Tampereen yliopisto

Anni Heikkilä

TÄRKKELYSPERUNAN VILJELYN TILAKOHTAISEN HIILIJALANJÄLKILASKENNAN KEHITTÄMINEN

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Hannele Auvinen
Silja Mustonen
Joulukuu 2025

TIIVISTELMÄ

Anni Heikkilä: Tärkkelysperunan viljelyn tilakohtaisen hiilijalanjälkilaskennan kehittäminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikka
Joulukuu 2025

Ihmisen aiheuttaman ilmastonmuutoksen hillintä on yksi aikamme merkittävimmistä haasteista, mikä luo tarpeen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiselle ja niiden systemaattiselle laskennalle. Maanvijlelyn päästölaskenta on nopeasti kehittyvä tutkimusala, jossa viljelyn erikoispiirteet liittyen vaihteleviin luonnon ilmiöihin ja prosesseihin asettavat merkittävät haasteet mallintamiselle ja laskennalle.

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, mistä tärkkelysperunan hiilijalanjälki koostuu ja miten hiilijalanjälkilaskennan tarkkuutta voidaan parantaa tilakohtaisessa elinkaariarvioinnissa (LCA). Tavoitetta lähestyttiin tutkimalla valmiita työkaluja, jotka soveltuvat perunan viljelyn päästölaskentaan, joista tarkempaan vertailuun valittiin Biocode Producer ja Cool Farm Tool 2.0. Työkalujen osalta tarkasteltiin viljelyvaiheen hiilijalanjälkeä, jonka lisäksi työssä laskettiin erikseen maankäytön ja maankäytön muutosten (LULUC) aiheuttamat päästöt parhaan kokonaisarvion täydentämiseksi. Vertailuksi primääridatalaskentaan mallinnettiin perunan hiilijalanjälki LCA-työkalu SimaProlla.

Biocoden ja Cool Farm Toolin laskentaohjelmille toteutettiin metodologian vertailu suhteessa toisiinsa sekä relevantteihin LCA-ohjeistuksiin. Lisäksi ulkopuolinen taho toteutti viljelyvaiheen hiilijalanjälkilaskelmat 24:n tutkitun alueen tilan vuoden 2024 viljelydatan pohjalta käyttäen sekä Biocodea että Cool Farm Toolia. Keskimääräisiksi viljelyvaiheen hiilijalanjäljiksi saatiin Biocodella 68 g CO_2 eq/kg perunaa ja Cool Farm Toolilla 31 g CO_2 eq/kg perunaa. Viljelyvaiheessa suurimmat osuudet hiilijalanjäljestä aiheutuivat typpioksiduulipäästöistä, jotka johtuivat pääosin typpilannoitteiden käytöstä, sekä lannoitteiden valmistuksesta. Suurimmat erot työkalujen välillä havaittiin peltotöiden ja siemenperunan päästöissä, kun taas pienimmät erot liittyivät lannoitteiden ja kasvinsuojeluaineiden valmistuksen päästöihin. Metodologiset erot työkalujen välillä olivat vähäisiä, mutta päästökertoimien lähteet erosivat kautta linjan. Erot tuloksissa liittyvät pääosin päästökertoimien lähteisiin, jotka molempien työkalujen osalta ovat luotettavia ja päästölaskentaan soveltuvia, mutta tuottavat erilaisia tuloksia, mikä on tyypillistä päästölaskennassa. SimaProlla mallinnettu viljelyvaiheen hiilijalanjälki tuotti tulokseksi 109 g CO_2 eq/kg perunaa, joka on merkittävästi laskettuja suurempi.

LULUC-päästöt laskettiin tässä työssä Luonnonvarakeskuksen vuonna 2025 julkaistun ruoka-LCA-ohjeistuksen mukaisesti käyttäen aineistona kaikkien tutkitun alueen tilojen maaperätietoja vuodelta 2025. Tulokseksi saatiin 848 kg CO_2 eq/ha/a eli tutkitun alueen satotasojen mukaan 31 g CO_2 eq/kg perunaa. Eniten tuloksiin vaikutti maaperän orgaanisen aineksen määrä, joka kasvaessaan lisää maaperäpäästöjä. SimaPro-mallinnus LULUC-päästöistä tuotti tulokseksi 114 g CO_2 eq/kg perunaa, joka on huomattavasti laskettua suurempi.

Työssä havaittiin, että tärkkelysperunan hiilijalanjälki koostuu viljelyvaiheesta, jossa suurin yksittäinen päästöjen aiheuttaja on typpilannoite, sekä LULUC-päästöistä, joiden osuus voi olla jopa puolet kokonaishiilijalanjäljestä. Lisäksi kävi ilmi, että tärkkelysperunan hiilijalanjälki kannattaa tutkitussa tapauksessa laskea primääridataa hyödyntäen niin viljelyvaiheen kuin LULUC-päästöjen osalta, koska taulukkoarvot ja sekundääridatalla lasketut tulokset poikkeavat merkittävästi primääridatalaskennan tuloksista.

Jatkotutkimusaiheeksi suositellaan tutkimaan koko hiilijalanjäljen laskennan toteuttamisen mahdollisuutta laskentatyökaluilla. Prosessinkehittämisehdotukseksi suositellaan perehtymään mahdollisimman laadukkaan ja tarpeeksi kattavan datan keräämisen mahdollisuuksiin sekä laskennan ja datan läpinäkyvyyteen, jotka usein muodostavat haasteita viljelyn päästölaskennalle.

Avainsanat: Tärkkelysperuna, viljely, hiilijalanjälki, LCA

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla

ABSTRACT

Anni Heikkilä: Development of Farm-Level Carbon Footprint Assessment for Starch Potato Cultivation
Master's thesis
Tampereen yliopisto
Environmental and Energy Engineering
December 2025

Mitigating human-induced climate change is one of the most significant challenges of our time, creating the need to reduce greenhouse gas emissions and to establish their systematic accounting. Agricultural emission accounting is a rapidly developing field of research, where the specific characteristics of cultivation, related to varying natural phenomena and processes, pose considerable challenges for modeling and calculation.

The aim of this thesis was to examine the composition of the carbon footprint of starch potato cultivation and to explore how the accuracy of carbon footprint assessment could be improved in farm-level life cycle assessment (LCA). This objective was approached by studying existing tools applicable to emission accounting in potato cultivation, with Biocode Producer and Cool Farm Tool 2.0 selected for detailed comparison. The tools were used to assess the cultivation phase carbon footprint, and in addition, land use and land use change (LULUC) emissions were calculated separately to complement the overall assessment. For comparison with primary data calculations, the carbon footprint of potato cultivation was also modeled using the LCA tool SimaPro.

A methodological comparison was conducted between Biocode and Cool Farm Tool in relation to each other and to relevant LCA guidelines. Furthermore, an external party carried out carbon footprint calculations of the cultivation phase for 24 farms in the research area, using 2024 cultivation data with both Biocode and Cool Farm Tool. The average carbon footprints obtained were 68 g CO2 eq/kg potato with Biocode and 31 g CO2 eq/kg potato with Cool Farm Tool. In the cultivation phase, the largest shares of the carbon footprint originated from nitrous oxide emissions, mainly caused by nitrogen fertilizer use, as well as from fertilizer production. The greatest differences between the tools were observed in field operations and seed potato emissions, while the smallest differences were related to emissions from fertilizer and pesticide production. Methodological differences between the tools were minor, but the sources of emission factors varied throughout. The differences in results were mainly due to emission factor sources, which are reliable and suitable for emission accounting in both tools, but produce different outcomes which is a typical feature of emission calculations. The cultivation phase carbon footprint modeled with SimaPro resulted in 109 g CO2 eq/kg potato, which is significantly higher than the calculated values.

LULUC emissions were calculated in this study according to the food-LCA guidelines published by Natural Resources Institute Finland in 2025, using soil data from all farms in the research region for the year 2025. The result was 848 kg CO2 eq/ha/a, corresponding to 31 g CO2 eq/kg potato based on the yields of the studied area. The most influential factor in the results was the amount of soil organic matter, which increases soil emissions as it rises. The SimaPro modeling of LULUC emissions produced a result of 114 g CO2 eq/kg potato, which is considerably higher than the calculated value.

The study found that the carbon footprint of starch potato consists of the cultivation phase, where nitrogen fertilizer is the single largest contributor,and LULUC emissions, which can account for up to half of the total carbon footprint. It was also shown that, in the case of this research, the carbon footprint of starch potato should be calculated using primary data for both the cultivation phase and LULUC emissions, since results based on table values and secondary data differ significantly from those obtained with primary data calculations.

For future research, it is recommended to investigate the feasibility of calculating the entire carbon footprint using emission accounting tools. As a process development proposal, emphasis should be placed on collecting high-quality and sufficiently comprehensive data, as well as ensuring transparency in both calculation and data, which often present major challenges in agricultural emission accounting.

Key words: startch potato, cultivation, carbon footprint, LCA
The originality of this publication has been verified using theTurnitin Originality Check program.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: Microsoft Copilot (GPT-5), ChatGPT (OpenAI GP-5.1)

Käyttötarkoitus: Käytin tekoälyä tiivistelmän englanniksi kääntämiseen, työni rakenteen hahmottelun tukena, yksittäisten kirjoittamieni lauseiden ja kappaleiden kielellisen sujuvoittamisen apuna, otsikoiden ideoimiseen sekä tiedonhaun tukena.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin toimeksiantona Chemigate Oy:lle ja se käsittelee tärkkelysperunan viljelyn hiilijalanjälkilaskentaa. Työn tuloksena Chemigate sai tietoa omien tuotteiden hiilijalanjälkilaskennan kehittämisen tueksi.

Haluan kiittää Chemigatea mahdollisuudesta toteuttaa mielenkiintoinen diplomityö, josta myös yritys voi hyötyä. Chemigatelta haluan kiittää Hanna Hällforsia sekä Terhi Kivirantaa työn ohjaamisesta, avusta, palavereista sekä tuesta tämän vuoden aikana. Lisäksi haluan kiittää muuta Chemigaten ja sen kumppaniyhtiöiden edustajia, jotka tarjosivat minulle mahdollisuuden osallistua kiinnostaviin työni aihetta koskeviin palavereihin sekä toimivat Hannan ja Terhin ohella tukena työni toteuttamisessa. Haluan kiittää myös Tampereen yliopiston Hannele Auvista ja Silja Mustosta työn ohjaamisesta, tärkeistä neuvoista, parannusehdotuksista sekä työn tarkastamisesta.

Kiitos vielä avopuolisolle ja parhaalle ystävälleni tuesta työn ja opintojen aikana. Kiitos myös oma perhe, Ympäristöteekkarikilta, ystävät ja ihanat opiskeluvuodet!

Tampereella, 17.12.2025

Anni Heikkilä

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. PERUNAN VILJELYN ILMASTOVAIKUTUKSET 4
2.1 Perunan hiilijalanjälki 4
2.2 Perunan lannoittamisen ilmastovaikutukset 8
2.3 Muiden panosten ilmastovaikutukset 10
2.4 Maankäytön ja maankäytön muutosten aiheuttamat päästöt 11
3. VILJELYN HIILIJALANJÄLKILASKENNAN TYÖKALUT 17
3.1 Viljelyn hiilijalanjälkilaskennan työkalut maailmalla 17
3.2 Perunan viljelyn hiilijalanjälkilaskentaan soveltuvien työkalujen vertailu 18
4. AINEISTO JA MENETELMÄT 22
4.1 Tutkimuskohteen esittely 22
4.2 Viljelyn panosten hiilijalanjälkilaskenta laskentatyökaluilla 23
4.3 LULUC-päästöjen laskenta 24
5. TULOKSET JA TULOSTEN TULKINTA 28
5.1 Cool Farm Toolin ja Biocoden metodologinen vertailu 28
5.1.1 Laskentaohjelmien vertailu suhteessa LCA-standardeihin 28
5.1.2 Laskennan laajuus, metodit ja päästökertoimet ohjelmien taustalla 31
5.1.3 Laskentaohjelmien LULUC-päästöjen arvioiminen 34
5.2 Tärkkelysperunan viljelyvaiheen hiilijalanjälkilaskennan tulokset 36
5.3 Tärkkelysperunan viljelyvaiheen hiilijalanjälkilaskennan tulosten tulkinta 39
5.3.1 Tulosten vertailu kirjallisuuteen 39
5.3.2 Työkalujen ja tulosten vertailu 43
5.4 LULUC-laskennan tulokset ja tulkinta 47
6. JOHTOPÄÄTÖKSET 52
LÄHTEET 56

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CCAFS-MOT	Climate Change, Agriculture and Food Security – Mitigation options Tool
CFP	Cool Farm Platform
CFT	Cool Farm Tool
DOM	Dead Organic Matter (kuollut orgaaninen aines)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (YK:n elintarvike- ja maatalousjärjestö)
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistical Database (YK:n elintarvike- ja maatalousjärjestön tilastotietokanta)
FCC	The Farm Carbon Calculator
GWP	Global Warming Potential (ilmastonlämmityspotentiaali)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli)
LB	Living Biomass (elävä biomassa)
LCA	Life Cycle Assessment (elinkaariarviointi)
Luke	Luonnonvarakeskus
LU	Land Use (maankäyttö)
LUC	Land Use Change (maankäytön muutos)
LULUC	Land Use and Land Use Change (maankäyttö ja maankäytön muutokset)
PEF	Product Environmental Footprint (Tuotteen ympäristöjalanjälki)
SCC	Solagro Carbon Calculator
SOC	Soil Organic Carbon (Maaperän orgaaninen hiili)
SOM	Soil Organic Matter (Maaperän orgaaninen aines).

1. JOHDANTO

Ihmisen toiminnasta aiheutuva ilmastonmuutoksen hillintä on yksi tämän ajan suurimmista globaaleista haasteista. Kansainväliset sopimukset ja EU:n ilmastopolitiikka tiukentavat vaatimuksia kasvihuonekaasujen vähentämiseksi, mutta myös kuluttajat ja sijoittajat ovat yhä tietoisempia valinnoistaan ja haluavat varmistaa, että yritykset toimivat kestävällä tavalla (SBTi, 2018). EU:n Green Deal -sopimus velvoittaa jäsenmaita tavoittelemaan kasvihuonekaasupäästöjen nettonollaa vuoteen 2050 mennessä (European Comission, 2024). Jotta päästöjä voidaan vähentää, pitää ne voida laskea vertailukelpoisesti, jotta voidaan tunnistaa, mistä niitä syntyy. Hiilijalanjälki on tunnetuin ympäristömittari, jonka avulla arvioidaan yritysten, palveluiden ja tuotteiden aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä. Se on keskeinen vaikutusluokka elinkaariarviointia eli LCA:ta (Life Cycle Assessment) tehdessä. (ISO 14040:2006; ISO 14067:2018) Sen lisäksi, että hiilijalanjäljen laskeminen auttaa tunnistamaan päästövähennyskohteet, se vahvistaa asiakkaan luottamusta yritystä kohtaan sekä vahvistaa asiakkaan ja yrityksen välistä suhdetta (Modak et al., 2021) ja toimii riskienhallintatyökaluna (GHG Protocol, 2004).

Maataloussektori vastaa arviolta noin 10–12 % globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä (IPCC, 2022) ja noin 15 % Suomen kokonaispäästöistä (Tilastokeskus, 2025), kun maankäyttösektoria ei oteta huomioon. Suomessa laaditun Hiili-Euro-ohjelman tavoitteena on vähentää maatalouden päästöjä 29 % vuoteen 2035 mennessä vuoden 2020 tasosta (Luonnonvarakeskus & Maa- ja metsätalousministeriö, 2022).

Kaikista viljelyskasveista peruna on ruokaviraston mukaan maailman kolmanneksi tärkein ja erikoiskasveista tärkein (Ruokavirasto, 2024). Perunalla on Suomessa vahva kulttuurinen asema sekä hyvä jalostusarvo, nimittäin ruokatuotannon lisäksi perunaa voidaan käyttää teollisuuden raaka-aineena. Tähän tarkoitukseen käytetään tärkkelysperunaa, jota viljellään tärkkelyksen valmistusta varten. Tärkkelysperuna eroaa ruokaperunasta korkeamman tärkkelyspitoisuuden perusteella, joka EU:n määritelmän mukaan on tärkkelysperunalla vähintään 13 % (European Comission, 2003). Sitä viljellään samalla tavalla kuin muitakin perunoita, mutta esimerkiksi panosten määrät voivat olla erilaiset kuin ruokaperunalla. Perunan ja etenkin tärkkelysperunan hiilijalanjälkilaskentaa on tutkittu hyvin vähän tilakohtaisella tasolla. Koska tärkkelysperuna on merkittävä suomalainen viljelykasvi sekä teollisuuden raaka-aine,

sen päästöjen arvioinnin puutteet heikentävät sekä viljelijöiden että teollisuuden mahdollisuuksia vähentää päästöjä ja vastata sääntelyn ja markkinoiden paineisiin.

LCA-laskentaa on kasvavissa määrin käytetty maataloustuotteiden ympäristövaikutusten arvioinnissa. Hiilijalanjälkilaskenta maataloudessa on haastavaa muun muassa luonnon ilmiöiden sekä prosessien kompleksisuuden ja vaihtelevuuden vuoksi. Haastetta tuovat erityisesti maaperän hiilivarastojen aiheuttamien päästöjen luotettava ja vertailukelpoinen arviointi, pelto- ja tilakohtainen laskenta sekä yhtenäisen metodologian puute. Paikalliset erot toiminnoissa ja ympäristöissä ovat eri puolilla maailmaa suuret, jolloin globaalin yhtenäisen metodologian kehittäminen on haastavaa, mutta vaade globaalisti vertailtavalle laskennalle on olemassa. Käytännön haasteena on primääridatan saatavuus viljelyn toiminnoista sekä olosuhteista. Maatalous on myös siitä erityinen sektori, että vaikka se tuottaa merkittäviä päästöjä, sillä on mahdollisuus sitoa hiiltä ja toimia hiilinieluna. Aihe on toistaiseksi vähemmän tutkittu ja menetelmiä maatalouden hiilijalanjälkilaskentaan kehitetään jatkuvasti, mutta aiheesta tarvitaan lisää tutkimusta. Koska tilakohtaisen primääridatan kerääminen on haastavaa, on hiilijalanjäljen arvioinnissa käytetty pääosin taulukkoarvoja, jotka erityisesti Suomen vaihtelevien olosuhteiden vuoksi voivat eri alueilla antaa virheellistä tietoa. (Palosuo et al., 2025) Erityisesti maaperän päästöjen arviointi on koettu suomalaisen tärkkelysperunan viljelyssä haastavaksi, koska viljely tapahtuu pääosin Länsi-Suomessa, jossa maaperäolosuhteet pelloilla ovat hyvin erilaiset verrattuna esimerkiksi Itä- ja Pohjois-Suomeen (Luonnonvarakeskus, 2025; MTK, 2025).

LCA-laskentaan ohjaavat mm. hiilijalanjälkilaskennan standardit sekä Euroopan komission PEF-ohjeistus (Product Environmental Footprint). Luonnonvarakeskus julkaisi uudenlaisen ohjeistuksen suomalaisten ruokatuotteiden LCA-laskentaan, joka tarjoaa mallin suomalaisten maataloustuotteiden elinkaariarviointiin (Heusala et al., 2025). Viitekehyksistä ja ohjeistuksista huolimatta maatalouden päästölaskenta on hankalaa edellämainittujen erityispiirteiden vuoksi ja ohjeita joutuu usein soveltamaan, mikä heikentää laskennan vertailtavuutta. Tarpeisiin räätälöityjä ja maatalouden sekä eri alueiden erityispiirteet huomioivia työkaluja tarvitaan.

Tässä työssä tutkitaan, miten tärkkelysperunan hiilijalanjälkilaskennan tarkkuutta voidaan parantaa tilakohtaisessa LCA:ssa. Sitä lähestytään vertailemalla keskenään kahta maatalouden hiilijalanjälkilaskentaan tarkoitettua työkalua, kansainvälisen Cool Farm Alliancen kehittämää Cool Farm Tool 2.0:a (CFT) sekä suomalaista Biocode Produceria, joita tutkitaan LCA-standardien sekä Luken ruoka-LCA-ohjeistuksen konteksteissa. Tämän lisäksi paneudutaan laskennan suurimpaan haasteeseen LULUC-päästöjen arviointiin ja lasketaan tutkitun alueen peltojen LULUC-päästöt Luken

ohjeistuksen mukaisesti. Lisäksi tutkitaan, mitkä asiat LULUC-päästöjen suuruuteen vaikuttaa sekä miten ja kuinka paljon primääridatalla laskettu arvo päästöille eroaa taulukkoarvoista sekä sekundääridatalla lasketuista arvoista. Tässä työssä keskitytään ainoastaan tärkkelysperunan alkutuotantoon viljelyn aloittamisesta sadonkorjuuseen.

Työn tutkimuskysymykset ovat seuraavanlaiset:

Pääkysymys: Miten tärkkelysperunan tilakohtainen hiilijalanjälki kannattaa laskea?

1. Mikä on perunanviljelyn hiilijalanjälki ja mistä se koostuu?
    a. Mikä on maankäytön ja maankäytön muutosten hiilijalanjälki ja mistä se koostuu?
2. Miten hiilijalanjälkilaskentaan käytettävät työkalut Biocode ja Cool Farm Tool soveltuvat perunan hiilijalanjälkilaskentaan?
    a. Miten työkalut vastaavat Luken ohjeistusta sovellettavia standardeja (ISO 14040/44/67)?
3. Miten menetelmävalinnat ja lähtöarvot vaikuttavat tuloksiin?

Työssä on kaksi teorialukua, joista ensimmäinen, luku 2, käsittelee perunan viljelyn ilmastovaikutuksia ja ja jälkimmäinen, luku 3, viljelyn hiilijalanjälkilaskennan työkaluja. Luvussa 4 esitellään aineistot ja menetelmät liittyen sekä hiilijalanjälkilaskentaan valituilla työkaluilla että LULUC-laskentaan. Seuraava, luku 5, esittelee edellisessä luvussa kuvattujen tutkimusten tulokset ja niiden tulkinnan. Viimeisessä luvussa 6 esitellään johtopäätökset ja kootaan vastaukset tutkimuskysymyksiin.

2. PERUNAN VILJELYN ILMASTOVAIKUTUKSET

Perunan viljelyn merkittävimmät ilmastovaikutukset liittyvät maankäyttöön ja maankäytön muutoksiin (luku 2.4), lannoitteiden ja muiden maanparannusaineiden valmistukseen ja käyttöön (luku 2.2), työkoneiden polttoainekulutukseen sekä kuljetuksiin tilalle ja sieltä pois (luku 2.3) (Pulkkinen et al., 2012a). Tässä luvussa käsitellään perunan hiilijalanjälkeä kokonaisuudessaan, siemenperunan, lannoittamisen, kasvinsuojelun, työkoneiden ja kastelun aiheuttamia ilmastovaikutuksia sekä maankäytön ja maankäytön muutosten aiheuttamia ilmastovaikutuksia.

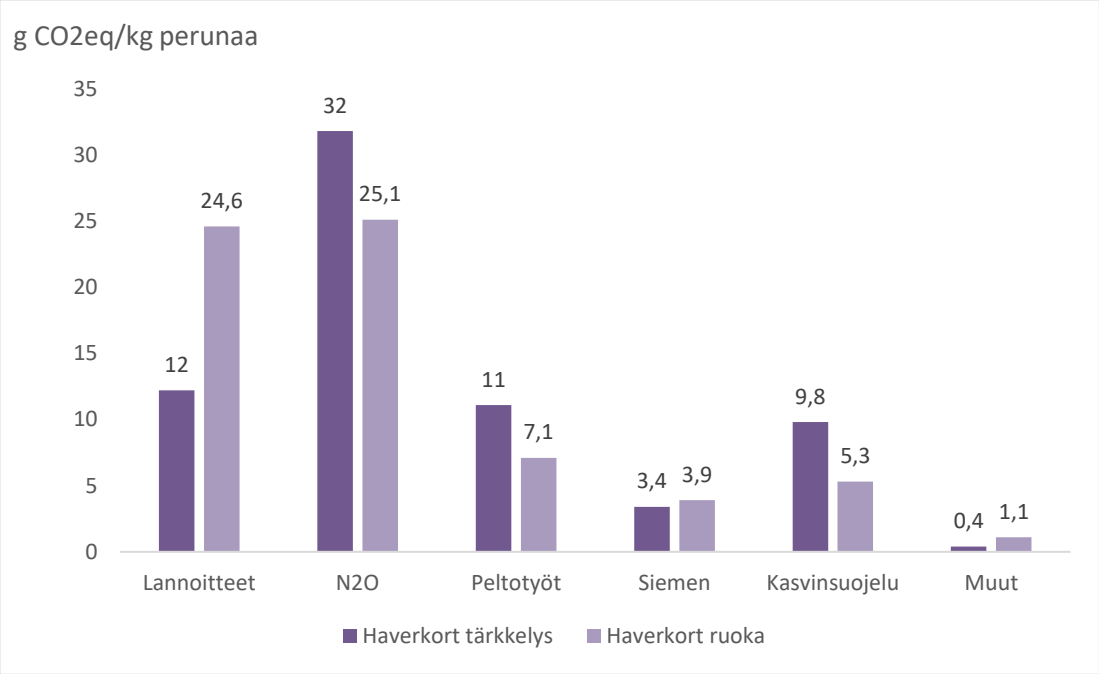
2.1 Perunan hiilijalanjälki

Perunan hiilijalanjälkeä on tutkittu sekä Suomessa että maailmalla, mutta tarkemmin juuri tärkkelysperunan hiilijalanjälkeä on tutkittu vähemmän. Laskelmia on toteutettu erilaisin laajuuksin ja rajauksin, lähtötiedoin, menetelmin sekä päästökertoimin. Näin ollen tulosten välillä on suuriakin eroja, joita tässä alaluvussa tarkastellaan mahdollisimman tarkan kokonaiskuvan saamiseksi.

Haverkort et al. (2011) ovat toteuttaneet perunan hiilijalanjälkivertailun, jossa vertailussa ovat siemenperuna, ruokaperuna, tärkkelysperuna sekä luomuperuna. Hiilijalanjäljiksi tutkimuksessa saatiin siemenperunalle 115 g CO_2 eq/kg perunaa, ruokaperunalle 77 g CO_2 eq/kg perunaa, tärkkelysperunalle 71 g CO_2 eq/kg perunaa ja luomuperunalle 82 g CO_2 eq/kg perunaa. Tähän tutkimukseen sisällytettiin päästöt siemenperunasta perunan säilytykseen ilman LULUC-päästöjä. Ilman varastointia tärkkelysperunan hiilijalanjäljeksi jää noin 69 g CO_2 eq/kg perunaa ja ruokaperunan noin 67 g CO_2 eq/kg perunaa, jolloin ruokaperunan hiilijalanjälki on noin 2 g CO_2 eq/kg perunaa pienempi kuin tärkkelysperunan. Haverkortin tutkimus on tilakohtainen, jossa jokaiseen kategoriaan valittiin kaksi edustavaa hollantilaista perunanviljelijää, joiden tuottaman viljelydatan perusteella tutkimus on tehty. Vertailtavuus Suomeen ei näin ollen välttämättä ole optimaalinen.

Haverkort (2011) tutki samalla tutkimusmenetelmällä tärkkelys- ja ruokaperunan hiilijalanjälkiä, joita vertailtaessa voidaan saada osviittaa, mitkä asiat aiheuttavat eroa tuloksiin (kuva 1). Ruokaperunan lannoitteiden valmistus on aiheuttanut tässä tutkimuksessa selvästi enemmän päästöjä, mikä johtuu suuremmasta synteettisten lannoitteiden käytöstä verrattuna tärkkelysperunaan, jossa on käytetty myös huomattavia määriä orgaanisia lannoitteita. Kuitenkin tärkkelysperunan

typpioksiduulipäästöt ovat suuremmat, mikä voi indigoida suurempaa kokonaistypen määrää lannoittaessa. Lisäksi tärkkelysperunalle on käytetty enemmän kasvinsuojeluaineita kuin ruokaperunalle. Edellä mainitut seikat voivat johtaa myös tärkkelysperunan kohdalla korkeampaan peltotöiden hiilijalanjälkeen. Valinnat lannoitteiden laadusta sekä kasvinsuojeluaineiden käytöstä ovat tilakohtaisia, ja voivat vaihdella, mikä vaikuttaa hiilijalanjälkeen. Erot ruoka- ja tärkkelysperunan hiilijalanjäljissä liittyvät pääosin näihin valintoihin, jotka voivat vaihdella muutenkin esimerkiksi eri ruokaperunatilojen kesken. Ero hiilijalanjäljessä on myös pieni tämän tutkimuksen ruoka- ja tärkkelysperunalla. Koska tutkimusta tärkkelysperunanviljelystä on hyvin vähän ja suuria eroja viljelysmenetelmissä ja hiilijalanjäljissä ei ole, tehdään tässä työssä hiilijalanjälkien vertailua myös ruokaperunan kanssa.



Kuva 1. Haverkortin (2011) tulokset tärkkelys- ja ruokaperunan hiilijalanjälkien jakautumiselle viljelyn toimintojen kesken.

Kotimaisen ruokaperunan hiilijalanjälki vaihtelee eri lähteissä, eikä suomalaisen tärkkelysperunan hiilijalanjälkeä ole tutkittu siten, että siitä olisi saatavilla julkista tietoa. Luken Potwellin suomalaiselle ruokaperunalle toteuttama PEF:n mukaisen hiilijalanjälkilaskelman tulos koko tuotantoketjulle on 120 g CO_2 eq/kg perunaa, josta alkutuotannon osuudeksi ilman kuljetuksia on arvioitu 40 %, eli perunanviljelyn hiilijalanjäljeksi saadaan 48 g CO_2 eq/kg perunaa. Potwellin mukaan viljely tapahtuu ainoastaan mineraalimailla, joten LULUC-päästöjen voidaan olettaa olevan hyvin pienet. (Potwell, n.d.) Suurempia tuloksia suomalaisen ruokaperunan hiilijalanjäljeksi on saatu tutkimuksissa, joissa arviointi ei ole ollut tila- tai tuotekohtaista, vaan yleistettävissä suomalaiselle perunalle. Muunmuassa Pulkkinen et al. (2012b) tutkimuksessa arvioitiin

pakatun ruokaperunan hiilijalanjäljeksi 130 g CO_2 eq/kg perunaa, josta alkutuotannon osuudeksi kuljetusten kanssa ilman LULUC-päästöjä laskettiin noin 85 g CO_2 eq/kg perunaa. Sen sijaan Carbon Cloudin laskelman mukaan suomalaisen ruokaperunan hiilijalanjälki on kuitenkin vielä suurempi, 153 g CO_2 eq/kg perunaa ilman LULUC-päästöjä ja 260 g CO_2 eq/kg perunaa LULUC-päästöjen kanssa. Kumpaankaan Carbon Cloudin lukemaan kuljetuksia ei ole huomioitu eikä siemenperunasta ole mainintaa raportissa eikä tuloksissa. (Carbon Cloud, 2025) Taulukko 1 kokoaa edellä esitetyt tulokset perunan viljelyvaiheen hiilijalanjäljelle.

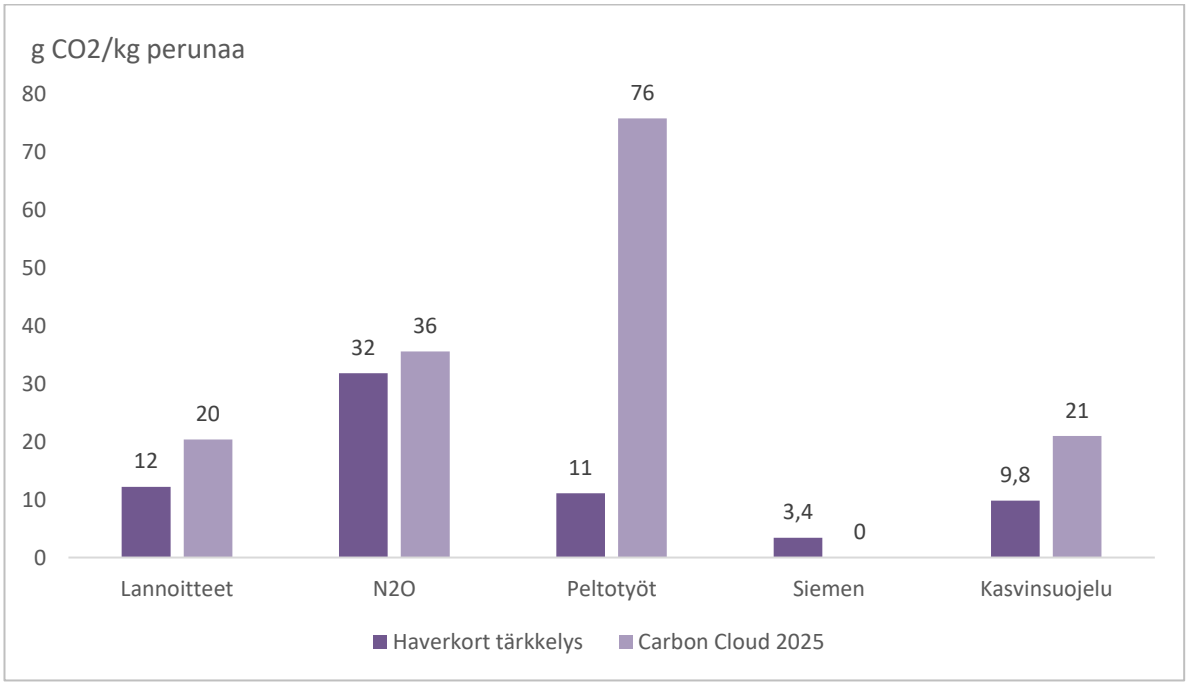
Taulukko 1. Perunan viljelyvaiheen hiilijalanjälki kirjallisuudessa.

Hiilijalanjälki (g CO_2 eq/kg perunaa)	**Lähde**	**Huomio**
69	Haverkort et al., 2011	Hollantilainen tilakohtainen tärkkelysperuna, LULUC-päästöjä ei huomioitu
67	Haverkort et al., 2011	Hollantilainen tilakohtainen ruokaperuna, LULUC-päästöjä ei huomioitu
48	Potwell, n.d.	Suomalainen ruokaperuna, tuotekohtainen, LULUC mukana tuloksessa
153	Carbon Cloud, 2025	Suomalainen ruokaperuna, LULUC-päästöt poistettu
85	Pulkkinen et al., 2012b	Suomalainen ruokaperuna, LULUC-päästöjä ei huomioitu

Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen (MTT) kirjallisuuskatsauksen mukaan perunan viljelyvaiheen hiilijalanjälki on 70–200 g CO_2 eq/kg perunaa. Katsaus on osa PotatoNow-hanketta ja siinä on vertailtu 19 tutkimusta ruoka-. luomu-, varhais-, siemen- ja tärkkelysperunan hiilijalanjäljistä. MTT:n tutkimuksessa todetaan perunaa tuottavien tilojen välisten erojen olevan suuria ja tilojen itse pystyvän vaikuttamaan hiilijalanjäljen suuruuteen toiminnoillaan. Erityisesti satotasojen ja typen käytön määrät tunnistetaan vaikuttavaksi tekijäksi tulosten vaihtelussa. (Pulkkinen et al., 2012a) Näin ollen tila- tai tuotekohtaisissa arvioissa vaihtelu voi olla suurempaa kuin vertailtaessa jonkin maan tai

suuremman alueen keskiarvioisia viljelyn hiilijalanjälkiä. Tulosten vaihteluun voi myös vaikuttaa tarkastelun laajuus, metodologiset valinnat sekä laskennassa hyödynnetyt päästökertoimet. Myös tutkimuksen ajankohta voi vaikuttaa tulokseen, kun laskentamenetelmät kehittyvät.

Koska muista tutkimuksista ei ollut saatavilla tarkkoja tietoja hiilijalanjäljen jakautumisesta viljelysvaiheen toimintojen kesken, vertaillaan kuvassa 2 Haverkortin tärkkelysperunan ja Carbon Cloudin suomalaisen ruokaperunan viljelyn toimintojen hiilijalanjälkiä. Carbon Cloudin arvioima kokonaistulos ruokaperunan hiilijalanjäljelle on yli kaksi kertaa suurempi kuin Haverkortin tärkkelysperunan hiilijalanjälki, josta suurin syy lienee peltotöiden korostunut osuus tuloksessa. Se kattaa noin puolet kokonaishiilijalanjäljestä tuloksella 76 g CO_2 eq/kg perunaa, joka yksin on suurempi kuin Haverkortin tutkimuksen kokonaishiilijalanjälki tärkkelysperunalle. Sen sijaan Haverkortin mukaan suurin osa hiilijalanjäljestä, 46 %, muodostuu maaperän typpioksiduulipäästöistä. Lannoitteiden sekä kasvinsuojeluaineiden valmistukset tuottavat Carbon Cloudin arviossa 20 ja 21 g CO_2 eq/kg perunaa ja Haverkortin tutkimuksessa noin puolet vähemmän 12 ja 10 g CO_2 eq/kg perunaa, jonka lisäksi siemenperunan päästöjä ei ole huomioitu Carbon Cloudin tutkimuksessa. Sen sijaan kastelun ja typpioksiduulipäästöjen suuruudet ovat hyvin lähellä toisiaan kyseisissä tutkimuksissa. (Carbon Cloud, 2025; Haverkort et al., 2011)



Kuva 2. Haverkortin (2011) hollantilaisen tärkkelysperunan ja Carbon Cloudin (2025) suomalaisen ruokaperunan viljelyn eri toimintojen hiilijalanjäljet. Kokonaishiilijalanjälki

Haverkortin (2011) tutkimuksessa on 69 g CO_2 eq/kg perunaa ja Carbon Cloudin tutkimuksessa 153 g CO_2 eq/kg perunaa.

Perunan hiilijalanjälki voi vaihdella suuresti erilaisia tutkimuksia tarkastellessa ja tässä katsauksessa tulokset asettuivat välille 48 –153 g CO_2 eq/kg perunaa. Tärkkelysperunan ja ruokaperunan hiilijalanjäljissä ei ole suurta eroa Haverkortin (2011) tutkimuksen perusteella. Seuraavissa alaluvuissa perehdytään tarkemmin viljelyn vaiheiden päästöihin ja niiden aiheuttajiin.

2.2 Perunan lannoittamisen ilmastovaikutukset

Tärkeimmät lannoitetyypit perunan viljelyssä ovat typpi-, fosfori-, kalsium- ja kaliumlannoitteet (Seppänen et al., 2008), joista ilmastovaikutuksen kannalta merkittävimpiä ovat typpilannoitteet. Tärkkelysperunaa viljellään tyypillisesti karkeilla mineraalimailla, jotka ovat rakenteeltaan perunan viljelylle sopivia sekä nopeasti lämpeneviä, pidättävät heikosti vettä sekä ovat luontaisesti ravinneköyhiä (Aaltonen et al., 2016; Seppänen et al., 2008). Nämä ominaisuudet voivat lisätä erityisesti kalium-, kalsium- ja magnesiumlannoituksen tarvetta verrattuna multaisemmilla mailla viljelyyn, mutta esimerkiksi Finnamyl Oy:n ja Lapuan Peruna Oy:n tärkkelysperunan viljelyohjeiden mukaan eloperäisillä mailla myös typpilannoitustaso on vain noin 70 % vähämultaisiin maihin verrattuna (Sillanpää et al., 2017). Lannoitteiden päästöt aiheutuvat niiden valmistuksesta sekä lannoitetypen aiheuttamista maaperän reaktoista.

Haverkortin (2011) tutkimuksen mukaan suurimmat tärkkelysperunanviljelyn ilmastovaikutukset liittyvät juuri typpioksiduulin (N_2O) vapautumiseen maaperästä (46 %) sekä lannoitteiden valmistamiseen (18 %) (kuva 1). Typpioksiduulipäästöt Haverkortin (2011) tutkimuksessa ovat noin 32 g CO_2 eq/kg perunaa ja lannoitteiden valmistuksen noin 12 g CO_2 eq/kg perunaa. Carbon Cloudin arviossa typpioksiduulipäästöt ovat noin 36 g CO_2 eq/kg ja lannoitteiden valmistuksen päästöt noin 20 g CO_2 eq/kg, eli samaa suuruusluokkaa Haverkortin tutkimuksen kanssa (Carbon Cloud, 2025). Lajikkeesta riippuen tärkkelysperunan typpilannoitustaso Suomessa vähämultaisilla ja multavilla mailla on ohjeen mukaan noin 85–120 kg N/ha (Sillanpää et al., 2017), noin 20 kg N/ha korkeampi kuin ruokaperunan (Seppänen et al., 2008). Myös Haverkortin tutkimuksen typpilannoitemäärä tärkkelysperunalle sekä Carbon Cloudin typpilannoitemäärä suomalaiselle ruokaperunalle asettuvat edellämainittuun suuruusluokkaan (Carbon Cloud, 2025a; Haverkort et al., 2011).

Lannoitteet voidaan niiden valmistuksen päästöjen laskennassa jakaa kahteen luokkaan: synteettiset ja orgaaniset lannoitteet, joista synteettiset lannoitteet ovat kemiallisesti valmistettuja ja orgaaniset taas biologista alkuperää, kuten lantaa tai

kompostijätettä (Global Carbon Council, 2024). Valmistuksen kannalta orgaanisten lannoitteiden päästöt karakterisoidaan LCA:n periaatteiden mukaisesti tyypillisesti nollaksi, koska ne ovat usein sivutuotteita tai jätteitä eikä niitä ole valmistettu ensisijaisesti lannoitteeksi (IPCC, 2019a). Synteettisten lannoitteiden valmistusten päästöt syntyvät pääosin typpilannoitteiden valmistuksen Harber-Bosch-prosessista, jossa ilmakehän typpi muunnetaan ammoniakiksi korkeassa lämpötilassa ja paineessa (Rosa et al., 2023). Harber-Bosch-prosessi on eritäin energiaintensiivinen ja aiheuttaa lähteestä ja vuodesta riippuen noin 1,2–1,8 % maailman hiilidioksidipäästöistä (Kyriakou et al., 2020; Osorio-Tejada et al., 2022; Smith et al., 2020). Muiden päälannoitteiden raaka-aineet hankitaan louhimalla (Rosa et al., 2023). Esimerkiksi lannoitetuottaja Yara kertoo tuottamiensa lannoitteiden elinkaaren päästöistä noin neljänneksen johtuvan tuotannosta, jossa 80 % aiheutuu ammoniakkituotannon energiatuotannosta, 8 % typpihappotuotannon typpioksiduulipäästöistä ja loput muista hajapäästöistä (Yara Suomi, 2021).

Sekä Haverkortin että Carbon Cloudin tutkimuksessa perunaa on lannoitettu synteettisten lannoitteiden lisäksi orgaanisilla lannoitteilla, mikä pienentää lannoituksen valmistamisen päästöjä siihen nähden, että lannoitus olisi tapahtunut kokonaan synteettisillä lannoitteilla. (Carbon Cloud, 2025a; Haverkort et al., 2011) Esimerkiksi kuvassa 1, jossa vertaillaan Haverkortin (2011) tärkkelys- ja ruokaperunan hiilijalanjälkiä, on ruokaperuruokaperunan lannoitteiden valmistuksesta aiheutunut noin kaksinkertainen määrä päästöjä tärkkelysperunaan verrattuna, vaikka lannoitustaso on samaa luokkaa, ja typpioksiduulipäästöt ovat tärkkelysperunalla suuremmat. Tämä johtuu siitä, että kyseisessä tutkimuksessa on ruokaperunalle käytetty lähes pelkästään synteettisiä lannoitteita, kun taas tärkkelysperunalle on käytetty myös mm. lantaa, jonka valmistuksen päästöt karakterisoidaan nollaksi. Näin ollen, vaikka tärkkelysperunan lannoitustaso olisi suurempi verrattuna ruokaperunaan, voi lannoitteiden valmistuksen päästöt olla tärkkelysperunalla pienemmät.

Typpioksiduulia vapautuu maaperästä typpilannoitteiden käytön seurauksena sekä viljelysjätteiden hajoamisen tuotteena (IPCC, 2019a). Sitä syntyy maaperän mikrobien prosesseissa erityisesti, jos maaperässä on paljon typpeä ja liian vähän happea saatavilla. Lannoitteen typpi lisää maaperässä tapahtuvaa nitrifikaatiota ja denitrifikaatiota, joiden seurauksena syntyy typpioksiduulia. Typpioksiduulipäästöt jaotellaan suoriin ja epäsuoriin päästöihin, joista suorat viittaavat suoraan maaperästä syntyviin päästöihin ja epäsuorat muualta, kuten ilmakehästä tai vesistöistä, syntyviin päästöihin.

Suomessa maatalouden päästöistä 49 % liittyi maaperän typpioksiduulipäästöihin vuonna 2022, kun LULUC-sektoria ei huomioida (Tilastokeskus, 2024). Haverkortin tutkimuksessa typpioksiduulipäästöjen osuus on 46 % ja Carbon Cloudin 23 %. Kuitenkin absoluuttisesti Haverkortin tutkimuksessa typpioksiduulipäästöt maaperästä ovat noin 32 g CO_2 eq/kg perunaa ja Carbon Cloudin tutkimuksessa 36 g CO_2 eq/kg (Carbon Cloud, 2025a; Haverkort et al., 2011). Pulkkisen tutkimuksessa suomalaisen ruokaperunan hiilijalanjäljelle typpilannoituksesta aiheutuvien maaperän typpioksiduulipäästöjen osuus perunan alkutuotannon päästöistä on noin 50 % eli noin 43 g CO_2 eq/kg perunaa (Pulkkinen et al., 2012b). Näiden päästöjen suuruus riippuu siitä, kuinka paljon typpeä maaperään syötetään. Näin ollen typpilannoituksesta aiheutuvat päästöt voivat tärkkelysperunan kohdalla olla suuremmat kuin ruokaperunalla, kuten kuvassa 1. Lannoituksen vaikutus perunan päästöihin riippuu kuitenkin myös siitä, miten päästöt ilmoitetaan. Mitä suurempi typpilannoitemäärä hehtaaria kohden, sitä suuremmat ovat myös päästöt hehtaarikohtaisesti. Toisaalta, jos suuremmalla lannoituksella saadaan korkeampi sato hehtaaria kohden, voi perunakilon ilmastovaikutus pienentyä. Näin ollen päästöjä laskettaessa on tärkeää tietää pinta-alan ja sadon suhde, jotta panosten aiheuttamat päästöt kohdistuvat oikein.

2.3 Muiden panosten ilmastovaikutukset

Perunan viljely alkaa siemenperunasta, jonka ilmastovaikutus massayksikköä kohden on Haverkortin (2011) mukaan suurempi kuin tärkkelysperunan tai ruokaperunan, koska se vaatii suhteessa enemmän resursseja ja panoksia. Tutkimuksen mukaan siemenperunan osuus tärkkelysperunan kokonaispäästöistä on kuitenkin vain noin viiden prosentin luokkaa (3,4 g CO_2 eq/kg perunaa), joka selittyy sillä, että yhdestä siemenperunasta saadaan kasvatettua useita tärkkelysperunoita.

Suomessa kasvinsuojeluaineita käytetään vähän verrattuna moniin muihin maihin ja niitä ohjeistetaan käyttämään vain tarvittaessa (Aaltonen et al., 2016). Kasvinsuojeluaineiden suorien ilmastovaikutusten osuuden perunan viljelyn ilmastovaikutuksesta oletetaan olevan pieni vähäisten käyttömäärien vuoksi, mutta aiheesta on vähän tutkimusta (Pulkkinen et al., 2012a). Haverkortin (2011) tutkimuksen mukaan kasvinsuojelun ilmastovaikutuksen osuus tärkkelysperunan päästöistä on 14 % ja 9,8 g CO_2 eq/kg perunaa. Carbon Cloudin tutkimuksessa osuus on sama, mutta hiilijalanjälki 21 g CO_2 eq/kg perunaa (kuva 2). Haverkortin tutkimuksessa tärkkelysperunan kohdalla kasvinsuojeluaineita käytetään enemmän kuin ruokaperunan, mutta Carbon Cloudin ruokaperunan hiilijalanjälkitutkimuksessa kasvinsuojeluaineita käytetään enemmän kuin Haverkortin tärkkelysperunatutkimuksessa. (Carbon Cloud, 2025a; Haverkort et al.,

2011) Tämän kategorian sisällä on tilakohtaistakin vaihtelua, sillä suojeluaineita käytetään vain tarvittaessa ja tilakohtaiset tarpeet voivat olla erilaiset.

Kastelun osuus tärkkelysperunan päästöistä on hyvin pieni, vain 0,6 % ja 0,4 g CO_2 eq/kg perunaa. Työkoneiden kulutuksen osuus sen sijaan Haverkortin tutkimuksessa on kolmanneksi suurin, 16 % ja 11 g CO_2 eq/kg perunaa. (Haverkort et al., 2011) Kuten edellä on mainittu, Carbon Cloudin tutkimuksessa työkoneiden kulutuksen hiilijalanjälki on korostunut tuloksissa sen ollessa selvästi suurin panoksista. Taulukon 1 vertailussa juuri Carbon Cloud antaa suurimman hiilijalanjälkituloksen, johon yksi syy voi olla peltotöiden hiilijalanjälki, joka on noin 76 g CO_2 eq/kg perunaa. Tutkimuksessa kerrotaan kokonaisdieselinkulutukseksi noin 22,7 GJ/a/a eli noin 600 l/ha/a, joka on moninkertainen verrattuna Haverkortin (2011) tutkimukseen, jossa peltotöiden energiankulutus vastaa noin 97 l dieseliä hehtaaria kohden, sekä muihin tutkimuksiin viljelyn energiankäytöstä, joissa polttoainekulutus on välillä 60–130 l/ha (Ahokas, 2013; Esala, 2021; Mikkola et al., 2009).

2.4 Maankäytön ja maankäytön muutosten aiheuttamat päästöt

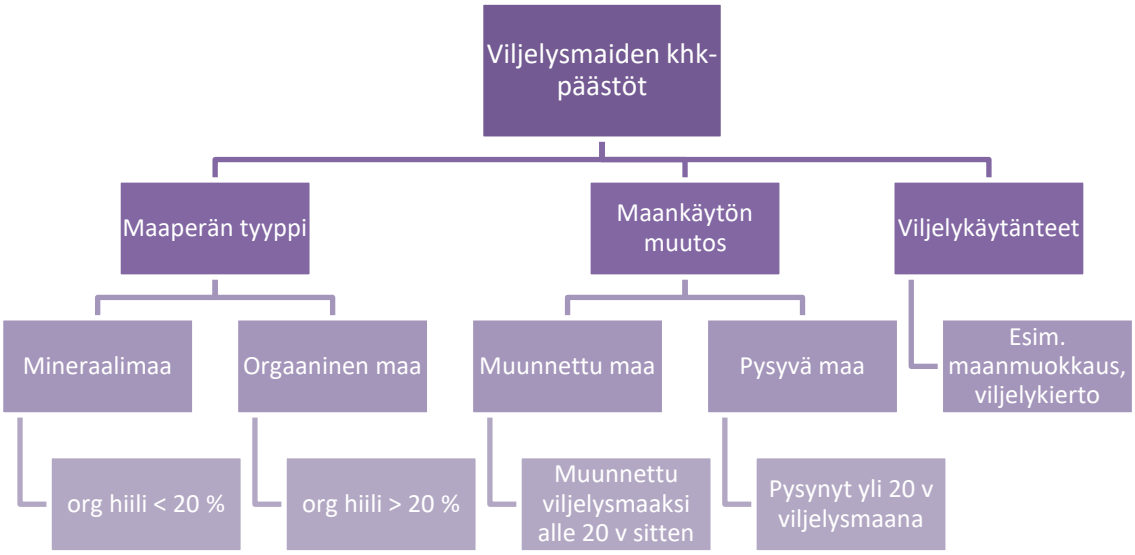
Maankäyttö ja maankäytön muutokset -sektori kuvaa hiilivarastojen muutoksia ja metaani- ja typpioksiduulipäästöjä esimerkiksi maaperässä (Tilastokeskus, n.d.). Hiilivarastojen, joita ovat ovat maaperän orgaaninen hiili (SOC, engl. Soil Organic Carbon), elävän biomassan sisältämä hiili sekä kuollut orgaaninen aines, muutokset voivat olla negatiivisia tai positiivisia, eli hiilivarasto voi joko pienentyä tai kasvaa. Jälkimmäisessä tapauksessa varasto toimii hiilinieluna ja tapahtuu hiilensidontaa. LULUC-sektoriin kuuluu viisi maankäyttöluokkaa, joista tässä työssä keskitytään viljelysmaahan. Perunan viljelysmaiden kasvihuonekaasupäästöjä arvioidessa keskeisimpiä tekijöitä ovat maaperän tyyppi sekä maankäytön muutokset, kuten metsän raivaaminen pelloksi. Lannoituksesta aiheutuneet typpioksiduulipäästöt eivät kuulu LULUC-sektorin päästöihin, mutta saatetaan ilmoittaa osana maaperän päästöjä. (Luke, n.d.)

Maankäytön muutoksella tarkoitetaan muutosta IPCC:n maankäyttöluokasta toiseen, joita ovat metsämaa, kosteikko, nurmimaa, rakennettu alue, muu maa sekä tässä työssä käsiteltävä viljelysmaa (IPCC, 2019b). IPCC:n kasvihuonekaasuinventaario-ohjeistus määrittää 20 vuoden rajan maankäytön muutoksille. Mikäli maa on muutettu viljelysmaaksi alle 20 vuotta sitten, sitä pidetään muunnettuna maana. Yli 20 vuotta sitten viljelysmaaksi muutettu maa luokitellaan pysyvässä käytössä olevaksi viljelysmaaksi. Tämä perustuu oletukseen, että maaperän hiilivarastot saavuttavat tasapainotilan 20

vuoden kuluessa muutoksesta, jolloin niiden päästöt ovat pienemmät kuin vasta muunnetun. (IPCC, 2019b) Tämän rajan mukaan IPCC:n omien raporttien lisäksi useimmissa standardeissa ja ohjeistuksissa on määritelty laskentaperusteet muunnetun ja pysyvässä käytössä olevien maiden päästölaskennalle.

Maankäytön muutos voidaan jakaa vielä suoraan ja epäsuoraan maankäytön muutokseen, joista suora muutos viittaa esimerkiksi metsän muuttamista viljelysmaaksi. Epäsuora muutos tarkoittaa sellaista muutosta, jotka ovat seurausta toisaalla tapahtuvista muutoksista. Vaikka epäsuoristakin maankäytön muutoksista aiheutuu päästöjä, eivät niiden arvioimiseen vaadittavat metodit ja data ole tarpeeksi kehittyneet, että niitä otettaisiin vielä huomioon LULUC-päästöjä arvioidessa. (BSI 2011. PAS 2050:2011) Viljelykäytännöt ja niiden muutokset, kuten viljelysjätteiden jättäminen tai poistaminen pellolta tai muutokset viljelykierrossa, maanmuokkaustavoissa tai kesantoviljelyssä, vaikuttavat maaperän päästöihin. Esimerkiksi vähennetty maanmuokkaus, peitekasvien käyttö ja monipuolinen viljelykierto edistävät maaperän hiilen sitomista. (Palosuo et al., 2025)

Maaperän orgaanisen hiilen määrä vaikuttaa päästöihin, koska mikrobit hajottavat maaperän orgaanista ainesta, mikä vapauttaa hiiltä ilmakehään. Suomessa viljelysmaat jaetaan mineraalimaihin ja orgaanisiin maihin (esim. turvemaat). Mineraalimaat, jotka kattavat suurimman osan, 90 %, Suomen peltopinta-alasta, sisältävät alle 20 % orgaanista hiiltä maan ylimmästä 20 cm:n kerroksesta mitattuna, joten niiden maaperäpäästöt ovat tyypillisesti pienemmät (Luonnonvarakeskus, 2025). Orgaaniset maat, kuten turvemaat, sisältävät yli 20 % orgaanista hiiltä maan ylimmästä 20 cm:n kerroksesta mitattuna, mikä tekee niistä merkittäviä päästölähteitä. (IPCC, 2019b) Niiden ilmastopäästöt aiheutuvat maaperän orgaanisen hiilen hajotuksen lisäksi turpeen hajoituksesta, jonka yhteydessä vapautuu typpioksiduulia (Lehtilä et al., 2025). Kuva 3 esittää edellä kerrotut viljelysmaiden kasvihuonekaasupäästöihin liittyvät olennaisimmat tekijät kaaviona.



Kuva 3. Viljelysmaiden kasvihuonekaasupäästöihin vaikuttavat keskeisimmät tekijät.

Huolimatta siitä, että vain noin 10 % Suomen viljelysmaista ovat orgaanisia maita, Suomessa viljelysmaat kokonaisuutena ovat päästölähde (Tilastokeskus, 2024). Vuonna 2019 maankäyttösektori tuotti 53 % kaikista Suomen maatalouden kasvihuonekaasupäästöistä, ja tästä 98 % johtui maaperän hiilivarastojen hajoamisesta orgaanisilla mailla, vaikka orgaanisten viljelysmaiden osuus peltopinta-alasta on vain 11 % (Ahvenjärvi et al., 2022; Tilastokeskus, 2023). Koko LULUCF-sektorin (LULUC-sektori, jossa on lisänä ”Forest” eli metsä) sisällä orgaaniset maat tuottivat 87 % kaikista sektorin nettohiilidioksidipäästöistä vuonna 2021 (Tilastokeskus, 2023). Kuitenkin myös mineraalimaat ovat Suomessa päästölähteitä, sillä niiden hiilivarastot ovat viime vuosina pienentyneet (Lehtonen et al., 2021).

Suomessa LULUC-päästöjen sisällyttäminen maataloustuotteiden ilmastovaikutusten laskentaan on vielä harvinaista (Lehtilä et al., 2023). Tähänastisen laskennan suurimpia haasteita ovat olleet yhtenäisen metodologian puute, sekä primääridatan puute liittyen peltojen maaperän tyyppiin ja muutokseen. Ohjeistuksia, joissa LULUC kehotetaan sisällyttämään LCA:han, on kuitenkin useita, esimerkiksi PAS2050:2011 (BSI, 2011) ja ISO 14067 (2018). Tyypillisesti LULUC-päästöt on huomioitu käyttäen IPCC Tier 1 metodia ja päästökertoimia, jolloin päästöjä arvioidaan yleisellä keskiarvoisella globaalilla tai kansallisella tasolla. Tällöin tarkkuus voi olla heikko keskiarvoista poikkeavilla alueilla. Esimerkiksi IPCC Tier 2 ja 3 metodit ovat tarkempia, mutta usein etenkin Tier 3 metodit voivat olla monimutkaisia ja epäkäytännöllisiä sekä vajavaisia

liittyen LULUC päästöjen sisällyttämiseen laajemman mittakaavan LCA-tutkimuksiin. (Lehtilä et al., 2025)

Jos LULUC-päästöjä ei huomioida lainkaan, on viljelytuotteiden laskettu ilmastovaikutus tyypillisesti todellisuutta pienempi. Lehtilän et al. (2025) tutkimuksessa korostui orgaanisen maan merkittävä vaikutus viljelytuotteiden kasvihuonekaasupäästöihin. Esimerkiksi kauran hiilijalanjälki kasvoi tutkimuksessa viidenneksellä, kun huomioitiin LULUC-päästöt mineraalimaalla. Jos viljelymaasta puolet oli orgaanista maata, kasvoi hiilijalanjälki yhdeksänkertaiseksi. (Lehtilä et al., 2025) Eroa voi tulla suuriakin määriä riippuen orgaanisen sekä muunnetun viljelysmaan osuuksista, mikä voi koitua ongelmaksi myös siinä tilanteessa, jos esimerkiksi viljely tapahtuu vanhalla mineraalimaapellolla, jonka LULUC-päästöt olisivat suhteellisen pienet, mutta hiilijalanjälkeä laskettaessa käytetään LULUC-laskentaan kansallisia keskiarvoja esimerkiksi orgaanisten viljelysmaiden määrästä.

PEF ohjeistaa tuotekohtaista hiilijalanjälkeä laskettaessa huomioimaan viljelysmaiden LULUC-päästöistä ne, jotka liittyvät 20 vuoden aikana tehtyihin suoriin maankäytön ja viljelytoimenpiteiden muutoksiin. Viljelysmaan nettohiilensidontaa PEF ei ota huomioon, koska tarpeeksi varmaa laskutapaa ei ole tähän vielä kehitetty. (Euroopan komissio, 2021) Ongelmallista etenkin suomalaisten maataloustuotteiden PEF:in mukaisessa hiilijalanjälkilaskennassa on eloperäisten maiden päästöjen huomioiminen ja selkeä erottelu mineraalimaista sekä IPCC:n eloperäisten maiden päästökertoimien epävarmuus, joita Luken ohjeistus (Heusala et al., 2025) pyrkii tarkentamaan.

Tässä työssä LULUC-päästöjen laskentaan sekä arvioitavien laskentatyökalujen LULUC-laskennan verrokkina käytetään Luken ohjeistuksen (Heusala et al., 2025) mukaista laskentamallia. Malli on suunniteltu erityisesti suomalaisten viljelysmaiden maankäytöstä ja maankäytön muutoksista aiheutuvien hiilidioksidi- ja metaanipäästöjen laskentaan, joten siinä huomioidaan muunmuassa mineraali- ja orgaanisten maiden eroavaisuudet. Maankäytön muutoksista huomioidaan PAS 2050:2011 (BSI 2011) mukaisesti ainoastaan suorat muutokset. Muunnetun maan hiilivarastot, jotka ohjeistuksen mukaan tulee huomioida, ovat maaperän orgaaninen hiili, elävä biomassa ja kuollut orgaaninen aines, ja pysyvän maan hiilivarastot maaperän orgaaninen hiili sekä elävä biomassa. Maaperän nettohiilensidontaa ei huomioida ohjeistuksen mukaisessa laskennassa. Mallin mukaan laskennassa käytettävät päästökertoimet tulee pohjautua Kyoton pöytäkirjaan kuuluviin kansallisiin kasvihuonekaasuinventaarioihin. Laskennan tulee ohjeen mukaan perustua primääridataan maankäytön muutosten historiasta sekä maaperän tyypistä. (Heusala et al., 2025)

Luken ohjeistuksen LULUC-laskentamallissa kokonaishiilidioksidi- ja metaanipäästöt viljelysmaasta lasketaan muunnetun ja pysyvän maan hiilivarastojen nettomuutosten aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen sekä orgaanisen maan metaanipäästöjen summana (yhtälö 1). Taulukossa 2 on esitetty yhtälön 1 muuttujien selitteet. (Heusala et al., 2025)

$$\mathrm{LULUC_{viljelysmaa}} = \left(\mathrm{A_{muunn}} \times \Delta\mathrm{C_{muunn}} + \mathrm{A_{pys}} \times \Delta\mathrm{C_{pys}}\right) \times \frac{44}{12} \times (-1) + \mathrm{LULUC_{CH4}} \times 29{,}8$$

(1)

Taulukko 2. Yhtälön 1 muuttujien selitteet. *Primääridataa käytettävä Luken ohjeistuksen mukaan (Heusala et al., 2025).

Muuttuja	Selite
$\mathbf{LULUC_{viljelysmaa}}$	Viljelysmaan LULUC-päästöt (CO_2 ja CH_4) yhteensä (kg CO_2eq./ha/vuosi)
$\mathbf{A_{muunn}}$	Viljelysmaaksi muunnetun maan osuus (dimensioton) *
$\mathbf{\Delta C_{muunn}}$	Hiilivaraston nettomuutos viljelysmaaksi muunnetulla maalla (kg C/ha/vuosi)
$\mathbf{A_{pys}}$	Pysyvässä käytössä olevan viljelysmaan osuus (dimensioton) *
$\mathbf{\Delta C_{pys}}$	Hiilivaraston nettomuutos pysyvässä viljelyskäytössä olevalla maalla (kg C/ha/vuosi)
$\mathbf{\frac{44}{12}}$	Muuntokerroin C:stä CO_2:ksi
$\mathbf{LULUC_{CH4}}$	Metaanipäästöt viljelysmaasta
$\mathbf{29{,}8}$	Muuntokerroin CH_4:sta CO_2:ksi

Yhtälössä 1 käytettävien hiilivarastojen muutosten, $\Delta\mathrm{C_{muunn}}$ ja $\Delta\mathrm{C_{pys}}$, laskenta toteutetaan erikseen muunnetun (yhtälö 2) ja pysyvän maan (yhtälö 4) hiilivarastoille. Yhtälöiden 2 ja 3 selitteet löytyvät taulukosta 3.

$$\Delta\mathrm{C_{muunn}} = \Delta\mathrm{LB_{muunn}} + \Delta\mathrm{DOM_{muunn}} + \Delta\mathrm{SOC_{muunn}} \qquad (2)$$

$$\Delta\mathrm{SOC_{muunn}} = \left(\mathrm{A_{min}} \times \Delta\mathrm{SOC_{muunn,min}}\right) + \left(\mathrm{A_{org}} \times \Delta\mathrm{SOC_{muunn,org}}\right) \qquad (3)$$

Taulukko 3. Yhtälöiden 2 ja 3 muuttujien selitteet. *Primääridataa käytettävä Luken ohjeistuksen mukaan (Heusala et al., 2025).

Muuttuja	Selite
$\Delta\mathbf{C_{muunn}}$	Hiilivaraston nettomuutos viljelysmaaksi muunnetulla maalla (kg C/ha/vuosi)
$\Delta\mathbf{LB_{muunn}}$	Nettomuutos elävän biomassan, LB (engl. Living Biomass), hiilivarastossa viljelysmaaksi muunnetulla maalla (kg/C/ha/vuosi)
$\Delta\mathbf{DOM_{muunn}}$	Nettomuutos kuolleen orgaanisen aineksen, DOM (engl. Dead Organic Matter), hiilivarastossa viljelysmaaksi muunnetulla maalla (kg/C/ha/vuosi)
$\Delta\mathbf{SOC_{muunn}}$	Nettomuutos maaperän orgaanisen hiilen, SOC (engl. Soil Organic Carbon), hiilivarastossa viljelysmaaksi muunnetulla maalla (kg/C/ha/vuosi)
$\mathbf{A_{min}}$	Mineraalimaiden osuus viljelysmaasta (dimensioton) *
$\mathbf{A_{org}}$	Orgaanisten maiden osuus viljelysmaasta (dimensioton) *
$\Delta\mathbf{SOC_{muunn,min}}$	Nettomuutos mineraalimaiden maaperän orgaanisen hiilen (SOC) varastossa viljelysmaaksi muunnetulla maalla (kg/ha/vuosi)
$\Delta\mathbf{SOC_{muunn,org}}$	Nettomuutos orgaanisten maiden maaperän orgaanisen hiilen (SOC) varastossa viljelysmaaksi muunnetulla maalla (kg/ha/vuosi)

$$\Delta C_{pys} = \Delta LB_{pys} + \left(A_{min} \times \Delta SOC_{pys,min}\right) + \left(A_{org} \times \Delta SOC_{pys,org}\right), \quad (4)$$

jossa A_{min} ja A_{org} ovat, kuten taulukossa 3 on mainittu ja loput muuttujat ovat vastaavat muuttujat taulukossa 3, mutta viljelysmaana pysyneelle maalle. Muiden muuttujien arvot katsotaan ohjeen mukaisesti Tilastokeskuksen tuoreimmista luvuista. (Heusala et al., 2025)

3. VILJELYN HIILIJALANJÄLKILASKENNAN TYÖKALUT

Tässä luvussa perehdytään erilaisiin hiilijalanjälkilaskennan työkaluihin, joita käytetään maanviljelyssä. Alaluvussa 3.1 esitellään kirjallisuudessa vertailtuja työkaluja, joista poimitaan tämän työn kontekstiin soveltuvat työkalut vertailuun alalukuun 3.2.

3.1 Viljelyn hiilijalanjälkilaskennan työkalut maailmalla

Maatilojen kestävyyden arviointiin on kehitetty kansainvälisesti useita metodeita ja työkaluja (Arulnathan et al., 2020). Suurin osa työkaluista on kuitenkin luotu Yhdysvaltoihin, Australiaan ja Kanadaan, ja ohjeistusta eurooppalaisten maanviljelijöiden työkalujen valintaan on saatavilla vähän (Dzalbs et al., 2023). Esimerkiksi latvialaisessa vuonna 2023 julkaistussa tutkimuksessa vertailtiin maataloussektorin pienten ja keskikokoisten puutarhaviljelyyn keskittyneiden yritysten tarpeisiin luotuja kasvihuonekaasulaskureita. Vaikka perunanviljely ei ole puutarhataloutta, soveltuvat tutkimuksessa suositellut työkalut myös perunatilojen päästölaskentaan. Jotta pääsi mukaan kyseisen tutkimuksen vertailuun, piti työkalun olla ilmaiseksi saatavilla, toimia tilatason mittakaavalla ja maantieteellisesti soveltua joko Euroopan tai koko maailman mittakaavan arviointiin. Analyysi suoritettiin pisteyttämällä viisi indikaattoria, jotka olivat työkalun pohja, kulut viljelijälle, käytön helppous, viljelijöiden hyväksyntä ja metodologian läpinäkyvyys. Näiden indikaattorien pohjalta viljelijöille suositeltiin The Farm Carbon Calculatoria (FCC), Cool Farm Toolia sekä Solagro Carbon Calculatoria (SCC), joka on Euroopan komission yhteisen tutkimuskeskuksen tutkijoiden kehittämä laskuri. Kaksi ensimmäistä pisteytyivät identtisesti jokaisen indikaattorin kohdalla ja SCC oli edellisiä helpompi käyttää mutta keräsi vähemmän viljelijöiden hyväksyntään liittyviä pisteitä. (Dzalbs et al., 2023)

MacSween et al. (2018) vertailivat kuutta maatalouden tarpeisiin kehitettyä kasvihuonekaasulaskuria helpottaakseen mahdollisia käyttäjiä tunnistamaan tarpeisiinsa relevantit työkalut. Tutkimuksessa arvioitiin käyttäjän ammattitaidon tarvetta työkalua käyttäessä, datan vaatimuksia, saatavuutta, maantieteellistä kattavuutta, taustalla olevaa laskentamallia ja laskennan mittakaavaa. Kuitenkaan työkalujen metodologian vertailuun ei tässä tutkimuksessa paneuduttu. Vertailluista työkaluista tilatason hiilijalanjälkilaskentaan pohjoiseurooppalaisissa olosuhteissa soveltuvat CCAFS-MOT (Climate Change, Agriculture and Food Security – Mitigation options Tool) ja Cool Farm Tool. Muissa työkaluissa joko arvioinnin mittakaava tai maantieteellinen

soveltuvuus eivät sopineet suomalaisen perunanviljelyn päästölaskentaan. (MacSween et al., 2018)

Arulnathan et al., (2020) analysoivat maatilatason kestävyyden arviointiin tarkoitettuja työkaluja. Jotta päätyi mukaan arviointiin, oli työkalujen oltava englannin kielisiä, ilmaisia, uudempia kuin vuonna 2008 kehitettyjä, suunniteltuja juuri tilatason arviointiin maatalous- ja elintarvikesektorilla ja niistä tuli olla saatavilla taustatietoa (kuten verkkosivut, raportit, tieteelliset artikkelit). Tutkimuksessa tarkasteltiin edellä esiteltyjen MacSweenin ja Dzalbsin tutkimuksissa esiin nostettujen seikkojen lisäksi myös tarkemmin työkalujen metodologisia ratkaisuja sekä niiden suhdetta Bellagion periaatteiden mukaiseen kestävyyden arviointiin. Tarkasteltuja työkaluja oli yhteensä 19, joista yhdeksän soveltui käytettäväksi eurooppalaisen viljelyn hiilijalanjäljen tarkasteluun, joista kolmessa tuloksena saadaan indikaattoritulos (eikä esimerkiksi ainoastaan sanallinen arvio). Nämä kolme tämän työn raameihin sopivaa työkalua olivat SENSE Tool, CCAFS-MOT sekä Cool Farm Tool. (Arulnathan et al., 2020)

Suomalaisia työkaluja viljelyn päästölaskentaan on tarjolla hyvin vähän. Esimerkiksi ProAgria on kehittänyt Excel-pohjaisen hiilikartoitustyövälineen, jonka viimeisin versio on julkaistu vuonna 2023, mutta työväline ei anna tulosta hiilijalanjäljelle, vaan arvion siitä, mitä viljelyn osa-aluetta kannattaa kehittää ilmaston näkökulmasta (Peltonen et al., 2021). Sen sijaan suomalainen yritys Biocode on kehittänyt työkalun elintarvikeyritysten hiilijalanjälkilaskentaan. Biocoden laskurilla voi laskea koko yrityksen päästöt, mutta myös alkutuotannon päästöt erikseen (Biocode, 2025a).

3.2 Perunan viljelyn hiilijalanjälkilaskentaan soveltuvien työkalujen vertailu

Taulukossa 4 esitellään luvussa 3.1 kuvatuista tutkimuksista niiden suosittelemat suomalaisen viljelyn hiilijalanjälkilaskentaan soveltuvat työkalut, sekä Suomessa kehitetty Biocode, ja niiden ominaisuuksia. Neljä työkaluista (FCC, SCC, CFT, Biocode) on käytettävissä suoraan verkossa, CCAFS-MOT on ladattava Excel-tiedosto ja SENSE Tooliin ohjelmisto. Kaikilta, paitsi Biocodelta, löytyy suoraan netistä metodologiaraportti, jossa kerrotaan ohjelman taustoista. Biocoden kohdalla dokumentin ja lisätietoja saa pyytämällä, mutta suoraan heidän sivustolta sellaista ei ole löydettävissä. Kaikissa toiminnallisena yksikkönä käytetään sekä massaa että pinta-alaa, jonka lisäksi SENSE Tool laskee päästöt myös ravintosisällöllisiä ominaisuuksia, kuten kaloreita kohden. Kaikkien taustalla vaikuttaa IPCC:n ohjeistukset ja kaikkiin paitsi SENSE Tooliin on tarkasteluun valittavissa viljelyskasviksi peruna. (Arulnathan et al., 2020; Biocode, 2025b; Dzalbs et al., 2023)

Taulukko 4. Maanviljelyn ympäristövaikutusten arviointiin tarkoitettujen työkalujen vertailututkimuksista poimittujen suomalaisen viljelyn hiilijalanjälkilaskentaan soveltuvien työkalujen ominaisuuksien vertailu.

	FCC[1]	**SCC[1]**	**CCAFS-MOT[2]**	**SENSE Tool[2]**	**CFT[1,2]**	**Biocode[3]**
Työkalun pohja	verkossa	verkossa	Excel	ladattava ohjelmisto	verkossa	verkossa
Metodologian läpinäkyvyys	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	pyydet-täessä
Toiminnallinen yksikkö	massa, pinta-ala	massa, pinta-ala	massa, pinta-ala	massa, tilavuus, ravinto-sisältö	massa, pinta-ala	massa, pinta-ala
Peruna vaihtoehtona	kyllä	kyllä	kyllä	ei	kyllä	kyllä
Taustalla IPCC ohjeistukset	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä

[1](Dzalbs et al., 2023) [2](Arulnathan et al., 2020) [3](Biocode, 2025b)

Työkalujen laskennan laajuuksissa sen sijaan on suurempia eroavaisuuksia. Taulukkoon 5 kootuista viljelyn päästöreiteistä kolme työkalua, SCC, CFT ja Biocode, kattavat jokaisen. Joskin LULUC-laskennassa sekä CFT:llä että Biocodella on rajoitteita orgaanisten maiden päästölaskennassa (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024). Luvun 2 perusteella olennaisimmat päästöreitit LULUC, typpioksiduulipäästöt sekä lannoitetuotanto ovat otettuna huomioon kaikkien työkalujen laskennassa lukuunottamatta SENSE Toolia, joka ei huomioi pellon typpioksiduulipäästöjä (Ramos et al., 2015). Kuitenkin LULUC-päästöjen huomioimisessa SCC:a lukuunottamatta kaikilla muilla on puutteita laajuudessa sekä erityisesti orgaanisten maiden päästölaskennassa (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024; Feliciano et al., 2017; Parker et al., 2015; Ramos et al., 2015). Seuraavaksi eniten päästöjä aiheuttavat peltotöiden energiankulutus sekä kasvinsuojeluaineiden tuotanto on huomioitu muissa paitsi CCAFS-MOT:ssa (Feliciano et al., 2017). Useammalla työkalulla on puutteita siemenperunatuotannon, kastelun sekä pellon hoidon kohdalla (Feliciano et al., 2017; Parker et al., 2015; Ramos et al., 2015).

Taulukko 5. Vertailuun valittujen hiilijalanjälkityökalujen laskennan laajuuden vertailu.

	FCC[1]	SCC[2]	CCAFS-MOT[3,4]	SENSE Tool[5]	CFT[5]	Biocode[6]
Lannoitetuotanto	X	X	X	X	X	X
Siemenperunatuotanto	X	X			X	X
Kasvinsuojeluaineiden tuotanto	X	X		X	X	X
Kastelu		X		X	X	X
Pellon hoito		X	X		X	X
Kasvijätteen käsittely	X	X	X	X	X	X
Energia, polttoaineet	X	X		X	X	X
N2O suorat ja epäsuorat päästöt	X	X	X		X	X
LULUC	X**	X	X*	X*	X**	X**

*Vain LUC, **Orgaanisten maiden laskentaa joko ei lainkaan tai rajoitetusti [1](Parker et al., 2015) [2](Bochu et al., 2013) [3](Feliciano et al., 2017) [4](D et al., 2018) [5](Ramos et al., 2015) [6](Haverkort and Hillier, 2011) [6](Biocode, 2025b)

Valmiiden tiettyyn aihealueeseen keskittyvien työkalujen lisäksi hiilijalanjälkeä sekä muita ympäristövaikutuksia voi arvioida LCA-ohjelmistojen avulla. Yleisesti käytössä oleva LCA-ohjelmisto on SimaPro, jonka avulla voi arvioida erilaisten tuotteiden tai prosessien ympäristövaikutuksia riippuen siitä, minkälainen tietokanta ohjelmistossa on taustalla. Perunan hiilijalanjälkeä voi arvioida muunmuassa Agri-Footprint-tietokannan avulla, joka tarjoaa eri maille sekundääridataan perustuvat kertoimet perunan hiilijalanjäljelle. Suomalaisen perunan päästökertoimen taustalla on FAOSTAT:n (Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistical Database) 5 vuoden keskimääräinen perunan satotaso Suomessa vuosilta 2014-2018. Lannoitukset voivat kuvastaa Suomen keskimääräistä lannoitustasoa, mutta muut panokset perustuvat kansainvälisiin malleihin. LULUC-päästöt on sisällytetty Agri-Footprintin kertoimeen perustuen FAOSTAT:n dataan maankäytön historiasta sekä viljelysmaan maaperän tyypistä kyseisessä maassa. Panoksista Agri-Footprint ottaa huomioon lannoituksen lisäksi kasvinsuojeluaineet, kalkituksen, siemenperunan sekä energian kulutuksen. (Blonk, 2022) Se, minkä tuloksen lopulta Simaprosta saa, riippuu tietokannan taustatietojen lisäksi siitä, minkälaisia valintoja tekee työkalua käyttäessä esimerkiksi

laskentametodologian ja allokoinnin (prosessin ympäristövaikutusten jakaminen mahdollisen usean tuotteen kesken) suhteen. Näistä valinnoista tärkkelysperunan kohdalla ohjeistaa mm. PEF-ohjeistusta täydentävä PCR (Product Category Rules) tärkkelysalan tuotteille (Starch Europe, 2021). Tällaisella työkalulla saa hyvän arvion hiilijalanjäljestä, mutta tilakohtainen laskenta voi olla kömpelöä.

Edellä tehtyjen vertailujen pohjalta parhaat vaihtoehdot tilakohtaiseen tärkkelysperunan hiilijalanjälkilaskentaan Suomessa ovat Solagro Carbon Calculator, Cool Farm Tool sekä Biocode. Kuten edellä mainittu, kaksi ensimmäistä ovat kansainvälisiä työkaluja, joita Dzalbs et al. (2023) vertaili muunmuassa tutkimuksessaan. SCC ja CFT saivat yhteensä pisteitä yhtä paljon, mutta vaikka SCC:a pidettiin helppokäyttöisempänä, sai CFT paremmat arvostelut maanviljelijöiden keskuudessa ja on käytössä laajasti alalla. Biocode sen sijaan on kotimainen työkalu, jonka on mahdollista tarjota paikkakohtaisempaa taustadataa suomalaista tärkkelysperunanviljelyä tutkittaessa (Biocode, 2025b). Laajempaan tarkasteluun valittiin tässä työssä Cool Farm Tool ja Biocode, jonka lisäksi tarkastellaan rinnalla myös SimaProssa tuotettuja laskelmia.

4. AINEISTO JA MENETELMÄT

Ensimmäisessä alaluvussa esitellään tutkimuskohde ja tutkimuksen rakenne, toisessa alaluvussa aineistot ja menetelmät liittyen laskentatyökalujen analysointiin ja viljelyvaiheen hiilijalanjäljen laskentaan ja kolmannessa esitellään LULUC-päästöjen laskenta.

4.1 Tutkimuskohteen esittely

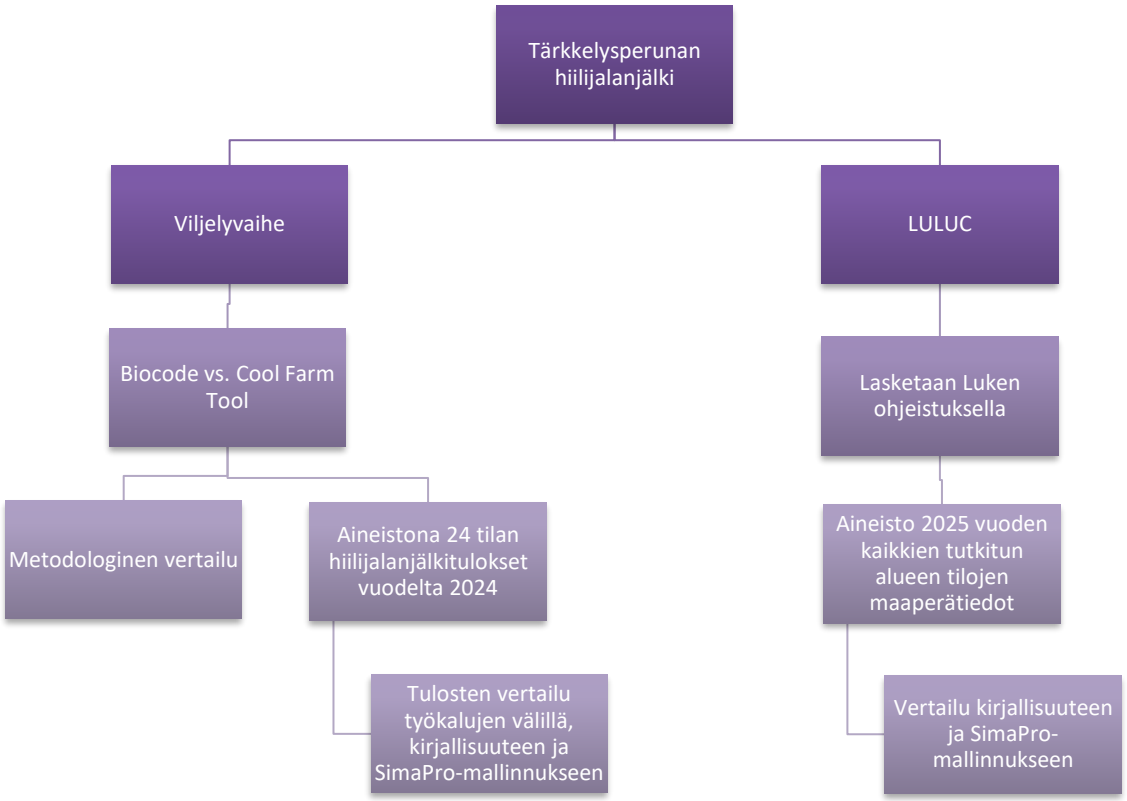
Tässä työssä arvioidaan tärkkelysperunan hiilijalanjälkilaskentaa kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa arvioidaan viljelyvaiheen hiilijalanjälkilaskentaa Biocoden ja Cool Farm Toolin laskentatyökaluilla ja toisessa LULUC-päästöjen laskemista (kuva 2). Osuudet toteutetaan erillisinä, koska vaikka viljelyvaiheen laskentaan käytetyillä työkaluilla LULUC-laskentakin olisi jollain tasolla mahdollista, haluttiin tässä tutkimuksessa varmistaa LULUC-laskennan laadukkuus niin datan kuin metodien puolesta käyttämällä tähän Luken ruoka-LCA-ohjeistusta.

Tutkimus toteutettiin tutkitun alueen tärkkelysperunan viljelydatan perusteella niin, että viljelyvaiheen hiilijalanjälkilaskennan otokseen lukeutui 24 tilaa, joilta on kerätty viljelydataa 93:lta peltolohkolta. Tällä datalla on laskettu viljelyvaiheen hiilijalanjälki käyttäen sekä Biocoden että Cool Farm Toolin laskentaohjelmia. Nämä tulokset sekä kunkin laskentaohjelman metodologiatiedot toimivat aineistona tämän tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa, jossa arvioitiin tärkkelysperunan viljelysvaiheen hiilijalanjälkeä sekä vertailtiin edellä mainittuja laskentaohjelmia (kuva 2).

Tutkimuksen toisen vaiheen otokseen lukeutui kaikki tutkitun alueen tärkkelysperunaa viljelevät tilat, joilta on kerätty maaperätiedot vuodelta 2025. Tämän datan perusteella työssä toteutettiin laskelma LULUC-päästöistä, jota verrattiin kirjallisuuden arvoihin (kuva 2).

Vertailua varten työssä mallinnettiin lisäksi perunan hiilijalanjälkeä LCA-työkalu SimaProlla. Mallinnus toteutettiin Starch Europen Product Category Rules for Starch Industry Products -ohjeistuksen mukaisesti käyttäen Agri-footprint 6.3-tietokantaa, taloudellista allokaatiota sekä Environmental Footprint 3.1 -metodia (Starch Europe, 2021). Kirjastosta valittiin ”Potatoes at farm (FI) Economic, U”, eli perunat maatilalla Suomessa, josta manuaalisesti asetettiin ”peat emissions” nollaan eli poistettiin orgaanisten maiden aiheuttamat päästöt, josta saatiin pelkän viljelyvaiheen päästöt. Lisäksi mallinnus toteutettiin orgaanisten maisten oletuspäästöillä, jolloin saatiin selville

kokonaispäästöt perunakiloa kohden, josta vähennettiin viljelyvaiheen päästöt. Tästä tuloksena saatiin LULUC-päästöt. (Kuva 2)



Kuva 2. Työn tutkimuksen rakenne.

Viljelyvaiheen ja LULUC:n hiilijalanjäljet yhdistämällä saatiin arvio tutkitulla alueella viljeltävän tärkkelysperunakilon kokonaishiilijalanjäljestä. Lisäksi arvioitiin sopivia laskentamenetelmiä niin viljelyvaiheen kuin LULUC:n hiilijalanjäljille ja pohdittiin, kannattaako primääridatalaskentaa toteuttaa, vai ovatko taulukkoarvot riittävän lähellä laskettuja tuloksia.

4.2 Viljelyn panosten hiilijalanjälkilaskenta laskentatyökaluilla

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin tärkkelysperunan viljelyvaiheen hiilijalanjälki sekä vertailtiin Biocoden ja Cool Farm Toolin laskentaohjelmia ja niiden tuottamia hiilijalanjälkituloksia.

CFT:n ja Biocoden laskentaohjelmien metodologiset taustat vertailtiin suhteessa LCA-standardeihin, Luken ruoka-LCA-ohjeistukseen ja toisiinsa keskittyen perunanviljelyn kannalta olennaisiin seikkoihin, kuten tärkeimpien panosten hiilijalanjäljen arvioinnin taustoihin. Myös LULUC-päästöjen arvioinnin taustat tutkittiin, sillä vaikka tässä tutkimuksessa hyödynnetty data ei mahdollista niiden laskemista CFT:lla ja Biocodella, voi se tulevaisuudessa olla mahdollista. Tällöin koko päästöjen arviointi olisi mahdollista

yksinkertaistaa yhdellä työkalulla tehtäväksi, jos työkalut täyttävät LULUC-laskennan vaatimukset. Vertailun tarkoituksena oli löytää pohja mahdollisesti eroaville hiilijalanjälkituloksille sekä tarjota mahdollisia perusteita sille, mitkä laskentatavat jatkossa palvelevat parhaiten tilakohtaista tärkkelysperunan hiilijalanjälkilaskentaa.

Tutkimusta varten ulkopuolinen taho toteutti 24:n tilan hiilijalanjälkilaskennat vuoden 2024 viljelydataa käyttäen sekä Biocode Producer että Cool Farm Tool 2.0 -ohjelmaa. Laskenta toteutettiin peltolohkoittain, joita oli yhteensä 93. Tästä saadut lohkokohtaiset hiilijalanjälkitulokset, jotka toimivat tämän tutkimuksen ainestona, ilmoitettiin kokonaishiilijalanjäljelle sekä viljelyvaiheen toiminnoille yksikössä kg CO_2 eq/kg tärkkelystä. Tulokset muutettiin yksikköön kg (tai g) CO_2 eq/kg perunaa käyttämällä tutkitun alueen vuosien 2020–2025 keskitärkkelysprosenttia. Hiilijalanjälkitulosten lisäksi analyysin tukena oli laskijan käyttämät lohkokohtaiset syötetiedot multavuudelle, typpi- ja fosforilannoitteen ja kasvinsuojeluaineen määrälle sekä tilakohtaiset tärkkelyssadot, jotka muutettiin perunasadoiksi käyttämällä edellä mainittua tärkkelysprosenttia. Tällöin voitiin arvioida panosten määrää suhteessa perunasatoon eri lohkoilla ja niiden suhdetta hiilijalanjälkituloksiin. Huomioonotettavaa aineistossa on, ettei kalkitusaineiden käyttöä oltu huomioitu kuin yhden tilan kohdalla, sillä tyypillisesti peltoja kalkitetaan viiden vuoden välein eikä niitä sattunut enempää tälle vuodelle.

Biocoden ja CFT:n tuottamista hiilijalanjälkituloksista laskettiin keskiarvot ja keskihajonnat kokonaishiilijalanjäljelle sekä viljelyn eri toiminnoille. Lisäksi kokonaishiilijalanjäljelle haettiin lohkot, joissa tulokset olivat pienimmät ja suurimmat kummallakin laskentatyökalulla. Biocoden ja Cool Farm Toolin metodologisen vertailun pohjalta vertailtiin työkalujen tuottamia tuloksia hiilijalanjäljelle ja analysoitiin, miten tulokset eroavat, mitkä viljelyn vaiheet tuottavat suurimmat erot ja miksi. Lisäksi laskennan ja työssä tehdyn analyysin tuloksia verrattiin toisiinsa sekä kirjallisuuteen.

4.3 LULUC-päästöjen laskenta

LULUC-päästöjen laskenta tässä työssä perustuu vuonna 2025 viljelijöiltä kerättyyn aineistoon, ja se toteutetaan luvussa 2.5 esitellyn Luken ruoka-LCA-ohjeistuksen liitteen 1 mukaisesti. Tutkittavasta kokonaisalasta Satakunnassa sijaitsevien peltojen osuus on 55 % ja Etelä-Pohjanmaalla sijaitsevien peltojen osuus 45 %. Kerätty aineisto sisälsi tiedot turvemaiden ja alle 20 vuotta vanhojen peltojen pinta-alasta ja osuudesta.

Laskenta sekä vertailu muihin LULUC-tuloksiin tehtiin yksikössä kg CO_2 eq./ha/a Luken ohjeistuksen mukaisesti. Vaikka muu hiilijalanjälkilaskenta tässä työssä on esitetty yksikössä kg CO_2 eq./kg perunaa, yksikkömuunnosta ei tässä vaiheessa tehty, sillä sen

edellyttämät satotasotiedot voivat aiheuttaa epävarmuutta tuloksiin. Myöhemmissä luvuissa tulokset muunnettiin yksikköön kg CO_2 eq./kg perunaa tutkitun alueen satotasojen perusteella.

Jotta voitiin laskea yhtälön 1 mukaisesti viljelysmaan maankäytön ja maankäytön muutoksen päästöt, oli selvitettävä muunnetun ja pysyvän maan hiilivarastojen nettomuutokset (yhtälöt 2 ja 4). Jotta saatiin selville muunnetun maan hiilivarston nettomuutos, oli ensin selvitettävä maaperän orgaanisen hiilen nettomuutos hiilivarastossa muunnetulla maalla (ΔSOC_{muunn}). Tämä laskettiin yhtälön 3 avulla taulukon 6 mukaisin parametrein.

Taulukko 6. Munnetulla maalla tapahtuvan orgaanisen hiilen nettomuutoksen (ΔSOC_{muunn}) laskennassa käytetyt parametrit ja niiden arvot. Laskenta toteutettiin yhtälön 3 mukaisesti.

Parametri	**Arvo**	**Yksikkö**	**Parametrin arvon lähde**
$\mathbf{A_{min}}$	0,9967	-	Primäärilähde
$\mathbf{\Delta SOC_{muunn,min}}$	-527	kg C/ha/a	(Heusala, et al. 2025)
$\mathbf{A_{org}}$	0,0033	-	Primäärilähde
$\mathbf{\Delta SOC_{muunn,org}}$	-6800	kg C/ha/a	(Heusala, et al. 2025)

ΔSOC_{muunn} arvoksi saatiin -547,7 kg C/ha/a yhden desimaalin tarkkuudella. Tämän jälkeen voitiin laskea hiilivaraston nettomuutos muunnetulla maalla yhtälön 2 mukaisesti taulukon 7 mukaisin parametrein.

Taulukko 7. Muunnetulla maalla tapahtuvan hiilivaraston nettomuutoksen (ΔC_{muunn}) laskennassa käytetyt parametrit ja niiden arvot. Laskenta tehtiin yhtälön 2 mukaisesti.

Parametri	Arvo	Yksikkö	Parametrin arvon lähde
ΔLB_{muunn}	-970	kg C/ha/a	(Heusala, et al. 2025)
ΔDOM_{muunn}	-4	kg C/ha/a	(Heusala, et al. 2025)
ΔSOC_{muunn}	-547,7	kg C/ha/a	Yhtälöstä 3

ΔC_{muunn} arvoksi saatiin -1521,7 yhden desimaalin tarkkuudella. Hiilivaraston nettomuutos pysyvällä maalla laskettiin yhtälön 4 mukaisesti, mutta elävän biomassan hiilivaraston muutosta viljelysmaana pysyneelle maalle (ΔLB_{pys}) ei huomioitu, sillä se on tarpeellista ainoastaan puiselle biomassalle sekä monivuotisille viljoille eikä näin ollen vaatinut huomioimista perunanviljelyn yhteydessä (Heusala, et al. 2025). Yhtälön 4 ensimmäisen parametrin voitiin näin ollen jättää huomioimatta, jolloin taulukossa 8 listatut parametrit ja niiden arvot ovat ne, joilla laskenta suoritettiin.

Taulukko 8. Viljelysmaana pysyneellä maalla tapahtuvan orgaanisen hiilen nettomuutoksen (ΔC_{pys}) laskennassa käytetyt parametrit ja niiden arvot. Laskenta on tehty yhtälön 4 mukaisesti.

Parametri	Arvo	Yksikkö	Parametrin arvon lähde
A_{min}	0,9967	-	Primäärilähde
$\Delta SOC_{pys,min}$	-176	kg C/ha/a	(Heusala, et al. 2025)
A_{org}	0,0033	-	Primäärilähde
$\Delta SOC_{pys,org}$	-6550	kg C/ha/a	(Heusala, et al. 2025)

ΔC_{pys} arvoksi saatiin -197,0 kg C/ha/a yhden desimaalin tarkkuudella. Näiden tietojen avulla voitiin laskea koko viljelysmaan LULUC-päästöt yhtälön 1 mukaisesti taulukon 15 parametrein.

Taulukko 9. Viljelysmaan maankäytön ja maankäytön muutosten ($LULUC_{viljelysmaa}$) laskennassa käytetyt parametrit ja niiden arvot. Laskenta tehtiin yhtälön 1 mukaisesti.

Parametri	Arvo	Yksikkö	Parametrin arvon lähde
$\mathbf{A_{muunn}}$	0,0258	-	Primäärilähde
$\mathbf{\Delta C_{muunn}}$	-1521,7	kg C/ha/a	Yhtälö 2
$\mathbf{A_{pys}}$	0,9742	-	Primäärilähde
$\mathbf{\Delta C_{pys}}$	-197,0	kg C/ha/a	Yhtälö 4
$\mathbf{LULUC_{CH4}}$	0	kg CH_4/ha/a	(Heusala, et al. 2025)

Laskuissa käytetyt arvot, joiden lähteenä toimi Luken ohjeistus (Heusala, et al. 2025), haettiin ohjeistuksen liitteen 1 taulukosta 1.3, joka perustuu Tilastokeskuksen vuoden 2024 tietoihin.

5. TULOKSET JA TULOSTEN TULKINTA

Tässä luvussa vertaillaan Biocoden ja Cool Farm Toolin metodologisia taustoja (5.1), esitellään viljelyvaiheen hiilijalanjälkitulokset tärkkelysperunalle kummallakin laskentaohjelmalla laskettuna (5.2), ja vertaillaan niitä kirjallisuuteen sekä toisiinsa ja analysoidaan merkittävimpiä tekijöitä ja eroja tuloksissa ja niiden taustalla (5.3). Lisäksi esitellään LULUC-laskennan tulokset, vertaillaan niitä kirjallisuuteen ja analysoidaan merkittävimpiä tekijöitä ja eroja tulosten taustalla ja suhteessa taulukkoarvoihin (5.4).

5.1 Cool Farm Toolin ja Biocoden metodologinen vertailu

Tässä alaluvussa CFT:n ja Biocoden metodologiaa vertaillaan toisiinsa sekä suhteessa LCA- ja hiilijalanjälkistandardeihin sekä Luonnonvarakeskuksen ruoka-LCA-ohjeistukseen.

5.1.1 Laskentaohjelmien vertailu suhteessa LCA-standardeihin

Hiilijalanjälkilaskentaa toteutetaan tyypillisesti kansainvälisten LCA-standardien ISO 14040/44/67 puitteissa. Datan keräämisen ja laskennan lisäksi kokonaiseen LCA-tutkimukseen kuuluu tavoitteen ja soveltamisalan määrittelyä, johon lukeutuu muun muassa vaikutusluokkien ja funktionaalisen yksikön määrittely ja allokointimenetelmien kuvaus, sekä tulosten tulkintaa, johon kuuluu muun muassa herkkyysanalyysi tai epävarmuusarvio (ISO 14040:2006; ISO 14044:2006). Biocoden ja CFT:n laskenta pohjautuukin pääosin standardien puitteisiin, mutta koska kumpikaan ei ole puhtaasti LCA-työkalu, on LCA:n muiden vaiheiden toteuttamisessa joitain puutteita. (Biocode, 2025a; Cool Farm Tool, 2025a)

Molemmilta yrityksiltä on saatavissa metodologiadokumentti, joista CFT pitää omaansa sivustollaan julkisena ja Biocodelta sen saa pyydettäessä. Näiden dokumenttien avulla laskennan vaiheet ovat jäljitettävissä, joskin kaikkia päästökertoimia ei välttämättä löydy suoraan. CFT on listannut päästökertoimiensa lähteet metodologiadokumentissaan, kun taas Biocodelta tiedot eivät löydy suoraan dokumentista, mutta toimitetaan pyydettäessä. (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024)

ISO 14067 vaatii fossiiliset ja LULUC-päästöt erikseen ilmoitettuna, ja vahvasti suosittelee myös biogeenisten päästöjen erottelua tulosten raportoinnissa (ISO 14067:2018). Luken ohjeistus tarkentaa hiilijalanjälkistandardin suositusta biogeenisten päästöjen erottelusta vaatimukseksi maataloustuotteiden kohdalla (Heusala et al.,

2025). Biocode ilmoittaa fossiiliset ja maankäytön päästöt erikseen mutta biogeeniset päästöt eivät sisälly laskentaan, kun taas CFT ei jaottele tulosten raportoinnissaan päästöjä lainkaan näihin kategorioihin, vaan ilmoittaa päästöt kokonaisuudessaan sekä viljelyn eri toimintojen kesken (Biocode, 2025a; Cool Farm Tool, 2025a). CFT:n tuloksissa kuitenkin on maaperä/lannoitteet sekä hiilivarastot -kohdat, jotka sisältävät maankäytön ja maankäytön muutosten päästöjä.

Molemmat työkalut perustavat laskentansa pääosin IPCC:n periaatteisiin täydentäen kumpikin sisäisen ja Biocoden kohdalla myös Luken tutkimustietojen perusteella. Karakterisointitekijät esimerkiksi liittyen typpioksiduulipäästöjen arviointiin perustuvat IPCC:iin ja päästökertoimet ovat yleisesti hyväksytyistä lähteistä (taulukko 11). (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024)

Allokointimenetelmistä Luke ohjeistaa standardin ISO 14040 (2006) mukaisesti niin, että mahdollisuuksien mukaan ensisijaisesti tulee käyttää osittamista allokoinnin välttämiseksi. Jos osittaminen ei ole mahdollista, allokointimenetelmien hierarkia on ensin fyysisen suhteen mukaan ja sitten jonkin muun, kuten taloudellisen, suhteen mukaan. (Heusala et al., 2025) Sekä Biocode että Cool Farm Tool ilmoittavat käyttävänsä tarvittaessa taloudellisia allokointiperusteita (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024).

Tulosten tulkintaa, herkkyysanalyysiä tai epävarmuusarviota ei työkalujen näissä versioissa ole saatavilla. Raportoinnista yleisissä LCA-standardeissa (ISO 14040/44) vaaditaan muunmuassa tiedot päätöksistä, valinnoista ja rajauksista, kuvaus tietojen laadusta sekä suhde elinkaari-inventaarion tuloksiin (ISO 14040:2006; ISO 14044:2006), jota tämän kaltaisissa laskentaohjelmissa, jotka eivät varsinaisesti ole LCA-työkaluja, ei löydy. Taulukossa 10 on listattuna edellä kuvaillut LCA- ja hiilijalanjälkistandardien ISO 14040, 14044 sekä 14067 pääpointit, ja miten työkalut suhtetuvat niihin.

Taulukko 10. Laskentatyökalujen vertautuminen ISO 14040, 14044 ja 14067 standardien vaatimuksiin.

ISO 14040/44/67 periaatteet (ISO 14040:2006; ISO 14044:2006; ISO 14067:2018)	Biocode (Biocode, 2025b)	Cool Farm Tool (Cool Farm Alliance, 2024)
Vaikutusluokka ja funktionaalinen yksikkö määritelty	kyllä	kyllä
Datan, esim. päästökertoimien, läpinäkyvyys, dokumentointi, jäljitettävyys	kyllä	kyllä
Johdonmukaisuus ja vertailukelpoisuus	kyllä	kyllä
Dokumentoitu metodologia	kyllä	kyllä
Fossiiliset, biogeeniset ja LULUC-päästöt sisällytetty	ei	ei
Erikseen ilmoitettu fossiilinen ja LULUC-päästö	kyllä	ei
Karakterisointitekijät perustuu IPCC:iin	kyllä	kyllä
Allokointimenetelmä kuvattu	kyllä	kyllä
Tulosten tulkinta, herkkyysanalyysi tai epävarmuusarvio tehty	ei	ei
Tulosten ohjeiden mukainen raportointi	ei	ei

Koska kyseessä eivät ole varsinaisesti LCA-työkalut, kumpikaan ohjelma ei täysin kata standardien tai Luken ohjeistuksen vaatimuksia päästöjen sisällyttämisen ja raportoinnin eikä muiden itse laskentaa ennen ja jälkeen tapahtuvien vaiheiden suhteen. Molempia on kuitenkin mahdollista käyttää LCA-tutkimuksen osana, jos itse määrittelee tutkimuksen laajuuden ja tavoitteet, suorittaa epävarmuusarvioinnin sekä raportoi tulokset ohjeiden mukaisesti. LCA-standardit ovat yleisiä ohjeita ja näin ollen vaativat soveltamista eri aloille, eikä pääpiirteittäin työkalujen laskennassa ole juuri puutteita näihin standardeihin nähden. Standardien noudattamisen näkökulmasta eroja työkalujen välillä ei juuri ole, ainoastaan Biocoden tarkempi päästöjen raportointi eri päästökategorioihin.

CFT päivittyi kesällä 2025 Cool Farm Platform 3.0 (CFP) -versioon, jolle haetaan verifiointia ISO 14067 standardia vastaan. Tähän versioon on muun muassa lisätty epävarmuusanalyysi osaan kategorioista. (Cool Farm Tool, 2025b) Biocode sen sijaan on kehittänyt uutta laskentaohjelmaa Luonnonvarakeskuksen kanssa, jonka metodologia on lähempänä Luonnonvarakeskuksen ohjeistusta (Biocode, 2025c).

5.1.2 Laskennan laajuus, metodit ja päästökertoimet ohjelmien taustalla

Hiilijalanjäljen laskemista ohjeistavassa ISO 14067 (2018) -standardissa edellytetään käyttämään paikkakohtaista tietoa prosesseille, jotka ovat selvitystä suorittavan organisaation hallinnassa ja kehotetaan käyttämään myös tärkeimmissä prosesseissa. Jos paikkakohtaisten tietojen kerääminen ei ole käytännöllistä, voi käyttää muita primääritietoja. Jos tämä ei ole käytännöllistä tai prosessin merkitys on vähäinen, voidaan käyttää sekundääritietoja tiedot perustellen ja dokumentoiden. Tähän perustuu myös Luken ruoka-LCA-ohjeistus, jonka lisäksi se ohjaa tarkemmin datan laadun arviointia eri menetelmin (Heusala et al., 2025). Luke ohjeistaa sisällyttämään viljelyn päästöjä mallinnettaessa ainakin tarvittavat panokset, kuten lannoitteet, kalkki, siemenperuna ja energia, tuotannon, peltotyöt ja koneiden käytön, viljelysjätteet sekä LULUC-päästöt (Heusala et al., 2025).

Kuten taulukosta 5 nähdään, työkalut kattavat edellä luetellut Luken minimivaatimukset sen suhteen, mitä tietoja viljelystä on mahdollista lisätä kuhunkin työkaluun, jonka lisäksi molemmissa kysytään mm. marginaalisempaa tietoa kasteluveden määrästä ja alkuperästä ja CFT:ssa lisäksi kastelutavoista. Biocodessa pellolle jätettävän viljelyjätteen määrä kysytään liittyen maaperän päästöjen laskentaan, mutta tarkemmin viljelyjätteiden käsittelyä ei oteta huomioon. Lannoitteiden ja kasvinsuojeluaineiden määrät kysytään molemmissa laskentaohjelmissa, jonka lisäksi selvitetään lannoitteiden tyyppi, jossa olennaisin tieto päästöjen kannalta on, onko lannoite orgaaninen vai ei. Näiden tietojen lisäksi CFT tarkentaa lannoitteen hankinnan alkuperäaluetta, jonka mukaan valitaan päästökertoimet lannoitteiden valmistuksen päästöjen laskentaan. Lisäksi molempiin on syötettävissä peltotöiden polttoainekulutus, jonka Biocodessa voi syöttää ainoastaan suoraan lukuna ja CFT:ssa myös erillisinä peltotyötapahtumina, joista työkalu laskee kulutuksen ja päästöt. CFT:ssa on myös mahdollista valita eri polttoaineita, kun taas Biocodessa kaikki kuuluvat samaan ”polttoaine”-kategoriaan. (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024) Kummallakin työkalulla on mahdollista laskea aiemmin todetusti LCA-standardien mukaisia sekä Luken ruoka-LCA-ohjeistuksen mukaisia viljelyn aktiviteetteja.

Niin Luken ohjeistus kuin tutkittavat työkalut käyttävät pohjanaan IPCC-metodologioita, eli muunmuassa ilmastonlämmitysvaikutus noudattaa GWP 100 -metodia ja typpioksiduulipäästöt mallinnetaan IPCC:n vuoden 2019 täydennys vuoden 2006 kasvihuonekaasuinventaarioiden ohjeeseen osan 4 luvun 11 periaatteiden mukaisesti (IPCC, 2019a). Pääosin työkalut sekä Luken ohjeistus käyttävät Tier 1 metodeita laskennassaan, mutta Biocode mallintaa typpioksiduulipäästöt Tier 2 metodilla (Biocode,

2025c; Cool Farm Alliance, 2024; Heusala et al., 2025). Molempien työkalujen taustalla on myös omaa tutkimusta, esimerkiksi CFT:n siemenperunan hiilijalanjälkilaskenta perustuu heidän omaan tutkimukseensa (taulukko 11).

Viljelyn aktiviteetit muutetaan kasvihuonekaasupäästöiksi päästökertoimien avulla, joihin pätee edellämainitut ISO 14067 -standardin ja Luken tiedon laatuvaatimukset. Koska Biocode on suomalainen laskentaohjelma, käyttää se esimerkiksi energiankulutuksen osalta kansallisia lähteitä, kuten Tilastokeskusta, ja muissa kohdissa Ecoinventiä tai IPCC:n kertoimia. Cool Farm Toolin lähteet päästökertoimille ovat kansainvälisistä tietokannoista ja lähteistä, jolloin päästökertoimet ei ole välttämättä paikkakohtaista. CFT:n käyttämät lähteet päästökertoimille ovat kuitenkin yleisesti käytettyjä ja hyväksyttäviä, kuten IPCC, Fertilizer Europe, World Food LCA Database sekä UK Department for Environment, Food and Rural Affairs. (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024) Metodit ja päästökertoimet eri toimintojen kohdalla on koottu taulukkoon 11.

Taulukko 11. Biocoden ja Cool Farm Toolin käyttämät metodit ja päästökertoimet viljelyn toiminnoille.

	Biocode		**Cool Farm Tool**	
	Metodi	Päästökerroin	Metodi	Päästökerroin
GWP	IPCC 2019	AR6	IPCC 2019	AR6
Lannoitetuotanto	ISO 14067:2018 Kehdosta portille	Fosfori: Ecoinvent 3.7.1, 2021, Global Typpi: Yara 2021	ISO 14067:2018 Kehdosta portille	Fertilizers Europe
Suorat N2O	IPCC 2019 Tier 2	IPCC 2019 (Vol.4 luku 11)	IPCC 2019 Tier 1	IPCC 2019 (Vol. 4 luku 11)
Epäsuorat N2O	IPCC 2019 Tier 1	IPCC 2019 (Vol.4 luku 11)	IPCC 2019 Tier 1	IPCC 2019 (Vol. 4 luku 11)
Kasvinsuojelu	IPCC 2019	Ecoinvent 3.8.1, 2021, Europe; International Chemical Safety Cards (ICISC) - tietokanta (ILO), 2022, Global	-	WFLDB – ”pesticide factors”
Kylvösiemen	ISO 14067:2018	Ecoinvent 3.7.1, GFLI 2020	Haverkort, 2011	Haverkort, 2011
Peltotyöt	ISO 14067:2018	Tilastokeskus polttoaineluokitus 2021-2025	Kaivosta tankkiin	Energia: DEFRA 2021 Koneet: ÖKL Sähkö: IEA 2019

CFP 3.0:ssa päästökertoimia on päivitetty uudempiin esimerkiksi energiankäytön sekä lannoitteiden osalta sekä metodologian päivittämiseen siementuotantoon liittyen. Näiden lisäksi myös viljelysjätteiden päästökertoimia ollaan päivitetty uuteen versioon. (Cool Farm Alliance, 2025)

Työkaluilla on mahdollista noudattaa Luken ohjeistusta paikkakohtaisen tiedon syöttämisestä laskentaan, jos laskija pystyy tiedot toimittamaan. Vaikka kaikki päästökertoimet eivät välttämättä ole paikallisia, ovat ne yleisesti LCA-laskentaan hyväksytyistä lähteistä. Metodologian suhteen suuria eroja ei laskentaohjelmien välillä ole, mutta päästökertoimien lähteet ovat pääosin erit Biocoden lähteiden ollessa myös osittain kansallisia, kuten Tilastokeskus.

5.1.3 Laskentaohjelmien LULUC-päästöjen arvioiminen

Luken ohjeistuksen pääteemoihin kuuluu LULUC-päästöjen laskennan ohjeistaminen. Sen pääpiirteet on koottu taulukkoon 7, jossa vertailtavina ovat Biocoden ja Cool Farm Toolin LULUC-päästöjen laskentaa. Luke edellyttää, että LULUC-laskentaan käytettävien päästökertoimien lähteinä hyödynnetään Kioton pöytäkirjan mukaisia kansallisia kasvihuonekaasuinventaarioita, kuten Tilastokeskusta Suomessa (Heusala et al., 2025). Kumpikaan laskentaohjelmista eivät käytä kansallisia lähteitä, vaan perustavat laskentansa kansainvälisiin IPCC:n raportteihin, joista myös päästökertoimet laskentaan on noudettu. IPCC:n päästökertoimet johdetaan kuitenkin alueellisesti ilmastovyöhykkeiden mukaisesti ja ovat näin ollen kelpo lähteitä päästökertoimilla, vaikka täysin paikkakohtaisesta tiedosta ei olekaan kyse. (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024)

IPCC:n lähteistä on kaikkien kohdalla johdettu myös pysyvän ja muunnetun maan kategoriat sekä maankäyttöluokat, mutta Biocode olettaa arvioitavien peltojen olevan vähintään 20 vuotta vanhoja, eli muunnetun maan hiilivaraston laskenta jää työkalusta pois. Biocode kuitenkin kysyy laskelmia tehdessä, onko pelto raivattu viimeisen 20 vuoden aikana, mutta tämä ei vaikuta laskentaan. Tästä kysytään, jotta Biocode voi kerätä aiheesta dataa ja mahollisesti kehittää työkaluaan jatkossa, jos sille on tarvetta. Kuitenkin, IPCC:n määritelmää hiilitasapainon saavuttamisesta 20 vuoden kuluessa sovelletaan, kun lasketaan mineraalimaiden aiheuttamia päästöjä. Ja vaikka pellon ikää ei oteta laskennassa huomioon, Biocode huomioi nykyisten ja aiempien viljelytapojen muutokset sekä hiilen syötön osana hiilijalanjälkeä, jos kyseessä on mineraalimaa. (Biocode, 2025b) CFT sen sijaan huomioi laskennassaan niin maankäytön, maanmuokkauksen kuin hiilen syötön muutokset viimeisen 20 vuoden aikana. Jos esimerkiksi pelto on muutettu toisesta maankäyttöluokasta edellisen 20 vuoden aikana, hiilijalanjälki on suurempi. (Cool Farm Alliance, 2024)

Biocodella maaperän orgaanisen aineksen päästöjen laskenta onnistuu, kun maaperän orgaanisen aineksen (SOM, engl. Soil Organic Matter) osuus on noin välillä 0–19 % tai 35 % tai enemmän. Välillä 20–34 % työkalu ilmoittaa multamaiden päästölaskennan olevan vielä tutkintavaiheessa ja laskennan päivittyvän tulevaisuudessa. (SOC:ksi muutettuna luvut, joissa laskenta onnistuu ovat noin välillä 0–11 % ja 20 % tai enemmän.) Mineraalimaille laskenta toteutetaan erikseen IPCC:n vuoden 2019 täydennys vuoden 2006 ohjeistukseen – Osa 4, luku 2 (IPCC, 2019b) mukaisesti, kun orgaanisille maille käytetään IPCC 2013 (IPCC, 2014) dokumentista haettua kerrointa boreaalisen ja lauhkean ilmastovyöhykkeen ojitetulle orgaaniselle viljelysmaalle. Lisäksi

Biocode olettaa laskennassaan Luken tutkimusten mukaisesti, että säädelty pellon kuivatus vähentää orgaanisten maiden päästöjä. (Biocode, 2025b) Niin ikään CFT:n osalta orgaanisten maiden käsittely on puutteelinen. CFT ei mahdollista orgaanisilla mailla viljeltävien kasvien päästöjen laskentaa, sillä maaperän orgaanisen hiilen SOC:n yläraja on rajoitettu 12 prosenttiin, joka vastaa SOM:n 20,6 prosenttia. Mineraalimaiden päästöaskenta toteutuu kuitenkin CFT:ssä samalla tavalla kuin Biocoden mineraalimaiden laskenta. Kuten taulukko 12 esittää, päästöihin huomioitavien hiilivarastojen valinnassa molemmat laskentaohjelmat poikkeavat osin Luken ohjeistuksesta. (Cool Farm Alliance, 2024)

Taulukko 12. Luonnonvarakeskuksen ohjeistuksen LULUC-päästöjen laskennan vaatimusten vertailu Biocoden ja Cool Farm Toolin metodologiaan.

	Luonnonvarakeskuksen vaatimukset (Heusala et al., 2025; Lehtilä et al., 2025)	**Biocode (Biocode, 2025b)**	**Cool Farm Tool (Cool Farm Alliance, 2024)**
LULUC päästökertoimet	Kyoton pöytäkirjan kansalliset khk-inventaariot, esim. Tilastokeskus	ei, (IPCC, 2019c, 2014)	ei, (IPCC, 2019b, 2019c)
Maankäytön muutos	IPCC kategoriat: Pysyvä maa – pysynyt väh. 20 v. Muunnettu maa – muunnettu viim. 20 v. aikana toisesta maan-käyttöluokasta Laskenta erikseen	ei	kyllä
Maaperän tyyppi	Mineraalimaa < 20 % orgaanista hiiltä Orgaaninen maa > 20 % orgaanista hiiltä	laskenta välillä SOC 0–11% ja 20% <	ei, laskenta vain SOC < 12%
Huomioitavat hiilivarastot, pysyvä maa	SOC mineraalimaa, SOC orgaaninen maa, elävä biomassa	SOC min, SOC org	SOC min
Huomioitavat hiilivarastot, muunnettu maa	SOC mineraalimaa, SOC orgaaninen maa, elävä biomassa, kuollut orgaaninen aines	ei laskentaa muunnetulle maalle	SOC min, metsän biomassa

SOC = Soil Organic Carbon (Maaperän orgaaninen hiili), min = mineraalimaa, org = orgaaninen maa

LULUC-päästöjen laskennassa molemmat tarkastellut työkalut keskittyvät ensisijaisesti mineraalimaiden päästöjen arviointiin, mutta laskentaperusteissa on puutteita korkeamman orgaanisen aineksen omaavien maiden käsittelyssä. Biocoden merkittävä eroavaisuus verrattuna sekä Luken ohjeistukseen että Cool Farm Tooliin on oletus, jonka mukaan kaikki pellot ovat olleet viljelykäytössä vähintään 20 vuoden ajan. Tämä oletus sulkee kokonaan pois muunnetun maan hiilivarastojen muutosten huomioimisen

laskennassa. Edellä mainittua eroavaisuutta lukuunottamatta maaperäpäästöihin liittyvien toimintojen osalta molemmat työkalut huomioivat mineraalimailla samat asiat eli viljelytoimintojen ja hiilen syötön aiheuttamat hiilivarastojen muutokset. (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024)

5.2 Tärkkelysperunan viljelyvaiheen hiilijalanjälkilaskennan tulokset

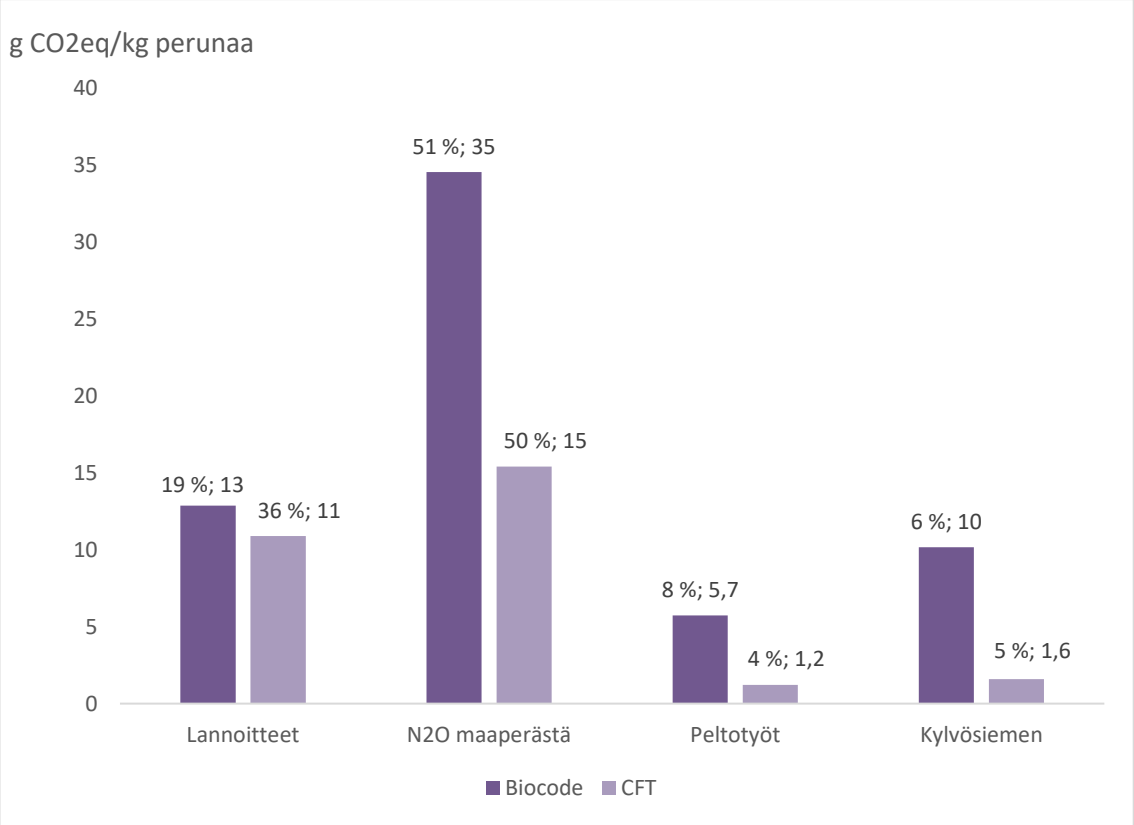
CFT:n kokonaishiilijalanjälki on 0,031 kg CO_2 eq./kg perunaa, kun taas Biocoden vastaava arvo on 0,068 kg CO_2 eq./kg perunaa, eli 31 g ja 68 g CO_2 eq./kg perunaa (taulukko 13). Biocoden tulos on siten noin 2,2-kertainen verrattuna CFT:n arvioon. Suurimmat erot työkalujen välillä ilmenevät kylvösiemenen ja peltotöiden hiilijalanjälkien kohdalla. Kylvösiemenen keskimääräinen hiilijalanjälki on Biocodella noin kuusinkertainen ja peltotöiden nelinkertainen verrattuna CFT:n tuloksiin. Sen sijaan lannoitteiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt ovat molemmissa työkaluissa samankaltaisia, Biocoden arvion ollessa vain 1,3-kertainen CFT:iin nähden. Tulosten raportoinnissa maaperän typpioksiduulipäästöihin sisällytetään ne päästöt, jotka aiheutuvat orgaanisen aineksen ja typpilannoitteiden vuorovaikutuksesta maaperän mikrobien kanssa.

Biocoden tuloksissa on myös järjestäen suurempi hajonta kaikissa tuloksissa, kun vertaillaan kaikkien lohkojen tuloksista laskettuja keskihajontoja, mikä osittain liittyy myös suurempiin tuloksiin (taulukko 13). Suhteessa hiilijalanjälkiin, hajonnat ovat työkaluilla samaa suuruusluokkaa, paitsi peltotöiden kohdalla, jossa Biocoden hajonta on selvästi suurempi sekä kasvinsuojelun ja siemenperunan kohdalla, jossa taas CFT:n hajonta suhteessa tulokseen on huomattavasti suurempi. Pienin ero työkalujen välillä on lannoitteiden keskihajonnassa, jotka myös keskimääräisissä tuloksissa ovat lähimpänä toisiaan.

Taulukko 13. Vuoden 2024 tutkitun alueen 24:n tilan keskiarvoiset hiilijalanjäljet sekä keskihajonnat toimintoja kohden Cool Farm Toolilla sekä Biocodella laskettuna yksikössä g CO_2 eq/kg perunaa.

g CO_2 eq/kg perunaa	Kokonais-hiilijalanjälki	Lannoite	Peltotyöt	Kasvin-suojelu	Kylvö-siemen	Maaperän N_2O
CFT	31	11	1,2	1,5	1,6	15
keski-hajonta	8,77	3,10	0,27	1,05	1,76	4,60
Biocode	67	13	5,7	4,1	10	35
keski-hajonta	12,5	3,13	2,44	1,91	2,20	6,81

Kuva 4 esittää päästöjen jakautumista eri toimintojen kesken Biocodella ja CFT:lla lasketuissa keskiarvoisissa tuloksissa. Molemmissa tapauksissa maaperän typpioksiduulipäästöt kattavat noin puolet päästöistä, lannoitteet Biocodella 19 % ja CFT:lla 36 %, kylvösiemen Biocodella 15 % ja CFT:lla 5 %, peltotyöt Biocodella 8 % ja CFT:lla 4 % ja kasvinsuojelu Biocodella 6 % ja CFT:lla 5 %.



Kuva 4. Tutkitun alueen 24:n tilan keskiarvoisen hiilijalanjäljen jakautuminen viljelytoimintojen kesken Biocodella sekä Cool Farm Toolilla laskettuna. Prosenttiluku kertoo kunkin toiminnon osuuden kokonaishiilijalanjäljestä ja toinen luku kyseisen toiminnon hiilijalanjäljen yksikössä g CO_2eq/kg perunaa.

Taulukko 14 esittää molempien laskentaohjelmien tuloksista ne lohkot, joiden hiilijalanjälki perunakiloa kohden oli pienin ja suurin. Nämä tulokset ovat kaikki eri lohkoista, eli suurimmat tulokset saadaan eri lohkoilta CFT:lla ja Biocodella samoin kuin pienimmät. CFT:lla lasketut kokonaishiilijalanjäljet sekä toimintoihin kohdistetut hiilijalanjäljet ovat pienemmät kaikissa tapauksissa verrattuna Biocodeen. Erityisen suuria eroja tuottavat järjestelmien antamat tulokset kylvösiemenen sekä peltotöiden hiilijalanjäljille. Esimerkiksi lohkon 20 kylvösiemenen hiilijalanjälki on Biocodella 53-kertainen CFT:iin verrattuna ja lohkon 64 yli 18-kertainen.

Taulukko 14. Hiilijalanjälkituloksien maksimi- ja minimilohkot Cool Farm Toolilla sekä Biocodella yksikössä g CO_2 eq/kg perunaa. Suluissa oleva luku ilmoittaa kyseisen lohkon vastaavan hiilijalanjälkituloksen toisella työkalulla laskettuna.

[g CO_2 eq/kg perunaa] Lohko	Kokonais-hiili-jalanjälki	Lannoite	Peltotyöt	Kasvin-suojelu	Kylvö-siemen	Maaperän N_2O
6: CFT max (Biocode)	61 (110)	21 (25)	2,0 (12)	1,2 (3,3)	9,1 (16)	28 (52)
64: Biocode max (CFT)	115 (32)	19 (10)	10 (1,2)	7,2 (1,9)	17 (0,90)	62 (17)
20: CFT min (Biocode)	9,2 (57)	2,6 (11)	0,93 (5,2)	1,1 (3,8)	0,12 (6,5)	4,4 (31)
11: Biocode min (CFT)	46 (28)	11 (9,6)	2,1 (1,2)	3,0 (1,3)	9,7 (0,95)	20 (15)

Seuraavassa alaluvussa pureudutaan tarkemmin edellä esitettyihin tuloksiin sekä vertaillaan niitä niin kirjallisuuteen kuin toistensa kanssa.

5.3 Tärkkelysperunan viljelyvaiheen hiilijalanjälkilaskennan tulosten tulkinta

Tässä alaluvussa vertaillaan edellisessä alaluvussa 5.2 esiteltyjä tärkkelysperunan hiilijalanjälkilaskennan tuloksia kirjallisuuden hiilijalanjälkiin (5.3.1) ja vertaillaan Biocoden ja CFT:n tulosten eroja ja syitä erojen taustalla (5.3.2). Vertailua toteutetaan kokonaishiilijalanjäljen sekä viljelyn vaiheiden välillä.

5.3.1 Tulosten vertailu kirjallisuuteen

Tulokset 31 g CO_2 eq/kg perunaa ja 68 g CO_2 eq/kg perunaa ovat molemmat pienemmät, mitä tyypillisesti kirjallisuudessa perunan tai tärkkelysperunan hiilijalanjäljet ovat.

Luvussa 2.1 vertaillaan kirjallisuuden arvoja perunan viljelyvaiheen hiilijalanjäljelle (taulukko 1), joita tässä luvussa verrataan tutkitun alueen tärkkelysperunan viljelyvaiheen hiilijalanjälkituloksiin. Lisäksi vertaillaan SimaPro-mallinnukseen, josta viljelyvaiheen hiilijalanjäljeksi saatiin 0,109 kg CO_2 eq/kg perunaa eli 109 g CO_2eq/kg perunaa.

Taulukon 1 arvoista ainoastaan Potwellin tutkimuksessa kyseisen yrityksen oman ruokaperunatuotteen viljelyn hiilijalanjälki arvioidaan pienemmäksi (48 g CO_2eq/kg perunaa) kuin tässä työssä saadut tulokset. Potwell kertoo laskevansa mukaan LULUC-päästöt, mutta viljelyn tapahtuvan mineraalimailla, jolloin maaperäpäästöt ovat pienet. Laskenta tehdään PEF:n mukaisesti, mutta tarkemmin laskennan vaiheista tai oletuksista Potwell ei raportoi. (Potwell, n.d.) Lähellä saatuja tuloksia on Haverkortin (2011) tutkimus, jossa laskettiin tärkkelysperunan hiilijalanjäljeksi 69 g CO_2eq/kg perunaa. Tutkimuksen ovat tehneet Cool Farm Toolin kehittäjät ja tässä tutkimuksessa on testattu CFT:n ensimmäistä mallia, joten metodit ovat hyvin lähellä tämän työn tutkimusta. Mutta, kuten luvussa 2.1 on todettu, tutkimuksessa on pieni hollantilainen otos, jolloin todennäköisesti syötetiedoissa on eroa tämän työn tutkimukseen nähden.

Työssä esitellyissä suomalaiselle ruokaperunalle tehdyissä tutkimuksissa tulokset olivat suurempia: 85 g CO_2eq/kg perunaa Pulkkisen et al. (2012b) ja 153 g CO_2eq/kg perunaa Carbon Cloudin (2025) toimesta (taulukko 1). Kuten luvussa 2.1 on mainittu, Carbon Cloudin syötetiedot eroavat huomattavasti, kun peltotöihin käytetty polttoainemäärä on suuri ja siemenperunaa ei huomioida lainkaan. Tarkempaan vertailuun tämän työn tulosten kanssa on valittu Haverkort (2011), Carbon Cloud (2025) sekä SimaPro, sillä ne tarjoavat tarkimmat tiedot eri vaiheiden hiilijalanjäljistä.

Lähes kaikilla vertailtavilla suurin osuus päästöistä aiheutuu maaperän typpioksiduulipäästöistä. Haverkort, Carbon Cloud (CC), SimaPro ja Biocode asettuvat typpioksiduulin hiilijalanjäljessä 32:n g CO_2eq/kg perunaa ja 36:n g CO_2eq/kg perunaa välille, kun taas CFT:n 16 g CO_2eq/kg perunaa on puolet pienempi verrattuna muihin (kuva 5). CFT:n muita pienempää typpioksiduulipäästöä analysoidaan tarkemmin luvussa 5.3.2.

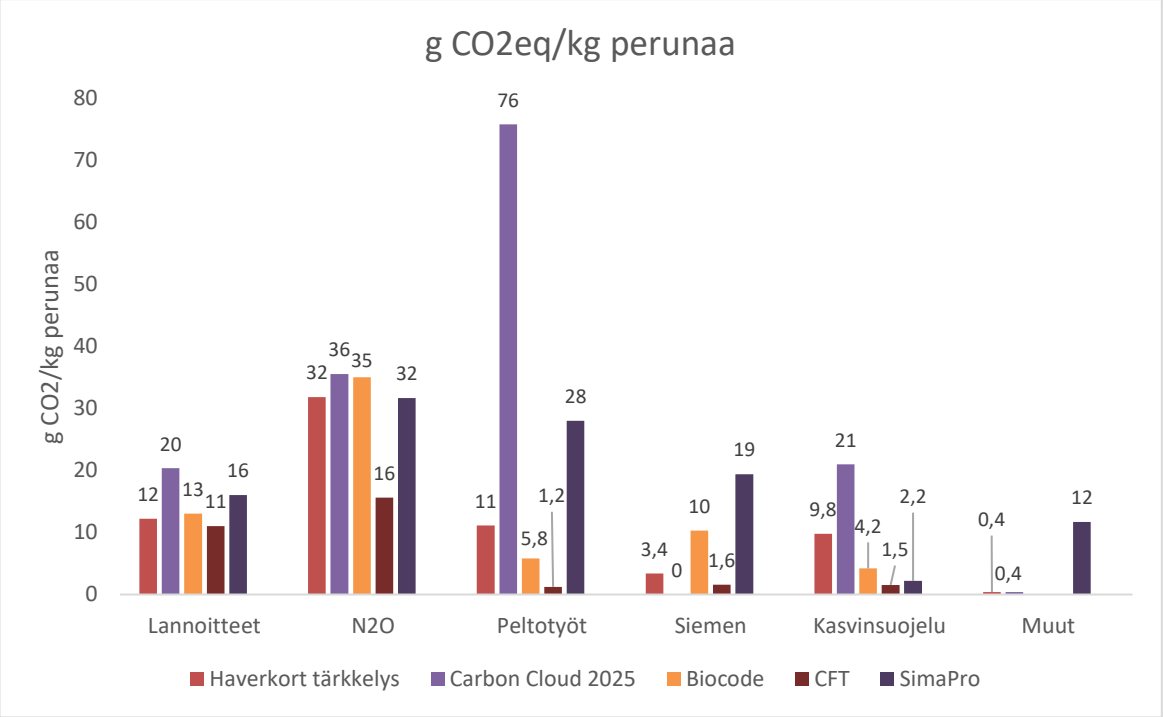
Seuraavaksi suurin päästöjen lähde on sekä Haverkortin tutkimuksessa että molempien laskentaohjelmien tapauksessa lannoitteiden valmistuksen päästöt, jotka seuraavilla ovat hyvin samaa suuruusluokkaa 11 g CO_2eq/kg perunaa CFT:lla, 12 g CO_2eq/kg perunaa Haverkortilla ja 13 g CO_2eq/kg perunaa Biocodella. Sen sijaan CC:n tulos on selvästi suurempi, 20 g CO_2eq/kg perunaa, vaikka sen ilmoittama lannoitteen määrä syötetiedoissa on suunnilleen samaa suuruusluokkaa muiden kanssa (kuva 5). Kuitenkin Haverkort (2011) syötetiedoissa typpilannoitteesta suurempi osa oli orgaanista kun taas CC:llä (Carbon Cloud, 2025) synteettistä, mikä kasvattaa typpilannoitteen valmistuksen päästöjä CC:n tapauksessa. Näiden tulosten väliin asettuu SimaPro, jonka lannoitteiden valmistuksen päästöt ovat 16 g CO_2eq/kg perunaa. Agrifootprint-tietokannassa lannoitustasot ovat samaa suuruusluokkaa kuin muilla: hieman pienemmät kuin CC:n tutkimuksessa ja hieman suuremmat kuin Haverkortin (2011) tutkimuksessa.

Kun maaperän typpioksiduulipäästöt sekä lannoitteiden valmistuksen päästöt kattavat CFT:n tuloksista jo 85 %, kattavat muut toiminnot, kylvösiemen, kasvinsuojelu ja peltotyöt, loput 15 %. Nämä toiminnot kattavat CFT:lla lasketuissa tuloksissa keskenään saman suuruusluokan osuuden päästöistä, kun taas Biocoden tuloksissa siemenperuna erottuu lähes yhtä suurella osuudella (15%) kuin lannoitteet (kuva 4). Suuremmassa päässä on myös SimaPron siemenperunan hiilijalanjälki, joka kattaa noin 18 % kokonaishiilijalanjäljestä. Haverkortin (2011) tutkimuksessa taas siemenperunan osuus on noin 5 % hiilijalanjäljestä, joka on lähempänä CFT:n siemenperunan osuutta (6%). SimaPron hiilijalanjälki 19 g CO_2eq/kg perunaa siemenperunalle on absoluuttisestikin tarkasteltuna huomattavasti muita suurempi, kun Biocoden vastaava luku on 10 g CO_2eq/kg perunaa.

Molempien laskentaohjelmien tulosten perusteella peltotöiden osuus perunan kokonaishiilijalanjäljestä on selvästi pienempi kuin Haverkortin (2011) tutkimuksessa, jossa peltotyöt muodostivat kolmanneksi suurimman päästölähteen 16 %:n osuudella kokonaishiilijalanjäljestä. Merkittävin ero havaitaan kuitenkin verrattaessa tuloksia CC:n laskentaan, jossa peltotöiden päästöt olivat 76 g CO_2eq/kg perunaa eli noin puolet kokonaishiilijalanjäljestä (kuva 5). Kuten aiemmin todettiin, ero selittyy todennäköisesti syötetiedoissa käytetyn poikkeuksellisen suuren dieselin määrän vuoksi. SimaPron peltotöiden tulos (28 g CO_2eq/kg perunaa) on toiseksi suurin, mutta sekin jää huomattavasti pienemmäksi kuin CC:n vastaava arvo.

CC:n tulos kasvinsuojeluaineiden valmistuksen hiilijalanjäljelle on myös selvästi muita suurempi, kun Haverkort on puolet pienempi 9,8 g CO_2eq/kg perunaa, Biocode 4,2 g CO_2eq/kg perunaa ja CFT ainoastaan 1,5 g CO_2eq/kg perunaa. SimaPron tulos tässä kategoriassa (2,2 g CO_2eq/kg perunaa) on lähempänä laskentaohjelmien tulosta.

”Muut” -kohtaan lukeutuu kastelun hiilijalanjälki Haverkortilla ja CC:lla, joka molemmissa tutkimuksissa on sama 0,4 g CO_2eq/kg perunaa. (Carbon Cloud, 2025; Haverkort et al., 2011) Simapron osalta kyseiseen kategoriaan kuuluu muita typpipäästöjä, kuten typpimonoksidi- ja ammoniakkipäästöjä. Kaikkien vertailtavien (CFT, Biocode, Haverkort 2011, Carbon Cloud 2025) hiilijalanjäljet eri toiminnoille ovat esitettyinä kuvassa 5.



Kuva 5. CFT:n, Biocoden, Carbon Cloudin (2025) sekä Haverkortin (2011) hiilijalanjälkitulokset perunan viljelyvaiheen eri toiminnoille.

Vaikka lopputulokset eroavat vertailtavilla osalla suuresti, tarkastellessa kokonaistuloksen taakse, ovat erot osassa kategorioita kuitenkin suhteellisen pieniä. Carbon Cloudin (2025) tulos oli kaikkia muita suurempi, mutta suurin tekijä eroavaisuudessa on peltotyöt, jonka lisäksi selvää eroa on myös lannoitteiden ja kasvinsuojelun kategorioissa. Toisaalta, CFT:n tulokset ovat pienemmät kuin muilla jokaisessa kategoriassa. Eniten hajontaa kaikkien tulosten välillä on peltotöiden, siemenperunan sekä kasvinsuojelun välillä. Peltotyöt sekä kasvinsuojelu ovat kategoriat, joissa syötetiedot todennäköisesti vaihtelevat eniten ja siemenperuna taas on perunanviljelylle niin spesifi kategoria, että vakiintunutta ja yhtenäistä laskentamenetelmää ei ole vielä kehitetty.

Laskettujen tulosten vertailu kirjallisuuteen on tehtävä varauksella, koska tutkimusasetelmissa on hyvin paljon eroavaisuuksia. Käytettävä data on erilaista, koska kyseessä on eri tila eri sijainnissa, jopa eri maassa, on käytetty esimerkiksi eri määrä panoksia ja esimerkiksi sadot voivat olla erilaisia. Lisäksi, koska tutkimusta tärkkelysperunan hiilijalanjäljestä on vähän, suurimmassa osassa tutkimuksissa ollaan tutkittu ruokaperunaa tärkkelysperunan sijaan, joka tekee todennäköisemmäksi erilaisten viljelykäytäntöjen soveltamisen. Myös itse tutkimuksen rajaukset eroavat osassa tutkimuksista, ja vaikka tähän vertailuun on pyritty yhtenäistämään tuloksia mahdollisimman paljon, eroavaisuuksia voi silti olla siinä, mitä kaikkea laskennassa on

otettu huomioon ja mihin tuotantoketjun vaiheeseen mikäkin päästö on yhdistetty. Eroavaisuudet työssä laskettujen tulosten ja kirjallisuuden tulosten kanssa liittyvät joltain osalta edellämainittuihin seikkoihin ja joltain osalta käytettyyn laskentaohjelmaan ja metodiin, mutta ei ole varmaa, mitkä asiat tuovat suurimmat eroavaisuudet. Seuraavassa alaluvussa vertaillaan tässä työssä laskettuja tuloksia keskenään, jolloin saadaan esiin laskentaohjelmien eroavaisuuksia.

5.3.2 Työkalujen ja tulosten vertailu

Biocoden kokonaishiilijalanjäljen keskiarvo 68 g CO_2eq/kg perunaa on hieman yli kaksinkertainen verrattuna CFT:n kokonaishiilijalanjäljen keskiarvoon 31 g CO_2eq/kg perunaa. Kun verrataan eri toimintojen keskiarvoisia hiilijalanjälkiä, ovat lannoite, typpioksiduulipäästöt sekä kasvinsuojelu hieman alle tai yli kaksinkertaisia Biocodella laskettuna. Sen sijaan peltotöiden ja kylvösiementen hiilijalanjälkien keskiarvot ovat Biocodella huomattavasti suurempia kuin CFT:lla.

Keskimäärin Biocoden hiilijalanjälki maaperän typpioksiduulipäästöille on yli kaksi kertaa suurempi, 35 g CO_2eq/kg perunaa, kuin CFT:n 16 g CO_2eq/kg perunaa. Molemmat työkalut noudattavat sekä suorien että epäsuorien typpioksiduulipäästöjen laskennassa IPCC 2019a mukaista metodologiaa, joskin Biocode käyttää suoriin tarkempaa Tier 2 metodia ja epäsuoriin Tier 1, kun taas CFT käyttää molempiin Tier 1 metodia (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024). Tier 2 metodi on tarkempi, koska siinä on mahdollista huomioida päästökertoimet paikallisemin, käsitellä typen lähteet (lannoitteetm kasvijätteet ym.), mineraali- ja orgaanisen maan päästöt sekä pellon hallintatavat erillisinä osina laskentaa ja näin ollen saavuttaa paikkakohtaisempia tuloksia (IPCC, 2019a). Tämän työn aineistossa ei kuitenkaan ollut yhtään lohkoa, jonka multavuus ylittäisi orgaanisen maan rajan (35 %), kun maksimimultavuus oli 16 %. Lisäksi, dataa peltolohkojen viljelystavoista ja muista typen lähteistä, kuten kasvijätteistä, ei ole tähän laskentaan saatavilla. Molemmat työkalut myös ilmoittavat käyttävänsä päästökertoimia, jotka noudetaan samasta IPCC, 2019a taulukosta (11.1). Näin ollen erot Tier 1 ja Tier 2 metodien välillä häviävät eivätkä tulosten pitäisi erota merkittävästi. Osa tulosten erosta voi kuitenkin liittyä siihen, millaisia valintoja on tehty liittyen lannoitteiden syöttämiseen laskentaa tehdessä. Näitä valintoja ei kuitenkaan ole tiedossa eikä laskennan välituloksiin ja tarkempiin yksityiskohtiin ole mahdollista päästä käsiksi. Myös lohkojen typpioksiduulipäästöjen keskihajonta oli Biocodella lähes kaksi kertaa suurempi (8,1 g CO_2eq/kg perunaa) CFT:iin (4,6 g CO_2eq/kg perunaa) nähden, mikä viittaa siihen, että Biocoden laskentamalli reagoi herkemmin lohkokohtaisiin eroihin, kuten lannoitustasoihin.

Lannoitteiden valmistuksen hiilijalanjäljen eroavaisuus työkalujen välillä on pienimmästä päästä Biocoden ollessa keskimäärin 1,3-kertainen CFT:iin nähden. Biocodessa lannoitteet syötetään laskentaan vain yläkategorioittain, joita ovat kierrätystyppilannoite, lanta sekä teollinen typpi- ja fosforilannoite. Määrä ilmoitetaan typpeä per hehtaari -muodossa. CFT puolestaan tarjoaa laajemman valikoiman vaihtoehtoja, joissa voidaan määrittää myös lannoitteen lähdealue ja levitysmenetelmä. Tämä yksityiskohtaisempi syöttötapa saattaa osaltaan selittää työkalujen välisiä tuloseroja. Molemmat työkalut arvoivat lannoitteen valmistuksen päästöt kehdosta portille rajauksella, mutta käyttävät eri lähdettä päästökertoimiin (taulukko 11) (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024). Lannoitteiden päästöjen laskenta on todennäköisesti suoraviivaisempaa kuin esimerkiksi maaperäpäästöjen mallintaminen, sillä lannoitteiden osalta tiedot voidaan hakea suoremmin valmiista ja verifioiduista päästökerrointietokannoista. Tämä voi osaltaan selittää sen, että erot pysyvät pienempinä ja tasaisempina. Tätä tulkintaa tukevat myös lähes samansuuruiset keskihajonnat, 3,10 g CO_2 eq/kg perunaa (CFT) ja 3,13 g CO_2 eq/kg perunaa (Biocode), mikä viittaa siihen, että hajonta johtuu todennäköisemmin lohkokohtaisista eroista, kuten lannoitusmäärien vaihtelusta, kuin itse työkalujen välisistä eroista.

Lannoitteiden tavoin myös kasvinsuojeluaineiden valmistuksen päästölaskenta edustaa laskennan monimutkaisuuden kannalta suoraviivaisempaa osuutta. Tästä huolimatta Biocoden tulos 4,2 g CO_2 eq/kg perunaa on tässä kategoriassa keskimäärin noin kolminkertanen verrattuna CFT:n 1,5 g CO_2 eq/kg perunaa. Molemmissa työkaluissa kasvinsuojeluaineet on jaettu neljään toiminnalliseen alaluokkaan, joista CFT lisäksi erittelee aineiden käyttökohteet. Vaikka luokittelu on työkalujen välillä samankaltaisia ja laskenta suoraviivaista, tulokset poikkeavat toisistaan huomattavasti enemmän kuin lannoitteiden kohdalla. Erot selittynevät pääasiassa työkalujen hyödyntämillä päästökertoimilla, jotka on johdettu eri lähteistä ja jotka tässä tapauksessa tuottavat merkittävämpiä eroja tuloksiin. Molemmat työkalut kuitenkin tukeutuvat yleisesti luotettavina pidettyihin päästökertoimien lähteisiin, jotka on listattu taulukossa 11. Tätä päätelmää tukevat lähellä toisiaan olevat lohkojen kasvinsuojeluaineiden hiilijalanjälkien keskihajonnat 1,05 CFT:lla ja 1,91 Biocodella.

Kuten aiemmin todettu, suurimmat erot laskentatyökalujen tuloksissa liittyvät kylvösiemeneen ja peltotöihin. Edellisessä alaluvussa esitettiin, että siemenperunan osuus Biocoden laskemasta kokonaishiilijalanjäljestä on noin 15 %, mikä vaikuttaa kirjallisuuteen verrattuna poikkeuksellisen korkealta. Vastaava osuus CFT:lla on 6 %, mikä on lähempänä kirjallisuudessa raportoituja arvoja (Haverkort et al., 2011; Pulkkinen

et al., 2012a). Biocoden laskema kylvösiemenen ilmastovaikutus on keskimäärin 10 g CO_2 eq/kg perunaa, mikä on yli kuusinkertainen CFT:n vastaavaan 1,6 g CO_2 eq/kg perunaa nähden. Vaikka keskihajonnat ovat molemmissa työkaluissa samaa suuruusluokkaa (CFT 1,76 g ja Biocode 2,20 g CO_2 eq/kg perunaa), keskihajonnan suhde siemenperunan hiilijalanjäljen keskiarvoon paljastaa merkittävän eron työkalujen käyttäytymisessä. CFT:n variaatiokerroin on noin 113 %, kun taas Biocodella se on vain 22 %. Tämä tarkoittaa, että CFT:n tulokset vaihtelevat suhteellisesti huomattavasti enemmän eri lohkojen välillä, mikä viittaa suurempaan herkkyyteen syötetietojen vaihtelulle kyseisessä päästökategoriassa. Syötetietoina tähän kategoriaan toimii käytetyn siemenperunan massa ja molempien laskentaohjelmien kohdalla laskennan metodologisena taustoina toimivat työkalujen kehittäjien omat tutkimukset, jotka todennäköisesti tulevat kehittymään tulevaisuudessa. Muun muassa CFT:n vuoden 2025 päivityksessä on jo tarkennettu siemenperunan päästölaskentaa. (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2025, 2024)

Peltotöiden kohdalla Biocoden keskiarvo 5,8 g CO_2/kg perunaa on yli nelinkertainen CFT:n keskiarvoon 1,2 g CO_2/kg perunaa nähden. CFT:ssa on mahdollista syöttää suora energiankulutus esimerkiksi dieselin määränä tai lisätä erilaisia peltotöitä, joista ohjelma laskee polttoaineiden käytön. Biocodessa vaihtoehtona on ainoastaan suoran polttoainekulutuksen lisääminen. Näiden tietojen perusteella työkalut karakterisoivat päästöt kertoimien avulla, jotka tässäkin tapauksessa noudetaan eri lähteistä, Biocode kansallisesta Tilastokeskuksen lähteestä ja CFT kansainvälisestä tietokannasta (taulukko 11). (Biocode, 2025b; Cool Farm Alliance, 2024) Koska eroa on suhteellisen paljon, on päästökerrointietokannassa todennäköisesti hyvin erilaiset tiedot.

Taulukot 13 ja 14 osoittavat, että Biocode tuottaa järjestelmällisesti suurempia hiilijalanjälkilukuja kuin CFT, ja että työkalujen väliset erot vaihtelevat lohkoittain ja osa-alueittain. Etenkin kylvösiemenen, typpioksiduulin ja peltotöiden päästöissä CFT antaa merkittävästi pienempiä arvoja. Suurimmat erot työkalujen välillä kohdistuvat niihin lohkoihin, joissa CFT:n tulokset ovat keskimääräistä pienempiä. Tämä viittaa siihen, että työkalut painottavat laskennassaan eri tekijöitä tai käyttävät erisuuruisia oletuspäästökertoimia näissä kategorioissa.

Se, että minimi- ja maksimilohkot ovat työkaluilla eri lohkot, tukee tätä tulkintaa (taulukko 14). Esimerkiksi CFT:n minimilohkolla (lohko 20) Biocoden kokonaishiilijalanjälki on yli kuusinkertainen CFT:hen verrattuna. Lohkolla 20 CFT:n tulokset ovat hyvin pieniä suhteessa muihin lohkoihin sekä CFT:n keskiarvoon, mikä saattaa liittyä lohkon poikkeuksellisen korkeaan satotasoon. Koska hiilijalanjälki on ilmoitettu perunakiloa kohden, suuri sato pienentää tulosta suhteellisesti. Tämä ei kuitenkaan selitä työkalujen

välistä eroa samalla lohkolla. Suurimmat erot kyseisellä lohkolla liittyvät siemenperunan ja peltotöiden päästöihin, joiden vaihtelevuudesta edellä jo mainittiin, sekä maaperän typpioksiduulipäästöihin.

Lohkoilla, joilla CFT:n tulokset ovat suurimmat ja Biocoden pienimmät (taulukko 14: esim. CFT max: lohko 6 ja Biocode min: lohko 11), erot tasoittuvat, mutta eivät katoa. Erityisesti peltotöiden ja kylvösiementen päästöt erottuvat edelleen selvästi, mikä vahvistaa käsitystä, että työkalujen metodologiset painotukset sekä päästökertoimet eroavat näissä päästölähteissä.

Taulukossa 15 kuvattujen lohkokohtaisten panostietojen perusteella panosten suhteet satoon ovat kuitenkin samankaltaiset eri lohkoilla, vaikka taulukkoon kerätyt lohkot ovat ne, jotka ovat antaneet laskennan pienimmät ja suurimmat tulokset. Ainoastaan lohkolla 6 lannoitustaso on selvästi korkeampi, mikä näkyy molemmissa työkaluissa suurimpina lannoitteen valmistuksen päästöinä.

Lisäksi on huomionarvoista, että Biocoden laskennassa lohkolla 64 on muodostunut kasvinsuojelupäästöjä (7 g CO_2-ekv/kg perunaa), vaikka syötetietojen mukaan kasvinsuojeluaineita ei ole käytetty (taulukko 15). Syötetietojen aineisto on koottu laskennan jälkeen manuaalisesti, joten syöttövirheen mahdollisuutta lohkon 64 kasvinsuojeluaineen osalta ei voida poissulkea. Virheen mahdollisuus laskentaa suoritettaessa sen sijaan on pienempi. Virhelähde ja sen mahdolliset vaikutukset voitaisiin todeta, jos tutkimus toistettaisiin.

Taulukko 15. Taulukkoa 9 vastaavien CFT:n ja Biocoden minimi- ja maksimilohkojen pääpanokset suhteutettuna perunasatoon (lukuunottamatta siemenperunan määrää) sekä multavuus.

Lohko	Multavuus (%)	Typpi-lannoitus (kg N/t perunaa)	Fosfori-lannoitus (kg P/t perunaa)	Kasvin-suojelu (l/t perunaa)
6: CFT max	4,5	4,5	1,3	0,20
64: Biocode max	4,5	2,8	0,049	0
20: CFT min	9	2,1	0,51	0,22
11: Biocode min	4,5	2,5	0,21	0,18

Biocoden tulokset ovat järjestäen suurempia kuin CFT:n, vaikka erot metodologiassa ovat pääosin hyvin pienet tai olemattomat. Osa eroista selittyy todennäköisesti

päästökertoimien eroilla, joihin ei kuitenkaan pääse suoraan käsiksi tätä tutkimusta varten, sillä kaikki tarkat syötetiedot ja työkaluihin sisäänrakennetut tarkat valinnat, kuten esimerkiksi, mikä luku on päästökerrointietokannasta valittu tiettyyn kohtaan, eivät ole tiedossa. Kaikki eroista eivät kuitenkaan ole selitettävissä ainoastaan päästökertoimien eroavaisuuksila, sillä esimerkiksi typpioksiduulipäästöjä laskettaessa päästökertoimien lähteeksi molemmat työkalut ilmoittavat saman IPCC:n taulukon, mutta tulokset eroavat silti toisistaan. Myöskään siemenperunan hiilijalanjäljen hajonta tuskin selittyy ainoastaan eri päästökertoimien lähteillä. Eroavaisuudet ovat kuitenkin tyypillisiä LCA-laskennassa, kun vertaillaan eri metodeita ja työkaluja, ja eri tavoilla on mahdollista tehdä hyväksyttäviä arvioita.

5.4 LULUC-laskennan tulokset ja tulkinta

Viljelysmaan LULUC-päästöiksi tutkitulla alueella saadaan luvun 4.2 mukaisin laskuin 847,8 kg CO_2 eq./ha/a. Kun käytetään tutkitun alueen vuosien 2020-2025 keskimääräistä satotasoa perunalle hehtaaria kohden voidaan laskea LULUC-päästöt perunakiloa kohden 30,6 g CO_2 eq./kg perunaa. Tulokset eri yksiköissä on koottu taulukkoon 16.

Taulukko 16. Luonnonvarakeskuksen ohjeistuksen (Heusala, et al. 2025) mukaan laskettu maankäytön ja maankäytön muutosten aiheuttamat päästöt ($\mathrm{LULUC_{viljelysmaa}}$) tärkkelysperunan viljelyssä tutkitulla alueella eri yksiköissä.

Päästöjen suuruus	Yksikkö
847,8	kg CO_2 eq./ha/a
30,6	g CO_2 eq./kg perunaa

Taulukossa 17 vertaillaan edellä laskettua LULUC-päästöjen arvoa erilaisiin taulukkoarvoihin, joita kaikkia olisi mahdollista käyttää perunan LCA-laskennassa kuvaamaan maankäytön ja maankäytön muutosten päästöjä. Sekundääriarvoilla laskettu arvo 3109 kg CO_2 eq./ha/a on saatu käyttäen samaa laskutapaa kuin edellä, mutta kohtiin, joissa edellä on käytetty primääridataa ($\mathrm{A_{muunn}}$, $\mathrm{A_{pys}}$, $\mathrm{A_{org}}$, $\mathrm{A_{min}}$), on tässä käytetty taulukkoarvoja, jotka on haettu Luken ohjeistuksen (Heusala et al., 2025) mukaisesti UNFCCC:n CRF-taulukoista sekä Luken Taloustohtorin sivuilta. Taulukossa 18 listataan arvot ja niiden lähteet, joita muunnetun ja pysyvän maan sekä orgaanisen ja mineraali maan pinta-alojen osuuksille on käytetty. Muunnetun ja pysyvän maan pinta-alojen osuudet on haettu CRF-taulukosta 4B, josta saatava tieto on koko Suomen laajuudelle (UNFCCC 2023, taulukko 4B). Orgaanisen ja mineraalimaan osuudet on

haettu Luken Taloustohtori -sivulta, jossa arvot on eritelty maantieteellisesti pääilmansuuntien mukaan, joista tarkimman tuloksen verrattuna primääridatalla laskettuun antaa Länsi-Suomi.

Taulukko 17. Lasketun LULUC-päästön vertailu taulukkoarvoihin.

Lähde	LULUC-päästö [kg CO_2 eq./ha/a]
Laskettu (Heusala et al., 2025)	848
Sekundääriarvoilla laskettu (Heusala et al., 2025)	3109
Pinta-alan mukaan painotettu (Heusala et al., 2025)	3807
Suomen keskiarvo (Heusala et al., 2025)	3531
Simapro-mallinnus (FAO satotasoilla)	3091

Taulukko 18. Sekundääridatalla laskettujen LULUC-päästöjen parametrien arvot ja lähteet, jotka eroavat oman LULUC-laskennan arvoista.

Parametri	Arvo [dimensioton]	Lähde
$\mathbf{A_{muunn}}$	0,0310	(UNFCCC 2023, taulukko 4B)
$\mathbf{A_{pys}}$	0,9690	(UNFCCC 2023, taulukko 4B)
$\mathbf{A_{org}}$	0,099	(Luke Taloustohtori 2025, Länsi-Suomi)
$\mathbf{A_{min}}$	0,901	(Luke Taloustohtori 2025, Länsi-Suomi)

Pinta-alapainotettu arvo 3109 kg CO_2 eq./ha/a on laskettu Luken ohjeistuksen liitteen 1 taulukon 1.1 perusteella, jossa on esitetty maakunnittain kunkin alueen keskimääräiset LULUC-päästöt (Heusala et al., 2025). Taulukossa 13 Suomen keskiarvo 3531 kg CO_2 eq./ha/a on haettu samasta taulukosta. Tutkittavan alueen pellot sijaitsevat Satakunnassa ja Etelä-Pohjanmaalla, ja pinta-alapainotettu keskiarvo on johdettu näiden maakuntien taulukossa 19 esitettyjen arvojen perusteella.

Taulukko 19. Pinta-alapainotetun arvon (3109 kg CO_2 eq./ha/a) laskennassa käytetyt maakuntakohtaiset tiedot.

	Satakunta	**Etelä-Pohjanmaa**
LULUC [kg CO_2 eq./ha/a] (Heusala et al., 2025)	3254	4486
Peltopinta-alan osuus [dimensioton] (primääridata)	0,55	0,45

Taulukon 17 esittämä SimaPro-mallinnus tuotti LULUC-päästöjen tulokseksi 3091 kg CO_2 eq./ha/a. Kokonasihiilijalanjätulokseksi SimaPro-mallinnuksella saatiin 0,223 kg CO_2 eq./kg perunaa, josta vähennettiin viljelyvaiheen hiilijalanjälkitulokseksi saatu 0,109 kg CO_2 eq./kg perunaa (luku 5.3.1), jolloin LULUC-päästöjen suuruudeksi saatiin 0,114 kg CO_2 eq./kg perunaa. Tämä muunnettiin vertailuyksikköön kg CO_2 eq./ha/a hyödyntämällä FAO:n (Food and Agriculture Organization of the United Nations) tilastojen mukaista viiden vuoden keskimääräistä satotasoa Suomessa, joka FAOSTAT:n mukaan vuosina 2014–2018 oli 27 115 kg/ha/a (FAOSTAT). FAO:n satotasoja on käytetty, koska monet Agri-Footprintin tiedot pohjautuvat tähän lähteeseen (Blonk, 2022).

Kuten taulukosta 17 havaitaan, ilman primääridataa johdetut arvot LULUC-päästöille ovat huomattavasti suuremmat, noin 3,6–4,5-kertaisesti, kuin todellisilla tiedoilla laskettu arvo. Lukuunottamatta Simapro-mallinnuksen arvoa, kaikki taulukon 17 arvot perustuvat jollain tavalla Luken ohjeistukseen sekä samoihin kansallisiin lähteisiin, kuten Luken Taloustohtoriin sekä Tilastokeskukseen. Asiat, joita LULUC-päästöjä laskettaessa otetaan huomioon, ovat samat näillä sekundääridataan perustuvilla sekä primääridatalla lasketulla tuloksilla. Suurimmat erot johtuvat orgaanisten maiden määrästä. Kuten luvussa 2.4 todetaan, orgaanisten maiden aiheuttamat päästöt muodostavat suurimman maaperäpäästöjen lähteen vastaten 98 %:sta maankäyttösektorin päästöistä maataloudessa, vaikka orgaanisten maiden osuus on vain noin 10 % peltopinta-alasta. Tutkitulla alueella orgaanisia maita on ainoastaan 0,33 %, kun taas koko Suomessa osuus on 10,3 % ja Länsi-Suomessa 9,9 % (Luonnonvarakeskus, 2025). Tämä selittää keskeisesti sen, miksi tutkitun alueen LULUC-päästöt ovat merkittävästi pienemmät. Kun luvussa 5.1 esitetty laskenta suoritetaan korvaamalla orgaanisten maiden osuus (0,33 %) Länsi-Suomen taulukkoarvolla (9,9 %) on LULUC-päästöjen suuruus 3083 kg CO_2

eq/ha/a, joka on 264 % suurempi kuin todellinen 848 kg CO_2 eq/ha/a. Koko Suomen taulukkoarvolla (10,3 %) tulokseksi saadaan 3177 kg CO_2 eq/ha/a, joka on 275 % suurempi kuin todellinen arvo.

Toinen eroavaisuus liittyy muunnetun viljelysmaan osuuteen, joka tutkitulla alueella on 2,58 % ja koko Suomessa 3,1 % (Luonnonvarakeskus, 2025). Tämä aiheuttaa vastaavasti vain noin 3 % suuremman tuloksen päästöjen ollessa 873 kg CO_2 eq/ha/a. Taulukossa 20 kootaan, miten tulos muuttuu, kun luvun 5.1 laskenta toteutetaan eri alueiden taulukkoarvoilla orgaanisen ja mineraalimaan sekä muunnetun ja pysyvän maan osuuksille.

Taulukko 20. Tuloksen muutos eri alueiden taulukkoarvoilla orgaanisen ja mineraalimaan sekä muunnetun ja pysyvän maan osuuksille luvussa 5.1 esitetyn laskennan perusteella.

Muutettu parametri	$\mathbf{A_{muunn}}$	$\mathbf{A_{pys}}$	$\mathbf{A_{org}}$	$\mathbf{A_{min}}$	**Tulos kg CO_2 eq/ha/a**
A_{org} Länsi-Suomi	0,0258	0,9742	0,099	0,901	3083
A_{org} koko Suomi	0,0258	0,9742	0,103	0,897	3177
A_{muun} koko Suomi	0,031	0,969	0,0033	0,9967	873

Kun vertailua tehdään arvojen kesken, jotka perustuvat kaikki Luonnonvarakeskuksen lähteisiin, ovat metodit ja taustaoletukset samankaltaisia. Tällöin eroavaisuudet perustuvat lähinnä edellä käytyihin orgaanisen maan sekä muunnetun maan osuuksien suuruuksiin. Kuitenkin, kun vertaillaan muihin lähteisiin, voi taustalla olla hyvin paljon erilaisia oletuksia. Esimerkiksi laskennan erilaiset rajaukset, kuten muutoksen arvioinnin ajanjakso tai huomioidaanko epäsuoria maankäytön muutoksia, epäsuoria päästöjä, erityisesti epäsuoria typpioksiduulipäästöjä, tai hiilensidontaa, vaikuttavat päästölaskennan tulokseen. Jos määritelmät eri maankäyttöluokille ovat erilaiset, tulee laskennassa käytettyä erilaisia päästökertoimia, tai jos päästö kohdistetaan pinta-alan sijaan satoa kohden, vaikuttaa perunan kunkin satokauden sadon määrä päästön suuruuteen. Suurta eroa tuovat myös päästökertoimet, jotka eri lähteiden kesken eroavat toisinaan hyvinkin suuresti, mutta voivat silti olla hyväksyttyjä lähteitä standardoituunkin päästölaskentaan. Muunmuassa hiilivarastojen oletusarvot voivat erota riippuen

lähteestä sekä laskentaan valitusta tarkkuudesta eli kuinka paikkakohtaisia päästökertoimia on kulloinkin laskentaan saatavilla.

Kun vertailu tehdään arvojen välillä, jotka kaikki perustuvat Luonnonvarakeskuksen lähteisiin, ovat käytetyt menetelmät ja taustaoletukset keskenään samankaltaisia. Tällöin eroavaisuudet johtuvat pääasiassa orgaanisen maan ja muunnetun maan osuuksien eroista. Sen sijaan, kun vertailu ulotetaan muihin lähteisiin, voivat taustalla olevat oletukset poiketa huomattavasti toisistaan. Päästöarvioihin vaikuttavat esimerkiksi laskennan rajaukset, kuten tarkasteltavan muutoksen aikajänne, sekä se, sisällytetäänkö laskentaan epäsuorat maankäytön muutokset, epäsuorat päästöt (erityisesti typpioksiduuli) tai hiilensidonta. Lisäksi erot maankäyttöluokkien määritelmissä voivat johtaa erilaisten päästökertoimien käyttöön, mikä heijastuu suoraan laskentatuloksiin. Myös päästöjen kohdistaminen pinta-alaa tai satoa kohden vaikuttaa tulokseen, sillä perunan satomäärien vuosittainen vaihtelu voi muuttaa päästön suuruutta. Eroja syntyy myös käytettyjen päästökertoimien välillä, jotka voivat vaihdella huomattavasti eri lähteiden välillä, vaikka ne kaikki olisivat hyväksyttyjä standardoidussa päästölaskennassa. Lisäksi hiilivarastojen oletusarvot voivat poiketa riippuen lähteestä sekä laskennan tarkkuustasosta, eli siitä, kuinka paikkakohtaista dataa on saatavilla.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä pyrittiin vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

Pääkysymys: Miten tärkkelysperunan tilakohtainen hiilijalanjälki kannattaa laskea?

1. Mikä on perunanviljelyn hiilijalanjälki ja mistä se koostuu?
    a. Mikä on maankäytön ja maankäytön muutosten hiilijalanjälki ja mistä se koostuu?
2. Miten hiilijalanjälkilaskentaan käytettävät työkalut Biocode ja Cool Farm Tool soveltuvat perunan hiilijalanjälkilaskentaan?
    a. Miten työkalut vastaavat Luken ohjeistusta sovellettavia standardeja (ISO 14040/44/67)?
3. Miten menetelmävalinnat ja lähtöarvot vaikuttavat tuloksiin?

Tavoitteena oli selvittää, miten tärkkelysperunan hiilijalanjälkilaskennan tarkkuutta voitaisiin parantaa tilakohtaisessa LCA:ssa. Selvitystä varten tutkittiin, mikä on perunan ja LULUC:n hiilijalanjälki, mistä se koostuu ja mitkä ovat merkittävimmät päästölähteet, miten Biocode ja Cool Farm Tool soveltuvat perunan hiilijalanjälkilaskentaan ja miksi ne tuottavat erilaisia tuloksia sekä miksi taulukkoarvot eroavat työssä lasketuista tuloksista.

Perunan hiilijalanjäljen suuruus vaihtelee paljon riippuen muunmuassa tutkimusasetelmasta, -tavasta sekä viljelyn panosten määristä. Työssä esitellyissä tutkimuksissa perunan hiilijalanjälki vaihtelee 48:n g CO_2 eq/kg perunaa ja 153:n g CO_2 eq/kg perunaa välillä. Se koostuu viljelyn panoksista sekä maaperäpäästöistä, joista merkittävimmiksi päästölähteiksi osoittautuivat LULUC-päästöt, typpioksiduulipäästöt sekä lannoitteiden valmistuksen päästöt. Tärkkelysperunan keskiarvoinen hiilijalanjälki ilman LULUC-päästöjä tutkitulla alueella vuonna 2024 Biocodella laskettuna oli 67 g CO_2eq/kg perunaa, Cool Farm Toolilla 31 g CO_2eq/kg perunaa ja merkittävimmät päästölähteet typpioksiduulipäästöt sekä lannoitteiden valmistus.

Molemmat työkalut soveltuvat tärkkelysperunan tilakohtaiseen hiilijalanjälkilaskentaan tutkitulla alueella eikä suuria metodologisia eroja työkalujen taustalta löytynyt. Kumpikaan työkaluista ei ole suoraan LCA-työkalu, ei täyttä yhtäläisyyttä LCA-standardien kanssa saavuteta johtuen pääosin tulosten raportointiin liittyvistä puutteista. Tässäkään asiassa työkalut eivät juuri eroa toisistaan paitsi, kun otetaan huomioon CFT:n uusin päivitys, jolle ollaan hakemassa sertifiointia hiilijalanjälkistandardia vastaan. Luken ruoka-LCA-ohjeistuksen mukaiset vähimmäisvaatimukset viljelyvaiheen

päästöreiteistä katetaan molemmissa työkaluissa. Merkittävämmät puutteet liittyvät sen sijaan LULUC-laskentaan, joka tässä työssä toteutettiin erikseen laskemalla laskennan laadukkuuden takaamiseksi. Vaikka työkaluilla oli joitain puutteita liittyen LULUC-laskentaan, jatkotutkimuksena olisi mielenkiintoista selvittää, millaisia tuloksia LULUC-päästöille saataisiin Biocodea ja CFT:ia käyttämällä suhteessa syötettyyn viljelydataan.

Metodologiset taustat ovat työkalujen välillä hyvin samankaltaiset, mutta eroavaisuudet hiilijalanjäljissä ovat suuret etenkin peltotöiden ja siemenperunan päästöjen osalta. Siemenperunan päästöjen arviointimetodit ovat työkaluilla erit, ja koska perunanviljelyn päästölaskenta on vielä kehittämisvaiheessa ja siemenperuna on spesifi päästöreitti juuri perunanviljelylle, eroa tuloksiin voi aiheuttaa yhtenäisen metodologian puute. Peltotöiden päästöjen laskemisen metodologia ei eroa työkaluilla, mutta päästökertoimet ovat eri lähteistä, mikä on todennäköisin eroa tuova seikka. Pienimmät eroavaisuudet työkalujen välillä ovat lannoitteiden sekä kasvinsuojeluaineiden valmistuksen päästöissä, joissa myös laskentametodit ovat samat, mutta päästökertoimien lähteet eri. Tässä tapauksessa päästökertoimien erot ovat pienemmät kuin peltotöiden päästöjä arvioitaessa. Pääosin erot tuloksissa liittyvät päästökertoimien lähteisiin, jotka ovat molempien työkalujen kohdalla luotettavia ja LCA-laskentaan kelpaavia, mutta tuottavat vain erilaisia tuloksia, mikä on tyypillistä LCA-laskennassa. Perusteltua syytä tulosten tai työkalujen taustojen näkökulmasta jomman kumman työkalun suosittelemiseen ei työssä löydetty.

LULUC-päästöihin vaikuttaa eniten maaperän orgaanisen aineksen määrä sekä maankäytön historia. Mitä vähemmän orgaanista ainetta ja mitä vanhempi pelto, sitä pienemmät LULUC-päästöt viljelysmaasta aiheutuu. Jotta työkaluilla olisi mahdollista laskea viljelyn LULUC-päästöt, tulisi viljelystä saada enemmän tietoja, joita tässä työssä ei ollut mahdollista kerätä. Kuitenkin dataa saatiin Luken ruoka-LCA-ohjeistuksen mukaiseen LULUC-laskentaan, joka toteutettiin tässä työssä erikseen. LULUC-päästöjen suuruudeksi saatiin 848 kg CO_2 eq/ha/a eli tutkitun alueen satotasojen mukaan 31 g CO_2eq/kg perunaa, joka on samansuuruinen kuin CFT:lla laskettu viljelyvaiheen hiilijalanjälki ja vajaa puolet Biocoden vastaavasta. Kun viljelyvaiheen hiilijalanjäljen yhdistää LULUC-päästöjen kanssa, saadaan kokonaistulokseksi CFT:n viljelyvaiheen kanssa 62 g CO_2eq/kg perunaa ja Biocoden viljelyvaiheen kanssa 99 g CO_2eq/kg perunaa.

Työssä esitellyt sekundääriarvot LULUC-päästöille olivat välillä 3090–3807 kg CO_2 eq/ha/a. Vertailun perusteella Luonnonvarakeskuksen lähteisiin perustuvat LULUC-päästöjen taulukkoarvot ovat suuruusluokaltaan lähellä Simaprolla laskettua, Agri-Footprint-tietokantaan pohjautuvaa arvoa, joskin hieman suurempia. Sekundääriarvot

ovat keskenään johdonmukaisia, mutta huomattavasti korkeampia, 3,6–4,5 -kertaisia, kuin primääridataan perustuva tulos. Jos perunakilon kokonaishiilijalanjälkeä laskettaessa LULUC-päästöt sisällytettäisiin taulukkoarvoista, esimerkiksi SimaPron perusteella, olisi kokonaishiilijalanjälki CFT:n viljelyvaiheen hiilijalanjäljen kanssa 146 g CO_2eq/kg perunaa ja Biocoden viljelyvaiheen hiilijalanjäljen kanssa 181 g CO_2eq/kg perunaa. Kokonaishiilijalanjälki olisi tällöin CFT:n kohdalla yli kaksinkertainen ja Biocoden kohdalla lähes kaksinkertainen verrattuna tilanteeseen, jossa LULUC-päästöille on käytetty primäärilaskennan arvoa. Tämä viittaa siihen, että LULUC-päästöjen arviointi tulisi toteuttaa mahdollisuuksien mukaan todelliseen tilakohtaiseen dataan perustuen, jotta laskennan tarkkuus paranee ja virheiden mahdollisuudet vähenevät.

Jos verrataan tässä työssä laskettuja kokonaishiilijalanjälkiä, CFT ja LULUC 62 g CO_2eq/kg perunaa sekä Biocode ja LULUC 99 g CO_2eq/kg perunaa, SimaPron kokonaishiilijalanjälkeen, jossa viljelyvaihe on 109 g CO_2eq/kg perunaa ja LULUC 114 g CO_2eq/kg perunaa eli yhteensä 223 g CO_2eq/kg perunaa, on molemmat työssä lasketut tapaukset huomattavasti pienemmät. Työ osoitti, että tämän tutkimuksen tapauksessa tärkkelysperunan viljelyn hiilijalanjälki kannattaa laskea primääridataa käyttäen, sillä erot hiilijalanjäljen sekundääriarvoihin niin viljelyvaiheen kuin LULUC-päästöjenkin osalta ovat merkittävät.

Haasteita tutkimuksen tekemiseen toivat viljelyn päästölaskennan kehityksen murrosvaihe, jossa ohjeistukset ovat toistaiseksi vähäisiä, hyviä työkaluja on vähän ja ne harvat hyvät työkalut, joita on, kehittyvät jatkuvasti. Tätä työtä tehdessä vuoden 2025 aikana niin Biocode kuin Cool Farm Alliance ilmoittivat uusista versioista ja parannusaikeista laskentaansa. Toisaalta uudet versiot ja parannukset voivat tuoda vastauksia laskennan puutteisiin esimerkiksi LULUC-laskennan osalta. Lisäksi LCA-laskennan tämänhetkinen luonne, jossa usealla eri tavalla on mahdollista saavuttaa yhtä oikea mutta toisistaan eroava tulos, hankaloittavat parhaan laskentatavan valitsemista.

Prosessinkehitysehdotuksena tämän työn perusteella suositellaan perehtymään ainakin mahdollisimman laadukkaan ja tarpeeksi kattavan datan keräämiseen sekä laskennan ja datan läpinäkyvyyteen. Vaikka työkalulla on mahdollista laskea tarkasti useita päästöreittejä, pitää laadukkaaseen laskentaan olla olemassa laadukasta dataa. Voisi olla hedelmällistä pohtia, miten saadaan tarpeeksi laadukasta dataa riittävän helposti, jotta laskentaa olisi mahdollista toteuttaa entistä laadukkaammin esimerkiksi suuremmalla otoskoolla. Lisäksi, jos halutaan toteuttaa LCA-standardien mukaista läpinäkyvää päästölaskentaa, on primääridatan läpinäkyvyys haaste maataloustuotannon kontekstissa, jossa viljelydata ei ole teollisuuden saatavilla

sellaisenaan. Valmiita työkaluja käyttäessä on myös haastavaa saada selville eri kohdissa käytetyt oletukset ja päästökertoimet, jotka ovat rakennettu ohjelman sisään, mikä voi luoda lisähaasteen läpinäkyvyydelle.

LÄHTEET

Aaltonen, M., Hannukkala, A., Huusela-Veistola, E., Jalli, H., Ketola, J., Känkänen, H., Nissinen, A., Raiskio, S., Ruuttunen, P., Salo, T., Tiilikkala, K., Tuovinen, T., Vänninen, I., 2016. Peruna IPM-ohjeet. Luonnonvarakeskus (Luke).

Ahokas, J., 2013. Polttoaineen kulutus peltotöissä. Helsingin yliopisto maatalous-metsätieteellinen tiedekunta.

Ahvenjärvi, S., Lehtonen, H., Lång, K., Lidauer, M., Mehtiö, T., Huhta-nen, P., Nousiainen, J., Hietala, S., Bloch, V., Suomi, P., Latukka, A., 2022. Maatalouden kasvihuonekaasupäästöt ja niiden kustannukset. Luonnonvarakeskus, Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 16.

Arulnathan, V., Heidari, M.D., Doyon, M., Li, E., Pelletier, N., 2020. Farm-level decision support tools: A review of methodological choices and their consistency with principles of sustainability assessment. J. Clean. Prod. 256, 120410. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120410

Biocode, 2025a. Parannamme elämän edellytyksiä maapallolla [WWW Document]. Biocode. URL https://biocode.io/fi/meista/ (accessed 4.11.25).

Biocode, 2025b. Methodology Documentation - Life cycle assessment (LCA) methodology used on Biocode - LCA Model: Crop production (field plot level) (No. Version 2.0).

Biocode, 2025c. Laskentametodologia [WWW Document]. Biocode. URL https://biocode.io/fi/laskentametodologia/ (accessed 4.17.25).

Blonk, 2022. Agri-footprint 6 Methodology Report - Part 2: Description of Data (No. Version 5).

Bochu, J.-L., Metayer, N., Bordet, C., Gimaret, M., 2013. Development of Carbon Calculator to promote low carbon farming practices - Methodological guidelines (methods and formula) Final (EC-JRC-IES by Solagro).

BSI, 2011. PAS 2050:2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.

Carbon Cloud, 2025. Potato, Finland · 0.26 kg CO_2e/kg | Verified by CarbonCloud [WWW Document]. URL https://apps.carboncloud.com/climatehub/agricultural-reports/benchmarks/32f9a0dd-c603-4fd4-95d8-d91fc03b4b2d (accessed 10.14.25).

Cool Farm Alliance, 2025. Cool Farm Tool and Platform - Technical Method Description - CFP version 3 and CFT version 2.

Cool Farm Alliance, 2024. Cool Farm Tool and Platform - Technical Method Description - version CFT 2.10.

Cool Farm Tool, 2025a. Carbon Footprint Calculator | Measure Water & Biodiversity [WWW Document]. Cool Farm Tool Online Greenh. Gas Water Biodivers. Calc. URL https://coolfarm.org/ (accessed 2.5.25).

Cool Farm Tool, 2025b. Is the CFT compliant with standards such as the WRI GHG Protocol ISO, PAS2050, Carbon Trust, Life cycle analysis, the International Dairy Federation etc? [WWW Document]. URL https://coolfarmsupport.zohodesk.eu/portal/en/kb/articles/is-the-cft-compliant-with-standards-such-as-the-wri-ghg-protocol-iso-pas2050-carbon-trust-life-cycle-analysis-the-international-dairy-federation-etc (accessed 4.24.25).

D, F., D, N., Vetter, S.H., Hillier, J., 2018. CCAFS Mitigation Options Tool, Beta version.

Dzalbs, A., Bimbere, M., Pubule, J., Blumberga, D., 2023. Environmental Impact Decision Support Tools for Horticulture Farming: Evaluation of GHG Calculators. Agriculture 13, 2213. https://doi.org/10.3390/agriculture13122213

Esala, J., 2021. Muokkaus- ja kylvötöiden energiankulutus. SeAMK Elintarvike ja maatalous.

Euroopan komissio, 2021. Product Environmental Footprint Method (No. Annex 1 to 2). Publications Office of the European Union.

European Comission, 2024. The European Green Deal.

European Comission, 2003. Comission Regulation (EC) No 2236/2003 of 23 December 2003 laying down detailed rules for the application of Council Regulation (EC) NO 1868/94 as regards the quota system in the potato starch sector.

Feliciano, D., Nayak, D.R., Vetter, S.H., Hillier, J., 2017. CCAFS-MOT - A tool for farmers, extension services and policy-advisors to identify mitigation options for agriculture. Agric. Syst. 154, 100–111. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.006

Finland. 2023 Common Reporting Format (CRF) Table. | UNFCCC [WWW Document], n.d. URL https://unfccc.int/documents/627719 (accessed 9.25.25).

GHG Protocol Ranganathan, J., Corbier, L., Bhatia, P., Schmitz, S., Gage, P., Oren, K., Dawson, B., Spannagle, M., McMahon, M., Boileau, P., Frederick, R., Vanderborght, B., Thomson, F., Kitamura, K., Woo, C.M., Pankhida, N., Miner, R., Segalen, L., Koch, J., Bhattacharjee, S., Cummis, C., Breidenich, C., Eaton, R., Gillenwater, M., Eddis, M., Marache, M., Acosta, R., Camobreco, V., Cook, E., 2004. GHG Protocol. World Resour. Inst.

Global Carbon Council, 2024. GCC NBS Tool for Estimation of GHG Emissions from Fertilizer use in Projects (GCCTA003 No. V1.0-2024).

Haverkort, A.J., Hillier, J.G., 2011. Cool Farm Tool - Potato: Model Description and Performance of Four Production Systems. Potato Res. 54, 355–369. https://doi.org/10.1007/s11540-011-9194-1

Heusala, Hannele, Lehtilä, Anniina (eds.), 2025. Guidance for environmental footprint assessment of food products (Food-LCA) : Specification for external communicational purposes on the Finnish market (Ohjeistus No. 4/2025), Natural resources and bioeconomy studies. Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki.

IPCC, 2022. AR6. Chapter 2: Emissions Trends and Drivers (No. Volume 6), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC, 2019a. Chapter 11: N2O Emissions from Managed Soils, and CO2 Emissions from Lime and Urea Applications (Agriculture, Forestry and Other Land Use No. Volume 4), 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

IPCC, 2019b. Chapter 2: Generic methodologies applicable to multiple land-use categories (Agriculture, Forestry and Other Land Use No. Volume 4), 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

IPCC, 2019c. Chapter 5: Cropland (Agriculture, Forestry and Other Land Use No. Volume 4), 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

IPCC, 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands - Methodological Guidance on Lands with Wet and Drained Soils, and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment.

Kyriakou, V., Garagounis, I., Vourros, A., Vasileiou, E., Stoukides, M., 2020. An Electrochemical Haber-Bosch Process. Joule 4, 142–158. https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.10.006

Lehtilä, A., Ghani, H.U., Liu, X., Palosuo, T., Tuomisto, H.L., Leinonen, I., 2025. Framework for including national-level LULUC emissions and removals in the GWP of agricultural and forestry products in LCA. J. Clean. Prod. 494, 144999. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144999

Lehtilä, A., Leinonen, I., 2023. Maankäytön ja maankäytön muutosten vaikutukset osaksi ruokatuotteiden hiilijalanjälkilaskentaa [WWW Document]. Luonnonvarakeskus. URL https://www.luke.fi/fi/blogit/maankayton-ja-maankayton-muutosten-vaikutukset-osaksi-ruokatuotteiden-hiilijalanjalkilaskentaa (accessed 4.8.25).

Lehtonen, A., Mäkipää, R., Aro, L., Haakana, S., Heikkinen, J., Huuskonen, S., Härkönen, K., Hökkä, H., Kekkonen, H., Koskela, T., Lehtonen, H., Luoranen, J., Mutanen, A., Nieminen, M., Ollila, P., Palosuo, T., Pohjanmies, T., Repo, A., Rikkonen, P., Räty, M., Saarnio, S., Smolander, A., Soinne, H., Tolvanen, A., Tuomainen, T., Uotila, K., Viitala, E.-J., Virkanjärvi, P., Wall, A., 2021. Maankäyttösektorin ilmastotoimenpiteet : Arvio päästövähennysmahdollisuuksista. Luonnonvarakeskus, Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 122.

Luonnonvarakeskus, 2025. Taloustohtori: Maalajit suuralueittain.

Luonnonvarakeskus, Maa- ja metsätalousministeriö, 2022. Ruoantuotannon hiili-euro-ohjelma (HERO).

MacSween, K., Feliciano, D., 2018. Comparison of online greenhouse gas accounting tools for agriculture. CGIAR CCAFS.

Mikkola, H.J., Ahokas, J., 2009. Energy ratios in Finnish agricultural production. Agric. Food Sci. 18, 332–346. https://doi.org/10.23986/afsci.5958

Modak, N.M., Kelle, P., 2021. Using social work donation as a tool of corporate social responsibility in a closed-loop supply chain considering carbon emissions tax and demand uncertainty. J. Oper. Res. Soc. 72, 61–77. https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1654413

MTK, 2025. Perunan ja sokerijuurikkaan tuotanto [WWW Document]. MTK. URL https://www.mtk.fi/-/peruna-ja-sokerijuurikas (accessed 10.1.25).

Osorio-Tejada, J., Tran, N.N., Hessel, V., 2022. Techno-environmental assessment of small-scale Haber-Bosch and plasma-assisted ammonia supply chains. Science of The Total Environment. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154162

Palosuo, T., Heikkinen, J., Hilasvuori, E., Kulmala, L., Launiainen, S., Lehtilä, A., Leinonen, I., Liimatainen, M., Salminen, M., Shurpali, N., Silfver, T., Soinne, H., Virta, J., Liski, J., 2025. Demands and possibilities for field-scale estimation of agricultural greenhouse gas balances. CATENA. https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108649

Parker, L., Pitman, J., Wardell, G., Brown, M., 2015. Methodology of the Farm Carbon Calculator - Updates to land use change, livestock and emissions factors used in reports ending after 1 April 2025 (Methodology v.3.4).

Peltonen, S., Haikarainen, I., Kari, M., 2021. ProAgria | Hiilikartoitus auttaa hahmottamaan ilmastotoimenpiteiden… [WWW Document]. URL https://www.proagria.fi/ajankohtaista/hiilikartoitus-auttaa-hahmottamaan-ilmastotoimenpiteiden-tilanteen-maatilallasi (accessed 4.11.25).

Potwell, n.d. Hiilijalanjälki [WWW Document]. Potwell. URL https://potwell.fi/hiilijalanjalki/ (accessed 10.14.25).

Pulkkinen, H., Kemppainen, M., Markus, A., Virtanen, E., 2012a. Perunan ilmastovaikutukset (No. 73), PotatoNow. MTT, Jokioinen.

Pulkkinen, H., Regina, K., Katajajuuri, J.-M., 2012b. Introduction of national method to estimate direct nitrous oxide emissions from mineral soils for Finnish product rasbon footprinting. Luonnonvarakeskus, Proceedings of the 8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector.

Ramos, S., Larrinaga, L., Albinarrate, U., Jungbluth, N., Ingolfsdottir, G.M., Yngvadottir, E., Landquist, B., Woodhouse, A., Olafsdottir, G., Esturo, A., Zufia, J., Perez-Villareal, B., 2015. SENSE tool: easy-to-use web-based tool to calculate food product environmental impact. LCA of nutrition and food consumption. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0980-x

Rosa, L., Gabrielli, P., 2023. Energy and food security implications of transitioning synthetic nitrogen fertilizers to net-zero emissions (Environmental research No. 18 014008). FAO.

Ruokavirasto, 2024. Blogi: Perunanviljelijöiden haasteet ilmastonmuutoksen ja kestävän tuotannon edessä: EAPR-kongressin kohokohdat Oslossa [WWW Document]. Ruokavirasto. URL https://www.ruokavirasto.fi/tietoa-meista/ajankohtaista/ruokaviraston-blogi/blogitekstit/blogi-perunanviljelijoiden-haasteet-ilmastonmuutoksen-ja-kestavan-tuotannon-edessa-eapr-kongressin-kohokohdat-oslossa/ (accessed 10.1.25).

SBTi, 2018. Six business benefits of setting science-based targets [WWW Document]. Sci. Based Targets Initiat. URL https://sciencebasedtargets.org/blog/six-business-benefits-of-setting-science-based-targets (accessed 2.10.25).

Seppänen, M., Mäkelä, P., Yli-Hannula, M., Helenius, J., Kallela, M., Stoddard, F., Teeri, T., 2008. Peltokasvien tuotanto, Opetushallitus. Vammalan Kirjapaino Oy.

SFS-EN ISO 14040:2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet., 2006.

SFS-EN ISO 14067:2018. Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista koskevat vaatimukset ja ohjeet., 2018.

Sillanpää, A., Pusa, K., 2017. Tärkkelysperunan viljelyohjeet. Finnamyl Oy ja Lapuan Peruna Oy.

Smith, C., K. Hill, A., Torrente-Murciano, L., 2020. Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. Energy Environ. Sci. 13, 331–344. https://doi.org/10.1039/C9EE02873K

Starch Europe, 2021. Product Category Rules for Starch Industry Products.

Tilastokeskus, 2025. Vuoden 2023 kasvihuonekaasupäästöt laskivat 10 % edellisvuodesta | Tilastokeskus [WWW Document]. URL https://stat.fi/julkaisu/clmpwmdg9iy0v0cunp21h4q6v?utm_source=chatgpt.com (accessed 9.29.25).

Tilastokeskus, 2024. Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2022 - National Inventory Document under the UNFCCC and Paris Agreement.

Tilastokeskus, 2023. Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990 to 2021 - National Inventory Report under the UNFCCC - Submission to the European Union.

Tilastokeskus [WWW Document], n.d. URL https://stat.fi/meta/kas/lulucf.html (accessed 2.19.25).

Yara Suomi, 2021. Kohti hiilineutraaliutta [WWW Document]. Yara Suomi. URL https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/vastuullisuus/ymparisto/kohti-hiilineutraaliutta/ (accessed 10.16.25).