihmisten terveysvaikutuksia arvioitiin yksikössä CTUh (Comparative Toxic Unit for Humans), joka kuvaa kemikaalien aiheuttamaa toksisuutta ihmisille. Muuntokertoimina CTUh-yksiköiden muuntamiseksi DALY-arvoiksi käytettiin syöpää aiheuttaville vaikutuksille 11.5 DALY/CTUh ja muille terveysvaikutuksille, kuten hengityselinten, hermoston ja hormonitoiminnan häiriöille, kertoimena käytettiin 2,7 DALY/CTUh (Arendt ym., 2020).

### 4.3.2 Ympäristövaikutusarvioinnin tulokset

UNECE:n raportissa tarkastelu kattaa infrastruktuurin, alueen valmistelun ja käyttöönoton, käytön ja ylläpidon, verkkoon liittämisen sekä käytöstä poistamisen energiankulutuksen ja jätevirrat. Sen sijaan purettujen laitteiden mahdollinen kierrätys ja uudelleenkäyttö ei sisälly tarkasteluun.

Kun aurinkopaneelit, invertterit ja sähköasennukset saavuttavat käyttökänsä lopun, ne voidaan kierrättää. Kierrätyksen yhteydessä voidaan hyödyntää esimerkiksi paneelien kehyksistä saatavaa alumiinia, kuparia, lasia, hopeaa ja aurinkopaneelien valmistukseen soveltuvaa piitä. Aurinkopaneelien ja muiden järjestelmäkomponenttien kierrätys vähentää uusien raaka-aineiden louhinnan ja jalostuksen tarvetta, pienentää energiankulutusta verrattuna neitseellisten materiaalien käsittelyyn ja auttaa pienentämään aurinkovoiman hiilijalanjälkeä. Lisäksi materiaalien päätyminen kaatopaikoille estyy, mikä vähentää ympäristöriskkejä. Esimerkiksi Hernández-López ym. (2024) raportoivat, että tehokkaalla kierrätyksellä voidaan vähentää ilmaston lämpenemispotentiaalia ja fossiilisten luonnonvarojen ehtymispotentiaalia 25 % ja mineraalisten luonnonvarojen ehtymispotentiaalia jopa lähes 50 %.

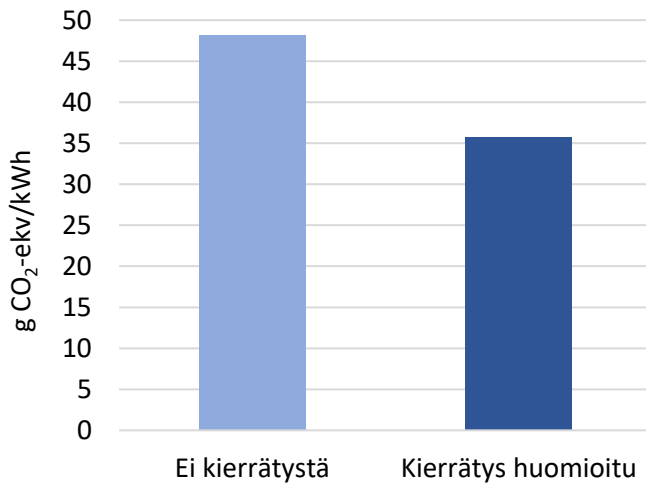
Tämän vuoksi UNECE:n raportoimia ympäristövaikutuksia täydennettiin kierrätyksen sisältävällä skenaariolla. Kierrätyksen tuomia säästöjä koskevat arviot perustuvat Hernández-Lópezin ym. (2024) tutkimukseen. Tulokset on koottu taulukkoon 4.

**Taulukko 4.** Aurinkovoimainstallaation elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset

Vaikutusluokka	Yksikkö	per kWh Ei kierrätystä	Kierrätyksen ympäristöhyöty	per kWh Kierrätys huomi- oitu
<b>Globaalit vaikutusluokat</b>				
<i>Ilmaston lämpenemispotentiaali</i>	g CO <sub>2</sub> -ekv	48.1	25.68 %	35.8
<i>Resurssien ehtymispotentiaali, alkuaineet</i>	mg Sb-ekv	5.84	49.74 %	2.93
<i>Resurssien ehtymispotentiaali, fossiiliset</i>	MJ	0.84	24.94 %	0.63
<b>Alueelliset ja paikalliset vaikutusluokat</b>				
<i>Otsonin muodostumispotentiaali</i>	g NMVOC	0.17	26.16 %	0.13
<i>Happamoitumispotentiaali</i>	g SO <sub>2</sub> -ekv	0.54	22.89 %	0.42
<i>Makean veden rehevöityminen</i>	g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ekv	0.11	15.34 %	0.096
<i>Meriveden rehevöityminen</i>	g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ekv	0.03	12.88 %	0.022
<i>Terveysvaikutukset ihmisiin</i>				
- syöpäriski	DALY	6.21E-08	17.91 %	5.10E-08
- muut terveysvaikutukset	DALY	2.77E-08	27.84 %	2.00E-08

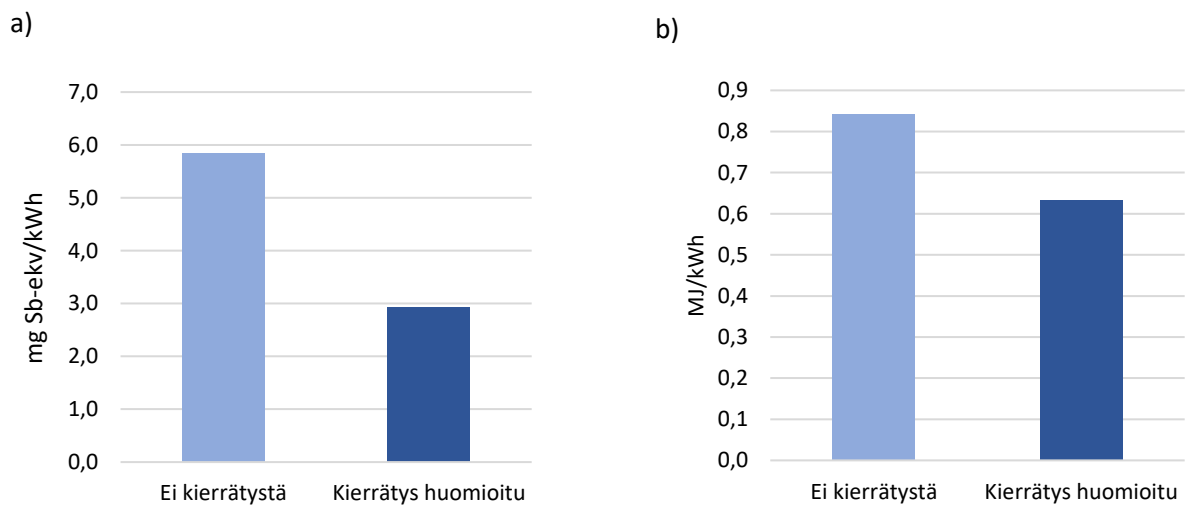
#### Globaalit vaikutukset

Kuva 11 esittää ilmaston lämpenemispotentiaalin aurinkovoimalan tuottamaa kilowattituntia kohden. Tulokset esitetään sekä ilman materiaalien kierrätystä että kierrätys huomioituna. Noin puolet kasvihuonekaasupäästöistä johtuu piin valmistuksesta (alkutuotannosta aurinkolaatuisen piin puhdistukseen asti). Loput päästöistä jakautuvat moduulin muihin osiin, asennuspaikan valmisteluun ja sähkötekniisiin laitteisiin. (UNECE, 2022)



**Kuva 11.** Aurinkovoiman elinkaarin ilmastonlämpenemispotentiaali (GWP)

Kuva 12a esittää uusiutumattomien luonnonvarojen (alkuaineet) ehtymispotentiaalin. Noin 60 % metallien ja mineraalien ehtymispotentiaalista liittyy kennojen valmistukseen, loppu jakautuu melko tasan rakentamisen ja inverttereiden kesken (UNECE, 2022). Elinkaaren loppuvaiheessa kierrätyksellä saavutettavat ympäristöhyödyt vaikuttavat merkittävästi tuloksiin. Kuvassa 12b puolestaan nähdään fossiilisten luonnonvarojen ehtymispotentiaali.



**Kuva 12.** Uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymispotentiaali per tuotettu kWh; a) alkuaineet, b) fossiiliset energialähteet

### Alueelliset ja paikalliset vaikutukset

Kierrätyksen huomioiminen aurinkovoiman elinkaaritarkastelussa tuo selkeitä ympäristöhyötyjä myös paikallisella tasolla. Vaikutukset näkyvät mm. ilman laadun parantumisena sekä happamoitumis- ja rehevöitymispotentiaalien alenemisena. Kierrätys vähentää myös ihmisten terveyteen kohdistuvia riskejä, vaikka aurinkovoiman elinkaaren aikaiset terveysvaikutukset ovat jo lähtökohtaisesti vähäiset.

DALY-arvoksi 1 MW aurinkovoimalalle saadaan 2,2. Tämä tarkoittaa, että voimala aiheuttaa elinkaarensa aikana väestötasolla 2,2 menetettyä terveysvuotta. Kierrätys alentaa arvoa edelleen 1,8 vuoteen.

### 4.3.3 Energian käyttö

Energiankulutus laskettiin Ecoinvent 3.11 -tietokannan (Ecoinvent, 2024) aineiston perusteella. Aineisto koskee 1 kWh:n sähköntuotantoa maahan asennetulla monikiteisellä piipohjaisella aurinkosähköpaneelilla ja kattaa koko käyttöiän ilman kierrätysvaihetta. Laskelmaan sisältyivät paneelien, invertterin ja kiinnitysjärjestelmän valmistus, sähköasennukset, asennusvaiheen sähkönkulutus sekä asennus- ja käyttövaiheen aikainen dieselin kulutus.

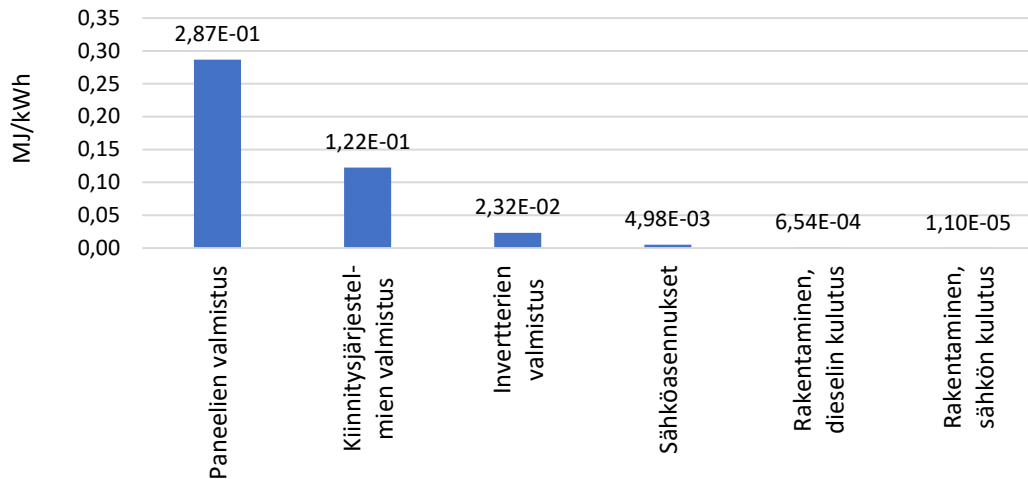
Aineistoon tehtiin muutoksia, sillä tietokanta perustuu alun perin vuoden 2012 globaaliin tuotantodataan. Vaikka Ecoinvent on ekstrapoloinut aineistoa ajantasaisemmaksi, aurinkosähköteknologia on kehittynyt merkittävästi, minkä vuoksi muunnoskerroimien käyttö katsottiin tarpeelliseksi. Teknologinen kehitys ilmenee muun muassa piin käytön vähenemisenä aurinkokennoissa viimeisten 20 vuoden aikana noin 16 g/Wp:stä noin 2 g/Wp:iin, kiekkojen ohenemisenä (esimerkiksi 140 µm verrattuna tietokannan keskimääräiseen 280 µm:iin) sekä moduulien hyötysuhteen jatkuvana paranemisenä (Fraunhofer ISE, 2025; Stucki ym., 2024). Paneeleille käytetty muunnoskerroin oli 0,3, ja invertterille, kiinnitysjärjestelmälle, sähköasennuksille ja sähkölle käytettiin kerrointa 0,5. Dieselin osalta käytettyjä arvoja ei muutettu.

Kokonaisenergiankulutuksen arvioinnissa sovellettiin Cumulative Energy Demand (CED) -menetelmää, jonka avulla määritettiin uusiutuvan ja uusiutumattoman primäärienergian kokonaiskulutus 1 kWh:n sähkön tuottamiseksi. Tulokset esitetään taulukossa 5.

**Taulukko 5.** Kokonaisenergiankulutus kWh:ta kohden

Vaikutusluokka	Yksikkö	Kehdosta portille	Käyttövaihe
<i>Uusiutumaton, biomassa (NR-B)</i>	MJ	2.65E-05	1.10E-11
<i>Uusiutumaton, fossiilinen (NR-F)</i>	MJ	3.40E-01	1.94E-07
<i>Uusiutumaton, ydinvoima (NR-N)</i>	MJ	3.52E-02	8.39E-08
<i>Uusiutuva, biomassa (Re-B)</i>	MJ	9.72E-03	5.87E-09
<i>Uusiutuva, maalämpö (Re-G)</i>	MJ	1.50E-03	2.29E-09
<i>Uusiutuva, aurinkoenergia (Re-S)</i>	MJ	2.72E-05	3.85E+00
<i>Uusiutuva, vesi (Re-V)</i>	MJ	4.44E-02	1.91E-08
<i>Uusiutuva, tuulienergia (Re-T)</i>	MJ	7.65E-03	1.35E-08

Kokonaisenergiankulutus on 4,29 MJ/kWh, josta uusiutumattomien energialähteiden osuus oli 0,375 MJ/kWh ja uusiutuvien energialähteiden osuus 3,91 MJ/kWh. Kun käyttövaihe rajataan tarkastelun ulkopuolelle, energiankulutus oli 0,438 MJ/kWh. Käyttövaiheen korkea energiankulutus johtuu siitä, että aurinkoenergia, joka myöhemmin muunnetaan sähköksi, on huomioitu LCA-laskennan lähtötietona, kuten Re-S-arvo osoittaa. Kehdosta portille vaiheen energiankulutuksen jakauma nähdään kuvassa 13. Suurimman vaikutuksen aiheuttaa paneelien valmistus.



Kuva 13. Energiankulutuksen jakauma

#### 4.3.4 Energian takaisinmaksuaika

Myös aurinkoenergialle laskettiin energian takaisinmaksuaika eli aika, jonka kuluessa järjestelmä tuottaa sen valmistuksessa ja asennuksessa kulutettua energiaa vastaavan sähkömäärän. Käytetty laskentakaava on:

$$\text{Energian takaisinmaksuaika (vuotta)} = \frac{\text{Järjestelmään sitoutunut kokonaisenergia (kWh)}}{\text{Järjestelmän vuosittain tuottama energia (kWh/vuosi)}}$$

Aurinkosähköjärjestelmän raaka-aineiden hankintaan, valmistukseen, kuljetuksiin ja asennukseen ennen käyttövaihetta sitoutuneen energian laskennassa hyödynnettiin samaa aineistoa kuin osiossa 4.3.3. Järjestelmään sitoutuneen kokonaisenergian määräksi saatiin 2 068 MWh. Järjestelmän keskimääräinen vuotuinen sähköntuotanto on 828,4 MWh, jossa on huomioitu järjestelmän suorituskyvyn heikkeneminen ajan myötä. Näiden lähtötietojen perusteella aurinkosähköjärjestelmän energian takaisinmaksuajaksi tässä tutkimuksessa muodostui 2,5 vuotta. Tämä tarkoittaa, että aurinkosähköjärjestelmä tuottaa elinkaarensa aikana 12-kertaisesti sen energiamäärän kuin sen rakentamiseen on kulunut. Saatu takaisinmaksuaika sijoittuu aiemmissa tutkimuksissa raportoitujen arvojen yläpäähän, sillä osassa tutkimuksia takaisinmaksuajaksi on esitetty noin yksi vuosi (Fraunhofer ISE, 2025; Smith ym., 2024). Tästä huolimatta tulos on linjassa eurooppalaisten olosuhteiden kanssa, joissa energian takaisinmaksuaika vaihtelee tyypillisesti noin 1–2,5 vuoden välillä riippuen paitsi valmistusprosessien vaikutuksista myös auringon säteilymäärästä (Bošnjaković ym., 2023).

#### 4.4 Tulosten tulkinta

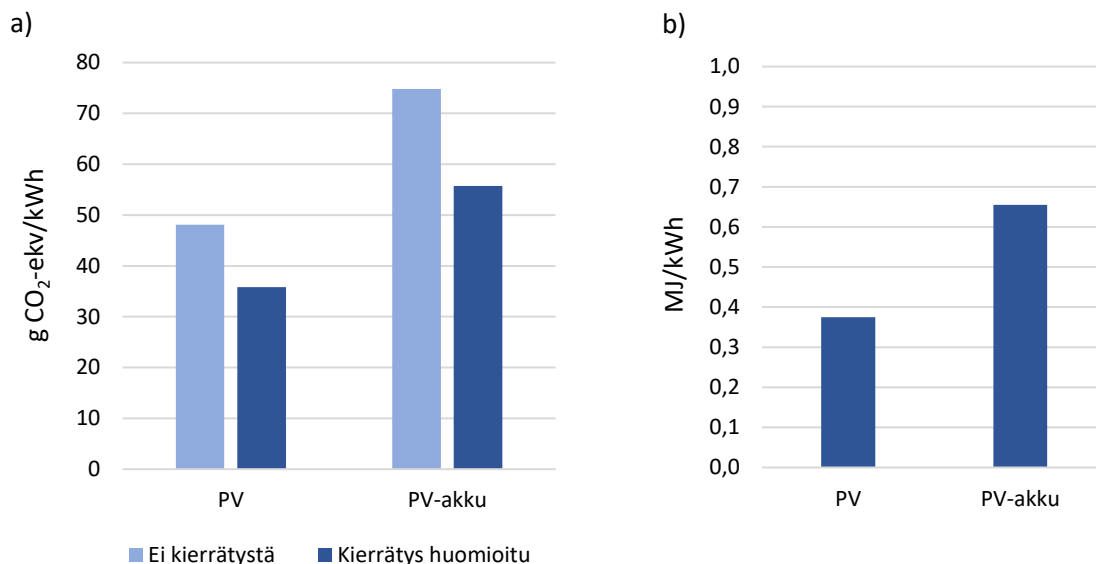
Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin ainoastaan aurinkosähköjärjestelmää (PV). Aurinkosähkön ja akkuvarastojen yhdistäminen on kuitenkin yleistymässä. Kehitystä ovat vauhdittaneet sekä akkujen että aurinkosähköpaneelien nopeasti laskeneet hinnat (esimerkiksi akkujen hinnat laskivat noin 93 % vuosina 2010–2024) sekä se, että aurinkosähkön tuotanto on sääriippuvaista, minkä vuoksi akkuvarastot voivat tehostaa sähkön käyttöä varastoimalla ylituotantoa myöhempää käyttöä varten (Mutyaba, 2025).

Useissa tutkimuksissa on arvioitu aurinkosähkön ja akkujen ympäristövaikutuksia erikseen, mutta molempien järjestelmien yhdistelmää käsitteleviä tutkimuksia on toistaiseksi vähän, erityisesti teollisen mittakaavan järjestelmien osalta. Osa aiemmista tutkimuksista on tarkastellut aurinkosähkön ja

akkuvarastojen yhdistämisen ympäristövaikutuksia pienessä mittakaavassa (Celik ym., 2008; Krebs ym., 2020; Üçtuğ & Azapagic, 2018).

Aurinkosähkö–akkujärjestelmän ympäristövaikutuksiin vaikuttavat useat tekijät, kuten maantieteellinen sijainti, aurinkosähkökapasiteetti, asennustapa (maahan asennettu tai kattoratkaisu), akun koko ja tyyppi, käytetty teknologia sekä järjestelmän rajaukset. Esimerkiksi Turkissa toteutetussa tutkimuksessa pienen mittakaavan aurinkosähköjärjestelmän ja litiumioniakun yhdistäminen johti ilmaston lämpenemispotentiaaliin 43,3 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh ja energian takaisinmaksu-aikaan 4,7 vuotta (Üçtuğ & Azapagic, 2018). Tutkimus kattoi kehdestä hautaan -rajauksen ja koski 1 kWp:n katolle sijoitettuja monikiteisiä aurinkopaneeleita, 1 kW:n invertteriä ja 2,1 kWh:n litiumioniakkua. Toisessa tutkimuksessa verrattiin aurinkosähköjärjestelmää aurinkosähkö–akkujärjestelmään (Krebs ym., 2020). Tutkimuksessa analysoitiin Keski-Euroopassa sijaitsevaa 10 kWp:n kattosijoitettua monikiteistä aurinkosähköjärjestelmää, johon liitettiin erikokoisia litiumioniakkuja (5 kWh, 10 kWh ja 20 kWh). Tulokset osoittivat, että ympäristövaikutukset kasvavat akun koon kasvaessa. Ilmaston lämpenemispotentiaalit (g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh) olivat 54 (pelkkä PV), 80 (PV + 5 kWh akku), 84 (PV + 10 kWh akku) ja 88 (PV + 20 kWh akku). Tutkimuksessa arvioitiin myös uusiutumattomien energialähteiden (CED-NR) ja kokonaisenergiankulutusta (CED). CED-NR arvot, ilmaistuna yksikössä MJ öljyekvivalenttia/kWh, olivat 0,70 (PV), 1,16 (PV + akku 5 kWh), 1,22 (PV + akku 10 kWh) ja 1,29 (PV + akku 20 kWh). Vastaavat CED-arvot olivat 4,77, 5,27, 5,40 ja 5,50.

Krebsin ym. (2020) vertailututkimuksen perusteella voidaan arvioida, että akun lisääminen aurinkosähköjärjestelmään kasvattaa ilmaston lämpenemispotentiaalia noin 1,6-kertaiseksi ja uusiutumattoman energian kulutusta noin 1,7-kertaiseksi. Arvio siitä, miltä tämän tutkimuksen aurinkosähköjärjestelmän ilmaston lämpenemispotentiaali ja uusiutumattoman energian kulutus näyttäisivät akkuvarastoon yhdistettynä, on esitetty kuvassa 14.



**Kuva 14.** a) GWP ja b) uusiutumattoman energian kulutus PV ja PV + akku yhdistelmässä

Myös käytetty aurinkosähköteknologia vaikuttaa ympäristövaikutuksiin. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin monikiteiseen piiteknoologiaan perustuvaa aurinkosähköä. Monikiteiset paneelit ovat tunnetusti hankintahinnaltaan edullisempia kuin yksikiteiset paneelit, jotka ovat noin 20–30 % kalliimpia (Tongwei Co. Ltd, 2023). Yksikiteinen teknologia tarjoaa kuitenkin korkeamman hyötysuhteen, noin

20,9 %, kun monikiteisten paneelien hyötysuhde jää noin 18 %:iin (Stucki ym., 2024). Laboratorioolosuhteissa yksikiteisillä kennoilla on saavutettu jopa 27,8 % hyötysuhde (Fraunhofer ISE, 2025). Tämä osaltaan selittää yksikiteisten hallitsevan markkinaosuuden, noin 86 % vuonna 2025 (Mordor Intelligence, 2026).

Yksikiteisten ja monikiteisten aurinkosähköjärjestelmien ympäristövaikutuksia koskevat tutkimustulokset ovat kuitenkin osin ristiriitaisia. Burkina Fasossa toteutetussa kehdoista hautaan -elinkaaritutkimuksessa yksikiteisen aurinkosähkön ilmaston lämpenemispotentiaali oli noin 30 % korkeampi kuin monikiteisen (yksikiteinen 48 ja monikiteinen 37 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh) (Badza ym., 2023). Samankaltaisia tuloksia raportoitiin Kiinassa tehdyssä tutkimuksessa, jossa yksikiteisen aurinkosähkön GWP oli 150 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh ja monikiteisen 130 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh, mikä tarkoittaa noin 15 % korkeampaa ilmastovaiikutusta yksikiteisellä teknologialla (Ullah ym., 2025). Kyseinen tutkimus osoitti myös, että yksikiteisten paneelien valmistukseen liittyvä energiankulutus (320 MJ/m<sup>2</sup>) on selvästi suurempi kuin monikiteisten (210 MJ/m<sup>2</sup>), erityisesti piin puhdistus- ja kiekkojen valmistusvaiheissa. Tämä liittyy yksikiteisen teknologian korkeamman hyötysuhteen mahdollistaviin korkeisiin puhtaus- ja rakenteellisiin vaatimuksiin. Ilmaston lämpenemispotentiaalin näkökulmasta valmistusvaiheen suurempi energiankulutus kumosi osittain korkeamman hyötysuhteen tuomat edut, mikä heijastuu korkeampana kokonaisilmastovaikutuksena.

Eurooppalaisessa kontekstissa Leccisi ym. (2016) raportoivat, että yksikiteisen aurinkosähkön GWP oli noin 63 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh, kun monikiteisen vaikutus oli noin 48 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh, eli monikiteinen teknologia aiheutti noin 31 % pienemmän ilmastovaiikutuksen. Vastakkaisia tuloksia esittivät Stucki ym. (2024), joiden mukaan yksikiteisen teknologian ilmastovaiikutus oli noin 18 % pienempi kuin monikiteisen (35,8 vs. 43,6 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh).

Myös maantieteellinen raja-alue vaikuttaa merkittävästi elinkaarianalyysin tuloksiin. Erot sähköntuotannon energialähdejakaumassa sekä raskaan liikenteen sääntelyssä kuljetusvaiheissa voivat muuttaa tuloksia huomattavasti. Useat tutkimukset osoittavat, että monikiteisten aurinkosähköpaneelien valmistus Kiinassa aiheuttaa selvästi suurempia ympäristövaikutuksia, jopa 42–263 % enemmän verrattuna muihin tuotantoalueisiin (Fu ym., 2015; Leccisi ym., 2016; Ullah ym., 2025). Näissä tutkimuksissa Kiinassa valmistetun aurinkosähkön GWP-arvot vaihtelivat 51, 56 ja 130 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh välillä. Euroopassa tuotetun aurinkosähkön ilmastovaiikutukset ovat olleet johdonmukaisesti alhaisempia puhtaamman sähköntuotantorakenteen ansiosta. Kiinan sisällä LCA-tuloksissa havaittiin kuitenkin huomattavaa vaihtelua, mikä saattaa johtua alueellisista eroista kasvihuonekaasupäästöissä. Esimerkiksi 1 kWh:n sähkön tuotannon ilmastovaiikutus voi vaihdella noin 170 g CO<sub>2</sub>-ekv:sta yli 900 g CO<sub>2</sub>-ekv:iin alueesta riippuen (Wu ym., 2025).

## 5. Biokaasu

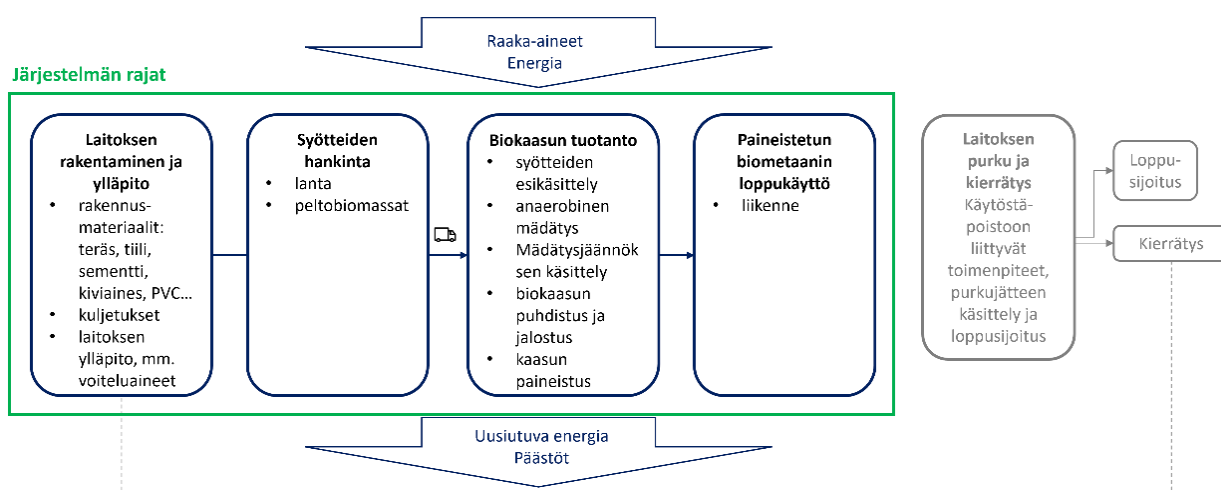
### 5.1 Tavoitteet ja tutkimuksen laajuus

Tässä osiossa arvioidaan biokaasutuotannon elinkaaripäästöjä. Tarkasteltavana on laitos, jonka vuosittainen tuotanto on noin 10 GWh paineistettua biokaasua (CBG). Kaasun loppukäyttäjänä on liikenne. Tämä energiamäärä riittäisi kattamaan esimerkiksi 600 henkilöauton (4 kg/100 km, 15 000 km/v) ja 40 kuorma-auton (20 kg/100 km, 80 000 km/v) vuotuisen polttoainetarpeen. Tulosten tulkinnaassa vertaillaan biokaasukäytön ja fossiilisten polttoaineiden käytön kasvihuonekaasuvaikutusta.

Muiden vaikutusluokkien kuin ilmastonlämpenemispotentiaalin laskenta perustui kirjallisuudesta sekä Ecoinvent-tietokannasta (Ecoinvent, 2024) koottuun etualan inventaarioon ja taustadataan. Inventaarioiden jatkokäsittely ja vaikutuslaskenta toteutettiin OpenLCA 2.6 -ohjelmistolla (GreenDelta, 2025). Vaikutusten arviointimenetelmänä käytettiin Leidenin yliopiston ympäristötieteiden laitoksen kehittämää CML-perustaso-menetelmää (ks. liite 2).

#### 5.1.1 Järjestelmän rajaus

Paineistetun biokaasun elinkaaren vaiheet on esitetty kuvassa 15. Elinkaari alkaa laitoksen rakennusmateriaalien hankinnasta, niiden kuljetuksista sekä itse biokaasulaitoksen rakentamisesta. Ylläpitovaiheessa laitoksen tekninen toimivuus varmistetaan vuosittaisilla huoltotoimenpiteillä. Kaasun raaka-aineiden hankinta koostuu maatalouden jäte- ja sivuvirtojen keräilystä ja kuljetuksista. CBG:n tuotantovaihe sisältää syötteiden esikäsittelyn, anaerobisen mädätyksen, mädätysjäännöksen käsittelyn, biokaasun puhdistuksen ja jalostuksen sekä jalostetun kaasun paineistuksen. Loppukäyttökohteina ovat henkilöautot ja raskas liikenne. Elinkaaren lopussa laitos puretaan, materiaalit kierrätetään ja jätteet käsitellään. Tässä raportissa laitoksen purku jätettiin järjestelmän rajauksen ulkopuolelle, koska biokaasulaitoksen purkuprosessin tuleva toteutus on osittain epäselvä. Purkuvaiheen aiheuttamat päästöt oletettavasti kompensoituvat merkittävästi kierrätyksen kautta, sillä kierrätetyt materiaalit vähentävät uusien neitseellisten materiaalien tarvetta rakennusvaiheessa.



Kuva 15. Biokaasun elinkaaren vaiheet

#### 5.1.2 Toiminnallinen yksikkö

Toiminnallisena yksikkönä käytettiin MJ energiaa. Biokaasulaitoksen oletettu käyttöikä on 25 vuotta.

## 5.2 Inventaarioanalyysi

### 5.2.1 Laitoksen rakentaminen ja ylläpito

Rakennusvaiheessa hankitaan tarvittavat materiaalit ja kuljetetaan ne rakennuspaikalle. Laitoksen reaktorirakennus, joka koostuu kivistä ja tiilestä muuratuista rakenteista, on tilavuudeltaan 10 000 m<sup>3</sup>. Lisäksi laitokseen kuuluu kaksi 1 820 m<sup>3</sup> teräksistä biokaasusäiliötä. Putkistot koostuvat PVC- ja betoniputkista, jotka mahdollistavat syötteiden ja kaasun siirron prosessiyksiköiden välillä. Kaikki rakennusmateriaalit kuljetetaan työmaalle kuorma-autoilla, joiden dieselinkulutus on 0,40 litraa per kuljettu kilogramma.

Ylläpitovaiheessa laitoksen tekninen toimivuus varmistetaan vuosittaisilla huoltotoimenpiteillä. Näillä pyritään ehkäisemään ja korjaamaan käytön aikana ilmeneviä ongelmia, kuten kaasu- ja vesivuotoja, putkistojen tukkeumia sekä kaasusäiliöiden korroosiota. Huoltotoimenpiteet sisältävät rakennusmateriaalien kuten sementin, soran, maalien ja voiteluaineiden käytön.

Biokaasulaitoksen rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjen intensiteetiksi arvioitiin 7,0 g CO<sub>2</sub>-ekvivalenttia tuotettua megajoulea biokaasua kohden, ja ylläpitovaiheen vastaava arvo on 4,7 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ. Arviot perustuvat Kumawatin ym. (2024) julkaisemaan vertaisarvioituun tutkimusartikkeliin.

Muiden vaikutusluokkien kuin GWP:n laskennassa rakentamis- ja kunnossapitovaiheiden inventaario perustui Chenin ym. (2012) ja Kumawatin ym. (2004) tutkimuksiin, ja taustadata otettiin Ecoinvent 3.11 -tietokannasta (Ecoinvent, 2024). Taulukko 6 esittää rakentamis- ja kunnossapitovaiheiden inventaarion lähtöarvot. Lähtöarvot perustuvat laitokseen, jonka vuotuinen kapasiteetti on 450 m<sup>3</sup> ja laitoksen elinkaari 20 vuotta (Chen ym., 2012). Näitä inventaariotietoja skaalattiin mallinnuksessa vastaamaan tässä tutkimuksessa tarkasteltavan laitoksen tuotantoa ja elinkaarta. Lisäksi mallinnusvaiheessa tehtiin tarvittavat yksikkömuunnokset siten, että tulokset esitetään megajoulekohtaisesti. Mainittakoon, että inventaariolähteet perustuvat Kiinan kontekstiin tehtyihin LCA-laskelmiin, minkä vuoksi Ecoinvent-dataa oikaistiin vastaamaan eurooppalaista kontekstia. Mikäli eurooppalaista dataa ei ollut saatavilla, käytettiin globaalia tai rest-of-the-world-tason dataa.

**Taulukko 6.** Rakentamisen ja huollon ja kunnossapidon aikainen inventaario

	Arvo	Yksikkö	Huomautus	Ecoinvent
<b>Rakentaminen</b>				
Sementti	1.15	t		Market for cement, unspecified (Europe)
Savitiili	2000	kpl	1 tiili = 2.04 kg	Market for clay brick (rest of world)
PVC-putki	27	m	1 metri = 6 kg	Market for polyvinyl chloride, unspecified polymerization, weighted average (Europe)
Sora	1	t		Market for gravel, crushed (rest of world)
Hiekka	2.5	t		Market for sand (rest of world)
Teräsraudoitus	10	kg		Market for steel, low-alloyed (global)
<b>Huolto</b>				
Sementti	50	kg		Market for cement, unspecified (Europe)
Betoni	10	kg		Market for concrete block (rest of world)

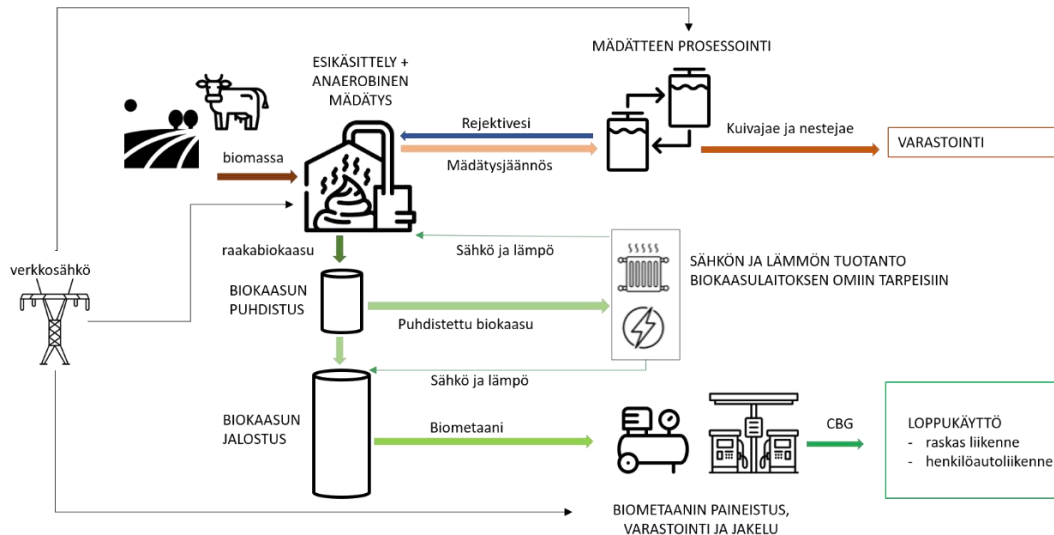
### 5.2.2 Syötteiden hankinta ja biokaasun tuotanto

#### *Biokaasulaitoksen syötteet ja prosessikuvaus*

Biokaasulaitoksen syöteinä käytetään maatalouden sivuvirtoja ja lantaa, ja prosessiteknologiana toimii määkämädätys. Lantapohjaisia syötteitä käytetään vuosittain 45 000 tonnia, ja peltobiomassoja, kuten nurmea ja olkea, 5 000 tonnia. Syötteiden koostumus vaikuttaa suoraan mädätysprosessin kaasuntuottopotentiaaliin, mädätysjäännöksen laatuun ja ravinnekiertoon. Lantasyötteet tarjoavat

tasaisen ja ravinteikkaan substraattivirran, kun taas peltobiomassat voivat parantaa prosessin hiili-typpi-suhdetta ja kaasuntuottoa.

Metaanintuoton toteutuma oletettiin 90 prosentiksi. Käsittelemätön biokaasu sisältää 65 % metaania ja 35 % hiilidioksidia. Biokaasuprosessin kulku on esitetty kuvassa 16.



**Kuva 16.** Biokaasuprosessi

Biokaasuketju alkaa syötteen kuljetuksesta keskitettyyn biokaasulaitokseen (puoliperävaunurekka 20 t, kuljetusmatka lietalannoille 20 km, kuiville lannoille ja peltobiomassoille 40 km, polttoaineenkulutus dieselkalustolla 30 l/100 km). Biokaasulaitos itsessään koostuu syötteen esikäsitteystä, biokaasureaktoreista sekä biokaasun ja mädätysjäännöksen jatkokäsittelystä. Esikäsitteily sisältää myös hygienisoinnin, mikä mahdollistaa mädätysjäännöksen jatkojalosteiden markkinoimisen lannoitevalmisteina. Tuotettu biokaasu puhdistetaan ja jalostetaan biometaaniksi amiinipesurissa. Lopuksi biometaanii paineistetaan CBG:ksi. Kompressorin sähkönkulutus on 0,3 kWh/kg biokaasua (Ferrari ym., 2024). Mädätysjäännöstä muodostuu 95 % syöteseoksen massasta. Jäännös käsitellään separoimalla se neste- ja kuivajakeisiin, mikä mahdollistaa jatkojalostuksen ja ravinteiden tehokkaamman hyödyntämisen.

Esikäsitteilyn ja hygienisoinnin, mädätyksen, biokaasun puhdistuksen ja jalostuksen ja mädätysjäännöksen jatkokäsittelyn lämmöntarpeet ja osa sähköntarpeesta katetaan polttamalla tuotettua biokaasua laitoksen omassa CHP-yksikössä. Tällöin prosessin energiankäytön päästöt rajoittuvat CHP-yksikön metaani- ja N<sub>2</sub>O-päästöihin. CHP-yksikön lämpöhyötysuhde on 59 % ja sähköhyötysuhde 31 %. Tarvitava CHP-yksikön teho mitoitettiin lämmöntarpeen perusteella. CHP:n sähköntuotannon ylittävät sähköntarpeet katetaan verkkosähköllä, jonka päästökertoimena käytettiin vuoden 2024 volyympainotettua keskiarvoa 34 g CO<sub>2</sub>/kWh (Fingrid, 2025).

Kasvihuonekaasupäästöjen laskentaan sisällytetään EU uusiutuvan energian direktiivin mukainen lantahyvyitys. Hyvyitys paremmista maatalouskäytännöistä ja lannan paremmasta käsittelystä on 45 gCO<sub>2</sub>-ekv/MJ lantaa (EU RED II, 2018). Lantahyvyityksen laskennassa käytetyt lantojen energiasällöt ovat:

- Naudan lietalanta 0,5 MJ/kg lantaa (kosteuspitoisuus 91 %)
- Naudan kuivalanta 1,8 MJ/kg lantaa (kosteuspitoisuus 70 %)
- Sian lietalanta 0,75 MJ/kg lantaa (kosteuspitoisuus 92 %)

Muiden vaikutusluokkien lantahyvitysten laskennassa arvo 45 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ jaettiin sen osatekijöihin, jotka olivat 1,47 g metaania (CH<sub>4</sub>) megajoulea kohti ja 0,0279 g dityppioksidia (N<sub>2</sub>O) megajoulea kohti (Euroopan komissio, 2022). Laskenta toteutettiin OpenLCA-ohjelmistossa hyödyntäen Ecoinvent-tietokantaan perustuvia taustaprosesseja. Näihin sisältyivät dieselkäyttöisen, 16–32 tonnin kuorma-auton tavaraliikennettä kuvaavat kuljetusprosessit syötteiden kuljetusten mallintamiseksi sekä Suomen sähköntuotantoa kuvaava keski-jännitteen sähkönsyöttöprosessi biokaasuntuotannon sähkönkulutuksen huomioimiseksi.

Mädätysjäännöksen käsittelyssä separointitekniikaksi valittiin dekantterilinko, jonka energiankulutuksena käytettiin 3 kWh/m<sup>3</sup> (Finnilä ja Latvala, 2023). Mädätysjäännöksen ja sen jatkojalosteiden varastoinnin aikaiset kasvihuonekaasupäästöt eliminoidaan suljetulla jälkivarastoinnilla, josta metaani otetaan talteen biometaanin lisätuotantoa varten.

### 5.2.3 Loppukäyttö

CBG:n loppukäytön kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa huomioitiin ainoastaan metaani- ja typpioksiduulipäästöt (N<sub>2</sub>O); biogeenistä alkuperää olevia hiilidioksidipäästöjä ei sisällytetä elinkaarilaskentaan. Kaasuottomoottorin metaanipäästöt perustuvat Röckin ym. (2020) tutkimukseen; metaanipäästöt 0,2 gCH<sub>4</sub> /kWh ja N<sub>2</sub>O-päästöt 0,01 gN<sub>2</sub>O/kWh. Kun moottorin hyötysuhteeksi oletetaan 35 %, saadaan ominaispäästöt polttoaine-energiaa kohti 0,019 g CH<sub>4</sub>/MJ<sub>CBG</sub> ja 0,001 g N<sub>2</sub>O/MJ<sub>CBG</sub>. Myös muita päästöjä, kuten CO (0,042 g/MJ), NO<sub>x</sub> (0,017 g/MJ) ja HC (0,036 g/MJ), tarkasteltiin (Cignini ym., 2020).

Kasvihuonekaasupäästöt esitetään hiilidioksidiekvivalentteina. GWP100-päästökertoimina käytettiin IPCC:n AR6:n mukaisia arvoja (IPCC, 2021); biometaanille 27 ja N<sub>2</sub>O:lle 273. Taulukko 7 kokoaa yhteenvedon CBG:n tuotannon ja loppukäytön päästölaskennassa käytetyistä oletuksista.

**Taulukko 7.** Yhteenvedo CBG:n tuotannon ja loppukäytön päästölaskennassa käytetyistä oletuksista

	Päästöt	Sähkön kulutus	Lämmön kulutus	Lähde:
Esikäsitteily ja hygienisointi		150 kWh/t kuiva-ainetta	E (kJ) = 4,18 kJ/ kg °C x m (kg) x ΔT (12 → 70 °C)	Luostarinen ym., 2019
Mädätysprosessi, märkämädätys	Metaanivuoto 1 %	3 % tuotetun biometaanin energiasisällöstä		Majer ym. 2016, Luostarinen ym., 2019
Jalostus, amiinipesuri	Metaanivuoto 0,1 %	0,12 kWh/Nm <sup>3</sup> biokaasua	0,13 kWh/Nm <sup>3</sup> bio- kaasua	Lampinen, 2015
Paineistus (200 bar)		0.3 kWh/kg <sub>CBG</sub>		Ferrari ym. (2024)
Separointi, dekantterilinko		3 kWh/m <sup>3</sup> mädätysjäännöstä		Finnilä ja Latvala, 2023
Loppukäyttö, liikenne	0,019 gCH <sub>4</sub> /MJ <sub>CBG</sub> 0,001 gN <sub>2</sub> O/MJ <sub>CBG</sub> 0.042 g CO/MJ <sub>CBG</sub> (non-fossil) 0.017 g NO <sub>x</sub> /MJ <sub>CBG</sub> 0.036 g HC/MJ <sub>CBG</sub>			Röck ym., 2020; Cignini ym., 2020

## 5.3 Vaikutusarviointi

### 5.3.1 Vaikutusluokat

Tarkasteltuihin vaikutusluokkiin kuuluvat ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP), abioottinen ehtyminen (mineraalit ja metallit) (AD), fossiilisten polttoaineiden ehtyminen (AD-FF), happamoituminen (AP), rehevöityminen (EP), makean veden ekotoksisuus (AE-FW), meriveden ekotoksisuus (AE-M), maaperän ekotoksisuus (TE), ihmistoksisuus (HT), otsonikerroksen oheneminen (ODP) ja fotokemiallinen hapettuminen (PO). Taulukko 8 kokoaa vaikutustulokset per megajoule biometaania.

**Taulukko 8.** Ympäristövaikutukset per 1 MJ CBG:tä

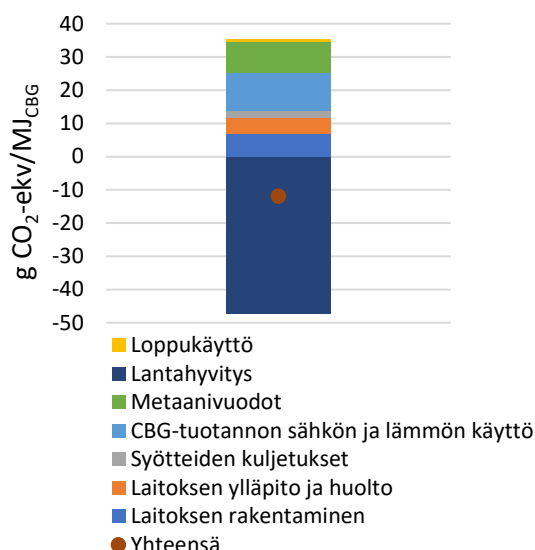
Vaikutusluokka	Yksikkö	Arvo
<b>Globaalit vaikutusluokat</b>		
<i>Ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP)</i>	kg CO <sub>2</sub> eq	-1.19E-02
<i>Resurssien ehtyminen, mineraalit ja metallit (AD)</i>	kg Sb eq	9.38E-08
<i>Resurssien ehtyminen, fossiiliset polttoaineet (AD-FF)</i>	MJ	2.67E-01
<b>Alueelliset ja paikalliset vaikutusluokat</b>		
<i>Happamoitumispotentiaali (AP)</i>	kg SO <sub>2</sub> eq	7.29E-05
<i>Rehevöityminen (EP)</i>	kg PO <sub>4</sub> eq	2.54E-05
<i>Makean veden ekotoksisuus (AE-FW)</i>	kg 1,4-DB eq	9.45E-03
<i>Meriveden ekotoksisuus (AE-M)</i>	kg 1,4-DB eq	2.38E+01
<i>Maaperän ekotoksisuus (TE)</i>	kg 1,4-DB eq	5.02E-05
<i>Ihmistoksisuus (HT)</i>	kg 1,4-DB eq	1.35E-02
<i>Otsonikerroksen oheneminen (ODP)</i>	kg CFC-11 eq	1.22E-09
<i>Fotokemiallinen hapettuminen (PO)</i>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	2.51E-07

### 5.3.2 Ympäristövaikutusarvioinnin tulokset

CBG:n elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt koostuvat rakentamisen ja ylläpidon päästöistä, tuotantovaiheen päästöistä sekä loppukäytön päästöistä. Esimerkkitapauksessa rakentamisen ja ylläpidon yhteenlasketut päästöt ovat 11,8 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ<sub>CBG</sub>. Lannan hyödyntäminen biokaasuprosessissa estää lannan hallitsemattomasta hajoamisesta aiheutuvat metaanipäästöt. Vahvasti lantapainotteisilla syöteillä voidaan saavuttaa jopa negatiivinen päästövaikutus. Esimerkkitapauksessa, jossa lannan osuus syöteseoksessa on 90 %, tuotantovaiheen päästöt ovat -24,4 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ<sub>CBG</sub>. Biokaasun käytön aikaiset kasvihuonekaasut muodostuvat pienestä metaanivuodosta ja N<sub>2</sub>O-päästöstä. Hiilidioksidipäästöjä ei huomioida niiden biogeenisen alkuperän vuoksi. Käytön aikaiseksi päästökseen muodostuu 0,8 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ<sub>CBG</sub>. Tulokset on havainnollistettu taulukossa 9 ja kuvassa 17.

**Taulukko 9.** CBG:n elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt. Laitoksen kapasiteetti 10 GWh/v, syöte-seos 90 % lantaa, 10 % peltobiomassoja.

Tuotettu CBG	36 245 859	MJ/v
Rakentamisen ja ylläpidon päästöt	11.8	g CO <sub>2</sub> -ekv/MJ <sub>CBG</sub>
Tuotantovaiheen päästöt	-24.4	g CO <sub>2</sub> -ekv/MJ <sub>CBG</sub>
Loppukäytön päästöt (liikenne)	0.8	g CO <sub>2</sub> -ekv/MJ <sub>CBG</sub>
<b>Yhteensä</b>	<b>-11.9</b>	<b>g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ<sub>CBG</sub></b>



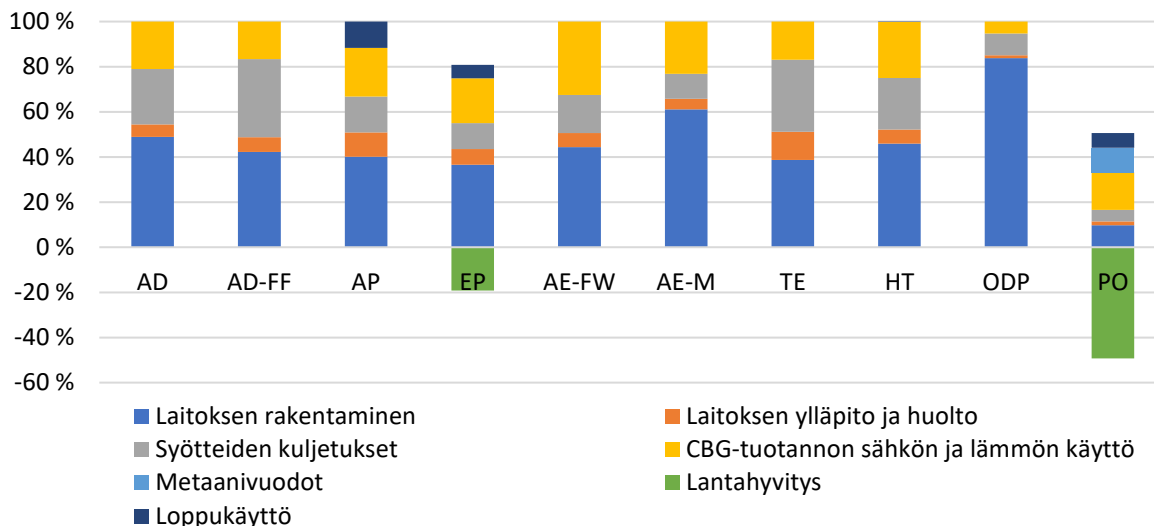
**Kuva 17.** CBG:n elinkaari päästöt g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ

Kontribuutioanalyysi toteutettiin myös muiden vaikutusluokkien osalta (taulukko 10). Sen avulla saadaan tietoa siitä, mikä elinkaaren vaihe aiheuttaa suurimman vaikutuksen. Tämä tieto on tärkeää päätöksenteon ja muutosten toteuttamisen kannalta, sillä sen avulla voidaan tunnistaa mahdollinen vaikutusten siirtyminen vaikutusluokasta tai elinkaaren vaiheesta toiseen.

**Taulukko 10.** CBG:n ympäristövaikutusten kontribuutioanalyysi. Yksiköt kuten taulukossa 8.

	AD	AD-FF	AP	EP	AE-FW	AE-M	TE	HT	ODP	PO
Laitoksen rakentaminen	4.59E-08	1.13E-01	2.92E-05	1.51E-05	4.19E-03	1.45E+01	1.94E-05	6.22E-03	1.02E-09	1.83E-06
Laitoksen ylläpito ja huolto	5.20E-09	1.73E-02	7.95E-06	2.82E-06	5.89E-04	1.10E+00	6.28E-06	8.33E-04	1.57E-11	3.30E-07
Syötteiden kuljetukset	2.30E-08	9.25E-02	1.15E-05	4.73E-06	1.60E-03	2.63E+00	1.60E-05	3.10E-03	1.17E-10	9.52E-07
CBG-tuotannon sähkön ja lämmön käyttö	1.97E-08	4.43E-02	1.57E-05	8.20E-06	3.07E-03	5.51E+00	8.48E-06	3.36E-03	6.47E-11	3.11E-06
Metaanivuodot	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.03E-06
Lantahyvyitys	0	0	0	-7.90E-06	0	0	0	0	0	-9.25E-06
Loppukäyttö	0	0	8.50E-06	2.48E-06	0	0	0	2.04E-05	0	1.25E-06

Kuva 18 havainnollistaa vaikutusanalyysia eri vaikutusluokkien välillä. Kaikissa vaikutusluokissa, lukuun ottamatta fotokemiallista hapettumista, biokaasulaitoksen rakentamisvaihe aiheutti suurimman osuuden kokonaisvaikutuksista. Rakentamisen osuus vaihteli 39–84 % välillä. Toisen merkittävä vaikutusten aiheuttaja mineraalien ja metallien sekä fossiilisten polttoaineiden ehtymisen, otsonikerroksen ohenemisen ja maaperän ekotoksisuuden osalta oli syötteiden kuljetukset, osuuksien vaihdella 10–35 % välillä. Happamoitumisen, rehevöitymisen, makean veden ja meriveden ekotoksisuuden, ilmaston lämpenemisen ja ihmistoksisuuden osalta toiseksi merkittävin vaikutusten aiheuttaja rakentamisvaiheen jälkeen oli CBG-tuotannon sähkön ja lämmön käyttö, osuuksien vaihdella 22–32 % välillä. Fotokemiallisen hapettumisen osalta tulokset poikkesivat muista vaikutusluokista, sillä suurin vaikutus aiheutui lantahyvyityksestä.

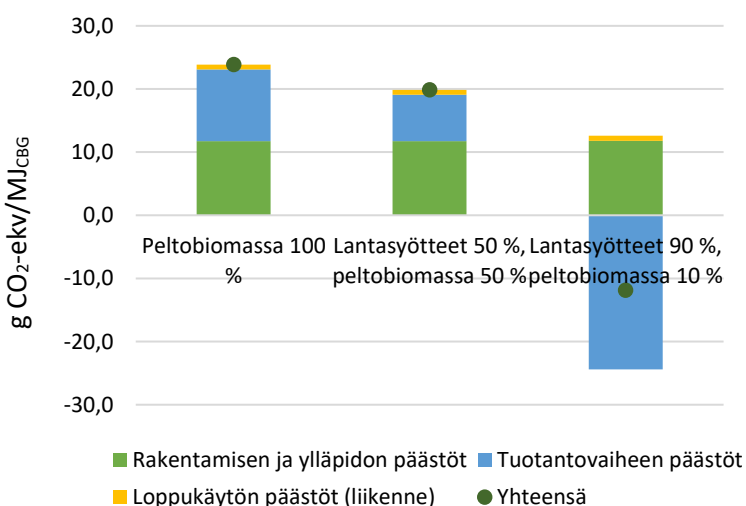


**Kuva 18.** Ympäristövaikutusten hotspot-analyysi eri vaikutusluokissa

## 5.4 Tulosten tulkinta

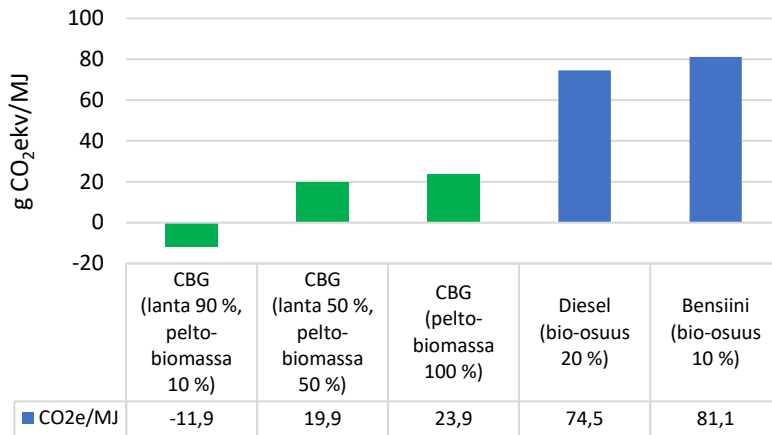
Käytetyillä syötteillä on merkittävä vaikutus biokaasun hiilipäästöihin. Lantahyvytyt on keskeinen tekijä, joka pienentää huomattavasti biokaasulaitoksen laskennallisia kasvihuonekaasupäästöjä. Jos siten biokaasun tuotannossa käytetään pelkästään kasviperäistä biomassaa tai esimerkiksi kotitalouksien biojätettä, ei vastaavaa laskennallista hyvytystä tehdä.

Edellä kuvatun esimerkin syöteseos koostui 90 % lannasta ja 10 % peltobiomassasta. Syöteseoksen koostumuksen merkityksen havainnollistamiseksi ilmastopäästöt laskettiin myös kahdelle vaihtoehdolle: seokselle, jossa on 50 % lantaa ja 50 % peltobiomassaa, sekä syötteelle, joka sisältää 100 % peltobiomassaa. Tulokset esitetään kuvassa 19.



**Kuva 19.** CBG:n elinkaari-päästöt erilaisilla syöteseoilla

Kuvassa 20 vertaillaan CBG:n elinkaari-päästöjä dieselin ja bensiinin vastaaviin. Dieselpolttoaineen bioosuudeksi oletettiin 7 % ja bensiinin 10 %. Dieselin ja moottoribensiinin tuotannon päästöt perustuvat JEC Well-to-Wheels v5 -raporttiin (Prussi ym., 2020) ja käytön aikaiset päästöt Tilastokeskuksen polttoaineluokitusdataan (Tilastokeskus, 2025).



**Kuva 20.** Paineistetun biokaasun, diesel B7:n ja bensiini E10:n elinkaaripäästöt

Vertailu osoittaa, että paineistetun biokaasun käyttö vähentää kasvihuonekaasupäästöjä merkittävästi fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna – ja tietyissä tapauksissa voi tuottaa jopa negatiivisia päästöjä. Kun biokaasun tuotannossa käytettävästä syöttestä 90 % on lantaa, polttoaineen megajoulekohtainen päästövähennys fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna on 114–115 %. Tämä tarkoittaa, että biokaasun käyttö ei ainoastaan vähennä fossiilisten polttoaineiden aiheuttamia päästöjä, vaan myös kompensoi muita päästöjä: biokaasuprosessi estää lannan hallitsemattomat metaanipäästöt, jotka muutoin vapautuisivat ilmakehään. Pelkästä peltobiomassasta tuotettu CBG alentaa megajouleperusteista ominaispäästöä noin 70 % verrattuna fossiiliseen dieseliin ja bensiiniin.

Lisäksi mädätysjäätännöksen prosessointi ja hyödyntäminen lannoitevalmisteina vähentää mineraalilannoitteiden tarvetta ja niiden valmistuksesta aiheutuvia päästöjä. Samalla se edistää ravinteiden kierrätystä, mikä tukee kiertotalouden ja kestäväen maatalouden tavoitteita. Mineraalilannoitteiden korvaamisesta syntyvän päästövähennyksen suuruusluokkaa ei tämän tutkimuksen puitteissa arvioitu.

### Skenaarioanalyysi

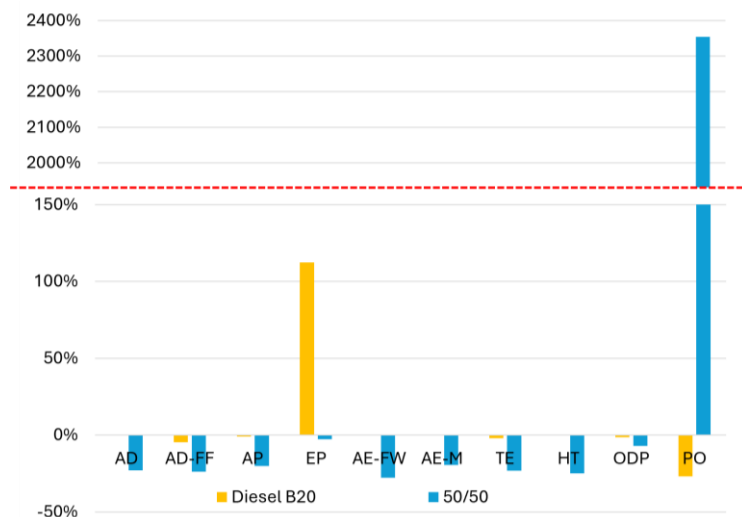
Muiden kuin globaalin lämmitysvaikutuksen vaikutusten osalta käytettiin skenaarioanalyysia sen tutkimiseksi, miten malli käyttäytyy, kun sovelletaan eri mahdollisia vaihtoehtoja. Skenaariot sisältävät: 1) 20 % biodieselin sekoittamisen kuljetuspolttoaineeseen (diesel B20) ja 2) syöteseoksen muuntamisen 50 % naudan lietelantaa ja 50 % biomassaa sisältäväksi (50/50). Taulukko 11 esittää skenaarioanalyysin tulokset

**Taulukko 11.** Skenaarioanalyysin tulokset, CBG.

	Lähtötilanne	Diesel B20	50/50	Yksikkö
AD	9.38E-08	9.40E-08	7.22E-08	kg Sb-ekv/MJ
AD-FF	2.67E-01	2.55E-01	2.03E-01	MJ/MJ
AP	7.29E-05	7.22E-05	5.82E-05	kg SO <sub>2</sub> -ekv/MJ
EP	2.54E-05	5.40E-05	2.48E-05	kg PO <sub>4</sub> -ekv/MJ
AE-FW	9.45E-03	9.45E-03	6.83E-03	kg 1,4-DB-ekv/MJ
AE-M	2.38E+01	2.38E+01	1.91E+01	kg 1,4-DB-ekv/MJ
TE	5.02E-05	4.92E-05	3.86E-05	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ekv/MJ
HT	1.35E-02	1.35E-02	1.02E-02	kg 1,4-DB-ekv/MJ
ODP	1.22E-09	1.20E-09	1.13E-09	kg 1,4-DB-ekv/MJ
PO	2.51E-07	1.83E-07	6.15E-06	kg CFC-11-ekv/MJ

Diesel B20 -skenaariossa ympäristövaikutusten pienenemistä lähtötilanteeseen verrattuna havaittiin fossiilisten polttoaineiden ehtymisessä, happamoitumispotentialissa, merivesien ja maaperän eko-toksisuudessa, ihmismyrkyllisyydessä, otsonikatoa aiheuttavassa potentialissa ja fotokemiallisessa hapettumisessa. Merkittävin vähennys oli fotokemiallisessa hapettumisessa (-27 %), jota seurasi fos-siilisten polttoaineiden ehtyminen (-4,6 %). Muissa vaikutusluokissa vähenemä jäi alle 2 %. Toisaalta perinteisen dieselin vaihtaminen B20 dieseliin kasvatti rehevöitymispotentiaalia 112 %.

Jälkimmäisessä skenaariossa (skenaario 50/50) raaka-aineena käytettiin 12 500 tonnia karjan lietettä ja 12 500 tonnia ruohoa. Skenaario johti ympäristövaikutusten pienenemiseen kaikissa vaikutusluo-kissa (-3 %:sta -28 %:iin) lukuun ottamatta fotokemiallista hapettumista, jossa vaikutus kasvoi mer-kittävästi (noin +2300 %). Lannan osuuden vähentäminen johti pienempiin hyvityksiin, mutta samalla kokonaisvaikutukset pienenevät alhaisemman resurssienkulutuksen vuoksi. Syötteiden vaihto vähensi vuosittaista kokonaisuusmassavirtaa, mikä puolestaan pienensi kuljetuksista aiheutuvia ympäristövaiku-tuksia. 50/50 syöteseos vähensi myös biokaasun tuotantoon tarvittavaa energiankulutusta, mukaan lukien sähköverkon kautta tuotettu sähkö. Lantahyvityksen vaikuttivat ainoastaan ilmaston lämpe-nemispotentiaaliin, rehevöitymiseen ja fotokemialliseen hapettumiseen, minkä seurauksena vaiku-tukset GWP:n ja PO:n osalta kasvoivat. Rehevöitymisen osalta lantahyvitysten vaikutus kuitenkin ku-moutui kuljetusten ja biokaasun tuotannon aikaisen vaikutusten vähenemisen myötä. Tulokset ha-vainnollistetaan kuvassa 21.



**Kuva 21.** Skenaariot ja prosentuaalinen muutos lähtötilanteeseen verrattuna

## 6. Metsähake

Hakkuutähteet tarjoavat käyttökelpoisen raaka-ainelähteen puupolttoaineiden tuotantoon. Yksinkertaisin tapa hyödyntää metsätähteitä on korvata niillä turvetta nykyisissä lämpö- ja CHP-laitoksissa (Spoof-Tuomi, 2025).

### 6.1 Tavoitteet ja tutkimuksen laajuus

#### 6.1.1 Järjestelmän rajaus

Tässä raportissa metsähakkeen käytön päästöjen tarkastelu rajataan keräilyyn, käsittelyyn ja polton aikaisiin vaiheisiin. Uusien haketta polttavien laitosten rakentaminen ei ole perusteltua, sillä Suomen kansallisen ilmasto- ja energiastrategian pitkän aikavälin tavoitteena on siirtyä pois polttoon perustuva energiantuotannosta. Lyhyellä aikavälillä puu voi kuitenkin toimia turpeen korvaajana.

#### 6.1.2 Toiminnallinen yksikkö

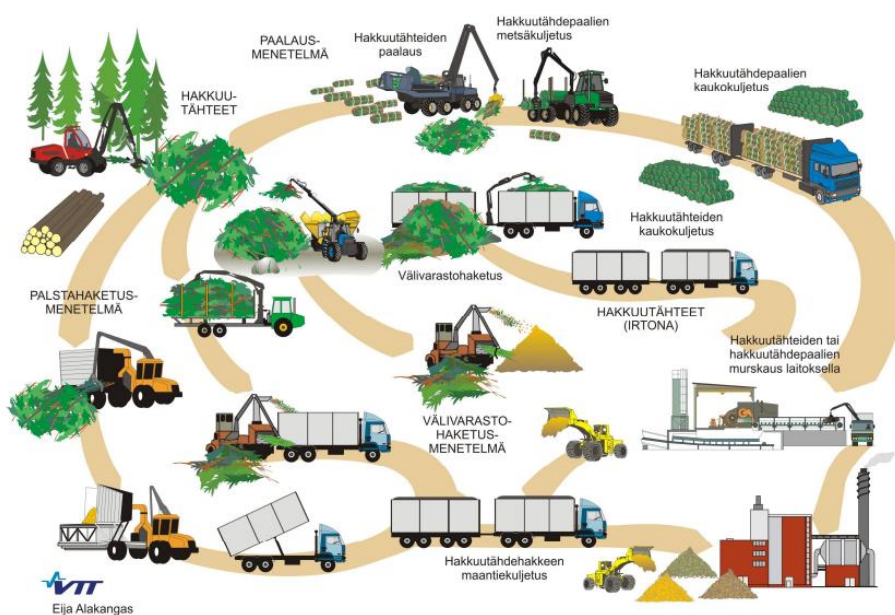
Toiminnallisena yksikkönä käytettiin MJ energiaa.

### 6.2 Inventaarioanalyysi

#### 6.2.1 Keräys ja esikäsittely

Metsätähteet ovat vähäpäästöinen energialähde. Vaikka niiden hyödyntäminen energiantuotannossa vapauttaa hiilidioksidia, määrä vastaa biomassan kasvun aikana sitoutunutta hiiltä. Toisin sanoen hiilidioksidin määrä ilmakehässä ei lisääny pysyvästi, vaan kiertää nopeassa hiilikiertokulussa. On kuitenkin huomioitava, että biomassan keräyksen, esikäsittelyn ja kuljetuksen aikana syntyy kasvihuonekaasupäästöjä, jos näihin käytetään fossiilista energiaa. Siksi nämä vaiheet on otettava mukaan biomassan elinkaaripäästöjen arviointiin.

Suomessa yleisimmin käytetty hakkuutähteen korjuumenetelmä on tienvarsihaketuksen perustuva menetelmä (kuva 22). Menetelmässä hakkuutähteet kasataan palstalle ainespuun korjuun yhteydessä. Kasat kuljetaan tienvarsivarastoon, josta ne haketetaan suoraan hakeautoon, joka vie ne polttolaitokselle. Kannot ovat sitkeitä hakettaa ja ne yleensä murskataan. Kannot voidaan murskata joko terminaalissa, käyttöpaikalla tai tienvarrella. (Alakangas ym., 2016) Laskennan yksinkertaistamiseksi tässä raportissa sekä hakkuutähteet että kannot käsitellään tienvarsivarastolla.



**Kuva 22.** Hakkutähteen korjuumenetelmät (Alakangas ym., 2016)

Metsätähteen käyttö polttolaitoksella edellyttää huolellista kosteuden hallintaa, jotta palaminen olisi tehokasta ja päästöt pysyisivät alhaisina. Pienissä ja keskisuurissa laitoksissa hakkeen kosteuden tulisi olla alle 30 %, sillä liian korkea kosteus heikentää lämpöarvoa, lisää savukaasujen pienhiukkaspitoisuutta ja nopeuttaa kattilan likaantumista. Tuoreen puun kosteus on tyypillisesti 50–55 %, jolloin kuivatus ennen polttoa on välttämätöntä. Tässä raportissa kuivausmenetelmäksi valitaan luonnonkuivatus palstakasoissa, koska se ei vaadi lisäenergiaa. Kuivuminen tapahtuu kevät-kesäkauden aikana, jolloin puun kosteus alenee 50 %:sta 30 %:iin.

Metsätähteen keräilyyn, käsittelyyn ja kuljetukseen päästölaskennassa käytettiin seuraavia oletuksia (Prussi ym., 2020; Tilastokeskus, 2025; Alakangas ym., 2016; Syke, 2025):

- Metsätähteen keräys, mukaan lukien lähikuljetus, niputus/nosto, metsäkoneiden siirrot ja lastaus/purku: Dieselin kulutus 0,012 MJ/MJ puuta.
- Haketus: Liikkuvan dieselkäyttöisen hakkurin energiankulutus tienvarsioperaatiossa 0,0035 MJ/MJ puuta.
- Diesel B7 päästökerroin: 68 g/MJ
- Hakkeen energiasisältö: 2,4 MWh/kiintokuutio (kosteus 30 %)
- Tilavuusmuunnos: 1 kiintokuutio  $\approx$  noin 2,5 irtokuutiota haketta  $\rightarrow$  Hakeirtokuution energiasisältö 0,9 MWh/irtokuutio (3240 MJ/i-m<sup>3</sup>)
- Hakkeen kuljetus polttolaitokseen: Puoliperävaunurekka, 85 i-m<sup>3</sup>/kuorma.
- Hakkeen tiheys: 300 kg/i-m<sup>3</sup>
- Kuljetusmatka: 70 km
- Kuljetuksen päästökerroin: Puoliperävaunuyhdistelmä (40 t), 80 % kuorma, maantieajo: 0,057 kg CO<sub>2</sub>-ekv/t.km

Muiden kuin ilmastolämpenemispotentiaalilaskennassa hyödynnettiin kirjallisuudesta ja Ecoinvent-tietokannasta (Ecoinvent, 2024) saatuja etu- ja taustatietoja. Inventaariot käsiteltiin edelleen OpenLCA 2.6 -ohjelmistolla (GreenDelta, 2025).

Muiden kuin ilmastonlämpenemispotentiaalın laskennassa hyödynnettiin kirjallisuudesta ja Ecoinvent-tietokannasta (Ecoinvent, 2024) saatuja etu- ja taustatietoja (ks. taulukko 12). Inventaariot käsiteltiin edelleen OpenLCA 2.6 -ohjelmistolla (GreenDelta, 2025). Tietokantaan tehtiin joitakin mukautuksia, jotta se vastaisi käytettyjä oletuksia. Esimerkiksi diesel B7 -seoksen mallintamisessa 7 % bioisuuden oletettiin olevan käytetystä kasviöljystä tuotettua rasvahappometyyliesteriä (FAME).

**Taulukko 12.** Ecoinvent-taustaprosessit eri prosessivaiheissa

	Ecoinvent	Huomautus
Metsäjätteen keräys	market for diesel, burned in agricultural machinery	Sisällytetty järjestelmärajan yhdenmukaisuuden varmistamiseksi
Haketus	market for diesel, burned in agricultural machinery	Sisällytetty järjestelmärajan yhdenmukaisuuden varmistamiseksi
Diesel B7 -sekoitus	treatment of used vegetable cooking oil, purified, esterification   fatty acid methyl ester	7 %:n pitoisuus dieselseoksessa
Kuljetus polttopaikalle	market for transport, freight, lorry, >32 metric ton, diesel, EURO 6	Sisällytetty järjestelmärajan yhdenmukaisuuden varmistamiseksi

## 6.2.2 Poltto

Metsätähdehakkeen ja -murskeen polton aikaiset CO<sub>2</sub>-päästöt ovat 112 g/MJ (Tilastokeskus, 2025). Nämä päästöt ovat kuitenkin luonteeltaan biogeenisiä ja katsotaan hiilineutraaleiksi, koska niiden vapautuminen ja sitoutuminen tapahtuu luonnollisessa hiilenkierrossa.

Sen sijaan biomassan polton metaani- ja dityppioksidipäästöt otetaan huomioon päästölaskennassa. VTT:n raportin (Tsupari ym., 2006) mukaiset suositellut päästökertoimet biomassan poltossa ovat metaanille 4 mg/MJ ja dityppioksidille 3 mg/MJ (leijupetiteknikka, laitoksen kokoluokka 5–50 MW). Vaikka CH<sub>4</sub>- ja N<sub>2</sub>O-päästöt ovat määrällisesti pieniä, on niiden ilmastovaikutus syytä huomioida niiden korkean GWP-arvon vuoksi. Laskennassa käytettiin IPCC:n AR6-raportin mukaisia GWP100-kertoimia: bioperäiselle metaanille on 27 ja dityppioksidille 273.

Polttovaiheen muiden kuin ilmastomuutokseen liittyvien ympäristövaikutusten laskennassa käytetyt oletukset perustuivat Tsuparin ym. (2006) ja Coronan ym. (2020) julkaisuihin. Oletuksia mukautettiin siten, että ne ovat yhdenmukaisia tämän tarkastelun järjestelmärajojen kanssa. Esimerkiksi Corona ym. (2020) käyttävät toiminnallisena yksikkönä 1 GJ:n eksergiaa, kun tässä tarkastelussa toiminnallinen yksikkö perustuu polttoaineen energiasisältöön (MJ). Taulukko 13 esittää polttovaiheeseen liittyvän inventaarion toiminnallista yksikköä kohden.

**Taulukko 13.** Polttovaiheen inventaario per MJ haketta

Nimike	Arvo	Yksikkö	Nimike	Arvo	Yksikkö
<b>Syötteet</b>			<b>Päästöt</b>		
Ammoniakki, nestemäinen	2.06E-07	kg	Jätevesi	3.56E-05	t
Hiekka	2.82E-08	kg	Vesipäästö ilmaan	1.88E-06	m <sup>3</sup>
Rikki	1.88E-08	kg	Voiteluöljyn hävitys	5.62E-07	Kg
Voiteluöljy	9.38E-10	kg	CO	4.84E-05	kg
Natriumhydroksidi	1.54E-07	kg	NOx	5.88E-05	kg
Vedenkulutus	1.88E-05	t	SO <sub>2</sub>	1.45E-05	kg
			Pöly/pienhiukkaset PM 2.5	2.04E-06	kg
			NH <sub>3</sub>	5.93E-06	kg
			HCl	2.86E-06	kg
			Hg	1.39E-09	kg
			NMVOc	7.33E-06	kg
			Dioksiini, 2,3,7,8-TCDD	4.68E-15	kg
			CH <sub>4</sub>	4.00E-06	kg
			N <sub>2</sub> O	3.00E-06	kg

## 6.3 Vaikutusarviointi

### 6.3.1 Vaikutusluokat

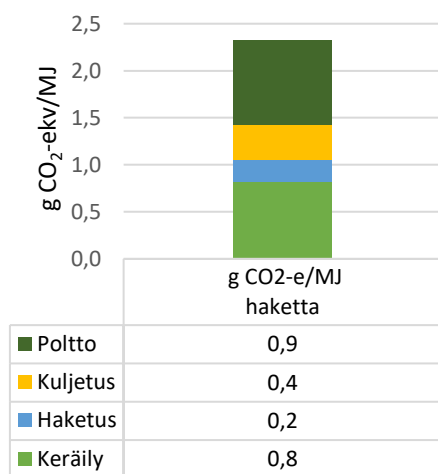
Tässä raportissa tarkastellut metsähakkeen vaikutusluokat ovat keskipistevaikutuksia, jotka on laskettu CML-lähtötason vaikutustenarviointimenetelmällä. Tarkastelu kattaa ilmaston lämpenemispotentiaalin (GWP), abioottisen ehtymisen (mineraalit ja metallit) (AD), fossiilisten polttoaineiden ehtymisen (AD-FF), happamoitumisen (AP), rehevöitymisen (EP), makean veden ekotoksisuuden (AE-FW), merivesien ekotoksisuuden (AE-M), maaperän ekotoksisuuden (TE), ihmismyrkyllisyyden (HT), otsonikerroksen oheneamisen (ODP) ja fotokemiallisen hapettumisen (PO). Taulukko 14 esittää vaikutukset per MJ metsähaketta.

**Taulukko 14.** Ympäristövaikutukset per MJ metsähaketta

Vaikutusluokka	Yksikkö	Arvo
Ilmaston lämpeneminen (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -ekv	2.30E-03
Resurssien ehtyminen (mineraalit ja metallit)	kg Sb-ekv	4.87E-10
Resurssien ehtyminen (fossiiliset polttoaineet)	MJ	2.49E-02
Happamoitumispotentiaali (AP)	kg SO <sub>2</sub> -ekv	9.37E-06
Rehevöityminen (EP)	kg PO <sub>4</sub> -ekv	6.41E-06
Makean veden ekotoksisuus (AE-FW)	kg 1,4-DB-ekv	1.05E-04
Meriveden ekotoksisuus (AE-M)	kg 1,4-DB-ekv	1.89E-01
Maaperän ekotoksisuus (TE)	kg 1,4-DB-ekv	6.59E-06
Ihmisille aiheutuva myrkyllisyys (HT)	kg 1,4-DB-ekv	2.24E-04
Otsonikerroksen oheneminen (ODP)	kg CFC-11-ekv	3.69E-11
Fotokemiallinen hapettuminen	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ekv	1.58E-06

### 6.3.2 Ympäristövaikutusarvioinnin tulokset

Inventaarioanalyysissä kuvatuilla oletuksilla metsähakkeen keräilyyn, käsittelyyn ja kuljetuksen yhteenlasketut kasvihuonekaasupäästöt ovat 1,4 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ haketta. Poltosta syntyvät päästöt muodostuvat metaani- ja dityppioksidipäästöistä, joiden yhteismäärä on 0,9 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ haketta. Elinkaaren aikainen kokonaispäästö on noin 2,3 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ haketta (kuva 23).



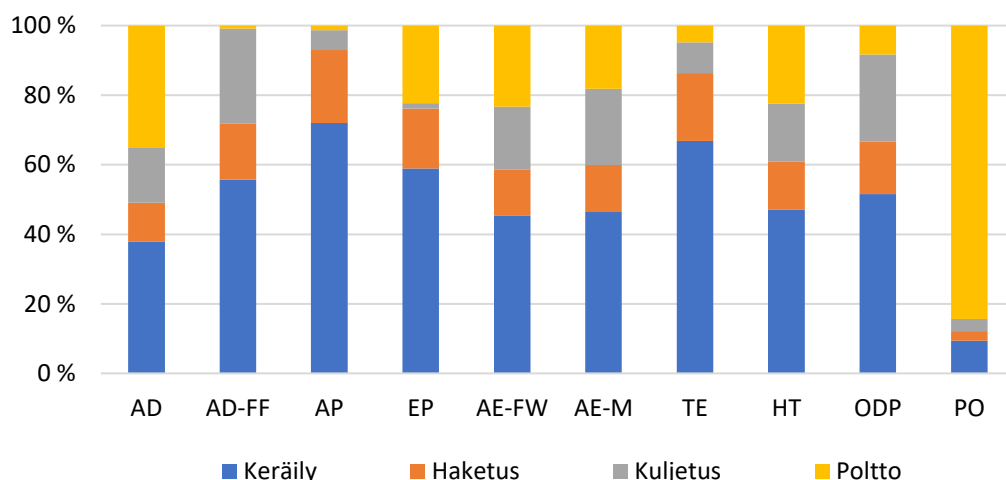
**Kuva 23.** Metsähakkeen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt

Myös muille vaikutusluokille tehtiin kontribuutioanalyysi (ks. taulukko 15). Analyysin avulla voidaan tunnistaa ne prosessit, jotka aiheuttavat suurimmat ympäristövaikutukset, ja siten tukea sidosryhmiä arvioimaan, mitkä tekijät ovat olennaisimpia päätöksenteon ja kehitystoimenpiteiden kannalta.

**Taulukko 15.** Metsähakkeen ympäristövaikutusten kontribuutioanalyysi. Yksiköt kuten taulukossa 13.

	AD	AD-FF	AP	EP	AE-FW	AE-M	TE	HT	ODP	PO
Keräily	3.61E-10	1.40E-02	7.23E-06	3.76E-06	1.01E-04	1.04E-01	2.37E-05	1.25E-04	2.06E-11	1.56E-07
Haketus	1.05E-10	4.09E-03	2.11E-06	1.10E-06	2.95E-05	3.02E-02	6.93E-06	3.64E-05	5.99E-12	4.54E-08
Kuljetus	7.69E-11	6.79E-03	5.43E-07	1.03E-07	2.26E-05	5.76E-02	1.13E-06	1.81E-04	9.24E-12	5.57E-08
Poltto	1.71E-10	2.05E-04	1.21E-07	1.43E-06	2.46E-05	3.43E-02	3.20E-07	5.01E-05	3.06E-12	1.34E-06

Kuva 24 esittää, miten eri prosessit ja elinkaaren vaiheet vaikuttavat tarkasteltuihin vaikutusluokkiin. Hotspot-analysissä tunnistettiin selkeitä ja toistuvia piirteitä: keräysvaihe aiheutti suurimman ympäristövaikutuksen uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymisessä (AD ja AD-FF), happamoitumisessa, rehevöitymisessä sekä makean veden, merivesien ja maaperän ekotoksisuudessa, ihmismyrkyllisyydessä ja otsonikerroksen ohenemisessa. Keräysvaiheen osuus näissä vaikutusluokissa vaihteli 38–72 % välillä. Useissa vaikutusluokissa keräysvaiheen kontribuutio ylitti 50 %, kuten otsonikerroksen ohenemisessa (ODP, 52 %), fossiilisten polttoaineiden abiottisessa ehtymisessä (AD-FF, 56 %), rehevöitymisessä (EP, 59 %), maaperän ekotoksisuudessa (TE, 67 %) ja happamoitumisessa (AP, 72 %). Sen sijaan polttovaihe muodostui hotspotiksi fotokemiallisen hapettumisen (PO) osalta, jossa sen osuus oli 84 %.



**Kuva 24.** Ympäristövaikutusten hotspot-analyysi eri vaikutusluokissa

## 6.4 Tulosten tulkinta

Kuten aiemmin todettiin, yksi mahdollinen ja teknisesti suoraviivainen tapa hyödyntää metsätähteitä on niiden käyttö turpeen korvaajana nykyisissä lämpö- ja CHP-laitoksissa. Seuraavassa tarkastellaan metsähakkeen ja turpeen polton kasvihuonekaasuvaikutuksia

Suomessa turpeella tuotetaan sähköä ja lämpöä yhdyskuntien ja teollisuuden yhdistetyssä ja erillisessä sähkön ja lämmön tuotannossa. Etelä-Pohjanmaalla turpeella on merkittävä rooli erityisesti

kaukolämmön tuotannossa. Turpeen käytön elinkaariset kokonaispäästöt koostuvat turpeen tuotannosta, turpeen käytöstä (poltto tai muu käyttö) sekä turvealueen jälkikäytöstä (Soimakallio ym., 2020).

Turpeen energiakäyttöön liittyvät päästöt syntyvät kahdesta pääasiallisesta lähteestä:

- Maaperäpäästöt – tuotantoalueen kuivatus ja ojitus kiihdyttävät orgaanisen aineksen hajoamista, mikä vapauttaa hiiltä ilmakehään.
- Poltosta – turpeen käyttö energiantuotannossa aiheuttaa merkittävät kasvihuonekaasupäästöt.

Lisäksi turpeen tuotantoon käytettävät työkoneet ja turpeen varastointi aiheuttavat jonkin verran lisäpäästöjä (Kirkinen ym. 2007).

### Turvetuotannon maaperäpäästöt

Turvetta muodostuu, kun korkea pohjaveden taso estää kasviaineksen hajoamisen suossa. Ojitus laskee pohjaveden tasoa ja käynnistää mikrobiologisen hajotuksen pintakerroksessa. Turpeen hajotessa sen kasviaines pilkkoutuu ja vapauttaa CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- ja N<sub>2</sub>O-päästöjä. Prosessi jatkuu, kunnes turvekerros on kulunut loppuun. Päästöjen suuruusluokka riippuu mm. ojituksen kestosta, vedenpinnan tasosta, jäännösturpeen paksuudesta ja tuotantoalueen jälkikäytöstä. Päästöt vaihtelevat myös vuodenajan mukaan. Turvetuotannon päästökerroin voi näin ollen vaihdella merkittävästi paikkakunnittain ja jopa yksittäisten tuotantoalueiden välillä. Siksi kansalliset kasvihuonekaasuinventaarit käyttävät usein keskiarvoja.

Turvetuotannon maaperäpäästöt raportoidaan maankäyttösektorilla (LULUCF), erillään polton päästöistä. Suomessa LULUCF-laskennasta ja kertoimien päivityksestä vastaa Luonnonvarakeskus (Luke). Päästökertoimien laskentaperiaatteet perustuvat kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC) vuoden 2006 ohjeistukseen ja siihen vuosina 2014 ja 2019 tehtyihin päivityksiin, sekä kansallisiin mittauksiin. Päästökertoimet ilmoitetaan pinta-alaperusteisesti (kg/ha/vuosi).

Tässä raportissa turvetuotannon maaperäpäästöt arvioitiin kansallisessa kasvihuonekaasuinventaarissa ilmoitettujen tietojen perusteella. Laskenta tehtiin jakamalla turvetuotannon kokonaispäästöt tuotantoalueiden kokonaisalalla. Näin saatu keskiarvokerroin kuvaa koko Suomen turvetuotannon päästöjä, sillä aluekohtaisia tai tarkempia mittausperusteisia kertoimia ei ollut kattavasti saatavilla. Laskennassa käytettiin vuoden 2022 tietoja (UNFCCC, 2024) ja tulokset esitetään taulukossa 16. GWP100-kertoimina käytettiin IPCC:n AR6 mukaisia kertoimia: metaanille on 27,2 ja dityppioksidille 273.

**Taulukko 16.** Turvetuotannon päästöt vuoden 2022 kasvihuonekaasuinventaarissa

	t/v	Turvetuotantoalueiden kokonaisala, ha	Päästökerroin t/ha/v
CO <sub>2</sub>	1 678 990	98 822	16,99
CH <sub>4</sub>	1 980	98 822	0,020
N <sub>2</sub> O	286	98 822	0,0029
CO <sub>2</sub> -ekv			18,3

Ominaispäästöjen laskennassa turpeen tuotantomääräksi asetettiin 400 MWh/ha/v (Leinonen, 2010).

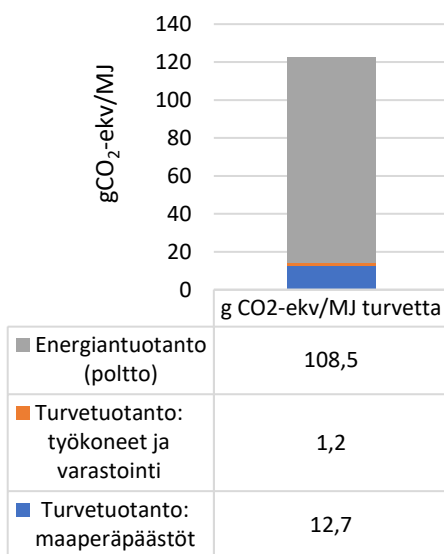
### Turpeen polton päästöt

IPCC luokittelee turpeen fossiilisten polttoaineiden kaltaiseksi polttoaineeksi, koska sen uusiutuminen on äärimmäisen hidasta (1 mm/vuosi). Tilastokeskuksen polttoaineluokituksen mukaan turpeen polton CO<sub>2</sub>-päästöt ovat 107,6 g CO<sub>2</sub>/MJ (Tilastokeskus, 2025). Lisäksi poltossa vapautuu pieniä määriä

metaani- ja dityppioksidipäästöjä. CH<sub>4</sub>:n ja N<sub>2</sub>O:n päästökertoimina käytetään Tsuparin ym. (2006) suosituksen mukaisia arvoja 4 mg CH<sub>4</sub>/MJ turvetta ja 3 mg N<sub>2</sub>O/MJ turvetta (leijupetiteknikka, laitoksen kokoluokka 5–50 MW).

### Turpeen elinkaaripäästöt

Kasvihuonekaasuintentaarion mukaiset turpeen maaperäpäästöt ovat 18,3 t CO<sub>2</sub>-ekv/ha/v. Yhdeltä hehtaarilta tuotetaan vuodessa 1440000 MJ turvetta, jolloin ominaispäästöksi muodostuu 12,7 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ. Turvetuotannon työkoneiden päästöksi arvioitiin 0,5 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ turvetta ja varastoinnin päästöksi 0,7 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ turvetta (Kirkinen ym., 2007). Turpeen poltosta syntyvät päästöt koostuvat hiilidioksidi-, metaani- ja dityppioksidipäästöistä, joiden yhteismäärä on 108,5 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ turvetta. Näin ollen turpeen koko elinkaaren aikaiseksi päästöksi muodostuu 122,4 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ (kuva 25). Tuloksista nähdään, että turpeen ilmastopäästöt ovat merkittävät. Vertailun vuoksi mainittakoon kiivihiilen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt noin 110 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ (Sokka ym., 2018).



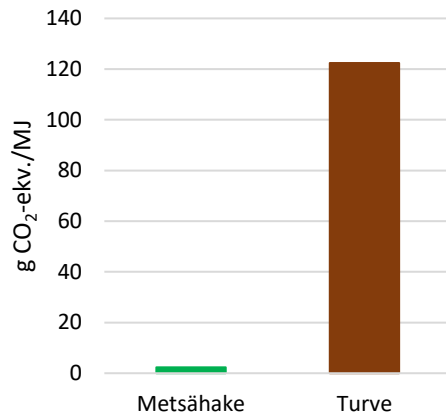
**Kuva 25.** Turpeen elinkaaripäästöt

Yllä esitetyssä laskelmassa turvetuotantokentän päästöt aiheuttavat noin 10 % turpeen elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä. Tulos on hyvin linjassa mm. Sitran vuonna 2020 julkaiseman selvityksen kanssa (Soimakallio ym., 2020).

Tässä tutkimuksessa ei otettu kantaa alueen käyttöön turvetuotannon päättymisen jälkeen. Ennallistettu tai metsitetty alue voi pitkällä aikavälillä toimia hiilinieluna ja vähentää aiempia päästöjä. Kokonaispäästöt riippuvat kuitenkin siitä, mikä jälkikäyttövaihtoehto valitaan ja miten alueen kasvihuonekaasutase kohdennetaan turpeen käytölle.

### Metsähake vs. turve

Metsähakkeen elinkaaripäästöt, jotka syntyvät keräyksestä, käsittelystä, kuljetuksesta sekä polton metaani- ja dityppioksidipäästöistä, ovat hyvin pienet, 2,3 g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ haketta. Turvetuotannon ja turpeen käytön kasvihuonekaasupäästöt sen sijaan ovat huomattavat – jopa fossiilisia polttoaineita korkeammat. Metsähakkeeseen verrattuna turpeen ilmastopäästöt ovat yli 50-kertaiset (kuva 26).



**Kuva 26.** Metsähakkeen ja turpeen elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt

Lyhyellä aikavälillä metsähake voi toimia vähäpäästöisenä ja ilmastovaikutuksia pienentävänä korvaajana turpeelle ennen siirtymää pois polttoon perustuvasta energiantuotannosta.

### Skenaarioanalyysi

Muiden kuin ilmastonlämpenemispotentiaalin osalta tarkastelu painottui skenaarioanalyysiin. Sovelletut skenaariot olivat: 1) rasvahappometyyliesterin (FAME) raaka-ainelähteen muuttaminen käytetystä kasviöljystä rypsiöljyksi (R-FAME) ja 2) FAME-osuuden kasvattaminen 20 prosenttiin keräyksen ja haketuksen aikana. Skenaarioanalyysin avulla arvioitiin tulosten herkkyyttä erilaisille oletuksille ja tarkasteltiin vaikutusten mahdollisia muutoksia eri olosuhteissa. Lisäksi analyysi mahdollistaa taakan siirtymisen tunnistamisen eri vaikutusluokkien välillä. Taulukko 17 esittää tarkasteltujen skenaarioiden vaikutukset.

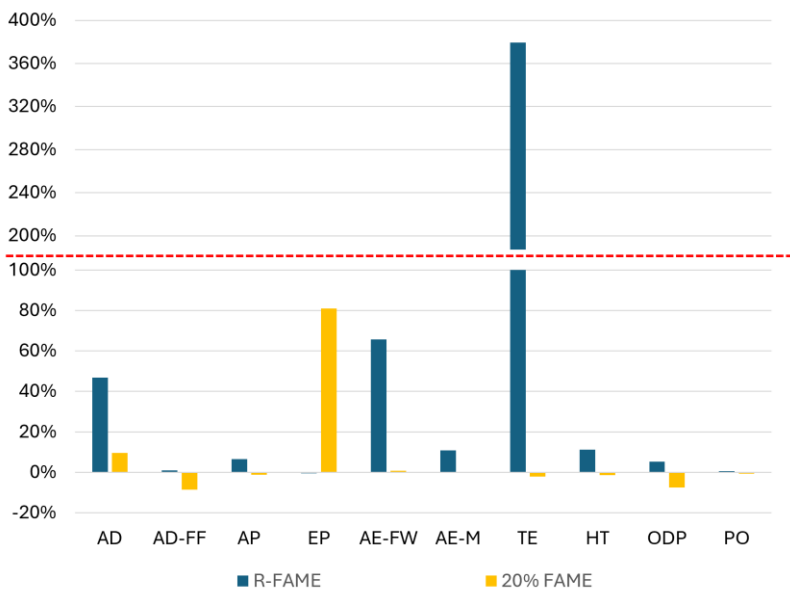
**Taulukko 17.** Skenaarioanalyysin tulokset, metsähake.

Vaikutusluokka	Lähtötilanne	FAME-R	FAME 20 %	Yksikkö
AD	4.87E-10	7.15E-10	5.34E-10	kg Sb-ekv/MJ
AD-FF	2.49E-02	2.51E-02	2.28E-02	MJ/MJ
AP	9.37E-06	9.99E-06	9.27E-06	kg SO <sub>2</sub> -ekv/MJ
EP	6.41E-06	6.38E-06	1.16E-05	kg PO <sub>4</sub> -ekv/MJ
AE-FW	1.05E-04	1.74E-04	1.06E-04	kg 1,4-DB-ekv/MJ
AE-M	1.89E-01	2.09E-01	1.89E-01	kg 1,4-DB-ekv/MJ
TE	6.59E-06	3.16E-05	6.45E-06	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ekv/MJ
HT	2.24E-04	2.49E-04	2.21E-04	kg 1,4-DB-ekv/MJ
ODP	3.69E-11	3.88E-11	3.41E-11	kg 1,4-DB-ekv/MJ
PO	1.58E-06	1.59E-06	1.57E-06	kg CFC-11-ekv/MJ

Tulokset osoittivat, että kaikissa tarkastelluissa skenaarioissa tapahtui kuormituksen siirtymistä joko FAME-pitoisuutta kasvattamalla tai FAME-raaka-ainetta muuttamalla. Kun FAME-osuuden määrää nostettiin 7 prosentista (diesel B7) 20 prosenttiin (diesel B20), osa vaikutusluokista pieneni, kun taas toiset kasvoivat. Esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden abioottinen ehtyminen, happamoituminen, ihmismyrkyllisyys, otsonikerroksen oheneminen, fotokemiallinen hapettuminen ja maaperän ekotoksisuus vähenivät, kun taas muissa vaikutusluokissa havaittiin kasvua. Muutokset vaihtelivat maltillisista alle prosentin muutoksista aina selvästi suurempiin lisäyksiin. Rehevöityminen erottui tuloksissa

erityisesti, sillä sen muutos lähtötilanteeseen nähden oli huomattava. Toiseksi suurin muutos havaittiin uusiutumattomien luonnonvarojen ehtymisessä (AD). Tämä korostaa sitä, että FAME-osuuden kasvattaminen ei johda yksiselitteisesti ympäristövaikutusten vähenemiseen, vaan vaikutukset jakautuvat eri tavoin eri vaikutusluokissa.

Skenaarioanalyysi toi esiin myös FAME-raaka-aineen valinnan merkityksen. Perusskenaariossa FAME tuotettiin käytetystä kasviöljystä, kun taas skenaariotarkasteluissa raaka-aineena käytettiin rypsiöljyä. Tämä johti selkeisiin eroihin vaikutuksissa. Kun FAME tuotettiin rypsiöljystä, rehevöityminen väheni, mutta useimmat muut vaikutusluokat kasvoivat. Erityisen voimakas kasvu havaittiin maaperän ektoksisuudessa, mikä liittyy maatalousperäisten raaka-aineiden tuotantoon, joka on vahvasti riippuvainen torjunta-aineista ja lannoitteista. Kuva 27 esittää prosentuaaliset erot perustilanteen ja skenaarioanalyysin tulosten välillä.



**Kuva 27.** Skenaariot ja prosentuaalinen muutos lähtötilanteeseen verrattuna

## 7. Johtopäätökset

HOKE-hankkeen osaraportin 1.1 Seutukunnalliset resurssit ja vahvuudet energiantuotannossa (Spoof-Tuomi, 2025) mukaan siirtyminen uusiutuvaan energiaan olisi Etelä-Pohjanmaan seutukunnissa parhaiten ja kestävimmin toteutettavissa seuraavin toimenpitein:

1. Sähköistämällä kaukolämmön tuotantoa
2. Sähköistämällä teollisuuden prosesseja
3. Lisäämällä biokaasun käyttöä erityisesti liikenteessä
4. Edistämällä lämpöpumpputeknologiaa asuin- ja liikerakennusten lämmityksessä
5. Korvaamalla maatalouden ja asuin- ja liikerakennusten lämmityksen turpeen käyttö metsähakkeella

Kaukolämmön sähköistäminen tarkoittaa, että kaukolämpöverkkoon syötettävä lämpö tuotetaan aiemman polttamiseen perustuvan energiantuotannon sijaan sähköä hyödyntävillä menetelmillä. Keskeisiä ratkaisuja ovat sähkökattilat ja sähkökäyttöiset lämpöpumput. Teollisuuden prosesseissa fossiilisia polttoaineita voidaan korvata esimerkiksi suoralla sähkölämmityksellä, sähkövastuksilla tai sähkökattiloilla. Yhteistä näille menetelmille on, että ne muuttavat sähkön lähes kokonaan lämmöksi ilman häviöitä. Lisäksi erityisesti kaukolämmön tuotantoa voidaan vähäpäästöistä korvaamalla nykyinen turpeen käyttö metsätähteistä tuotetulla hakkeella.

Maataloudessa sekä asuin- ja liikerakennusten lämmityksessä öljy on edelleen merkittävä energialähde, myös turvetta käytetään jonkin verran. Siirtyminen uusiutuvalla sähköllä toimiviin lämpöpumppuihin ja turpeen korvaaminen metsähakkeella vähentäisi maatalouden ja asuin- ja liikerakennusten lämmityksen ilmastopäästöjä murto-osaan nykyisestä tasosta.

Taulukko 18 kokoa yllä kuvattujen menetelmien ilmastovaikutukset yksikössä kg CO<sub>2</sub>-ekv per MWh tuotettua lämpöä. Vertailun vuoksi laskenta esitetään myös polttoöljyn ja turpeen käytölle. Polttoöljyn tuotannon aikaiset päästöt perustuvat Sokan ym. (2018) ja Tsuparin ym. (2006) raportteihin, polton aikaiset päästöt haettiin Tilastokeskuksen (2025) polttoaineluokituksista. Taulukossa esitetty laskenta huomioi teknologioiden erilaiset käyttökohteet ja hyötysuhteet.

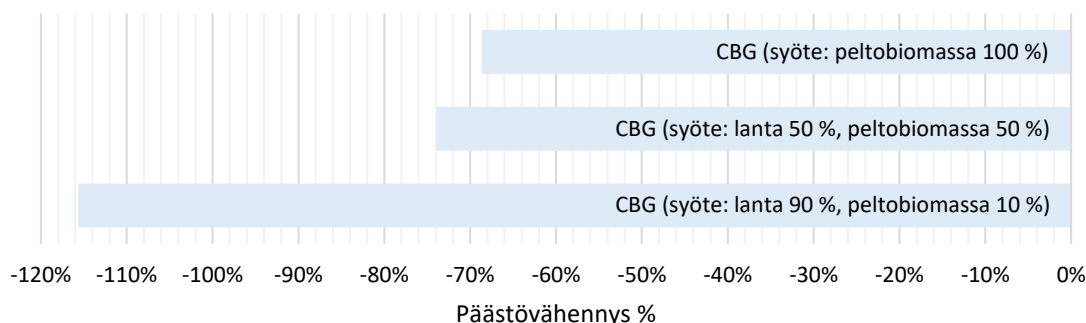
**Taulukko 18.** Energiantuotantomuotojen ilmastovaikutukset (kg CO<sub>2</sub>-ekv/MWh lämpöä)

Menetelmä/polttoaine/käyttökohde	Hyötysuhde	Elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt	kg CO <sub>2</sub> -ekv per MWh lämpöä
Sähkökattila/tuulisähkö/teollisuus, kaukolämpö	99 %	7,6 g CO <sub>2</sub> ekv/kWh	7,7
Sähkökattila/aurinkosähkö/teollisuus, kaukolämpö	99 %	35,8 g CO <sub>2</sub> ekv/kWh	36,2
Lämpöpumppu/tuulisähkö/teollisuus, kaukolämpö	COP 4	7,6 g CO <sub>2</sub> ekv/kWh	1,9
Lämpöpumppu/aurinkosähkö/teollisuus, kaukolämpö	COP 4	35,8 g CO <sub>2</sub> ekv/kWh	9,0
Lämpöpumppu/tuulisähkö/asuin- ja liikerakennukset	COP 3	7,6 g CO <sub>2</sub> ekv/kWh	2,5
Lämpöpumppu/aurinkosähkö/asuin- ja liikerakennukset	COP 3	35,8 g CO <sub>2</sub> ekv/kWh	11,9
Hakekattila/metsähake/teollisuus, kaukolämpö	90 %	2,2 g CO <sub>2</sub> ekv/MJ	8,8
Hakekattila/metsähake/maatalous, asuinrakennukset	80 %	2,2 g CO <sub>2</sub> ekv/MJ	9,9
Öljykattila/kevyt polttoöljy/teollisuus	90 %	84,2 g CO <sub>2</sub> ekv/MJ	337
Öljykattila/kevyt polttoöljy/maatalous, asuin- ja liikerakennukset	85 %	84,2 g CO <sub>2</sub> ekv/MJ	357
Turvekattila/turve/teollisuus, kaukolämpö	90 %	122 g CO <sub>2</sub> ekv/MJ	488
Turvekattila/turve/maatalous, asuinrakennukset	80 %	122 g CO <sub>2</sub> ekv/MJ	549

Siirtyminen vähäpäästöiseen sähkään kaukolämmön tuotannossa ja teollisuuden prosesseissa on tehokkain keino minimoida lämmöntuotannon ilmastovaikutukset. Pienimmät päästöt saavutetaan yhdistämällä tuulisähkö ja lämpöpumppu. Hake on hyvä vaihtoehto kohteissa, joissa sähkön päästökeruimet eivät ole riittävän alhaisia tai joissa tarvitaan polttoon perustuvaa varmuutta. Öljyn ja turpeen käytöstä tulisi luopua mahdollisimman nopeasti niin teollisuus- ja kaukolämpösektorilla kuin maatalous- ja kiinteistösektorilla.

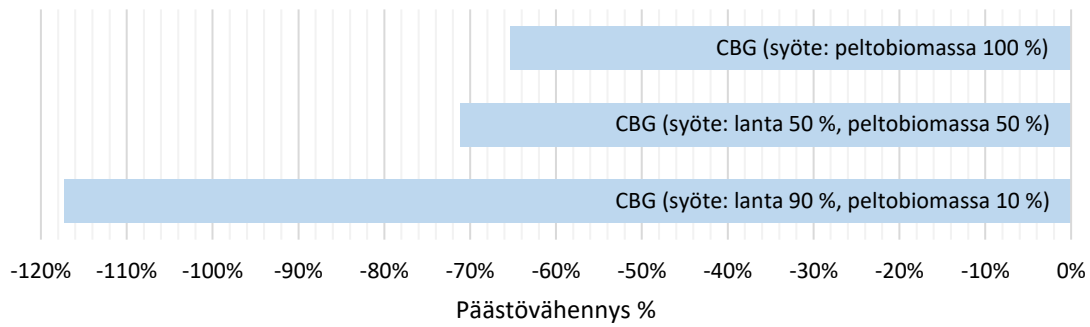
Paineistetun biokaasun liikennekäytön ilmastovaikutusta tutkittiin kolmella erilaisella syöteseoksella, ja ominaispäästöjä (g CO<sub>2</sub>-ekv/MJ) verrattiin fossiiliseen dieseliin ja bensiiniin. Tässä yhteenveto-osiossa tarkastelua laajennetaan laskemalla päästöt kilometriperusteiselle ajosuoritteelle, jolloin myös kaasu-, diesel- ja bensiinimoottoreiden erilaiset hyötysuhteet tulevat huomioiduiksi. Näin saadaan kokonaiskuva, jossa yhdistyvät polttoaineen kemialliset ominaisuudet ja moottorin energiatehokkuus, mikä mahdollistaa realistisen vertailun eri käyttövoimien ilmastovaikutuksista todellisessa ajossa. Henkilöautoliikenteen osalta vertailu tehtiin CBG:n ja bensiinikäytön välillä ja raskaassa liikenteessä vertailupolttoaineena oli diesel.

Henkilöauton polttoaineenkulutustiedot perustuvat ICCT:n (International Council on Clean Transportation) tuoreeseen julkaisuun henkilöautojen todellisista kulutus- ja päästötiedoista (Negri ja Bieker, 2025): Keskikokoisen henkilöauton keskimääräinen bensiinin kulutus 6,9 l/100 km ja vastaavan kokoisien kaasukäyttöisen ajoneuvon kulutus 4,7 kg/100 km. Laskennassa bensiinin tehollisena lämpöarvona käytettiin 41,6 MJ/kg ja tiheytenä 0,746 kg/l (Tilastokeskus, 2025). CBG:n tehollinen lämpöarvo 97 %:n metaanipitoisuudella on 48,5 MJ/kg. Tulokset nähdään kuvassa 28.



**Kuva 28.** CBG:llä saavutettavat päästövähennykset henkilöautoliikenteessä, vertailupolttoaineena bensiini E10. Vertailu perustuu ominaispäästöihin yksikössä g CO<sub>2</sub>-ekv/km.

Raskaan liikenteen päästövertailua tehtiin 3-akseliselle kuorma-autolle, jonka omamassa on 10 000 kg ja kokonaisuudessaan kuormattuna 26 000 kg. Oletuksena oli, että ajosuoritteesta 20 % ajetaan tyhjänä ja 80 % täyteen kuormattuna. Suomen ilmastopaneelin laskuri raskaan liikenteen päästöille antaa näillä oletuksilla dieselin kulutukseksi 35,5 l/100 km ja biokaasun kulutukseksi 32 kg/100 km (Suomen ilmastopaneeli, 2023). Laskennassa diesel B7:n tehollisena lämpöarvona käytettiin 43,2 MJ/kg ja tiheytenä 0,830 kg/l (Tilastokeskus, 2025). CBG:llä raskaassa liikenteessä saavutettavat päästövähennykset esitetään kuvassa 29.



**Kuva 29.** CBG:llä saavutettavat päästövähennykset raskaassa liikenteessä, vertailupolttoaineena diesel B7. Vertailu perustuu ominaispäästöihin yksikössä g CO<sub>2</sub>-ekv/km.

Biokaasun käyttö vähentää merkittävästi liikenteen kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin.

Kokonaisuutena tarkasteltuna sähköistäminen ja bioenergian käytön edistäminen luovat Etelä-Pohjanmaan seutukunnille kestävä ja ilmastomyönteisen energiapolun, joka vähentää päästöjä merkittävästi, vahvistaa alueen energiaomavaraisuutta ja tukee alueellista elinvoimaa.

## Lähteet

- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J., Korhonen, J. (2016). Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. ISBN 978-951-38-8419-2. <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2016/T258.pdf>
- Arendt, R., Bachmann, T.M., Motoshita, M., Bach, V., Finkbeiner, M. (2020). Comparison of Different Monetization Methods in LCA: A Review. *Sustainability*, 12, 10493. <https://doi.org/10.3390/su122410493>
- 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. <https://doi.org/10.1186/s42834-023-00201-x>
- Bošnjaković, M., Santa, R., Crnac, Z., & Bošnjaković, T. (2023). Environmental Impact of PV Power Systems. *Sustainability* 2023, 15(15), 11888. <https://doi.org/10.3390/SU151511888>
- Celik, A. N., Muneer, T., & Clarke, P. (2008). Optimal sizing and life cycle assessment of residential photovoltaic energy systems with battery storage. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16(1), 69–85. <https://doi.org/10.1002/pip.774>
- Chen, S., Chen, B., & Song, D. (2012). Life-cycle energy production and emissions mitigation by comprehensive biogas–digestate utilization. *Bioresource Technology*, 114, 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.084>
- Cignini, F., Genovese, A., Ortenzi, F., Valentini, S., & Caprioli, A. (2020). Performance and Emissions Comparison between Biomethane and Natural Gas Fuel in Passenger Vehicles. *E3S Web of Conferences*, 197. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019708019>
- Corona, B., Shen, L., Sommersacher, P., & Junginger, M. (2020). Consequential Life Cycle Assessment of energy generation from waste wood and forest residues: The effect of resource-efficient additives. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120948. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120948>
- Ecoinvent. (2024). *Ecoinvent v3.11*. <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-11/>
- EU RED II (2018). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001, annettu 11 päivänä joulukuuta 2018, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä (uudelleenlaadittu). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>
- European Commission. (2022). *Commission Implementing Regulation (EU) 2022/996 of 14 June 2022 on rules to verify sustainability and greenhouse gas emissions saving criteria and low indirect land-use change-risk criteria*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32022R0996>
- Ferrari, G., Shi, Z., Marinello, F., Pezzuolo, A. (2024). From biogas to biomethane: Comparison of sustainable scenarios for upgrading plant location based on greenhouse gas emissions and cost assessments. *Journal of Cleaner Production*, 478, 143936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143936>
- Fingrid (2025). Sähköntuotannon ja -kulutuksen CO<sub>2</sub>-päästöarviot. <https://www.fingrid.fi/sahko-markkinainformaatio/co2/>
- Finnilä, J., Latvala, M. (2023). Biokaasutuotannosta syntyvän mädätysjäännöksen hyödyntämismahdollisuudet. Feasib Oy. [https://kaustisenseutu.fi/site/assets/files/7164/2023-08-15\\_madatyjsjaannosselvitys\\_final.pdf](https://kaustisenseutu.fi/site/assets/files/7164/2023-08-15_madatyjsjaannosselvitys_final.pdf)
- Fraunhofer ISE. (2025). *Photovoltaics Report* (Issue October). <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

- Fu, Y., Liu, X., & Yuan, Z. (2015). Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *Journal of Cleaner Production*, 86(3), 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.05>
- Global Solar Atlas (2025). <https://globalsolaratlas.info/map>
- GreenDelta. (2025). *openLCA v2.6 has been released*. <https://www.openlca.org/openlca-v2-6-has-been-released/>
- Hernández-López, D.A., Vega-De-Lille, M.I., Sacramento-Rivero, J.C., Ponce-Caballero, C., El-Mekouei, A., Navarro-Pineda, F. (2024). Life cycle assessment of photovoltaic panels including transportation and two end-of-life scenarios: Shaping a sustainable future for renewable energy. *Renewable Energy Focus*, 51, 100649, <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100649>
- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M.D.M., Hollander, Zijp, A., van Zelm. R. (2016). ReCiPe 2016. A harmonized life cycle impact assessment method at mid-point and endpoint level Report I: Characterization. RIVM Report 2016-0104. National Institute for Public Health and the Environment. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (toim.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 s. [https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf)
- Kirkinen, J., Minkinen, K., Penttilä, T., Kojola, S., Sievänen, R., Alm, J., Savolainen, I. (2007). Greenhouse impact due to different peat fuel utilisation chains in Finland—a life-cycle approach. *Boreal Env. Res.* 12: 211-223. <https://jukuri.luke.fi/server/api/core/bitstreams/55db0048-1c37-4d16-bb15-5c08a6a73a51/content>
- Krebs, L., Frischknecht, R., Stolz, P., & Sinha, P. (2020). Environmental Life Cycle Assessment of Residential PV and Battery Storage Systems. In *IEA-PVPS* (Issue April). [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA\\_PVPS\\_Task12\\_LCA\\_PVandStorage.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA_PVPS_Task12_LCA_PVandStorage.pdf)
- Kumawat, R., Gidwani, L., Rana, KB. (2024). Comparative analysis of life cycle assessment of biogas-powered and coal-powered power plant for optimized environmental operation. *Heliyon*, 10, 10(20):e39155, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39155>
- Lampinen, Ari (2015). Biokaasualan historia ja tulevaisuus. Teoksessa Kymäläinen M. ja Pakarinen O. (toim.), Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. HAMKin e-julkaisuja 36/2015. ISBN 978-951-784-771-1. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK\\_Biokaasun\\_tuotanto\\_2015\\_ekirja.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK_Biokaasun_tuotanto_2015_ekirja.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Leccisi, E., Raugei, M., & Fthenakis, V. (2016). The energy and environmental performance of ground-mounted photovoltaic systems - A timely update. *Energies*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/en9080622>
- Leda, P., Kruszelnicka, W., Leda, A., Piasecka, I., Kłos, Z., Tomporowski, A., Flizikowski, J., Opielak, M. (2023). Life Cycle Analysis of a Photovoltaic Power Plant Using the CED Method. *Energies*, 16, 8098. <https://doi.org/10.3390/en16248098>
- Leinonen, A. (2010). Turpeen tuotanto ja käyttö. Yhteenveto selvityksistä. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research Notes 2550. 104 s. ISSN 1455-0865.
- Luostarinen, S., Tampio, E., Niskanen, O., Koikkalainen, K., Kauppila, J., Valve, H., Salo, T. Ylivainio, K. (2019). Lantabiokaasutuen toteuttamisvaihtoehdot. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2019.

Luonnonvarakeskus. Helsinki. 75 s. [https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/544244/luke-luobio\\_40\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y%20](https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/544244/luke-luobio_40_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y%20)

Majer, S.; Oehmichen, K.; Kirckshmeyr, F.; Scheidl, S. Calculation of GHG Emission Caused by Bio-methane. Biosurf. Fuelling Biomethane. Deliverable 5.3; European Union: Brussels, Belgium, 2016.

Mordor Intelligence. (2026). *Solar Photovoltaic (PV) Market Size & Share Analysis - Growth Trends and Forecast (2026–2031)*. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/solar-photovoltaic-market>

Motiva (2024a). Tuulivoimaloiden purkaminen ja kierrätys. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/tuulivoima/tuulivoimaloiden\\_purkaminen\\_ja\\_kierratys#:~:text=Tuulivoimalan%20k%C3%A4ytt%C3%B6ik%C3%A4%20on%20noin%2025%20vuotta%2C%20uusimpien%20voimaloiden%20jopa%2030%20vuotta.](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoimaloiden_purkaminen_ja_kierratys#:~:text=Tuulivoimalan%20k%C3%A4ytt%C3%B6ik%C3%A4%20on%20noin%2025%20vuotta%2C%20uusimpien%20voimaloiden%20jopa%2030%20vuotta.)

Motiva (2024b). Aurinkosähköteknologiat. 31.1.2024. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat)

Mutyaba, J. (2025). *The Rise of Solar PV and Battery Storage's Prominence in Emerging Markets*. IRENA. <https://www.irena.org/News/expertinsights/2025/Aug/The-Rise-of-Solar-PV-and-Battery-Storages-Prominence-in-Emerging-Markets>

Negri, M., Bieker, G. (2025). Life-cycle greenhouse gas emissions from passenger cars in the European Union. A 2025 update and key factors to consider. ICCT International Council on Clean Transportation. July 2025. [https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/07/ID-392-%E2%80%93Life-cycle-GHG-report\\_final.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/07/ID-392-%E2%80%93Life-cycle-GHG-report_final.pdf)

Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M., Edwards, R., Lonza, L. (2020). JEC Well-to-Tank report v5, EUR 30269 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-19926-7, doi:10.2760/959137, JRC119036.

Reichel, C., Mueller, A., Friedrich, L., Herceg, S., Mittag, M., Neuhaus, D.H. (2022). CO2 emissions of silicon photovoltaic modules – Impact of module design and production location. WCPEC-8, (th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 26–30 September 2022, Milan, Italy.

Renewables.ninja (2025). <https://www.renewables.ninja/>

Röck, M., Martin, R. and Hausberger, S. (2020). JEC Tank-To-Wheels report v5: Heavy duty vehicles, Hanarp, P., Bersia, C., Colombano, M., Gräser, H., Gomes Marques, G., Mikaelsson, H., De Prada, L., Prussi, M., Lonza, L., Yugo, M. and Hamje, H., editors. EUR 30271 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-19928-1, doi:10.2760/541016, JRC117564

Smith, B. L., Sekar, A., Mirletz, H., Heath, G., & Margolis, R. (2024). *An Updated Life Cycle Assessment of Utility-Scale Solar Photovoltaic Systems Installed in the United States*. <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/87372.pdf>

Soimakallio, S., Sankelo, P., Kopsakangas-Savolainen, M., Sederholm, C., Auvinen, K., Heinonen, T., Johansson, A., Judl, J., Karhinen, S., Lehtoranta, S., Rasanen, S., Savolainen, H. (2020). Turveraportti: Turpeen rooli ja sen kaytosta luopumisen vaikutukset Suomessa. Sitra. ISBN 978-952-347-186-3. <https://www.sitra.fi/julkaisut/turpeen-rooli-ja-sen-kaytosta-luopumisen-vaikutukset-suomessa/>

Sokka, L., Correia, S., Koljonen, T. (2018: Lämmityspolttoaineiden tuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt. VTT Technology 336. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2018/T336.pdf>

- Spoof-Tuomi, K. (2025). Seutukunnalliset resurssit ja vahvuudet energiahuollossa. HOKE – Hiilineutraalit, oikeudenmukaiset ja kokonaiskestävät energiayhteisöt Etelä-Pohjanmaalla –hanke, osaraportti T1.1.
- Stucki, M., Götz, M., & De Wild-Scholten, M. (2024). *Environmental Life Cycle Assessment of Electricity from PV systems-2023 data update*. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/05/Slides-IEA-PVPS-T12-Fact-Sheet-update-2023-v2.0.pdf>
- Suomen ilmastopaneeli (2023). Laskuri raskaan liikenteen päästöille ja kustannuksille. Suomen ilmastopaneeli ja Suomen ympäristökeskus SYKE 2023. Versio 0.90. <https://autokalkulaattori.fi/rekkalaskuri/>
- Syke (2025). CO2data. Infrarakentamisen päästötietokanta. <https://co2data.fi/infra/>
- Tilastokeskus (2025). Polttoaineluokitus 2025. <https://stat.fi/fi/tilastot/tietoa-teemoittain/kasvihuo-nekaasuinventaarioripolttaineluokitus>
- Tongwei Co. Ltd. (2023). *Comparing Solar Panel Costs Monocrystalline vs. Polycrystalline*. <https://en.tongwei.cn/blog/25.html>
- Tsupari, E., Tormonen, K., Monni, S., Vahlman, T., Kolsi, A., Linna, V. (2006). Dityppioksidin (N<sub>2</sub>O) ja metaanin (CH<sub>4</sub>) päästökertoimia Suomen voimalaitoksille, lämpökeskuksille ja pienpoltolle. VTT Working Papers 43. ISSN 1459ñ7683. <https://publications.vtt.fi/pdf/workingpapers/2006/W43.pdf>
- Üçtuğ, F. G., & Azapagic, A. (2018). Environmental impacts of small-scale hybrid energy systems: Coupling solar photovoltaics and lithium-ion batteries. *Science of the Total Environment*, 643, 1579–1589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.290>
- Ullah, F., Hasrat, K., Abdelfattah, W., Ben Khedher, N., Mu, M., & Wang, S. (2025). Comprehensive life cycle analysis of monocrystalline and polycrystalline solar PV panels in Nanjing, China: Effects on the environment, performance, and recycling opportunities. *Chemical Engineering Journal*, 522, 167775. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.167775>
- UNECE (2022). Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources. United Nations Economic Commission for Europe. United Nations, Geneva. [https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA\\_3\\_FINAL%20March%202022.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf)
- UNFCCC (2024). United Nations Framework Convention on Climate Change. Documents. Finland. 2024 Common Reporting Table (CRT). <https://unfccc.int/documents/644963>
- Vestas, (2017). Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V136-3.45 MW Wind Plant – 31st July 2017, Version 1.0. Vestas Wind Systems A/S, Hedeager 42, Aarhus N, 8200, Denmark. [https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/V1363%2045MW\\_Mk3a\\_ISO\\_LCA\\_Final\\_31072017.pdf.coredownload.inline.pdf](https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/V1363%2045MW_Mk3a_ISO_LCA_Final_31072017.pdf.coredownload.inline.pdf)
- Wu, Y., Zhang, Z., Zhu, S., Song, X., Ning, L., Chen, P., Zang, H., Ren, W., Niu, M., Cai, B., & Zhang, L. (2025). Decarbonizing China’s grid: provincial grid carbon footprint factors and export-embedded electricity emissions from 2020 to 2060. *Carbon Footprints*, 4(4), N/A-N/A. <https://doi.org/10.20517/cf.2025.61>

# LIITE 1

## GLOBAL SOLAR ATLAS

BY WORLD BANK GROUP

### South Ostrobothnia

62.957164°, 023.153915°

Yliuomantie, South Ostrobothnia, Finland Time

zone: UTC+03, Europe/Helsinki [EEST]

Report generated: 22 Sep 2025

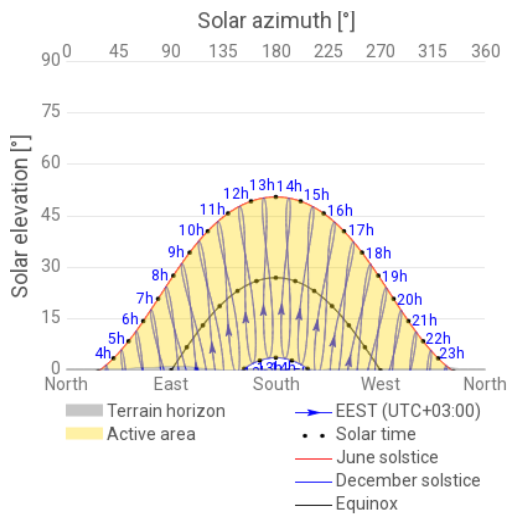
#### SITE INFO

Map data		Per year
Direct normal irradiation	DNI	988.4 kWh/m <sup>2</sup>
Global horizontal irradiation	GHI	879.2 kWh/m <sup>2</sup>
Diffuse horizontal irradiation	DIF	444.8 kWh/m <sup>2</sup>
Global tilted irradiation at optimum angle	GTl <sub>opta</sub>	1128.0 kWh/m <sup>2</sup>
Optimum tilt of PV modules	OPTA	45/ 180 °
Air temperature	TEMP	4.7 °C
Terrain elevation	ELE	48 m

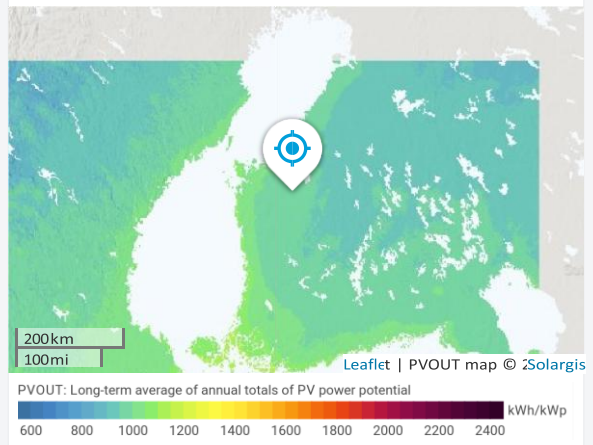
#### Map



#### Horizon and sunpath



#### PVOUT map



# GLOBAL SOLAR ATLAS

BY WORLD BANK GROUP

## PV ELECTRICITY AND SOLAR RADIATION

### PV system configuration



Pv system: **Ground-mounted large scale**  
 Azimuth of PV panels: **Default (180°)**  
 Tilt of PV panels: **45°**  
 Installed capacity: **1000 kWp**

### Annual averages

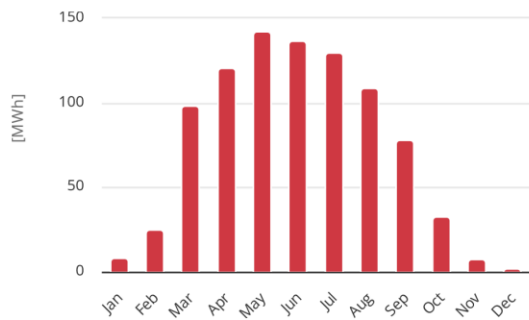
Total photovoltaic power output and Global tilted irradiation

**890.624**  
MWh per year

**1127.5**  
kWh/m<sup>2</sup> per year

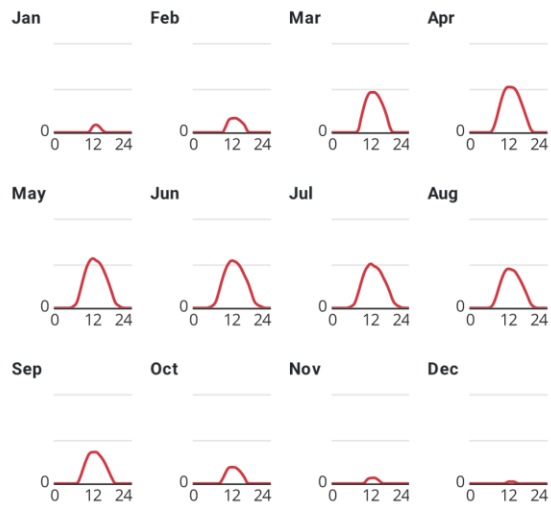
### Monthly averages

Total photovoltaic power output



### Average hourly profiles

Total photovoltaic power output [kWh]



UTC+03

### Average hourly profiles

Total photovoltaic power output [kWh]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6					3,724	8,887	5,036					
6 - 7				0,432	22,762	27,934	21,001	4,004				
7 - 8				30,030	67,590	74,637	58,143	32,174				
8 - 9				267,392	333,818	323,617	290,313	232,267	3,398			
9 - 10			22,642	128,345	192,677	192,475	163,896	114,806	69,316	2,350		
10 - 11		0,159	61,060	167,312	267,392	333,818	323,617	290,313	232,267	175,189	46,424	
11 - 12	14,656	139,566	414,863	490,718	533,353	505,843	469,347	419,732	342,496	177,820	49,994	3,037
12 - 13	68,985	159,198	454,622	515,449	561,265	537,618	501,113	444,600	356,216	186,389	62,555	21,100
13 - 14	86,468	162,765	455,438	512,844	539,458	526,475	476,372	434,818	357,011	182,930	64,888	21,900
14 - 15	65,966	149,311	431,405	494,249	514,192	498,458	455,731	414,319	325,743	159,077	51,260	17,963
15 - 16	25,443	119,941	372,505	433,131	455,989	443,630	412,964	360,434	279,596	119,326	21,484	1,167
16 - 17	2,539	81,502	291,134	339,906	372,565	367,312	341,286	294,051	215,447	65,743	0,230	
17 - 18		12,948	187,348	238,425	277,867	290,373	267,193	217,111	136,066	4,876		
18 - 19			59,900	131,964	167,794	187,477	177,871	132,808	58,613	0,170		
19 - 20			3,251	36,834	65,011	81,540	81,141	49,263	3,227			
20 - 21				2,614	28,730	38,200	36,897	13,748				
21 - 22					7,135	19,983	16,090	0,987				
22 - 23					0,125	4,418	1,917					
23 - 24												
Sum	264	886	3,172	4,023	4,602	4,562	4,179	3,508	2,598	1,065	260	65

# GLOBAL SOLAR ATLAS

BY WORLD BANK GROUP

## PV ELECTRICITY AND SOLAR RADIATION

### Annual averages

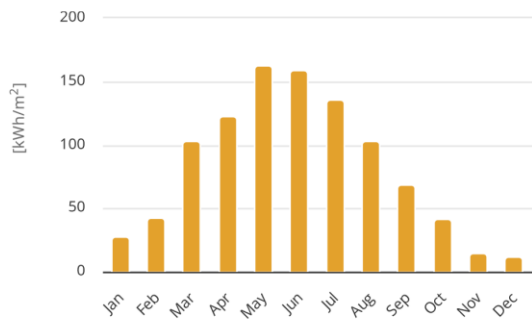
Direct normal irradiation

# 996.5

kWh/m<sup>2</sup> per year

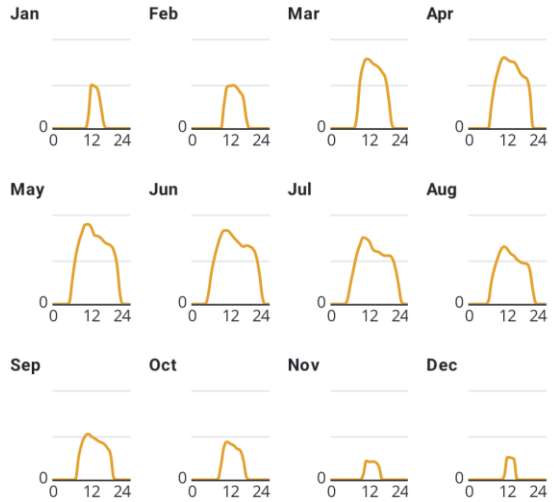
### Monthly averages

Direct normal irradiation



### Average hourly profiles

Direct normal irradiation [Wh/m<sup>2</sup>]



UTC+03

### Average hourly profiles

Direct normal irradiation [Wh/m<sup>2</sup>]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6					9	52	22					
6 - 7					137	176	113	15				
7 - 8				131	264	266	199	127	5			
8 - 9			67	250	348	336	283	205	130	3		
9 - 10			268	323	404	390	338	262	206	82		
10 - 11			357	382	450	417	377	309	247	190		
11 - 12	68	142	393	402	452	417	371	326	260	214	28	22
12 - 13	246	242	388	390	432	401	352	311	245	203	102	128
13 - 14	238	244	368	380	389	378	311	286	235	195	103	125
14 - 15	216	230	358	376	386	359	299	274	221	177	98	118
15 - 16	122	205	342	351	373	340	294	253	212	167	70	4
16 - 17	17	170	317	314	353	326	279	239	202	113		
17 - 18		51	280	294	341	332	275	232	179	15		
18 - 19			167	282	332	326	275	229	140			
19 - 20			22	209	302	313	263	193	10			
20 - 21				8	219	273	209	75				
21 - 22					47	178	117	3				
22 - 23						37	13					
23 - 24												
Sum	908	1,520	3,329	4,093	5,238	5,316	4,388	3,340	2,292	1,360	506	397

**GLOSSARY**

Acronym	Full name	Unit	Type of use
DIF	Diffuse horizontal irradiation	kWh/m <sup>2</sup> , MJ/m <sup>2</sup>	Average yearly, monthly or daily sum of diffuse horizontal irradiation (© 2025 Solargis)
DNI	Direct normal irradiation	kWh/m <sup>2</sup> , MJ/m <sup>2</sup>	Average yearly, monthly or daily sum of direct normal irradiation (© 2025 Solargis)
ELE	Terrain elevation	m, ft	Elevation of terrain surface above/below sea level, processed and integrated from SRTM-3 data and related data products (SRTM v4.1 © 2004 - 2025, CGIAR-CSI)
GHI	Global horizontal irradiation	kWh/m <sup>2</sup> , MJ/m <sup>2</sup>	Average annual, monthly or daily sum of global horizontal irradiation (© 2025 Solargis)
GTI	Global tilted irradiation	kWh/m <sup>2</sup> , MJ/m <sup>2</sup>	Average annual, monthly or daily sum of global tilted irradiation (© 2025 Solargis)
GTI_opta	Global tilted irradiation at optimum angle	kWh/m <sup>2</sup> , MJ/m <sup>2</sup>	Average annual, monthly or daily sum of global tilted irradiation for PV modules fix-mounted at optimum angle (© 2025 Solargis)
OPTA	Optimum tilt of PV modules	°	Optimum tilt of fix-mounted PV modules facing towards Equator set for maximizing GTI input (© 2025 Solargis)
PVOUT_total	Total photovoltaic power output	kWh, MWh, GWh	Yearly and monthly average values of photovoltaic electricity (AC) delivered by the total installed capacity of a PV system (© 2025 Solargis)
PVOUT_specific	Specific photovoltaic power output	kWh/kWp	Yearly and monthly average values of photovoltaic electricity (AC) delivered by a PV system and normalized to 1 kWp of installed capacity (© 2025 Solargis)
TEMP	Air temperature	°C, °F	Average yearly, monthly and daily air temperature at 2 m above ground. Calculated from outputs of ERA5 model (© 2025 ECMWF, post-processed by Solargis)

**ABOUT**

This pdf report (the “Work”) is automatically generated from the Global Solar Atlas online app (<https://globalsolaratlas.info/>), prepared by Solargis under contract to The World Bank, based on a solar resource database that Solargis owns and maintains. It provides the estimated solar resource, air temperature data and potential solar power output for the selected location and input parameters of a photovoltaic (PV) power system.

Copyright © 2025 The World Bank  
1818 H Street NW, Washington DC 20433, USA

The World Bank, comprising the International Bank for Reconstruction and Development (IBRD) and the International Development Association (IDA), is the commissioning agent and copyright holder for this Work, acting on behalf of The World Bank Group. The Work is licensed by The World Bank under a Creative Commons Attribution license (CC BY 4.0 IGO) with a mandatory and binding addition (please refer to the GSA website for full terms and conditions of use <https://globalsolaratlas.info/support/terms-of-use>).

The World Bank Group disclaims all warranties of any kind related to the provision of the Work.

The Work is made available solely for general information purposes. Neither the World Bank, Solargis nor any of its partners and affiliates hold the responsibility for the accuracy and/or completeness of the data and shall not be liable for any errors, or omissions. It is strongly advised that the Work be limited to use in informing policy discussions on the subject, and/or in creating services that better educate relevant persons on the viability of solar development in areas of interest. As such, neither the World Bank nor any of its partners on the Global Solar Atlas project will be liable for any damages relating to the use of the Work for financial commitments or any similar use cases. Solargis has done its utmost to make an assessment of solar climate conditions based on the best available data, software, and knowledge.

Sources: Solar database and PV software © 2025 Solargis

## LIITE 2

CML-perustaso on eurooppalainen elinkaariarvioinnissa käytetty vaikutustenarviointimenetelmä. Se on keskipistetason (midpoint) menetelmä, mikä tarkoittaa, että ympäristövaikutuksia tarkastellaan vaikutusketjun keskivaiheilla ilman loppupisteisiin (kuten ihmisterveyteen tai ekosysteemien kokonaisvaikutuksiin) ulottuvaa arvottamista. Tämä lähestymistapa tarjoaa yksityiskohtaisempaa ja läpinäkyvämpää tietoa yksittäisistä vaikutusmekanismeista, vaikka tulosten tulkinta voi olla päätepistemenetelmiä vaativampaa.

CML-perustaso kattaa seuraavat vaikutusluokat:

- **Ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP)**  
Kuvaa kasvihuonekaasujen vaikutusta ilmaston lämpenemiseen tietyn ajanjakso (yleensä 100 vuotta) aikana, mitattuna kilogrammoina hiilidioksidiekvivalenttia (kg CO<sub>2</sub>-ekv).
- **Abioottinen ehtyminen (AD)**  
Kuvaa ei-fossiilisten uusiutumattomien luonnonvarojen (mineraalit ja metallit) ehtymistä, mitattuna kilogrammoina antimoniekvivalenttia (kg Sb-ekv).
- **Abioottinen ehtyminen fossiilisten polttoaineiden osalta (AD-FF)**  
Kuvaa fossiilisten polttoaineiden ehtymistä, mitattuna energiasisältönä (MJ).
- **Happamoituminen (AP)**  
Kuvaa happamoittavien kaasupäästöjen vaikutuksia maaperään ja vesistöihin, mitattuna kilogrammoina rikkidioksidiekvivalenttia (kg SO<sub>2</sub>-ekv).
- **Rehevöityminen (EP)**  
Kuvaa ravinteiden kertymistä makean veden, merien ja maa-alueiden ekosysteemeihin ja siihen liittyvää liiallista perustuotantoa ja levien kasvua, mitattuna kilogrammoina fosfaattiekvivalenttia (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-ekv).
- **Makean veden ekotoksisuus (AE-FW)**  
Kuvaa kemiallisten päästöjen myrkyllisiä vaikutuksia makean veden ekosysteemeihin, jotka aiheuttavat biodiversiteetin vähenemistä ja mahdollisia lajien sukupuuttoja, mitattuna kilogrammoina 1,4-diklooribentseeniekvivalenttia (kg 1,4-DB-ekv).
- **Merivesien ekotoksisuus (AE-M)**  
Kuvaa epäpuhtauksien haitallisia vaikutuksia merieliöihin ja meriympäristöihin, mitattuna kilogrammoina 1,4-diklooribentseeniekvivalenttia (kg 1,4-DB-ekv).
- **Maaperän ekotoksisuus (TE)**  
Kuvaa myrkyllisten aineiden mahdollisia haitallisia vaikutuksia muihin kuin vesiekosysteemeihin, mitattuna kilogrammoina 1,4-diklooribentseeniekvivalenttia (kg 1,4-DB-ekv).
- **Ihmismyrkyllisyys (HT)**  
Kuvaa ympäristöön päästettyjen myrkyllisten aineiden mahdollisia haitallisia vaikutuksia ihmisiin, mitattuna kilogrammoina 1,4-diklooribentseeniekvivalenttia (kg 1,4-DB-ekv).
- **Otsonikerroksen oheneminen (ODP)**  
Kuvaa stratosfääriin otsonikerrosta heikentävien aineiden päästöjä, mitattuna kilogrammoina CFC-11-ekvivalenttia (kg CFC-11-ekv).
- **Fotokemiallinen hapettuminen (PO)**  
Kuvaa alailmakehän otsonin muodostumiseen (savusumuun) vaikuttavia päästöjä, mitattuna kilogrammoina eteeniekvivalenttia (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-ekv).