

Ella Karppi

# TUOTTEEN HIILIJALANJÄLJEN MÄÄRITTÄMINEN METALLIALAN YRITYKSESSÄ

Diplomityö  
Johtamisen ja talouden tiedekunta  
Tarkastajat: Yliopistotutkija Ulla Saari ja Professori Marko Seppänen  
Syyskuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Ella Karppi: Tuotteen hiilijalanjäljen määrittäminen metallialan yrityksessä  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Johtamisen ja tietotekniikan DI-ohjelma  
Syyskuu 2022

---

Ilmasto lämpenee, kun ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuudet nousevat. Hiilen, kaasun ja öljyn poltto, metsien raivaus, tyypeä sisältävät lannoitteet, kotieläintuotannon lisääntyminen sekä fluoratut kaasut ovat esimerkkejä useista syistä kasvihuonekaasupäästöjen lisääntymiselle. Jotta ilmaston lämpeneminen saadaan pysäytettyä, tarvitaan erilaisia toimenpiteitä kaikkialla maailmassa. Suomen hallitus tavoittelee Suomen olevan hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä, ja Euroopan unioni tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2050 mennessä.

Tämän diplomityön tavoitteena oli määrittää metallialan yrityksen valmistaman tuotteen hiilijalanjälki. Lisäksi selvitettiin, mitkä tekijät siihen vaikuttivat ja kuinka paljon. Työssä pyrittiin myös löytämään keinoja hiilijalanjäljen pienentämiseksi ja asettamaan ne tärkeysjärjestykseen. Tuotteen hiilijalanjälki laskettiin kohdeyrityksen vuonna 2021 valmistamalle tuotteelle ISO 14067 -standardia käyttäen ja kehdosta portille -metodin mukaan. Tarkasteltavia osa-alueita olivat tuotteen valmistuksessa käytettävät materiaalit, niiden kuljetus kohdeyritykselle sekä kohdeyrityksen oma tuotanto. Laskennassa käytetyt päästökertoimet kerättiin pääasiassa tehtaiden ympäristöselosteista, päästötietokannoista sekä Tilastokeskuksen sivuilta. Tiedot kohdeyrityksen energiankulutuksesta ja syntyneistä jätemääristä saatiin yrityksen laatuosastolta.

Tutkimuksen kohteena olleen tuotteen hiilijalanjäljeksi määritettiin 9 469 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Lähes kaikki kasvihuonekaasupäästöistä, 96 prosenttia, syntyi tuotteen valmistuksessa käytettävistä materiaaleista, etenkin haponkestävästä teräksestä. Seuraavaksi eniten kasvihuonekaasupäästöjä, kolme prosenttia, aiheutui tuotteen valmistukseen käytetystä energiasta. Tuotteen valmistuksessa käytettävien materiaalien kuljetus kohdeyritykselle muodosti yhden prosentin kasvihuonekaasupäästöistä.

Tutkimuksen tulosten perusteella kohdeyritykselle suositeltiin jatkotoimenpiteitä. Kohdeyrityksessä tulisi ensisijaisesti tutkia, olisiko vaihtoehtoisia vähähiilisempiä materiaaleja mahdollista käyttää. Lisäksi tavarantoimittajilta olisi hyvä saada tarkkoja tietoja materiaalien hiilijalanjäljistä, jotta kohdeyritys voi laskea tuotteen hiilijalanjäljen mahdollisimman tarkasti. Muita suosituksia olivat sähkösopimuksen päivittäminen alkuperätakuilla varmennettuun sähkөөn sekä lähetyskoh- taisten hiilijalanjälkien selvittäminen kuljetusyhtiöiltä.

Avainsanat: hiilijalanjälki, elinkaariarviointi, kasvihuonekaasupäästö, päästökerroin, ISO 14067

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Ella Karppi: Defining a product carbon footprint in the metal industry company  
Master's thesis  
Tampere University  
Master's Degree in Management and Information Technology  
September 2022

---

The climate is getting warmer as atmospheric greenhouse gas concentrations rise. Burning of coal, gas and oil, deforestation, nitrogen-containing fertilizers, increased livestock production and fluorinated gases are examples of several reasons for the increase in greenhouse gas emissions. To curb global warming, various measures are needed around the world. The Finnish government has set a goal that Finland will be carbon neutral by 2035. The European Union's goal is to be carbon neutral by 2050.

The main goal of this master's thesis was to determine the carbon footprint of one product manufactured by the case company. The aim was also to find out which factors affected it and how much. In addition, one goal was to find ways to reduce the carbon footprint and prioritize them. The carbon footprint was calculated for the product manufactured in 2021 by using the ISO 14067 standard and the cradle to gate method. The sectors examined were the materials used in the manufacture of the product, their transport to the company and the company's production. The emission factors used in the calculation are from environmental product declarations, emission databases and Statistics Finland. The information about energy consumption and waste generated in the company was obtained from the quality department in the company.

The carbon footprint of the product was 9,469 kg CO<sub>2</sub>eq. The most significant part of the greenhouse gas emissions, 96 percent, were from the materials used in the manufacture of the product, especially stainless steel. The second largest source of greenhouse gas emissions, three percent, was from the energy used to manufacture the product. The transportation of materials used in the product manufacturing caused one percent of the emissions.

Based on the results of the study, some recommendations were given to the company. The company should investigate whether it would be possible to use alternative materials with a lower carbon footprint. In the future, the suppliers should be able to give exact information about the carbon footprint of the materials they sell. Thus, the company would be able to calculate the product carbon footprint as accurately as possible. It was also recommended to update renewable origins for the company's electricity contract and find out shipment level carbon footprint from the carriers.

Keywords: carbon footprint, life cycle assessment, greenhouse gas emissions, emission factor, ISO 14067

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Näitä sanoja kirjoittaessani lopputyöni on viimeistä silausta vaille valmis. Tämä reilu puoli vuotta kestänyt diplomityöprosessi on sisältänyt onnistumisen ja ilon tunteita, mutta myös turhautuneisuutta ja motivaation puutetta. Matka on ollut opettavainen, ja kun sitä katsoo taaksepäin, joitain asioita olisi kannattanut tehdä toisin. Haasteista huolimatta voin todeta työni valmistuvan kutakuinkin alkuperäisen aikataulun mukaan.

Tämä diplomityö on tehty nimettömänä pysyvälle kohdeyritykselle, joka tarjosi mielenkiintoisen mutta haastavan aiheen tutkittavaksi. Haluan kiittää kohdeyrityksen työntekijöitä, joilta sain apua tarvittavien lähtötietojen keräämiseen sekä työn raamien määrittämiseen. Lisäksi haluan kiittää ohjaajaani Ulla Saarta, jolta olen saanut apua työhöni liittyvissä kysymyksissä aina tarvittaessa. Myös poikaystäväni, ystäväni ja perheeni ansaitsevat kiitokset, sillä he ovat jaksaneet kuunnella ja tsemppata, kun olen tukea tarvinnut.

Raisiossa, 12.9.2022

Ella Karppi

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Tausta .....	1
1.2 Tavoite ja tutkimuskysymykset .....	2
1.3 Tutkimuksen rajaukset .....	3
1.4 Työn rakenne ja vaiheet .....	3
2. KIRJALLISUUSKATSAUS .....	5
2.1 Hiilijalanjälki .....	5
2.2 Elinkaariarviointi .....	7
2.3 Tuotteen hiilijalanjäkilaskennan standardeja .....	11
2.4 Tuotteen hiilijalanjäljen laskeminen .....	15
2.5 Aiempia tutkimuksia tuotteen hiilijalanjäljestä .....	18
2.6 Hiilijalanjäljen pienentäminen yrityksessä .....	20
2.7 Teräksen ympäristövaikutukset .....	21
3. TUOTTEEN HIILIJALANJÄLJEN SELVITTÄMINEN KOHDEYRITYKSESSÄ .....	24
3.1 Kohdeyritys .....	24
3.2 Laskennan tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely .....	24
3.3 Inventaarioanalyysi .....	26
4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU .....	30
4.1 Tulosten esittely .....	30
4.2 Herkkyystarkastelu .....	32
4.3 Tulosten varmentaminen .....	35
5. YHTEENVETO .....	37
5.1 Päätulokset ja niiden tarkastelu .....	37
5.2 Suositukset ja jatkotoimenpiteet .....	37
5.3 Työn onnistuminen ja jatkotutkimus .....	39
LÄHTEET .....	40

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

## Lyhenteet

GHG-protokolla	Greenhouse Gas -protokolla
GWP	Global Warming Potential, lämmityspotentiaali
HYBRIT-hanke	Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology, hanke joka pyrkii fossiilittoman teräksen tuotantoon hyödyntäen fossiilivapaata sähköä ja vetyä
ISO	International Organization for Standardization, kansainvälinen standardisoimisjärjestö
LCA	Life Cycle Assessment, elinkaariarviointi
LCI	Life Cycle Inventory, inventaarioanalyysi
LIPASTO	Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen las- kentajärjestelmä
LKAB	Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag, Ruotsin valtion omistama kaivosyhtiö
PAS 2050	Public Available Specification, julkisesti saatavissa oleva spesifikaatio
PET	Polyetyleenitereftalaatti, pakkausteollisuudessa käytettävä muovi
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SSAB	Ruotsalainen teollisuuskonserni
VTT	Teknologian tutkimuskeskus
WWF	World Wildlife Fund, kansainvälinen ympäristöjärjestö

## Yksiköt ja merkinnät

CH <sub>4</sub>	Metaani
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
CO <sub>2</sub> -ekv	Hiilidioksidiekvivalentti
HFC-yhdisteet	Fluorihiiilivedyt
kg	Kilogramma
km	Kilometri
m <sup>3</sup>	Kuutiometri
MWh	Megawattitunti
N <sub>2</sub> O	Dityppioksidi
PFC-yhdisteet	Perfluoratut yhdisteet
SF <sub>6</sub>	Rikkiheksafluoridi
t	tonni
Tj	Terajoule

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Kauppalehti uutisoi 16.12.2019 Sitran Taloustutkimuksella teettämästä kyselystä, josta ilmeni, että 45 prosenttia kaikista teollisuusyrityksistä oli sitä mieltä, että vähähiilisten ja hiilineutraalien tuotteiden kehittäminen edistivät niiden strategista kilpailukykyä. Samaan aikaan lähes yhtä suuri osa niistä uskoi, että sen merkitys tulee kasvamaan vasta tulevaisuudessa. Kyselyyn vastasi yli 500 suomalaisen teollisuusyrityksen asiantuntijaa tai johtajaa, ja se toteutettiin loka-marraskuussa 2019. Osa kyselyyn vastanneista teollisuusyrityksistä oli suuryrityksiä, joista lähes kaikki pitivät ympäristöystävällisiä ratkaisuja ja tuotteita tärkeänä strategisena asiana joko sillä hetkellä tai tulevaisuudessa. Jo tuoloin kaksi kolmasosaa kyselyyn vastanneista suuryrityksistä mittasi hiilijalanjälkeään. Vastaavasti kaikista kyselyyn vastanneista teollisuusyrityksistä niin teki vain neljännes. (Kauppalehti 2019)

Kasvihuonekaasupäästöjen lisääntymiselle on useita syitä. Hiilen, kaasun ja öljyn poltto synnyttävät hiilidioksidia ja typpioksiduulia. Metsien raivaus taas kiihdyttää kasvihuoneilmiötä, kun puut eivät enää sido hiilidioksidia ilmakehästä. Typeä sisältävät lannoitteet synnyttävät typpioksiduulipäästöjä ja kotieläintuotannon lisääntyminen metaania. Fluorattujen kaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus on jopa 23 000 kertaa voimakkaampi kuin hiilidioksidin, ja niitä vapautuu tietyistä laitteista ja tuotteista. (Euroopan komissio 2022)

Vuonna 2019 kasvihuonekaasujen kokonaispäästöt Suomessa olivat 52,8 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonnia. Niistä 74 prosenttia oli peräisin energiasektorilta, 13 prosenttia maataloudesta, 10 prosenttia teollisuusprosessit ja tuotteiden käyttö -sektorilta sekä 3 prosenttia jätteiden käsittelystä. (Tilastokeskus 2020) Vuonna 2020 kasvihuonekaasujen kokonaispäästöt Suomessa olivat 48,1 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonnia eli 9 prosenttia vähemmän kuin vuonna 2019. Vuonna 2020 energiasektorin päästöt vähenivät 11 prosenttia vuoteen 2019 verrattuna. Tähän vaikutti muun muassa kivihiilen ja turpeen energiakäytön merkittävä väheneminen. (Tilastokeskus 2021) Suunta on oikea, mutta uusia ilmastotoimenpiteitä tarvitaan, sillä Suomen hallituksen tavoitteena on hiilineutraali Suomi vuoteen 2035 mennessä. (Valtioneuvosto 2021)

Euroopan unioni taas on sitoutunut Euroopan ilmastolain myötä olemaan hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Tämä tavoite on myös kirjattu Pariisin ilmastopöytäkirjaan, ja sen on allekirjoittanut 195 maata. Hiilineutraaliudella tarkoitetaan hiilidioksidipäästöjen tuottamista maksimissaan sen verran kuin niitä voidaan ilmakehästä sitoa hiilinieluihin. Hiilinielu on mekanismi, joka sitoo ilmasta hiilidioksidia itseensä, kuten maaperä, metsä tai valtameri. Jotta nollapäästöt voidaan saavuttaa, tulee kaikki maailman kasvihuonekaasupäästöt kyetä ottamaan talteen. (Euroopan parlamentti 2021)

Eräs keino tavoitella hiilineutraaliutta ja vähentää päästöjä on kompensoida toisella sektorilla tuotettuja päästöjä vähentämällä niitä jollain muulla sektorilla. Investoimalla energiatehokkuuteen, uusiutuviin energialähteisiin tai muihin puhtaisiin ja vähähiilisiin teknologioihin kompensointi voidaan toteuttaa. Esimerkkinä hiilidioksidipäästöjen kompensoinnista on EU:n päästökauppajärjestelmä. (Euroopan parlamentti 2021) Sen tavoitteena on teollisuuden hiilidioksidipäästöjen vähentäminen, ja sen piirissä on yli 10 000 energiantuotanto- ja teollisuuslaitosta. Jokaista ilmaan päästämäänsä hiilidioksiditonnia kohden niiden on hankittava lupa. (Euroopan parlamentti 2022)

## 1.2 Tavoite ja tutkimuskysymykset

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää kohdeyrityksen valmistaman tuotteen hiilijalanjälki. Työn aihe on hyvin ajankohtainen ja tärkeä kohdeyritykselle, sillä asiakkaat ovat enenevässä määrin kiinnostuneita yrityksen valmistaman tuotteen hiilijalanjäljestä. Kohdeyrityksen valmistamia koneita käytetään energia-, prosessi- ja kemianteollisuudessa sekä kylmätekniikan sovelluksissa. Jotta asetettuun tavoitteeseen päästään, on selvitettävä, mitkä eri tekijät vaikuttavat tuotteen hiilijalanjälkeen. Selvityksen pohjalta pyritään keräämään tarvittavat lähtötiedot laskentaa varten ja esittämään tuotteen hiilijalanjäljelle luku-arvo.

Tavoitteesta muodostuu työn tutkimuskysymys:

- Miten määritetään kohdeyrityksen valmistaman tuotteen hiilijalanjälki?

Tutkimuskysymyksen lisäksi työssä haetaan vastauksia seuraaviin lisäkysymyksiin:

- Mitkä tekijät vaikuttavat tuotteen hiilijalanjälkeen ja miten paljon?
- Millä keinoilla hiilijalanjälkeä voidaan kohdeyrityksessä pienentää ja mikä on keinojen prioriteettijärjestys?

Lisäkysymysten avulla pyritään vastaamaan varsinaiseen tutkimuskysymykseen. Ensimmäisessä kysymyksessä pyritään selvittämään, kuinka monta prosenttia kukin tekijä



muodostaa tuotteen hiilijalanjäljestä. Toisessa kysymyksessä pohditaan, mitä kohdeyrittäjä voisi tehdä pienentääkseen hiilijalanjälkeä, ja millä keinoilla on suurin vaikutus sen pienemiseen eli mihin asioihin tulisi ensimmäisenä kiinnittää huomiota.

### **1.3 Tutkimuksen rajaukset**

Tutkimus rajataan koskemaan kohdeyrittäjän valmistaman yhden tuotteen hiilijalanjälkeä. Laskenta tehdään yhdessä portille -mallia noudattaen eli se kattaa vain osan tuotteen elinkaaresta: materiaalien hankinnan, niiden kuljetuksen kohdeyrittäjän toimipisteelle ja tuotteen valmistuksen. Siinä ei oteta huomioon käyttövaihetta eikä käytöstä poistamista. Työssä käytetään esimerkkinä erästä kohdeyrittäjän vuonna 2021 valmistamaa tuotetta, jolle hiilijalanjälkilaskenta tehdään.

Materiaaleista laskennassa huomioidaan vain tuotteen kuusi painavinta osaa, joiden yhteismassa on noin 96 prosenttia tuotteen kokonaisuudesta. Niiden kuljetus kohdeyrittäjälle tapahtuu täys- ja puoliperävaunuyhdistelmillä, mutta laskennassa ei huomioida ajoneuvojen paluumatkoja, pysähdyksiä tai kuorman kevenemistä. Tuotteen valmistuksesta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä arvioidaan ottamalla huomioon sähkön, lämmön, polttoöljyn ja moottoripolttoöljyn kulutus. Lisäksi laskentaan sisällytetään keskimääräinen vedenkulutus per tuote sekä keskimäärin syntyvä sekajätteen määrä per tuote.

### **1.4 Työn rakenne ja vaiheet**

Työ koostuu johdannosta, kirjallisuuskatsauksesta, tuotteen hiilijalanjäljen selvittämisestä kohdeyrittäjässä, työn tuloksista ja niiden tarkastelusta sekä yhteenvedosta. Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään tuotteen hiilijalanjäljen määrittelyyn ja elinkaariarviointiin, johon hiilijalanjälkilaskenta perustuu. Lisäksi esitellään yleisimpiä standardeja, jotka ohjaavat tuotteen hiilijalanjäljen laskemista ja käydään läpi, mitä tietoja hiilijalanjälkilaskennassa tarvitaan sekä miten laskenta tapahtuu. Lisäksi tarkastellaan, millä keinoin yritys voi pienentää hiilijalanjälkeään sekä teräksen valmistuksesta aiheutuvia ympäristövaikutuksia.

Kirjallisuuskatsausta seuraa työn empiirinen osuus. Ensiksi tutustutaan kohdeyrittäjään, minkä jälkeen kohdeyrittäjän tuotteen hiilijalanjäljen laskemiselle määritellään tavoitteet ja soveltamisala. Sen jälkeen tehdään inventaarioanalyysi, jossa perusteellisesti kuvataan tuotteen hiilijalanjälkilaskennan kulku mukaan lukien lähtötietojen keruu ja tehdyt oletukset. Tuotteen hiilijalanjäljen laskenta toteutetaan Microsoft Excel -laskentatau-

lukko-ohjelmistolla. Luvussa 4 esitellään työn tulokset ja tarkastellaan niihin liittyvää epävarmuutta herkkyysanalyysin muodossa. Lisäksi annetaan tietoa muutamasta asiantuntijayrityksestä, jotka selvittävät yrityksien, tuotteiden ja palveluiden hiilijalanjälkiä ja näin ollen voisivat varmentaa tämän työn tuloksia. Työn lopuksi on yhteenveto, jossa työn päätulokset kootaan yhteen, ja niiden pohjalta esitetään johtopäätökset, suositukset ja jatkotoimenpide-ehdotukset. Lisäksi yhteenvedossa pohditaan, miten työ onnistui ja millaisia jatkotutkimuksia työstä voitaisiin tehdä.

## 2. KIRJALLISUUSKATSAUS

Tässä luvussa perehdytään ensiksi hiilijalanjäljen määritelmään ja esitellään erilaisia hiilijalanjäljen määritelmiä. Sen jälkeen käsitellään elinkaariarviointia ja sen neljää eri vaihetta, esitellään tuotteen hiilijalanjälkilaskennassa käytettyjä standardeja sekä käydään läpi tuotteen hiilijalanjäljen laskemista. Lisäksi perehdytään aiempiin tutkimuksiin tuotteen hiilijalanjäljestä sekä pohditaan, miten yrityksissä voidaan hiilijalanjälkeä pienentää. Lopuksi käsitellään teräksen ympäristövaikutuksia.

### 2.1 Hiilijalanjälki

Sana 'hiilijalanjälki' liittyy vuonna 1996 esitettyyn ekologisen jalanjäljen käsitteeseen, jonka kehittivät Mathis Wackernagel ja William E. Rees. (Pandey et al. 2011, Wackernagel & Rees 1996 mukaan) Ekologinen jalanjälki kuvaa, kuinka suuri maa- ja merialue tarvitaan tietyn ihmisjoukon ylläpitämiseen globaalihehtaareina ilmaistuna. Tämän mukaan hiilijalanjäljellä tarkoitetaan maa-alaa, joka tarvitaan koko ihmiskunnan elinaikanaan tuottaman hiilidioksidin yhteyttämiseen. (Pandey et al. 2011, East 2008 mukaan)

Wiedmann ja Minx (2007, s. 5) ehdottivat, että hiilijalanjälki määriteltäisiin toiminnon tai tuotteen elinkaaren aikana aiheutuvien suorien ja epäsuorien hiilidioksidipäästöjen kokonaismääränä. Tuote tarkoittaa sekä tavaraa että palvelua. Määritelmä pitää sisällään niin yksityishenkilöt kuin julkisen ja yksityisen sektorin organisaatiot. Barnett et al. (2013, s. 1) mukaan äskeistä määritelmää voidaan laajentaa myös muihin kasvihuonepäästöihin. Sen vuoksi hiilijalanjälki voidaan määritellä kasvihuonekaasujen kokonaismäärän mittana, joka on suoraan tai välillisesti aiheutunut toiminnasta tai kertynyt tuotteen elinkaaren aikana. Tuotteen hiilijalanjäljelle ei kuitenkaan ole olemassa yhtä yleispätevää määritelmää. Jokainen tutkimus tarjoaa hieman erilaisen määritelmän sen mukaan, mille teollisuuden alalle sitä sovelletaan, ja minkä takia tuotteen hiilijalanjälkeä lasketaan.

Taulukko 1. *Hiilijalanjäljen määritelmiä. (Mukaiillen A Wright et al. 2011, s. 4)*

Lähde	Määritelmä
Moss et al. 2008	Yksityishenkilön tai yrityksen toiminnasta sekä tuotteen elinkaaren aikana syntyneiden suorien ja epäsuorien päästöjen kasvihuonekaasujen kokonaismassa
Fuglestedt et al. 2005	Hiilijalanjälkianalyysi on arvioitujen hiilidioksidipäästöjen ja muiden kasvihuonekaasupäästöjen summa liittyen tiettyyn toimintaan tai toimialaan
Peters 2010	Toiminnallisen yksikön hiilijalanjälki tarkoittaa ilmastovaikutusta, johon sisältyvät kaikki oleelliset päästölähteet, -nielut ja varastointi
Hertwich & Peters 2009	Hiilidioksidi, metaani, typpioksiduuli ja fluori, joita syntyy tavaroiden ja palveluiden tuotannossa sekä niiden käytön aikana syntyvät kasvihuonepäästöt
Johnson 2008	Hiilijalanjälki on yhtä kuin henkilön, organisaation tai tuotteen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt

Taulukkoon 1 on koottu esimerkkejä erilaisista määritelmistä hiilijalanjäljelle. Yleisesti ottaen useat hiilijalanjäljen määritelmät sisältävät niin sanotusti kaikki kasvihuonekaasut. Tätä voidaan pitää epämääräisenä, sillä useiden kasvihuonekaasujen vaikutuksesta maapallon ilmastoon on käyty kiivasta keskustelua. Tästä johtuen ei voida olla varmoja, mitkä kasvihuonekaasut tulisi määritelmään sisällyttää ja mitkä jättää pois. On kuitenkin muita hiilijalanjäljen määritelmiä, jotka asettavat kasvihuonekaasujen sisällyttämisen rajan käyttämällä laillisesti valvottuja kasvihuonekaasuja, kuten kuusi Kioton pöytäkirjan kasvihuonekaasua. Tämä asettaa selkeästi määritellyn rajan, mikä vähentää väärintulkintoja. Toisaalta se luottaa siihen, että tarkat tiedot ovat saatavilla kaikista tapauksista vertailukelpoisuuden mahdollistamiseksi, mikä taas ei välttämättä aina ole totta. (Wang et al. 2011, s. 4)

On olemassa kaksi pääasiallista lähestymistapaa tuotteen hiilijalanjäljen määrittämiseen. Ne ovat prosessi- ja panos-tuotos-menetelmä. Prosessimenetelmä on alhaalta ylöspäin suuntautuva lähestymistapa. Siinä jokaiselle prosessille tuotteen elinkaareissa selvitetään hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen määrät, ja niiden yhteissumma muodostaa tuotteen hiilijalanjäljen. Koska prosessimalli vaatii yksityiskohtaista tietoa tuotteen koko elinkaaresta, on tuotteen hiilijalanjäljen selvittäminen aikaa vievä projekti. Suuressa mittakaavassa prosessimenetelmän käyttäminen on epäkäytännöllistä, sillä voi kestää päiviä selvittää hiilijalanjälki yhdelle tuotteelle. Suurin ongelma kuitenkin on se, että vaaditut tiedot eivät usein ole saatavilla, mikä heikentää laskennan tarkkuutta.

Tämä saattaa johtua siitä, että tavarantoimittaja ei halua paljastaa tietoja tuotantoprosesseistaan. (Barnett et al. 2013, s. 3, 4; Barnett et al. 2012, s. 2, 3)

Panos-tuotos-menetelmä taas on ylhäältä alas -lähestymistapa. Se perustuu hiili-intensiteetteihin. Hiili-intensiteetti tarkoittaa päästöjä suhteessa johonkin tiettyyn aktiviteettiin. Tässä menetelmässä hiili-intensiteetit määritellään useille aktiviteeteille. Tuote määritetään johonkin näistä aktiviteeteista, ja tuotteen attribuutti kerrotaan hiili-intensiteetillä. Näin saadaan selville tuotteen hiilijalanjälki. Panos-tuotos-menetelmä on nopea, ja se vaatii vain vähän tietoa itse tuotteen tuotannosta. Tästä syystä se soveltuu suurien tietoluetteloiden käsittelemiseen lyhyessä ajassa. Menetelmän pääasiallisena ongelmana on sen perustuminen keskiarvoihin. Tällöin se ei voi käsitellä mitä tahansa tuotekohtaista dataa. (Barnett et al. 2013, s. 3, 4; Barnett et al. 2012, s. 3)

Hiilijalanjälki auttaa päästöjen hallinnassa ja päästövähennystoimenpiteiden arvioinnissa. (Carbon Trust 2007, s. 5) Kun päästöt on kvantifioitu, tärkeimmät päästölähteet voidaan tunnistaa ja näin ollen priorisoida päästövähennyskohteet sekä lisätä tehokkuutta eri alueilla. Tämä tarjoaa mahdollisuuden ympäristötehokkuuteen ja kustannussäästöihin. Hiilijalanjäljen raportointia kolmannelle osapuolelle tai sen julkistamista voidaan tarvita niin lainsäädännön vaatimusten vuoksi kuin osana yritysten yhteiskuntavastuuta tai brändi-imagon kehittämistä. (Carbon Trust 2007; L.E.K. Consulting LLP 2007). Hiilijalanjäljellä on valtava merkitys liiketoiminnalle, sillä päästövähennykset edesauttavat kilpailuedun saavuttamisessa. (Pandey et al. 2011, Kleiner 2007 mukaan)

Teollisuusyritykset käsittelevät suuria materiaalivirtoja, minkä vuoksi ne ovat suuressa roolissa kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttajina. Yritysten hiilijalanjälkeen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa valtion sääntely, markkinapaineet, tuotantoteknologia, kuluttajatietoisuus, yrityksen koko ja kierrätys. Lisäksi on havaittu, että raaka-aineen hinta ja yritysten tietoisuus sosiaalisesta vastuusta ovat hieman vaikuttaneet yritysten hiilidioksidipäästöihin. (Liu 2014, s. 1) Valmistavat yritykset hyötyvät hiilitehokkaasta toimitusketjusta, sillä siitä on useita etuja. Hiilitehokkuus toimitusketjuissa parantaa kustannussäästöjä riippumatta siitä, onko yritys strategisesti linjassa vai ei. Lisäksi se voi parantaa toimitusten reagointikykyä ja innovaatioita. Myös tuotteen laatu ja asiakaspalvelu voivat parantua hiilitehokkuudella. (Olatunji et al. 2019, s. 6)

## 2.2 Elinkaariarviointi

Tuotteen hiilijalanjälkilaskenta perustuu elinkaariarviointiin (life cycle assessment). Sillä tarkoitetaan menetelmää, jolla voidaan arvioida ja analysoida tuotteen tai palvelun vaa-

timia resursseja ja ympäristövaikutuksia. Elinkaariarviointi voi kattaa täydellisen elinkaaren, jolloin arvioidaan ja analysoidaan raaka-aineiden tai materiaalien hankinta luonnosta, niiden prosessointi ja kuljetus tuotantolaitokselle, tuotteen valmistus, jakelu, käyttö, uudelleenkäyttö, huolto, kierrätys ja hylkääminen. Usein elinkaariarviointi toteutetaan suppeammassa muodossa, sillä näin laajan elinkaariarvioinnin tekeminen on aikaa vievää ja työlästä. Yksinkertaistettu elinkaariarviointi (streamlined life cycle assessment) tarkoittaa esimerkiksi tietyn päästön, kuten hiilidioksidipäästöjen tarkastelua tai siinä voidaan tutkia vain rajattua osaa tuotantoprosessista. Elinkaariarvioinnista voi olla apua, kun tunnistetaan tuotteiden ympäristösuorituskyvyn parantamismahdollisuuksia, tarjotaan tietoa teollisuuden prosessien suunnittelua ja kehittämistä varten tai laaditaan tuotteen ympäristöselostetta. (Suomen Standardisoimisliitto SFS-EN ISO 14040:2006+A1:2020, s. 7; Suomen ympäristökeskus 2017, s. 2)

Elinkaariarviointi juontaa juurensa aina 1960-luvulle asti. Jo silloin huoli ympäristön saastumisesta sekä materiaalien ja energian ehtymisestä on johtanut elinkaarilähestymistapojen kehitystä. Ensimmäisestä menetelmäehdotuksesta lähtien elinkaariarviointi on kehittynyt voimakkaasti sekä metodologiassa että sovelluksissa. Tämän takia se on tällä hetkellä hyvin tunnettu ja laajalti käytetty työkalu teollisuudessa, korkeakouluissa ja politiikassa. (Hauschild et al. 2018, s. 17)

Elinkaariarviointi on läpäissyt eri kehitys- ja käyttöönottovaiheita ja levinnyt laajalle hieman yli 60 vuodessa: alkuvuosien kausi (1960–1970), suunnittelukausi (1970–1990), standardointikausi (1990–2000), valmistelukausi (2000–2010) ja käsitteen laajennuskausi (2010–toistaiseksi). (Benedetto et al. 2013, s. 6) Elinkaariarvioinnin ensimmäiset vaiheet 1960-luvulla osoittivat, että löydettiin tapoja ottaa huomioon energia- ja materiaaliressit koko tuotteen valmistuksessa. (Amahmoud et al. 2022 s. 6, SAIC 2006 mukaan) Ajanjakso 1970–1990 taas sisälsi LCA-käsityksen leviämisen laajalti poikkeavilla lähestymistavoilla, terminologioilla ja tuloksilla. (Guinee et al. 2011, s. 2) 1990-luvulla elinkaariarvioinnin asiantuntijoiden ja SETAC:n (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) välinen yhteistyö johti elinkaariarviointikehityksen ja metodologian jatkuvaan kehittämiseen ja standardointiin. Yksi yhteistyön tärkeimmistä tuloksista oli käytäntösäännöt. (Khasreen et al. 2009, s. 4) Vuosina 2000–2010 elinkaariarvioinnista tuli tärkeä päätöksentekoväline ja laajalti käytetty menetelmä. (Guinee et al. 2011, s. 2–3) Vuoden 2010 jälkeen on ilmaantunut elinkaaren kestävä kehityksen arvioinnin viitekehys, jonka tavoitteena on ottaa huomioon kestävä kehityksen ympäristölliset, sosiaaliset ja taloudelliset ulottuvuudet. (Guinée et al. 2016, s. 2–3)



**Kuva 1.** Elinkaariarvioinnin neljä päävaihetta. (Mukaillen Ympäristöhallinto 2013)

Elinkaariarvioinnissa on neljä eri vaihetta, jotka on esitelty Kuvassa 1. Ensimmäinen vaihe on tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, jossa päätetään arvioinnin tavoitteet ja soveltamisala. Tavoitteissa ilmaistaan aiottu käyttötarkoitus, syyt selvityksen tekemiselle ja kenelle saaduista tuloksista on tarkoitus viestiä. Lisäksi kerrotaan, onko tuloksia tarkoitus käyttää julkisesti esitettävissä vertailuväitteissä. Soveltamisalaan sisältyvät muun muassa tutkittava tuotejärjestelmä ja sen toiminnot, toiminnallinen yksikkö, järjestelmän rajat, lähtötietojen laatuvaatimukset ja selvityksestä laadittavan raportin ohjeet. Asetettaessa järjestelmän rajoja tulee ottaa huomioon esimerkiksi raaka-aineiden hankinta, kuljetus sekä sähkön ja lämmön käyttö. Usein aluksi määriteltäviä järjestelmän rajoja joudutaan tarkentamaan myöhemmin. Lähtötietojen laatuvaatimuksissa määritellään yleisellä tasolla tarvittavan tiedon luonne. Se on tärkeää, jotta tuloksia osataan tulkita oikein ja käsitetään niiden luotettavuus. (Suomen Standardisoimisliitto SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020, s. 19, 20; Suomen ympäristökeskus 2017, s. 3)

Seuraava vaihe on inventaarioanalyysi. Siinä kerätään tarvittavat tiedot yksikköprosesseista, joita energia- ja materiaalivirrat yhdistävät. Tarvittavat tiedot ja yksityiskohtaisuus määräytyvät ensimmäisessä vaiheessa tehtyjen päätösten mukaan. Koska elinkaariarviointi on iteratiivinen prosessi, tietoa kerättyä saattaa olla tarpeen muokata soveltamisalaan liittyviä näkökohtia, jotta alun perin määritellyt tavoitteet toteutuvat. Tiedonkeruun jälkeen tarvitaan laskentamenettelyjä. Niitä ovat tietojen varmentaminen sekä suhteuttaminen yksikköprosesseihin ja toiminnallisen yksikön vertailuvirtaan. Niiden avulla

järjestelmän jokaisen yksikköprosessin ja tuotejärjestelmän toiminallisen yksikön inventaariotulokset muodostetaan. (SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020, s. 19, 21; Suomen ympäristökeskus 2017, s. 3)

Kolmannen vaiheen eli vaikutusarvioinnin tavoitteena on tarkastella päästöjen tai haitallisten toimien vaikutusta esimerkiksi ihmisten terveydelle, joka on yleisesti hyväksytty, niin sanottu suojeltava kohde. Inventaariotiedot luokitellaan yhteen tai useampaan vaikutusluokkaan. Ne muunnetaan yhteiseen yksikköön, ja saadut tulokset yhdistetään vaikutusluokan sisällä. Tuloksena on yksittäinen luku, joka kuvaa koko vaikutusluokan indikaattoritulosta. Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyssä päätetyt tavoitteet ja soveltamisala vaikuttavat vaikutusarvioinnissa käytettyihin menetelmiin, arvioitavien ympäristökysymysten valintaan ja yksityiskohtaisuuteen. (Suomen Standardisoimisliitto SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020, s. 22; Suomen ympäristökeskus 2017, s. 4)

Viimeisenä vaiheena on tulosten tulkinta, jossa arvioidaan muun muassa tuloksiin vaikuttavia tekijöitä ja niiden johdonmukaisuutta. Tulosten tulisi olla määritellyn tavoitteen ja soveltamisalan mukaisia. Lisäksi ne on tarkoitus esittää helposti ymmärrettävässä, täydellisessä ja johdonmukaisessa muodossa. Saatujen tulosten perusteella tehdään johtopäätökset ja toimenpidesuosituksia sekä selvitetään rajoituksia. (Suomen Standardisoimisliitto SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020, s. 24; Suomen ympäristökeskus 2017, s. 4)

Ei ole olemassa yhtä tiettyä menetelmää elinkaariarvioinnin toteuttamiseen. Riippuen organisaatiossa tarkoitetun soveltamistavan ja organisaation vaatimusten mukaisesti sillä on vapaus toteuttaa elinkaariarviointi ISO 14040 standardissa määritellyllä tavalla. Elinkaariarviointi eroaa monista muista tekniikoista, kuten ympäristövaikutusarvioinnista, koska se on toiminnalliseen yksikköön perustuva suhteellinen lähestymistapa. Siinä käsitellään potentiaalisia ympäristövaikutuksia. Se ei ole ennuste tarkoista tai todellisista ympäristövaikutuksista, koska epävarmuus on luontaista ympäristövaikutusten mallintamiselle ja ympäristötietoja yhdistetään eri paikoista ja eri ajankohdilta. (Suomen Standardisoimisliitto SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020, s. 16, 17)

Elinkaariarviointia voidaan käyttää hiilijalanjäljen selvittämisen lisäksi myös muissa yrityksen toiminnoissa. Sen avulla on mahdollista osoittaa alueita, joita kehittämällä koko yrityksen arvoketjun toimintaa voidaan tehostaa. Elinkaariarviointi auttaa ymmärtämään, mitkä teolliset järjestelmät ovat mukana tuotteiden valmistuksessa ja palveluiden toimittamisessa loppukäyttäjille. Lisäksi sillä voidaan osoittaa, onko tietyillä parannuksilla yhdessä osassa markkinaketjua merkittävää positiivista vaikutusta koko elinkaaren ajan. (Guine et al. 2002, s. 9)



Elinkaariarviointi ei mittaa tuotteen tai sen ainesosien suorituskykyä. Se ei yleensä sisällä tuotekehitykseen, myyntiin tai hallintoon liittyvien toimintojen energioita tai jätteitä. Lisäksi elinkaariarviointi ei yleensä sisällä jokaista yksittäistä materiaalia, eli sellaisia, joiden yhteismäärä on alle yksi prosentti prosessipanosten nettopainosta. Se ei yleensä myöskään ota huomioon esimerkiksi työntekijöiden työmatkoja tai kodin ja työpaikan välisiä matkoja. Elinkaariarviointi ei määrittele, mitä erityisiä toimia tulee tehdä, vaan se tarjoaa sidosryhmille tuloksia päätöksenteon tueksi. (Guine et al. 2002, s. 10)

### 2.3 Tuotteen hiilijalanjälkilaskennan standardeja

Tuotteen hiilijalanjäljen määrittämiseen on olemassa useita standardeja ja normeja, jotka on kehitetty ja joita kehitetään edelleen vastauksena tuotteiden kasvihuonekaasupäästöjen avoimuuden tarpeeseen. Kolme maailmanlaajuisesti tunnettua tuotteen hiilijalanjälkistandardia ovat ISO 14067, PAS 2050 ja Greenhouse Gas Protocol. Kaikki kolme standardia perustuvat olemassa oleviin ISO 14040- ja ISO 14044 -standardien mukaisiin elinkaariarviointimenetelmiin. (Winergy Technologies 2022)

ISO 14067 on yleisstandardi, joka koskee tuotteiden hiilijalanjäljen laskemista. Tavoitteena on laskea potentiaalinen vaikutus ilmaston lämpenemiseen hiilidioksidiekvivalenttina ilmaistuna. Tämä pitää sisällään kaikki merkittävät kasvihuonekaasupäästöt ja -poistumat tuotteen elinkaaren ajalta tai valituista prosesseista rajauskriteerien mukaisesti. (Suomen Standardisoimisliitto SFS-EN ISO 14067:2018, s. 23)

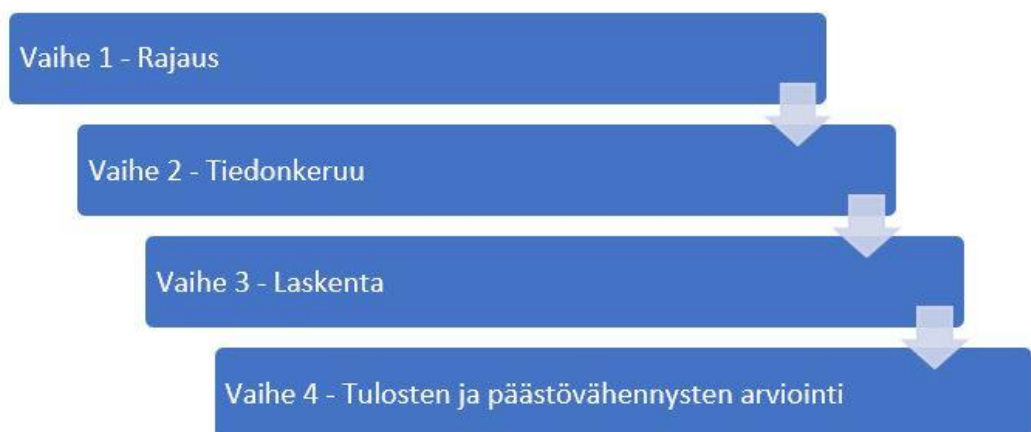
Tuotteen hiilijalanjäljen laskennassa otetaan huomioon raaka-aineiden hankinta, suunnittelu, tuotanto, kuljettaminen tai toimittaminen, käyttö ja loppukäsittely. Jotta johtopäätökset saavutetaan tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyn mukaisesti, menetelmiä, oletuksia ja tietoa sovelletaan samalla tavalla koko hiilijalanjälkilaskennan ajan. Laskentaan tulee ottaa mukaan kaikki analysoitavaan järjestelmään yhdistettävissä olevat prosessit ja virrat. Tärkeimpiä prosesseja ovat ne, jotka yhdessä muodostavat vähintään 80 prosenttia tuotteen hiilijalanjäljestä. Mikäli yksittäisten energia- ja materiaalivirtojen havaitaan olevan merkityksettömiä hiilijalanjäljen kannalta, voidaan ne rajata pois. (Suomen Standardisoimisliitto SFS-EN ISO 14067:2018, s. 20, 21, 25, 26)

Hiilijalanjälkiselvityksen tulee sisältää elinkaariarvioinnin neljä vaihetta, jotka esiteltiin luvussa 2.2 Elinkaariarviointi. Ensimmäisessä vaiheessa eli tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyssä on yksiselitteisesti esitettävä aiottu käyttötarkoitus, hiilijalanjälkiselvityksen tekemisen syyt, suunniteltu kohdeyleisö sekä hiilijalanjälkeä koskevien tietojen mahdollinen viestintä standardin ISO 14026 mukaan. Lisäksi on otettava huomioon ja määriteltävä selkeästi muun muassa tietoa ja tiedon laatua koskevat vaatimukset, sen ajallinen

rajaus, oletukset sekä hiilijalanjäljen selvitysraportti. Ensimmäisen vaiheen jälkeen tulee suorittaa elinkaari-inventaarioanalyysi. Se koostuu tietojen keräämisestä, varmentamisesta ja suhteuttamisesta yksikköprosessiin ja toiminnalliseen tai ilmoitettuun yksikköön. Lisäksi järjestelmän rajojen tarkentaminen ja allokointi kuuluvat siihen. (Suomen Standardisoimisliitto SFS-EN ISO 14067:2018, s. 22, 23, 24, 29)

Kolmas vaihe on vaikutusarviointi, jossa jokaiselle tuotejärjestelmän kasvihuonekaasupäästölle ja -poistumalle lasketaan potentiaalinen ilmastonmuutosvaikutus. Se lasketaan kertomalla vapautuneen tai poistuneen kasvihuonekaasun massa ilmaston sadan vuoden lämmityspotentiaalilla. Viimeiseen vaiheeseen, tulosten tulkintaan, kuuluvat merkittävien seikkojen yksilöinti, täydellisyyden, johdonmukaisuuden ja herkkyysanalyysin käsittelevä arviointi sekä johtopäätösten, rajoitusten ja suositusten muotoilu. (Suomen Standardisoimisliitto SFS-EN ISO 14067:2018, s. 39)

PAS 2050 on julkisesti saatavilla oleva spesifikaatio, joka tarjoaa menetelmän tavaroiden ja palveluiden elinkaaren aikana aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen arvioimiseen. Sitä voidaan käyttää kaikenlaisissa ja -kokoisissa organisaatioissa. PAS 2050 on työkalu, jonka avulla yritys voi arvioida tuotteiden olemassa olevia kasvihuonekaasupäästöjä löytääkseen energiansäästömahdollisuudet. Lisäksi se voi arvioida vaihtoehtoisia tuotekokoonpanoja, hankinta- ja valmistusmenetelmiä. PAS 2050:n avulla voi suunnitella jatkuvia ohjelmia kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Se on ensisijaisesti tarkoitettu yrityksen sisäiseen tai yritysten väliseen käyttöön. (British Standard Institution 2011, s. 1, 2)



**Kuva 2.** Hiilijalanjälkilaskennan vaiheet PAS 2050 -standardissa. (Mukaillen British Standard Institution 2011, s. 4)

Kuvassa 2 on esitetty neljä eri hiilijalanjälkilaskennan vaihetta PAS 2050 -standardissa. Ensimmäisessä vaiheessa kuvataan arvioitava tuote, määritetään arvioinnin yksikkö,

laaditaan prosessikartta, asetetaan järjestelmärajaus ja priorisoidaan tiedonkeruumenetelmät. Toisessa vaiheessa laaditaan tiedonkeruusuunnitelma, selvitetään tavarantoimittajilta laskentaa varten tarvittavat tiedot, kerätään päästökertoimet sekä analysoidaan ja tarkistetaan saatujen tietojen laatu. Seuraavaksi on hiilijalanjälkilaskennan vuoro. Kerättyjen tietojen avulla lasketaan tuotteen hiilijalanjälki. Vaiheeseen kuuluvat myös laskennan tarkistus ja kaikkien tietolähteiden ja oletusten kirjaaminen. Viimeisenä vaiheena on arvioida saatuja tuloksia ja tunnistaa mahdolliset päästövähennyskohteet. Lisäksi on hyvä arvioida, miten vähäiset muutokset lähtötiedoissa voivat vaikuttaa saatuun tuotteen hiilijalanjäljen lukuarvoon. (British Standard Institution 2011, s. 4)

Greenhouse Gas Protocol eli GHG-protokolla on World Business Council for Sustainable Development ja World Resources Institute -järjestöjen yhteishanke. Sen tehtävänä on kehittää kansainvälisesti hyväksytyjä kasvihuonekaasujen laskenta- ja raportointistandardeja sekä edistää niiden käyttöönottoa vähäpäästöisen talouden saavuttamiseksi maailmanlaajuisesti. Yksi kehitetyistä standardeista on GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard eli tuotestandardi, joka tarjoaa ohjeita yrityksille ja muille organisaatioille tiettyyn tuotteeseen liittyvien kasvihuonekaasupäästöjen ja -poistojen raportointiseksi. Sen ensisijainen tavoite on ohjata yrityksiä tekemään tietoisia valintoja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi tuotteissa, joita ne suunnittelevat, valmistavat, myyvät, ostavat tai käyttävät. (Bhatia et al. 2011, s. 4, 5)

GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard keskittyy tuotteen elinkaaren aikana syntyviin kasvihuonekaasupäästöihin ja -poistumiin. Tällöin se yksinkertaistaa analyysiä ja tuottaa tuloksia, jotka voidaan selkeästi välittää sidosryhmille. Tuotestandardi ei käsittele vältettäviä päästöjä tai toimenpiteitä vapautuvien päästöjen vähentämiseksi. Se on tarkoitettu räätälöitäväksi liiketoiminnan realiteettien mukaan ja palvelemaan useita liiketoimintatavoitteita. (Bhatia et al. 2011, s. 5, 7)



**Kuva 3.** Yleiskatsaus tuotestandardin vaiheisiin (mukaan Bhatia et al. 2011, s. 13)

Jotta kasvihuonekaasuinventaarior noudattaa tuotestandardia, tulee Kuvassa 3 esitetyt vaiheet suorittaa. Ensimmäisessä vaiheessa määritellään liiketoimintatavoitteet liittyen ilmastonmuutoksen hallintaan, suorituskyvyn seurantaan, toimittaja- ja asiakasvastuuseen sekä tuotedifferointiin. Seuraavaksi tulee tarkistaa, että raportoinnissa noudatetaan mm. johdonmukaisuuden ja läpinäkyvyyden periaatteita sekä elinkaarimenetelmiä. Näiden vaiheiden jälkeen on vuoro määrittää muun muassa laskennan kohteena oleva tuote, analyysiyksikkö ja vertailuvirta. Kun analysoitava tuote on määritelty, tulee laskentaan sisällyttää kaikki aiheelliset prosessit ja raportoida perustellusti mahdolliset poissuljettavat prosessit. Sen jälkeen tulee kerätä tietoa kaikista laskennassa mukana olevista prosesseista ja arvioida niiden laatua. Tarvittaessa yrityksen on myös allokoitava päästöt ja poistumat, jotta ne kuvastavat tarkasti tutkitun tuotteen ja sivutuotteiden osuutta kokonaispäästöissä ja -poistumissa. Epävarmuustekijöiden arvioimiseksi on hiilijalanjälkiselvityksessä raportoitava esimerkiksi käytetyt lämmityspotentiaalikerroimet ja laskentamallit. Laskettaessa tuotteen hiilijalanjälkeä on raportoitava muun muassa laskennan kokonaistulos hiilidioksidiekvivalenteina analyysiyksikköä kohti. Saatu tulos on varmistettava esimerkiksi kolmannen osapuolen toimesta. Viimeisinä vaiheina ovat raportointi ja vähennystavoitteiden asettaminen. (Bhatia et al. 2011, s. 10, 14, 15, 16, 17)

Taulukossa 2 on yleiskatsaus kolmesta edellä esitellystä standardista. Siitä käy ilmi, että standardien välillä on pieniä eroja. Elinkaarivaiheille PAS 2050 ja GHG-protokolla antavat vaihtoehtoisiksi kehdosta hautaan ja kehdosta portille -metodit, kun taas ISO 14067 antaa näiden lisäksi kaksi muuta vaihtoehtoa, portilta portille ja osittainen elinkaari. Li-

säksi ISO 14067 ei määrittele tarkkoja rajauskriteereitä laskennalle, kun taas GHG-protokolla edellyttää sille sadan prosentin täydellisyyttä. ISO 14067 ei edellytä biogeenisen hiilen sisällyttämistä hiilijalanjäljen tulokseen, kun taas PAS 2050:ssa varastoitua hiiliä otetaan vuoden sisällä otetaan huomioon laskelmissa. Yhteistä kaikille kolmelle standardille on, että ne käyttävät lämmityspotentiaalille sadan vuoden ajanjaksoa. Koska taulukossa esitetyt eri näkökohdat vaikuttavat eri tavoin tuotteen hiilijalanjäljen laskennassa saatuihin tuloksiin, jokainen standardi antaa erilaisen lopputuloksen, vaikka käytettäisiin samoja lähtötietoja. (Wang et al. 2018, s. 11)

Taulukko 2. Keskeiset näkökohdat standardeissa ISO 14067, PAS 2050 ja GHG-protokolla. (mukaillen Wang et al. 2018, s. 4)

	ISO 14067	PAS 2050	GHG-protokolla
Tavoitteet	Standardisoida kasvihuonekaasu-päästöjen laskenta ja niistä viestiminen	Tarjota yhtenäinen määrittely tavaroiden ja palveluiden kasvihuonekaasupäästöille	Tarjota yksityiskohtaiset ohjeet laskennalle ja raportoinnille
Elinkaarivaiheet	Kehdosta hautaan Kehdosta portille Portilta portille Osittainen elinkaari	Kehdosta hautaan Kehdosta portille	Kehdosta hautaan Kehdosta portille
Rajauskriteerit	Tarkkoja kriteerejä ei ole.	Tekijät, joilla on alle 1 %:n vaikutus lopputulemaan, voidaan jättää pois. Vähintään 95 % tuotteen koko elinkaaresta on sisällytettävä laskentaan.	Ei rajauskriteerejä, sillä 100 % täydellisyys on välttämätön.
Biogeeninen hiili	Jos hiilen varastointi lasketaan, se on raportoitava erikseen, mutta ei sisällytettävä hiilijalanjäljen tulokseen.	Varastoitua hiiliä 100 vuoden sisällä otetaan huomioon hiilijalanjälkilaskelmissa.	Kehdosta portille -järjestelmässä tunnustetaan biogeenisen hiilen varastointi.
Maankäytön muutos	Suora maankäytön muutos on dokumentoitava erikseen.	Eriyinen menettely; tarjoaa maaperän oletuspäästöt maakohtaisesti.	Antaa opastusta aiheutettavien vaikutusten määrittämiseen.
Lämmityspotentiaali	100 vuotta	100 vuotta	100 vuotta

## 2.4 Tuotteen hiilijalanjäljen laskeminen

Tuotteen hiilijalanjäljen määrittämiseksi tarvitaan lämmityspotentiaalikerroimia. Lämmityspotentiaali eli GWP (Global Warming Potential) kehitettiin mahdollistamaan eri kaasujen ilmastoon lämpenemisvaikutusten vertailu. Se mittaa, kuinka paljon energiaa yhden

kaasutonnin päästöt absorboivat tietyn ajanjakson aikana verrattuna yhden tonnin hiilidioksidipäästöihin. Mitä suurempi GWP on, sitä enemmän tietty kaasu lämmittää maapalloa verrattuna hiilidioksidiin kyseisenä ajanjaksona. Yleensä lämmityspotentiaaleille on käytetty 100 vuoden ajanjaksoa. Ne tarjoavat yhteisen mittayksikön, jonka avulla voidaan laskea yhteen eri kaasujen päästöarvioita. (US EPA 2022) Taulukossa 3 on esitetty PAS 2050 standardissa ja GHG-protokollassa käytettäviä GWP-kertoimia.

Taulukko 3. Kasvihuonekaasujen GWP-kertoimet. (mukailien British Standard Institution 2011, s. 9; Greenhouse Gas Protocol n.d., IPCC mukaan)

Kasvihuonekaasu	GWP-arvo (100 vuoden ajalta / PAS 2050)	GWP-arvo (100 vuoden ajalta / GHG Protocol)
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> )	1	1
Metaani (CH <sub>4</sub> )	25	28
Dityppioksidi (N <sub>2</sub> O)	298	265
HFC-yhdisteet	77–14 800	4–12 400
PFC-yhdisteet	7 390–17 700	6 630–17 400
Rikkiheksafluoridi (SF <sub>6</sub> )	22 800	23 500

Päästökertoimella tarkoitetaan syntyvän päästön määrää suhteessa tuotetun palvelun tai tuotteen määrään. Ne voivat kuvata elinkaaren tai käytönaikaisia päästöjä, pitää sisällään kaikki kasvihuonekaasupäästöt tai ainoastaan hiilidioksidipäästöt hiilidioksidiekvivalentteina. Toisinaan ne voivat edustaa tiettyä ajanjaksoa tai olla keskimääräisiä arvoja. Esimerkiksi sähköntuotannon päästökerroin usein ilmoitetaan muodossa g CO<sub>2</sub>/kWh. Jokaiselle hiilijalanjälkilaskennassa huomioitavalle asialle täytyy etsiä ja kohdistaa sopivin päästökerroin eli jonkin yksittäisen asian aiheuttama päästö. Niitä löytyy erilaisista tietokannoista. (OpenCO2.net 2022a)

Kuvassa 4 on esitetty hiilijalanjäljen laskentakaava. Hiilijalanjälki lasketaan kertomalla aktiivinen tieto päästökertoimella. Tarkasteltavan järjestelmän kokonaishiilijalanjälki saadaan, kun eri toimintojen hiilijalanjäljet summataan yhteen. (British Standard Institution 2011, s. 24)

Hiilijalanjälki = aktiivinen tieto (kg/l/kWh jne.) x päästökerroin (kg CO<sub>2</sub>e per kg/l/kWh jne.)

**Kuva 4.** *Hiilijalanjäljen laskentakaava. (mukaillen British Standard Institution 2011, s. 24)*

Ecoinvent on Life Cycle Inventory (LCI) -tietokanta, joka sisältää noin 18 000 tietojoukkoa, jotka kattavat useita sektoreita kuten maatalous, rakentaminen, muovit, metallit, kierrätys ja jätteiden käsittely. Ecoinventin tehtävänä on edistää ja tukea korkealaatuisten ympäristöarviointitietojen saatavuutta maailmanlaajuisesti. Se on voittoa tavoittelematon yhdistys, jonka kotipaikka on Sveitsin Zürich. Tietokantaa päivitetään vuosittain, jotta se sisältäisi uusimmat tiedot ja teknisiä parannuksia. (ecoinvent 2022a; ecoinvent 2022b)

OpenCO2.net on Clonet Oy:n kehittämä hiilijalanjälkialusta, jonka tavoitteena on lisätä yksityishenkilöiden ja yritysten tietämystä ilmastopäästöistä sekä auttaa päästöjen pienentämisessä ja järkevien hankintapäätösten tekemisessä. Se soveltuu sekä yrityksen että yksittäisen tuotteen hiilijalanjäljen laskentaan. Sitä voivat käyttää niin startup-, ptk-tai pörssiyritykset. Sen jatkuvasti kasvava päästötietokanta on Suomen kattavin, ja sen päästökerrointiedot ovat peräisin muun muassa tutkimuslaitosten julkaisuista, tieteellisistä artikkeleista, tilastoista tai hiilijalanjäljen laskeneilta yrityksiltä. Lisäksi alustalla on työkaluja esimerkiksi hiilikädenjäljen laskentaan sekä päästöjen vertailuun ja päästötietojen jakamiseen. (OpenCO2.net 2022b)

LIPASTO on Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä, joka on Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n toteuttama ja ylläpitämä. Järjestelmä kattaa tie-, raide-, vesi- ja ilmalikenteen sekä työkoneiden päästökertoimet. Sen rahoittamiseen ovat vuosina 2013–2017 osallistuneet esimerkiksi Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, Tilastokeskus ja Ympäristöministeriö. (LIPASTO 2022)

CO2data.fi on rakentamisen päästötietokanta. Se sisältää Suomessa käytössä olevien rakentamisen prosessien ja palveluiden sekä rakennustuotteiden keskimääräisiä päästötietoja. Palvelun tavoitteena on edistää vähähiilistä rakentamista ja yhdenmukaistaa rakennusten koko elinkaaren aikaisten ilmastovaikutusten laskentaa. Sen kehittämisestä

ja ylläpidosta vastaa Suomen ympäristökeskus (SYKE). (Rakentamisen päästötietokanta 2022)

## 2.5 Aiempia tutkimuksia tuotteen hiilijalanjäljestä

Rana *et al.* (2019) arvioivat tutkimuksessaan makeakirsikan toimitusketjun hiilijalanjälkeä. Toimitusketju sisälsi Italian Apulian alueella yleisesti viljellyn ja markkinoille tarkoitetun Ferrovia-lajikkeen viljelyn ja jalostusvaiheet. Tutkimus perustui LCA-menetelmään, ja toiminnallisena yksikkönä oli 0,5 kg makeakirsikoita pakattuna 19 g painavaan PET-muovipakkaukseen. Laskentaan sisältyi vaiheet taimitarhasta hedelmänjalostukseen ja PET-muovipakkauksen tuotantoprosessi. Taimitarhasta ja hedelmänjalostuksesta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa otettiin huomioon niin lannan hallinta, maaperän hoito kuin materiaalien ja työntekijöiden kuljetuksesta aiheutunut polttoaineen kulutus.

Tutkimuksessa saatiin 0,5 kg:n makeakirsikkarasialle hiilijalanjäljeksi 0,584 kg CO<sub>2</sub> ekv. Maatalouden hoidon osuus hiilijalanjäljestä oli hyvin merkittävä, 75,7 prosenttia. Hedelmänjalostuksen osuus oli 11,6 prosenttia ja PET-muovipakkauksen tuotantoprosessin 12,7 prosenttia. Taimitarhassa suurin yksittäinen tekijä hiilijalanjälkeen oli pohjaveden pumppaukseen kulunut sähkö, 15,8 prosenttia kokonaismäärästä. Keräyskeskuksen osalta suurimmat vaikutukset hiilijalanjälkeen oli sähkönkulutuksella, 5,6 prosenttia kokonaismäärästä ja vaurioituneiden tai vaatimustenvastaisten kirsikoiden jätteillä, 4,7 prosenttia kokonaismäärästä. (Rana *et al.* 2019)

Rana *et al.* (2019) korostivat tutkimuksessa, että lannan hallinta ja karsiminen vaikuttivat osaltaan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Lisäksi herkkyysanalyysi osoitti, että italialaisesta sähköverkosta tulevan sähkön korvaaminen aurinkosähköllä vähensi kasvihuonekaasupäästöjä 19 prosenttia.

Carneiro *et al.* (2022) arvioivat tutkimuksessaan perovskiittiaurinkokennon hiilijalanjälkeä. Arviointi suoritettiin LCA-menetelmää käyttäen, ja toiminnalliseksi yksiköksi määriteltiin yksi perovskiittiaurinkokennomoduuli 8,7 prosentin hyötysuhteella. Arviointi rajattiin kehdestä portille -tutkimukseksi sisältäen raaka-aineiden talteenoton ja käsittelyn sekä moduulin rakentamisen ja kokoonpanon. Inventaarioanalyysi tehtiin käyttämällä moduulin rakentamisesta ja kokoonpanosta saatua primaaridataa. Lisäksi kirjallisuutta ja Ecoinvent-tietokantaa käytettiin apuna.

Arvioinnissa ei otettu huomioon materiaaleja, jotka vastasivat alle kaksi prosenttia kokonaismäärästä. Kuljetuksissa oletettiin, että materiaalit on lähetetty tavarantoimittajan lähimmästä toimipisteestä joko kuorma-autolla Euroopasta tai laivalla Yhdysvalloista tai



Kiinasta. Syntyvä jäte ja pääpäästöt ryhmiteltiin yhteen ja käsiteltiin vaarallisina liuottimina polttamalla. Energiankulutusta arvioitiin käytetyistä laitteista ja niiden käyttöolosuhteista. Tutkimuksessa oletettiin, että käytettiin vain sähköenergiaa, joka oli peräisin portugalilaisesta matalajännitteisestä jakeluverkosta. (Carneiro et al. 2022, s. 3)

Perovskiittiaurinkokennomoduulin hiilijalanjäljeksi saatiin 32,88 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Kuljetuksen ja jätteenkäsittelyn osuus tuotteen hiilijalanjäljestä oli hyvin pieni, joten hiilijalanjälki muodostui pääasiassa materiaaleista ja energiasta. Tutkimuksessa todettiin, että siirtymällä portugalilaisesta energialähteestä peräisin olevasta sähköstä tavallisilla silikonipaneleilla valmistettuun uusiutuvaan sähkөөn tuotteen hiilijalanjälki pienenisi lähes 33 prosenttia. Materiaalien osalta kullalla oli merkittävin vaikutus tuotteen hiilijalanjälkeen. Tutkimuksen johtopäätös oli, että korvaamalla energianlähde ja kultakerros ympäristöystävällisemmillä vaihtoehdoilla saataisiin perovskiittiaurinkokennon hiilijalanjälkeä merkittävästi pienennettyä. (Carneiro et al. 2022, s. 4, 5)

Garcia & Freire (2014, s. 1) tutkivat Portugalissa valmistetun lastulevyn hiilijalanjälkeä. Tutkimuksessa arvioitiin neljän eri standardin, ISO 14067, GHG-protokollan tuotestandardi, PAS 2050 ja ilmastojuulistus, vaikutusta hiilijalanjäljen lukuarvoon. Toiminnallisena yksikkönä oli yksi kuutiometri lastulevyä, ja arvioita tehtiin sekä kehdesta portille että kehdesta hautaan -menetelmien mukaan.

Garcia & Freire (2014, s. 1) havaitsivat tutkimuksessaan, että tärkeimpinä eroina standardien välillä olivat biogeenisen hiilidioksidin käsittely, monitoiminnallisuus ja yksikköprosessien poissulkeminen. Tämän takia lastulevyn hiilijalanjäljelle saatiin useita arvoja. Kehdesta portille -menetelmällä lasketut arvot olivat -939–188 kg CO<sub>2</sub>-ekv/m<sup>3</sup>. Kehdesta hautaan -menetelmässä, jossa käytön jälkeen tuote poltettiin, arvot olivat 107–201 kg CO<sub>2</sub>-ekv/m<sup>3</sup>. Vastaavasti kehdesta hautaan -menetelmässä, jossa käytön jälkeen tuote päätyi kaatopaikalle, arvot olivat -692–433 kg CO<sub>2</sub>-ekv/m<sup>3</sup>. Näiden pohjalta todettiin, että biogeenisen hiilen varastoinnin sisällyttäminen (negatiivinen hiilijalanjälki) raportoituun hiilijalanjälkeen tai sen poissulkeminen (positiivinen hiilijalanjälki) raportoidusta hiilijalanjäljestä hallitsi tuloseroja. Lisäksi lastulevyn hiilijalanjälki oli erittäin herkkä poltosta syntyvän sähkön erilaiselle kirjanpidolle.

ISO 14067, GHG-protokolla ja PAS 2050 sisällyttävät hiilijalanjälkilaskelmaan biogeenisen hiilidioksidin päästöt ja poistumat. Ilmastojuulistuksessa ei oteta huomioon biogeenistä hiilidioksidia tai hiilen varastointia. Tämä voi vääristää vertailua kilpaileviin tuotteisiin, jotka eivät varastoi biogeenistä hiiltä. (Garcia & Freire 2014, s. 1)

## 2.6 Hiilijalanjäljen pienentäminen yrityksessä

Pyrittäessä vähentämään fossiilisia hiilidioksidipäästöjä kansallisella tasolla eri teollisuudenalojen fossiilisten hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on keskeistä, sillä ne käsittelevät suuria materiaalivirtoja ja kuluttavat suuria energiamääriä. Energian tehon käyttö johtaa korkeisiin hiilidioksidipäästöihin. (Robaina-Alves et al. 2015, s. 1–2) Hiilipäästöjä syntyy lähes kaikissa teollisuuden toimialoissa, materiaalien louhinnassa maankuoresta, tuotannossa, hankinnassa, varastonhallinnassa, tilausten käsittelyssä, kuljetuksissa, käytössä ja käytettyjen tuotteiden käyttöiän hallinnassa. Tämän takia on tehtävä parannuksia teollisissa käytännöissä, jotta kokonaishiilipäästöt eivät jatka nousuaan. (Stål et al. 2015, s. 1–2)

Yrityksillä on monia keinoja pienentää hiilijalanjälkeään. Hiilijalanjäljen pienentäminen voi myös auttaa yrityksiä pienentämään kustannuksia. Olemassa oleva ja helposti saatavilla oleva teknologia auttaa yrityksiä siirtymään kohti ympäristötietoisempaa suuntaa. Yksi helpoimmista tavoista pienentää hiilijalanjälkeä on siirtyä uusiutuvaan energiaan ja siten varmistaa, että yritys toimii puhtaammalla energialla aikaisempaan verrattuna. Useimmille yrityksille energiankäyttö on ylivoimaisesti suurin hiilijalanjälkeen vaikuttava tekijä. (Open Access Government 2019) Yrityksissä tarvitaan investointeja uusiutuvien energianlähteiden käytön lisäämiseksi, jotta aurinko- ja tuulivoiman hyödyntäminen on mahdollista. Lisäksi panostamalla tuotekehitykseen löydetään yrityksille ympäristö- ja energiatehokkaat teknologiat ja laitteet, joiden käytöllä voidaan merkittävästi vaikuttaa hiilijalanjäljen pienentämiseen. (Rahman et al. 2022, s. 11)

Toinen keino pienentää hiilijalanjälkeä on tutkia yrityksen toiminnassa syntyviä jätteitä. Paperijäte on merkittävä ongelma yritysten toimitiloissa, ja sen ympäristövaikutusten vuoksi ongelman ytimeen pääseminen edellyttää papeririippuvuuden vähentämistä toimistossa ja vaihtoehtoisten ratkaisujen etsimistä, kuten pilvipalveluiden laaja hyödyntäminen. Siellä missä jätteen vähentäminen on vaikeaa, kierrätysjärjestelmä voi auttaa vähentämään yrityksen hiilidioksidipäästöjä varmistamalla, että syntyvä jäte ei päädy kaatopaikalle. (Open Access Government 2019)

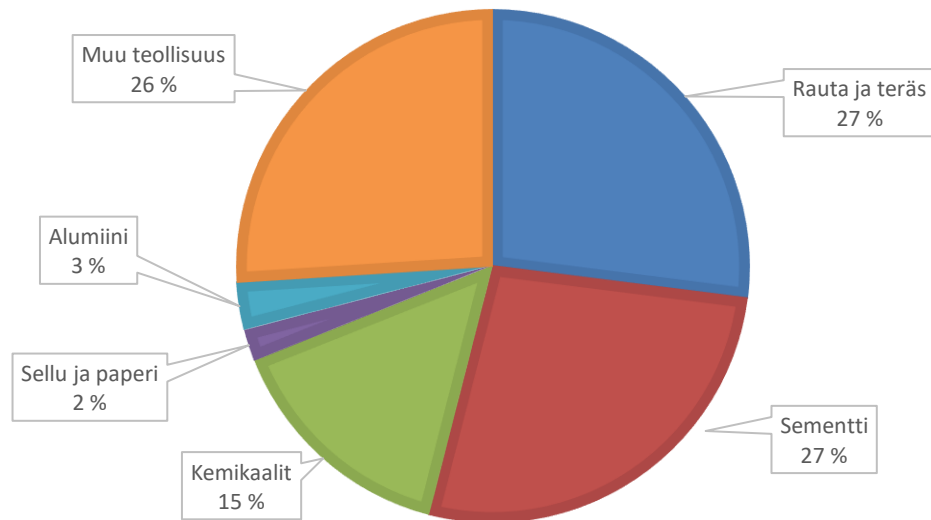
Viennin laatua yritykset voivat parantaa korostamalla puhtaita, tehokkaita ja ympäristöystävällisiä tuotantotekniikoita tuotteiden valmistuksessa, mikä vähentää hiilidioksidipäästöjä. Tämän takia viennin laadun parantamista koskevat toimet ovat erittäin hyödyllisiä ympäristön parantamisessa. (Rahman et al. 2022, s. 11) Mitä tulee kuljetuksiin, ne ovat toiseksi suurin teollisuuteen liittyvien hiilidioksidipäästöjen lähde, ja niiden osuus Yhdysvaltojen kokonaishiilipäästöistä vuonna 2018 oli yli 15 prosenttia. Tämän takia parantamalla tuotteiden kuljetusta yrityksen hiilijalanjälki voi pienentyä merkittävästi. On

olemassa erilaisia teknologioita, joita käyttämällä yritys voi vähentää kuljetuksista aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Kuormatilojen lastausohjelmistolla voi visualisoida tavaratilan ja järjestää sen mahdollisimman tehokkaalla tavalla maksimoidakseen kaiken käytettävissä olevan tilan. Tämän seurauksena voidaan tavaraa kuljettaa niin paljon kuin mahdollista ja samalla vähentää hiilidioksidipäästöjä vähentämällä kuljetusajoneuvojen tai matkojen määrää. Reitin optimointiohjelmisto taas on suunniteltu tehostamaan liikennettä, kun pysäkkejä on useita. Optimoinnissa voidaan ottaa huomioon erilaiset kriteerit, kuten aika, hinta ja polttoaine. Valitsemalla polttoainetehokkain reitti hiilijalanjälki minimoidaan. Lisäksi polttoainekäyttöisten ajoneuvojen vaihtaminen sähköajoneuvoihin pienentää hiilijalanjälkeä merkittävästi, etenkin alueilla, joilla suurin osa sähköstä tuotetaan ympäristöystävällisistä lähteistä, kuten tuulesta tai auringosta. (AIMultiple 2022)

## **2.7 Teräksen ympäristövaikutukset**

Kuvassa 5 on esitetty, miten suorat hiilidioksidipäästöt jakautuivat teollisuussektoreittain vuonna 2019 tehdyn raportin mukaan. Raudan ja teräksen tuotanto aiheuttivat 27 prosenttia teollisuuden suorista hiilidioksidipäästöistä. (IEA 2019). Vuonna 2021 maailmassa tuotettiin raakaterästä yli 1,9 miljardia tonnia. Teräksen valmistukseen käytetään rautamalmia, joka koostuu hapesta ja raudasta. Koska happi erotetaan raudasta hiilen avulla, yhden terästonnin valmistukseen tarvitaan yli puoli tonnia hiiltä. Valmistuksen aikana muodostuu hiilidioksidia, minkä takia teräksen tuotanto aiheuttaa runsaasti hiilidioksidipäästöjä. (Vattenfall 2022a; World Steel Association 2022)

## OSUUS MAAILMANLAAJUISISTA SUORISTA HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖISTÄ TEOLLISUUSSEKTOREITTAIN



**Kuva 5.** Maailmanlaajuiset suorat hiilidioksidipäästöt teollisuussektoreittain. (Mukaan Climate Solutions Series 2020, Malischek et al. 2019 mukaan)

Teräksen tuotannolla on monia ympäristövaikutuksia kuten päästöt ilmaan, jätevesien epäpuhtaudet sekä vaaralliset ja kiinteät jätteet. Terästehtaiden suurimmat ympäristövaikutukset aiheutuvat koksien kuivatuslauksesta eli koksauksesta ja raudan valmistuksesta. Koksaisuuneista vapautuu ilmapäästöjä, kuten koksikaasua, naftaleenia, ammoniumyhdisteitä, kevyttä raakaöljyä, rikkiä ja koksipölyä. Päästöt veteen tulevat koksien jäädyttämiseen käytetystä vedestä sen paistamisen jälkeen. Koksituuli ja muut yhdisteet saastuttavat sammutusveden. Sammutusvesi on kuitenkin käytettävissä uudelleen, ja suurin osa epäpuhtauksista voidaan poistaa suodattamalla. Raudanvalmistuksen sivutuotteista suurimmat osan muodostavat kuona sekä sulan raudan päälle kerääntyvät kalkkikiven ja rautamalmin epäpuhtaudet. Rikkidioksidi ja rikkivety haihdutetaan ja otetaan talteen ilmapäästöjen valvontalaitteissa ja jäännöskuona myydään rakennusteollisuudelle. Tämä ei ehkäise saastumista, mutta kiinteä jäte ei päädy kaatopaikalle. Valokaariuunien merkittävimmät jätteet ovat kaasupäästöt ja metallipöly. (GreenSpec 2022)

Kestävän kehityksen näkökulmasta ajateltuna terästuotannon kehityskohteita ovat jätteiden ja päästöjen vähentäminen valmistusprosessissa. Terästeollisuuden suurimmat hiilidioksidipäästöt syntyvät raudan tuotannosta masuuneissa. Päästöjä voidaan vähentää muun muassa poistamalla, varastoimalla tai kierrättämällä masuunissa syntynyt hiilidioksidi, rautamalmin elektrolyysillä pelkistyneen raudan tuottamiseksi sekä käyttämällä polttoaineena kestävää biomassaa. Samaan aikaan hiilen sitomisesta voi olla apua

myös päästöjen hallinnassa. Valmistuksen energiankulutusta voidaan vähentää merkittävästi korvaamalla vanhemmat masuunit suorapelkistys- tai sähkökaariuuneilla sekä hukkalämmön talteenottotekniikalla. Lisäksi terästuotannossa syntyviä sivutuotteita voidaan käyttää muiden prosessien raaka-aineina kuten sementin tuotannossa, elektrodien valmistuksessa, tienrakennuksessa ja maaperän parantamisessa. (Kumar & Nidheesh 2019, s. 8, 13)

Vuonna 2016 LKAB, SSAB ja Vattenfall aloittivat yhteistyön käynnistämällä HYBRIT-hankkeen, jonka tavoitteena on maailman ensimmäinen fossiilivapaa teräksen valmistustekniikka vuoteen 2035 mennessä. HYBRIT tulee sanoista Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology. Kyseessä on vedyn läpimurto terästeknologiassa, sillä perinteisessä rautamalmipohjaisessa teräksen valmistuksessa käytetyt hiili ja koksi on tarkoitus korvata fossiilivapaalla sähköllä valmistetulla vedyllä. Tällöin teräksen valmistuksessa syntyy hiilidioksidin sijaan vettä, ja valmistustekniikka ei käytännössä lainkaan aiheuta hiilidioksidipäästöjä. HYBRIT-hankkeen menestyminen tarkoittaisi sitä, että Suomen hiilidioksidipäästöjä voitaisiin vähentää seitsemän prosenttia. (SSAB 2022; Vattenfall 2022b)

### **3. TUOTTEEN HIILIJALANJÄLJEN SELVITTÄMINEN KOHDEYRITYKSESSÄ**

Tämän luvun alussa esitellään kohdeyrityksen toimintaa. Sen jälkeen kerrotaan työn empiirisen osion tavoitteista ja määritellään soveltamisala. Näiden jälkeen seuraa inventaarioanalyysi. Siinä kuvataan hiilijalanjälkilaskennassa käytetyt lähtötiedot ja käydään perusteellisesti läpi, miten laskenta on kullakin osa-alueella suoritettu. Jokaisen osa-alueen päästöt on taulukoitu tiedon esittämisen selkiyttämiseksi.

#### **3.1 Kohdeyritys**

Kohdeyritys on vuonna 1990 perustettu suomalainen perheyritys, joka kehittää ja valmistaa paineastioita mittatilaustyönä asiakkaan tarpeiden mukaan. Sen suunnittelemaa ja valmistamia tuotteita käytetään yli 50 maassa energia-, prosessi- ja kemianteollisuuden sekä kylmätekniikan sovelluksissa. Näistä esimerkkeinä voidaan mainita jalostamot, paperiteollisuus, voimalaitokset, nesteytettyä maakaasua kuljettavat alukset, jäähallit ja ilmastointijärjestelmät. Merkittävin osa tuotteista, yli 90 prosenttia, menee vientiin. Yritys työllistää Suomessa yli 300 henkilöä. Lisäksi sillä on tytäryhtiöitä Isossa-Britanniassa, Kiinassa, Saksassa ja Yhdysvalloissa. (Kohdeyrityksen kotisivut 2022)

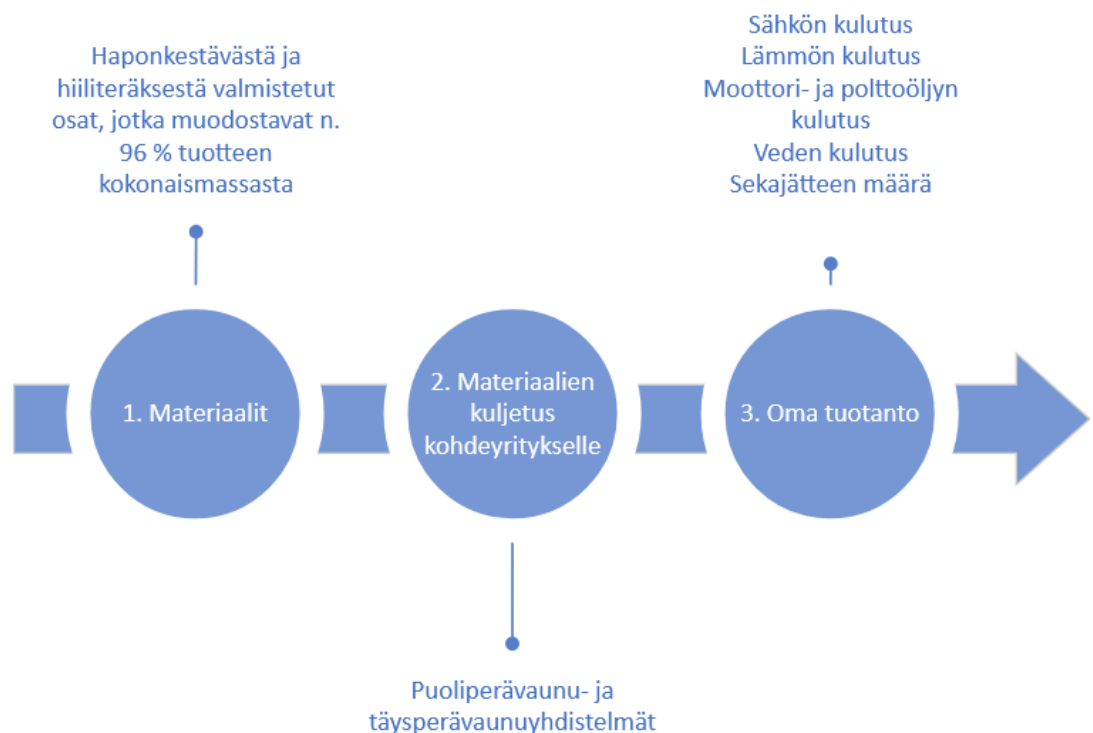
Vaikka kohdeyrityksen tuotteet ovat asiakasräätelöityjä, on niiden perusrakenne samanlainen. Tuote rakentuu levypakasta, vaipasta, päätylevyistä sekä yhdeputkista. Levypakka muodostuu yhteen hitsatuista levypareista. Vaippa taas valmistetaan joko putkesta tai levystä. Päätyjen paksuus vaihtelee lämpötilan ja paineen mukaan. Niiden materiaali on joko hiiliterästä tai haponkestävää terästä. Yhdeputket taas mahdollistavat nesteen tai kaasun virtaamisen tuotteessa. Tuotteita valmistetaan yhdeksässä eri kokoluokassa, ja eri suunnittelupaineet sekä asiakasräätelöinti aiheuttavat sen, että tuotteet ovat harvoin samanlaisia keskenään. (Kohdeyrityksen suunnitteluohje 2020)

#### **3.2 Laskennan tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely**

Tässä työssä tavoitteena oli laskea kohdeyrityksen valmistaman yhden tuotteen hiilijalanjälki. Se määritettiin pääasiassa ISO 14067 -standardia noudattaen (Suomen Standardisoimisliitto SFS-EN ISO 14067:2018). Laskennan tuloksia on mahdollista hyödyntää muun muassa hankintakanavien suunnittelussa ja tuotekehityksessä esimerkiksi materiaalivalinnoissa. Esimerkkinä laskennassa käytettiin vuonna 2021 valmistettua paineastiaa, joka on yksi myydyimmistä malleista. Laskennan toiminnallisena yksikkönä oli

yksi tuote, joten kaikki laskentatulokset on esitetty yhtä tuotetta kohti. Hiilijalanjälkilaskenta suoritettiin Microsoft Excel -laskentataulukko-ohjelmistoa käyttäen.

Laskenta tapahtui kehdestä portille -mallin mukaan, eli se ulottui tuotteen valmistuksen alkumetreiltä tuotteen pakkaamiseen asti (Circular Ecology 2022). Kuvassa 5 on esitetty laskentaan sisällytettävän järjestelmän rajausta. Materiaaleista laskennassa huomioitiin kuusi painavinta osaa, jotka yhdessä muodostivat noin 96 prosenttia tuotteen kokonaismassasta. Osien kuljetus kohdeyritykselle tapahtui puoliperävaunu- tai täysperävaunuyhdistelmillä. Kuljetuksissa ei huomioitu esimerkiksi ajoneuvojen paluumatkoja eikä jakelukierroksen pysähdyksiä eri asiakkaiden luona. Kohdeyrityksen tuotannon kohdalla yrityksen sähkön, lämmön, moottori- ja polttoöljyn kulutus sisällytettiin laskentaan. Lisäksi veden kulutus ja tuotannon aikana syntyvä sekajäte otettiin laskennassa huomioon.



**Kuva 6.** Järjestelmän rajausta.

Laskennassa käytettiin primaaridataa niiltä osin, kun se oli mahdollista. Mikäli sellaista ei ollut saatavilla, käytettiin sekundaaridataa. Materiaalien päästökertoimia haettiin valmistajien ympäristöselosteista. Kuljetusten kohdalla käytettiin VTT:n LIPASTO laskenta-järjestelmän ilmoittamia päästökertoimia Suomen tieliikenteessä (LIPASTO 2022). Sähkön päästökertoimena käytettiin sähkönmyyjän kotisivuilla ilmoitettua lukuarvoa, ja kaukolämmön päästökerroin löytyi sitä toimittavan yrityksen vuoden 2020 vuosikertomuk-

sesta. Polttoöljyn päästökertoimena käytettiin Tilastokeskuksen ilmoittamaa lukua (Tilastokeskus 2022). Vedelle löytyi päästökerroin OpenCO2.net -päästötietokannasta, ja se-kajätteen kohdalla hyödynnettiin WWF:n Ilmastolaskurin kertoimia (OpenCO2.net 2022c; WWF 2017). Laskennassa käytetyt kohdeyrityksen tuotanto- ja kulutustiedot oli-vat vuodelta 2021.

### 3.3 Inventaarioanalyysi

Laskennan kohteena olevan tuotteen kokonaismassa oli osaluettelon mukaan 3 088 kg, ja laskennassa huomioon otettujen osien materiaalit olivat joko haponkestävää terästä tai hiiliterästä. Taulukkoon 4 on eritelty osien materiaalit, aihoiden massat, valmiiden osien massat sekä niiden prosentuaalinen osuus tuotteen kokonaismassasta. Osa 1 prässätään ja leikataan haponkestävästä kelasta, joka tulee kohdeyritykselle suoraan tehtaalta. Osien 2, 3, 4 ja 5 aihiot tulevat kohdeyritykselle palvelukeskuksista, ja kohde-yritys koneistaa tai mankeloi ne lopulliseen muotoonsa. Osa 6 tehdään kohdeyrityksessä hitsaamalla yhteen osat 6.1 ja 6.2, jotka tulevat myös palvelukeskuksista.

Taulukko 4. *Osien materiaalit, massat ja prosenttiosuus tuotteen kokonaismassasta.*

Osa	Materiaali	Aihion massa (kg)	Valmiin osan massa (kg)	Valmiin osan massan osuus tuotteen kokonaismassasta (%)
Osa 1	Haponkestävä teräs	2 116	1 432	46
Osa 2	Haponkestävä teräs	62	60	1,9
Osa 3	Hiiliteräs	63	61	2,0
Osa 4	Hiiliteräs	688	688	22
Osa 5	Hiiliteräs	761	671	22
Osa 6.1	Hiiliteräs	10	10	0,3
Osa 6.2	Hiiliteräs	55	55	1,8
	Yhteensä	3 755	2 977	96 %

Taulukossa 5 on esitetty materiaalien kasviuonekaasupäästöt. Palvelukeskuksilla ei ollut hiilijalanjäljelle olemassa tarkkaa tuotekohtaista tietoa, joten päästökertoimina on laskennassa käytetty tehtaiden ilmoittamia tuotevaiheen arvoja. Osien hiilijalanjäljet on laskettu kertomalla valmiin osan massa päästökertoimella. Materiaalien kokonaispäästöiksi saatiin 9 082 kg CO<sub>2</sub>-ekv, josta suurimman osan, yli 50 prosenttia muodosti osa 1. Toiseksi suurin hiilijalanjälki, 1 864 kg CO<sub>2</sub>-ekv, oli osalla 4. Sen osuus materiaalien kokonaispäästöistä oli 20,5 prosenttia.



Taulukko 5. *Materiaalien päästöt.*

Osa	Toimitus	Valmiin osan massa (kg)	Päästökerroin, tuotevaihe A1-A3 (kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg)	Hiilijalanjälki (kg CO <sub>2</sub> -ekv)	Osuus materiaalien kokonaispäästöistä
Osa 1	Suoraan tehtaalta	1 432	3,39	4 854	53,5 %
Osa 4	Palvelukeskuksesta	688	2,71	1864	20,50 %
Osa 5	Palvelukeskuksesta	671	2,71	1818	20,00 %
Osa 2	Palvelukeskuksesta	60	3,39	203	2,20 %
Osa 3	Palvelukeskuksesta	61	2,71	165	1,80 %
Osa 6.2	Palvelukeskuksesta	55	2,71	149	1,60 %
Osa 6.1	Palvelukeskuksesta	10	2,71	27	0,30 %
	Yhteensä	2 977		9 082	

Laskennan kohteena olevan tuotteen valmistuksessa käytettävät osat tulevat kohdeyritykselle joko Suomesta tai Saksasta. Suomen kuljetuksissa käytetään täysperävaunuyhdistelmää (kokonaismassa 60 t, kantavuus 40 t). Saksan kuljetuksissa taas käytetään puoliperävaunuyhdistelmää (kokonaismassa 40 t, kantavuus 25 t). Täysperävaunuyhdistelmän päästökerroin maantieajossa täydellä kuormalla ajoneuvokilometriä kohden on 1,205 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Vastaava arvo puoliperävaunuyhdistelmälle on 0,962 kg CO<sub>2</sub>-ekv/km. (LIPASTO 2017a; LIPASTO 2017b)

Taulukossa 6 on ilmoitettu osien kuljetuksista aiheutuneet päästöt. Tehdas, josta osassa 1 käytettävä kela tulee, sijaitsee Suomessa noin 723 kilometrin päässä kohdeyrityksestä. Laskennassa oletettiin, että kela lastataan täysperävaunuyhdistelmään, jonka kuorma on täysi sen lähtiessä tehtaalta. Koska ei ollut tietoa auton reitistä eikä pysähdyksistä, oletettiin reitin pituudeksi tehtaalta kohdeyritykselle 723 kilometriä ilman pysähdyksiä ja kuorman kevenemistä. Tällöin ajosta aiheutuva suora päästö oli täysperävaunuyhdistelmän päästökerroin ajoneuvokilometriä kohden kerrottuna matkalla eli 1,205 kg CO<sub>2</sub>-ekv/km x 723 km. Tulokseksi saatiin 871 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Laskennassa käytettiin kelan massana 2 116 kg, joka on 5,29 prosenttia täysperävaunuyhdistelmän täydestä kuormasta 40 t. Tällöin osaan 1 kohdistettu kuljetuksen päästö on 46 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Osan 2 aihiot tulevat kohdeyritykselle Suomesta, 309 kilometrin päästä. Siitä aiheutuvat kuljetuksen päästöt laskettiin samalla periaatteella kuin osan 1 päästöt, ja tuloksiksi saatiin 372 kg CO<sub>2</sub>-ekv ja 0,58 kg CO<sub>2</sub>-ekv.

Osan 3 ja 5 aihiot tulevat kohdeyritykselle Saksasta. Tarkkaa tietoa reitistä ja kilometrimäärästä ei ollut saatavilla, joten laskennassa käytettiin matkana 1 725 kilometriä. Näidenkin osien kuljetuksen päästöt laskettiin samoja oletuksia noudattaen kuin osien 1 ja 2 kohdalla, ja osan 3 tuloksiksi saatiin 1 659 kg CO<sub>2</sub>-ekv ja 4,2 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Osan 5

tulokset olivat 1 659 kg CO<sub>2</sub>-ekv ja 50 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Osa 4 aihio ja osa 6.1 tulevat kohdeyritykselle palvelukeskuksesta, joka sijaitsee 264 kilometrin päässä kohdeyrityksestä. Osa 6.2 tulee palvelukeskuksesta, joka sijaitsee 67 kilometrin päässä kohdeyrityksestä. Osien yhteenlasketut kuljetusten päästöt olivat 107 kg CO<sub>2</sub>-ekv.

Taulukko 6. Kuljetuksen päästöt.

Osa	Kuljetustapa	Ajosta aiheutuva suora päästö yhteensä (kg CO <sub>2</sub> -ekv)	Osan massa suhteutettu päästö (kg CO <sub>2</sub> -ekv)
Osa 1	Täysperävaunuyhdistelmä	871	46
Osa 2	Täysperävaunuyhdistelmä	372	0,58
Osa 3	Puoliperävaunuyhdistelmä	1 659	4,2
Osa 4	Täysperävaunuyhdistelmä	318	5,5
Osa 5	Puoliperävaunuyhdistelmä	1 659	50
Osa 6.1	Täysperävaunuyhdistelmä	318	0,08
Osa 6.2	Täysperävaunuyhdistelmä	81	0,11
	Yhteensä		107

Taulukossa 7 on esitetty kohdeyrityksen energian käyttöä vuonna 2021 ja laskettu energiankulutuksesta aiheutuva hiilijalanjälki. Energian kokonaiskulutus oli 6 281 MWh. Sähkön osuus kokonaiskulutuksesta oli 57 prosenttia (3 602 MWh). Lämmön osuus oli 29 prosenttia (1 840 MWh), polttoöljyn 12 prosenttia (778 MWh) ja moottoripolttoöljyn yksi prosentti (61 MWh). Kohdeyritys valmisti vuoden 2021 aikana tuotteita 3 593 kpl, jolloin keskimääräinen sähkönkulutus yhtä tuotetta kohti oli 1,0 MWh ja lämpöenergian kulutus 0,51 MWh. Polttoöljyä kului keskimäärin 0,22 MWh per tuote ja moottoripolttoöljyä 0,02 MWh.

Sähkön päästökertoimen laskennassa käytettiin arvoa 194,59 kg CO<sub>2</sub>-ekv/MWh, joka oli sähkönmyyjän ilmoittama päästökerroin vuodelle 2020, sillä vuoden 2021 tietoja ei vielä ollut saatavilla. Tällöin sähköstä aiheutuvat päästöt yhtä tuotetta kohden oli likimäärin 195 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Kaukolämmön päästökerroin 22 kg CO<sub>2</sub>-ekv/MWh saatiin sitä myyvän yrityksen vuoden 2020 vuosikertomuksesta. Lämmöstä aiheutuva päästö yhtä tuotetta kohden oli noin 11 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Kohdeyrityksen käyttämä polttoöljy on rikitöntä kevyttä polttoöljyä, jonka päästökerroin on 70,2 tCO<sub>2</sub>/Tj (Tilastokeskus 2022). Kun tämä arvo kerrotaan 3,6:lla, saadaan se muunnettua muotoon kg CO<sub>2</sub>/MWh (LAB Open 2020). Näin ollen laskennassa käytettiin rikitömän kevyen polttoöljyn päästökertoimen arvoa 252,72 kg CO<sub>2</sub>-ekv/MWh. Poltto- ja moottoriöljystä aiheutuva päästö yhtä tuotetta kohden oli yhteensä noin 61 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Energiasta aiheutuva kokonaispäästö yhtä tuotetta kohden oli noin 267 kg CO<sub>2</sub>-ekv.

Taulukko 7. *Energian päästöt.*

Energia	MWh	MWh/tuote	Päästökerroin kg CO <sub>2</sub> -ekv/MWh	kg CO <sub>2</sub> -ekv/tuote
Sähkö	3 602	1,00	194,59	195
Lämpö	1 840	0,51	22	11
Polttoöljy	778	0,22	252,72	56
Moottoripolttoöljy	61	0,02	252,72	5
Yhteensä	6 281	1,75		267

Kohdeyritykseltä oli myös saatavissa tietoa veden kulutuksesta, mutta tuotantolaitoksen kokonaisjätevesimäärää ei ole mitattu. Ympäristöraportista selvisi jätemäärät kierrätysmetallille, -paperille, -pahville, -muoville, puulle, vaarallisille jätteille, energia- ja sekajätteelle. Näistä laskennassa huomioitiin vain sekajäte, jonka jätemäärä oli toiseksi suurin kierrätysmetallin jälkeen. Veden kulutuksen ja sekajätteen päästöt on esitetty taulukossa 8. Veden kulutus vuonna 2021 oli 0,712 m<sup>3</sup>/tuote ja sekajätteen määrä oli 32 kg/tuote. Veden päästökertoimena käytettiin arvoa 0,009 kg CO<sub>2</sub>-ekv/m<sup>3</sup> (OpenCO2.net 2022c). Kun veden päästökerroin kerrottiin veden kulutuksella, saatiin tulokseksi noin 0,006 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Sekajätteen päästökertoimena käytettiin arvoa 0,41 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg, jolloin siitä aiheutuvat päästöt per tuote olivat 0,41 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg x 32 kg ≈ 13 kg CO<sub>2</sub>-ekv (WWF Ilmastolaskuri 2017). Sekajätteen kuljetus ei sisälly laskentaan, sillä jätehuoltoyhtiön todellisesta ajoreitistä ei ollut tietoa. Tällöin sekajätteen kuljetusmatka olisi ollut hyvin karkea arvio, mikä olisi luonut epävarmuutta laskentaan.

Taulukko 8. *Veden ja sekajätteen päästöt.*

	Päästökerroin	Kulutus/tuote	kg CO <sub>2</sub> -ekv/tuote
Vesi	0,009 kg CO <sub>2</sub> -ekv/m <sup>3</sup>	0,712 m <sup>3</sup>	0,006
Sekajäte	0,41 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	32 kg	13
Yhteensä			13

## 4. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä luvussa esitetään kohdeyrityksen valmistaman tuotteen arvioitu hiilijalanjälki sekä tarkastellaan tulosten luotettavuutta herkkyystarkastelun muodossa. Luvun lopussa on mainittu muutamia hiilijalanjälkipalveluita tarjoavia yrityksiä, joiden avulla työn tulokset voitaisiin varmentaa.

### 4.1 Tulosten esittely

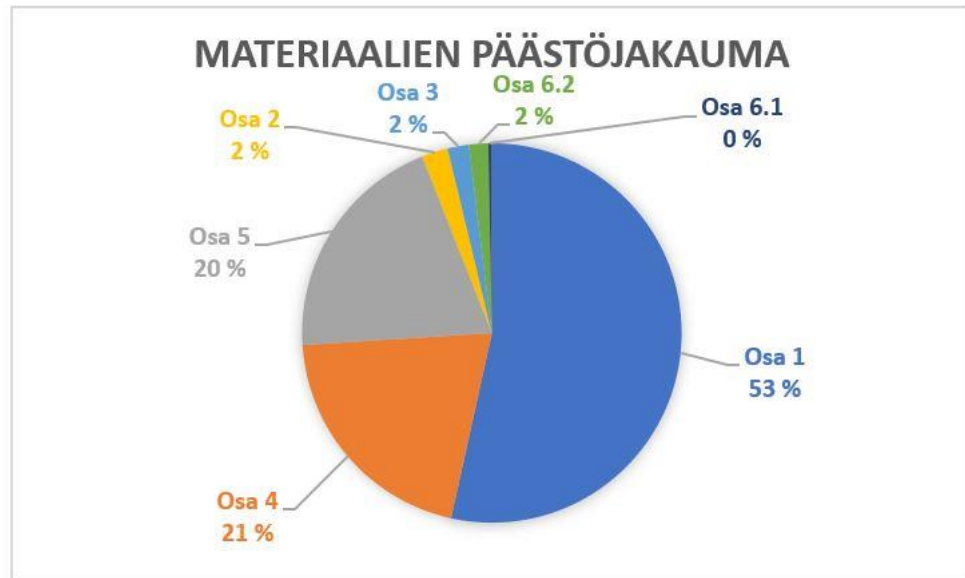
Kohdeyrityksen valmistaman tuotteen hiilijalanjälki laskettiin inventaarioanalyysin avulla luvussa 3. Esimerkkinä käytettiin vuonna 2021 valmistettua tuotetta, joka on yksi myydyimmistä malleista. Tuotteen kokonaishiilijalanjäljeksi kehdosta portille -metodia käyttäen saatiin 9 469 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Materiaalien osuus tuotteen kasvihuonekaasupäästöistä oli noin 96 prosenttia. Osan 1 aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt olivat 4 854 kg CO<sub>2</sub>-ekv eli noin 51 prosenttia tuotteen kokonaishiilijalanjäljestä ja noin 53 prosenttia materiaalien hiilijalanjäljestä.

Voidaankin todeta, että haponkestävä teräs oli merkittävin kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaja tuotteessa. Materiaalien jälkeen seuraavaksi eniten kasvihuonekaasupäästöjä aiheutti kohdeyrityksen energian käyttö. Sen osuus tuotteen kokonaishiilijalanjäljestä oli noin kolme prosenttia. Sähkön osuus energian päästöistä oli noin 73 prosenttia. Kolmanneksi eniten päästöjä aiheutui materiaalien kuljetuksista kohdeyritykselle. Niiden osuus kokonaispäästöistä oli kuitenkin vain yksi prosentti, eli niiden osuus ei ollut merkittävä kokonaishiilijalanjälkeä ajatellen. Taulukossa 9 on esitetty eri tekijöiden kasvihuonekaasupäästöt ja niiden osuus tuotteen kokonaispäästöistä. Veden ja sekajätteen päästöjen vaikutus tuotteen hiilijalanjälkeen oli mitättömän pieni, joten niiden osuudeksi kokonaispäästöistä on merkitty nolla prosenttia.

Taulukko 9. Tuotteen kokonaispäästöjen jakautuminen.

Tekijä	Kasvihuonekaasupäästöt (kg CO <sub>2</sub> -ekv)	Osuus kokonaispäästöistä (%)
Materiaalit	9 082	96
- Osa 1	4 854	51
- Osa 4	1 864	20
- Osa 5	1 818	19
- Osa 2	203	2
- Osa 3	165	2
- Osa 6.2	149	2
- Osa 6.1	27	0
Energia	267	3
- Sähkö	195	2
- Polttoöljy	56	1
- Lämpö	11	0
- Moottoripolttoöljy	5	0
Kuljetukset	107	1
- Osan 5 kuljetus	50	0,5
- Osan 1 kuljetus	46	0,5
- Osan 4 kuljetus	5,5	0
- Osan 3 kuljetus	4,2	0
- Osan 2 kuljetus	0,58	0
- Osan 6.2 kuljetus	0,11	0
- Osan 6.2 kuljetus	0,08	0
Vesi ja sekajäte	13	0
Yhteensä	9 469	100

Kuvassa 7 on esitetty, miten materiaaleista aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt jakaantuvat osien kesken. Materiaalien päästöistä 74 prosenttia muodostivat osat 1 ja 4. Kun tähän lisätään osa 5, voidaan todeta, että kolme osaa muodostivat 94 prosenttia materiaalien aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä.



*Kuva 7. Materiaalien päästöjakauma.*

## 4.2 Herkkyystarkastelu

Tuotteen hiilijalanjäljen laskennassa ilmeni lähtötietoihin kohdistuvia epävarmuustekijöitä, sillä kaikkia tarvittavia tietoja ei ollut tarkasti saatavilla ja oikean päästökertoimen valinta kullekin tekijälle tuotti paikoitellen haasteita. Herkkyystarkastelu tehtiin ensisijaisesti materiaalien ja energian päästöille, joilla laskennan perusteella oli merkittävin vaikutus tuotteen hiilijalanjälkeen. Lisäksi materiaalien kuljetuksiin liittyviä oletuksia ja epävarmuuksia analysoitiin myös.

Materiaalien päästökertoimina laskennassa käytettiin tehtaiden ympäristötuoteselosteissa ilmoitettuja lukuja. Haponkestävän teräksen ympäristötuoteseloste on julkaistu vuonna 2019, ja sen tiedot on mallinnettu vuoden 2017 tuotantotiedoista. Laskennassa käytetty päästökerroin 3,39 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg on yleisluku kylmävalssatuille haponkestäville teräksille. Suomen tehtaan teknisen johtajan mukaan vielä ei ole olemassa teräslajikohtaista tietoa päästökertoimista, mutta sellaisia odotetaan saatavan kesä-heinäkuussa 2022. (Sähköposti 6.5.2022; Ympäristötuoteseloste A) Hiiliteräksen kohdalla käytettiin ympäristötuoteselostetta, joka on julkaistu vuonna 2020. Myös sen tiedot on mallinnettu vuoden 2017 tuotantotiedoista. Siinä ilmoitettu päästökerroin 2,71 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg on yleisluku kuumavalssatuille hiiliteräslevyille. (Ympäristötuoteseloste B)

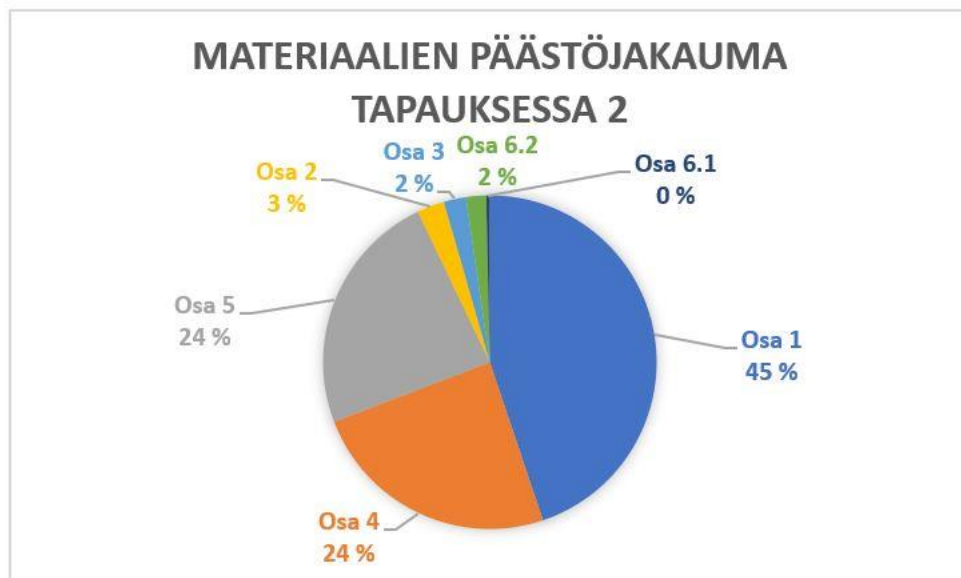
Voidaan todeta, että materiaaleihin liittyi kaksi olennaista epävarmuustekijää. Koska käytävissä ei ollut teräslajikohtaisia päästökertoimia materiaaleille, laskennassa käytetyt päästökertoimet ovat lähtökohtaisesti joko liian suuria tai liian pieniä. Selvitettäessä päästökerointa osalle 1 eli suoraan tehtaalta tulevalle haponkestävälle teräkselle kävi

ilmi, että oikea päästökerroin olisi välillä 1,40–3,40 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg. (Sähköposti 6.5.2022).

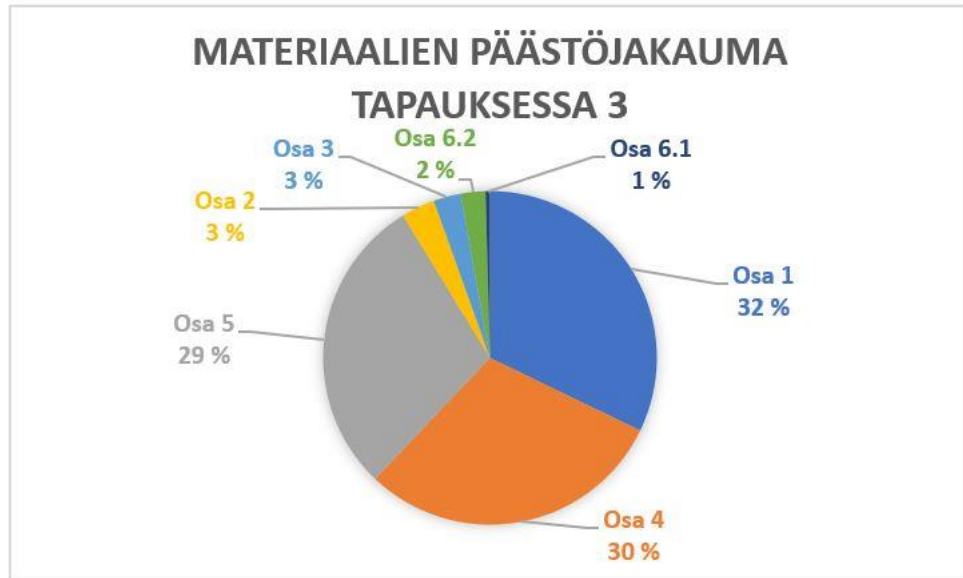
Taulukko 10. Osan 1 päästökertoimen vaikutus tuotteen hiilijalanjäljen suuruuteen.

Tapaus	Osan 1 päästökerroin (kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg)	Materiaalien kokonaispäästöt (kg CO <sub>2</sub> -ekv)	Tuotteen hiilijalanjälki (kg CO <sub>2</sub> -ekv)	Tuotteen hiilijalanjälki pienempi kuin tapauksessa 1
1	3,39	9 082	9 469	
2	2,40	7 663	8 050	15 %
3	1,40	6 231	6 618	30 %

Jos laskennassa käytettäisiin osalle 1 päästökertoimena 2,40 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg, olisivat materiaaleista aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt tällöin noin 7 663 kg CO<sub>2</sub>-ekv, eli tuotteen hiilijalanjälki olisi 15 prosenttia pienempi kuin käytettäessä päästökertoimena 3,39 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg. Mikäli päästökertoimena olisi 1,40 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg, materiaalien päästöiksi saataisiin 6 231 kg CO<sub>2</sub>-ekv, jolloin tuotteen hiilijalanjälki olisi 30 prosenttia pienempi kuin kertoimella 3,39 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg. Taulukossa 10 on kerrottu, miten osan 1 päästökertoimen arvo vaikuttaa tuotteen kokonaishiilijalanjälkeen. Kuvissa 8 ja 9 taas on havainnollistettu, miten materiaaleista aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt jakaantuisivat osien kesken, jos osan 1 päästökertoimena olisi luku 2,40 (tapaus 2) tai 1,40 (tapaus 3).



**Kuva 8.** Materiaalien päästöjakauma osan 1 päästökertoimen ollessa 2,40 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg.



**Kuva 9.** Materiaalien päästöjakauma osan 1 päästökertoimen ollessa 1,40 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg.

Tuotteessa olevat hiiliteräksestä valmistetut osat eivät kaikki ole saman tehtaan valmistamia. Tässä työssä on käytetty jokaiselle hiiliteräsosalle samaa päästökerrointa, sillä muiden tehtaiden lukuja ei ollut saatavilla. Lisäksi palvelukeskuksilta ei saatu tietoja tuotteiden hiilijalanjäljistä, joten niistä ostettujen osien kohdalla päästökertoimissa ei ole huomioitu esimerkiksi varastointia tai levyn työstöä. Todellisuudessa näiden osien päästökertoimet ovat suurempia kuin laskennassa käytetyt arvot.

Energian kulutustiedot saatiin kohdeyrityksen laatuinsinöörin lähettämästä Excel-tiedostosta, ja sähköenergialle sekä kaukolämmölle käytettiin myyjien ilmoittamia päästökertoimia parin vuoden takaa. Mikäli sähkön ja kaukolämmön myyjiltä olisi saatu vuoden 2021 päästökeroitiedot käyttöön, olisi laskennassa voitu käyttää ajantasaisinta päästökeroitietoa. Polttoöljylle ja moottoripolttoöljylle käytettiin Tilastokeskuksen ilmoittamaa päästökerointa, jota voidaan pitää perusteltuna valintana laskennan kannalta. Vaikka energian päästölaskennassa käytettyjä kulutustietoja ja päästökertoimia voidaan pitää luotettavina, kohdistuu energian aiheuttamiin päästöihin epävarmuutta. Laskennan kohteena olleen tuotteen valmistukseen käytetty energia laskettiin jakamalla kokonaisvuosikulutus kokonaistuotantomäärällä, eli arvio perustuu keskiarvoon. Todellisuudessa jokaisen tuotteen valmistukseen käytetään hyvin eri määrä energiaa, sillä toiset tuotteet vaativat enemmän työtä kuin toiset, esimerkiksi tuotteen kuivausaika voi olla vaikka kuusi tuntia tai jopa 48 tuntia. Tämän takia laskennassa tulisi energiasta aiheutuvat päästöt laskea jollakin toisella tavalla, jotta päästäisiin tarkempaan lopputulokseen.



Materiaalien kuljetusten kohdalla jouduttiin tekemään useita oletuksia, joten tulokset ovat niiltä osin vain suuntaa antavia. Kuljetusten todellisista reiteistä Suomessa ja Saksassa ei ollut tietoa. Tämän takia reitin pituudeksi on valittu lyhin reitti Google Mapsin perusteella. Todellisuudessa reitti Saksasta Suomeen sisältää lauttamatkoja, ja se kulkee useiden maiden kautta. Näitä asioita ei ole laskennassa otettu huomioon, vaan päästöt on laskettu käyttäen Suomen tieliikenteen päästökerrointa puoliperä- tai täysperävai- nuyhdistelmälle ja Google Mapsin ilmoittamia kilometrejä. Koska pysähdyksistä ja väli- puruista ei ollut tietoa, on laskennassa oletettu, että auton kuorma ei kevene matkan aikana, vaan auto ajaa yhtäjaksoisesti täydellä kuormalla kohdeyritykselle asti. Jotta ma- teriaalien kuljetusten päästöihin liittyvät epävarmuustekijät saataisiin minimoitua, tulisi hiilijalanjälkilaskennassa käyttää kuljetusyritysten ilmoittamia lähetyskohtaisia hiilijalan- jälkitietoja, mikäli sellaisia on saatavilla.

Lisäksi laskennassa otettiin huomioon veden kulutus ja syntynyt sekajäte tuotetta kohti. Veden päästökertoimena käytettiin OpenCO2.net -tietokannasta löytyvää arvoa, jota voi- daan pitää varsin luotettavana päästötietokantana. Kohdeyrityksessä syntyy sekajätteen lisäksi muutakin jätettä, mutta vain sekajäte huomioitiin laskennassa, koska sille oli löy- dettäväissä päästökerroin luotettavasta lähteestä ja kohdeyritys mittasi tuotekohtaista se- kajätteen määrää. Myös tässä käytetyt veden kulutus ja syntynyt sekajäte tuotetta kohti perustuivat keskiarvoihin, joten saatuihin päästölukemiin tulee suhtautua varauksella.

### 4.3 Tulosten varmentaminen

Ennen kuin tässä työssä saaduista hiilijalanjälkituloksista voidaan viestiä asiakkaille ja muille sidosryhmille, tulisi hiilijalanjälkipalveluita tarjoavan yrityksen suorittaa tuotteen hiilijalanjälkilaskenta. Tällöin varmistutaan siitä, että hiilijalanjälki perustuu luotettaviin laskentamenetelmiin ja lähtötietoihin sekä täyttää standardien mukaiset vaatimukset. Eräs tuotteen hiilijalanjälkilaskentaa tarjoava yritys on LCA Consulting Oy, jolla on noin 50 vuoden kokemus hiilijalanjälkiselvitysten toteuttamisesta. Se on tehnyt hiilijalanjälki- laskentoja sekä yrityksen sisäisiin että julkisiin käyttötarkoituksiin eri teollisuuden aloille muun muassa ISO 14067 -standardia ja GHG-protokollaa noudattaen. (LCA Consulting 2022)

Toinen esimerkki hiilijalanjälkilaskentaa tekevästä yrityksestä on Clonet Oy, jonka pal- veluihin kuuluu niin yrityksen, tuotteen kuin palvelun hiilijalanjäljen määrittäminen. Yri- tyksen hiilijalanjälkilaskennassa se käyttää Greenhouse Gas Protocol -standardeja ja tuotteen tai palvelun hiilijalanjälkilaskennassa ISO 14067 -standardia. Clonet Oy:llä las- kenta suoritetaan aina kahden asiantuntijan toimesta, eli toinen suorittaa sen ja toinen

varmentaa laskennan. Clonet Oy myöntää luotettavasta ja standardien mukaisesta hiilijalanjälkilaskennasta tuotteille ja yrityksille hiilijalanjälkimerkin. (Clonet Oy 2022)

Myös vuonna 2006 perustettu asiantuntijayritys PG Quality Oy tarjoaa hiilijalanjälkipalveluita. Sen toiminta-alueena on koko Suomi, ja sen asiakkaita ovat niin teollisuusyritykset, palvelualan yritykset kuin tutkimus- ja tuotekehitystoimintaa suorittavat organisaatiot. (PG Quality Oy 2022a) PG Quality Oy:n tarjoamat hiilijalanjälkipalvelut on tarkoitettu etenkin yrityksille, joilla on ISO 14001- ympäristöjärjestelmä. Suorittaessaan hiilijalanjälkilaskentaa yritys tutustuu ensiksi organisaatioon ja sen prosesseihin. Tämän jälkeen se valitsee standardit, joita se soveltaa hiilijalanjälkilaskennassa. PG Quality Oy:n tarkoituksena on selvittää suurimmat päästöjä aiheuttavat toiminnot sekä toiminnot, joiden osalta päästöjä voidaan helpoiten vähentää. Tuotteen hiilijalanjälkeä laskiessaan se käyttää esimerkiksi ISO 14067 -standardia, ja tuotteen elinkaari määritellään yhdessä asiakkaan kanssa. (PG Quality Oy 2022b)

## 5. YHTEENVETO

Tässä luvussa tarkastellaan työn päätuloksia ja tavoitteiden saavuttamista. Lisäksi esitetään, millaisia toimenpiteitä tulosten pohjalta kohdeyrityksessä voitaisiin tehdä. Luvun lopussa pohditaan työn onnistumista ja arvioidaan jatkotutkimuksen tarvetta.

### 5.1 Päätulokset ja niiden tarkastelu

Tämän diplomityön ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää, miten määritetään kohdeyrityksen valmistaman tuotteen hiilijalanjälki. Toisena tavoitteena oli selvittää, mitkä eri tekijät siihen vaikuttavat ja miten paljon. Kohdeyritykselle tuotteen hiilijalanjäljen tutkiminen oli merkittävä aihe, sillä asiakkaat ovat enenevässä määrin olleet kiinnostuneita tuotteen aiheuttamista ympäristövaikutuksista. Myös vastuullisuus nähdään kohdeyrityksessä tämän päivän ja etenkin tulevaisuuden kilpailuetuna, mikä lisäsi myös työn merkityksellisyyttä.

Työssä laskettiin hiilijalanjälki yhdelle kohdeyrityksen vuonna 2021 valmistamalle tuotteelle. Hiilijalanjälkilaskenta suoritettiin ensimmäistä kertaa kohdeyrityksen valmistamalle tuotteelle, joten tässä työssä tehtyä laskentaa ei ole voitu verrata aiempiin laskentoihin. Laskennassa sovellettiin kehdosta portille -mallia, ja siihen sisällytettiin tuotteen valmistuksessa käytettävistä materiaaleista kuusi painavinta osaa, joiden yhteenlaskettu massa oli noin 96 prosenttia tuotteen kokonaismassasta. Lisäksi laskennassa huomioitiin osien kuljetus kohdeyritykselle sekä tuotteen valmistukseen kuluva sähkö ja lämpö, polttoöljyn ja moottoripolttoöljyn kulutus, käytetty vesi ja syntynyt sekajäte.

Tuotteen hiilijalanjäljeksi saatiin noin 9 469 kg CO<sub>2</sub>-ekv. Merkittävin vaikutus tuotteen hiilijalanjälkeen oli materiaaleilla, joiden osuus tuotteen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä oli noin 96 prosenttia. Energian osuus tuotteen hiilijalanjäljestä oli noin kolme prosenttia, ja noin yhden prosentin muodostivat materiaalien kuljetukset kohdeyritykselle. Koska veden ja sekajätteen päästöjen vaikutus tuotteen hiilijalanjälkeen oli mitätömän pieni, niiden osuudeksi kokonaispäästöistä merkittiin nolla prosenttia.

### 5.2 Suositukset ja jatkotoimenpiteet

Työn kolmantena tavoitteena oli selvittää, millä keinoilla hiilijalanjälkeä voidaan kohdeyrityksessä pienentää, ja mikä on keinojen prioriteettijärjestys. Koska materiaalien osuus tuotteen hiilijalanjäljestä oli hyvin merkittävä, olisi kohdeyrityksessä ensisijaisesti hyvä

tutkia, miten niiden aiheuttamaa ympäristövaikutusta voitaisiin pienentää. Tuotteen valmistusta ohjaavat standardit, direktiivit ja lainsäädäntö asettavat tiettyjä vaatimuksia, minkä vuoksi mitä tahansa materiaalia laitteen valmistukseen ei voi käyttää. Tämän takia kohdeyrityksen keinot materiaalien suhteen saattavat olla hyvinkin rajalliset.

Kerätessä lähtötietoja kohdeyrityksen valmistaman tuotteen hiilijalanjälkilaskentaa varten kävi ilmi, että palvelukeskuksilla ei ollut antaa tietoa myymiensä tuotteiden hiilijalanjäljestä. Lisäksi tehtaiden ympäristötuoteselosteista ei käynyt ilmi teräslajikohtaisia päästökerroimia, vaan laskennassa jouduttiin käyttämään niin sanottuja yleislukuja. Jotta tuotteen valmistuksessa tarvittavien osien hiilijalanjäljestä saataisiin tarkkoja ja luotettavia lukuja, tulisi kohdeyrityksen saada niistä tietoa tavarantoimittajilta. Tulevaisuutta ajatellen olisi suositeltavaa, että kohdeyrityksessä alettaisiin selvittämään, onko tavarantoimittajilta mahdollista saada tällaista tietoa (lähi)tulevaisuudessa. Mikäli vastaus on ei, tulisi kohdeyrityksessä harkita, voidaanko yhteistyötä tavarantoimittajan kanssa jatkaa ja mahdollisesti etsiä vaihtoehtoinen toimittaja tilalle, jolta hiilijalanjälkitietoja on saatavissa. Jos luvussa 2.7 esitelty HYBRIT-hanke saavuttaa tavoitteensa ja tulevaisuudessa markkinoille saadaan fossiilivapaata terästä, tulee se vaikuttamaan myös kohdeyrityksen tuotteen hiilijalanjälkeen positiivisella tavalla. Vielä ei kuitenkaan ole varmaa tietoa hankkeen todellisesta aikataulusta eikä fossiilivapaan teräksen todellisista kustannuksista.

Kohdeyrityksen ostama sähkö ei ole alkuperätakuilla varmennettua, vaan se on perussähköä, jonka tuotantoon käytetään myös fossiilisia polttoaineita. Tässä työssä energian osuudeksi tuotteen hiilijalanjäljestä saatiin noin kolme prosenttia, ja edelleen sähkön osuudeksi noin kaksi prosenttia. Vaikka sen vaikutus tuotteen hiilijalanjälkeen oli pieni, yrityksen hiilijalanjälkeä ajatellen sen vaikutus on luultavasti jo merkittävä. Sähkösopimuksen päivittäminen uusiutuvilla energianlähteillä tuotettuun sähköön olisi yksinkertainen ja nopea tapa pienentää hiilijalanjälkeä kohdeyrityksessä, joten se on vahvasti suositeltava toimenpide.

Kohdeyrityksen käyttämiltä kuljetusyhtiöiltä olisi hyvä selvittää, onko niiltä saatavissa lähetyskohtaisia hiilijalanjälkiä. Tällöin kohdeyritys saisi tarkkaa tietoa myös materiaalien kuljetusten aiheuttamista ympäristöpäästöistä, sillä tässä työssä esitetyt tulokset ovat vain suuntaa antavia, koska laskentaan liittyi useita oletuksia ja epävarmuustekijöitä. Mikäli tietoja ei ole saatavissa, kohdeyrityksen kannattaa miettiä, käyttääkö se jatkossa saman kuljetusliikkeen palveluita vai edellytetäänkö niiltä jatkossa hiilijalanjälkitietojen saamista. Esimerkiksi Kaukokiito määritteli vastuullisuuden yhtiössään uudelleen vuonna 2021, ja sen tavoitteena on kuljettaa jokainen toimitus hiilineutraalisti vuoteen 2030 mennessä. (Kaukokiito 2022).

### 5.3 Työn onnistuminen ja jatkotutkimus

Työn onnistumista arvioitaessa voidaan todeta, että se vastaa sille asetettuun tavoitteeseen ja tutkimuskysymyksiin. Tutkimus on selkeä, hyvin jäsennelty ja sen kaikki vaiheet on raportoitu luvussa 3. Lukija saa hyvän kuvan, miten tutkimuksen kohteena olleen tuotteen hiilijalanjälki laskettiin, mitä lähtötietoja käytettiin ja mitä oletuksia jouduttiin tekemään. Paikoitellen lähtötiedot olivat puutteelliset tai käytettävissä ei ollut ajantasaisinta tietoa, minkä takia tässä työssä saatu tuotteen hiilijalanjäljen tulos on vain suuntaa antava arvio.

Työn teoriaosuus palvelee hyvin työn empiiristä osuutta, sillä siinä esitetään vain olennaista tietoa tutkimuksen kannalta. Koska hiilijalanjäljestä löytyy valtavasti tietoa niin tieteellisten artikkeleiden kuin yritysten omista raporteista tai kotisivuilta, oli paikoitellen haastavaa ja aikaa vievää löytää sopivaa, objektiivista ja tämän työn kannalta oleellista teoriaa. Teoriaosuudessa olisi enemmän voitu selvittää, miten merkittävänä tekijänä ympäristöasiat nähdään yrityksissä tänä päivänä ja millaista kilpailuetua ne yrityksille tuovat. Ajankäytöllisistä syistä niihin ei pureuduttu, ja työn teoreettista laajuutta voidaan pitää diplomityölle sopivana.

Kohdeyritys voi hyödyntää työn tuloksia, ja työn ohessa laadittua laskentatyökalua voidaan pienen jatkojalostuksen jälkeen käyttää tulevaisuudessa mille tahansa kohdeyrityksen valmistamalle tuotteelle. Kun ulkopuolinen taho on varmentanut laskentaprosessin luotettavuuden, saaduista tuloksista voidaan viestiä yrityksen ulkopuolelle ja laskentatyökalu voidaan ottaa yleiseen käyttöön eri osastoilla ja miksei jopa kohdeyrityksen tytäryhtiöissä.

Työn pohjalta nousi esiin joitain mahdollisia jatkotutkimusaiheita. Ensinnäkin tässä työssä tehtyä hiilijalanjälkilaskentaa voitaisiin laajentaa kattamaan koko kohdeyritystä. Tällöin yrityksessä voitaisiin tunnistaa sellaisia merkittäviä päästövähennyskohteita, joita tässä työssä ei käynyt ilmi. Lisäksi saataisiin kokonaisvaltaisempi kuva kohdeyrityksen toiminnan ympäristövaikutuksista. Koska tässä työssä ei otettu lainkaan kantaa siihen, millaisia kustannusvaikutuksia hiilijalanjäljen pienentämisellä on yritykselle, voisi toinen mahdollinen jatkotutkimus liittyä siihen.

Kolmas mielenkiintoinen aihe voisi liittyä kohdeyrityksen asiakkaiden näkemyksiin ja mielikuviin hiilijalanjäljen merkityksestä liiketoiminnassa. Kohdeyrityksen asiakkaiden edustajille voitaisiin lähettää kyselytutkimus aiheeseen liittyen tai heitä voitaisiin haastella aiheesta. Näin kohdeyritys saisi tietoa muuan muassa siitä, miten asiakasyrityksissä nähdään hiilijalanjäljen merkitys liiketoiminnalle. Tämä tieto on tärkeää kehitettäessä tulevaisuuden liiketoimintaa.

## LÄHTEET

- AIMultiple. (2022). 5 Ways to Reduce Corporate Carbon Footprint in 2022. [Viitattu 19.4.2022]. Saatavissa: <https://research.aimultiple.com/carbon-footprint-reduction/>
- Amahmoud, A., El Attar, M. M. & Meleishy, A. (2022). The Evolution of Life Cycle Assessment Approach: A Review of Past and Future Prospects. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol.992(1), 012002.
- Barnett, A., Barraclough, R. W., Becerra, V., & Nasuto, S. (2012). A comparison of methods for calculating the carbon footprint of a product.
- Barnett, A., Barraclough, R. W., Becerra, V., & Nasuto, S. (2013). A history of product carbon footprinting.
- Benedetto, G., Corinto, G. L., Rugani, B., V'azquez-Rowe, I. & Benetto, E. (2013). The Evolution of Life Cycle Assessment (LCA): Some Guidelines for Future Research in the Wine Sector. In Proceedings of the L Annual Meeting of SIDEA, Lecce. 14 p. Saatavissa: [https://u-pad.unimc.it/retrieve/handle/11393/200842/3032/Ben\\_et\\_al\\_sidea13.pdf](https://u-pad.unimc.it/retrieve/handle/11393/200842/3032/Ben_et_al_sidea13.pdf)
- Bhatia, P., Cummis, C., Draucker, L., Rich, D., Lahd, H. & Brown, A. (2011). Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. E-reader version. World Resources Institute. 154 p.
- British Standards Institution. (2011). The guide to PAS 2050:2011: how to carbon footprint your products, identify hotspots and reduce emissions in your supply chain. 79 p. Saatavissa: <https://www.bsigroup.com/globalassets/local-files/en-th/carbon-footprint/pas-2050-2011-guide.pdf>
- Carbon Trust. (2007). Carbon footprinting. An introduction for organizations. Saatavissa: <https://semspub.epa.gov/work/09/1142510.pdf>
- Carneiro, A. L., Martins, A. A., Duarte, V. C. M., Mata, T. M., & Andrade, L. (2022). Energy consumption and carbon footprint of perovskite solar cells. Energy Reports. Vol.8, pp.475–481.
- Circular Ecology. (2022). Environmental Glossary of Terms and Definitions. [Viitattu 3.9.2022]. Saatavissa: <https://circularecology.com/glossary-of-terms-and-definitions.html#.YxM3pbRBw2w>
- Climate Solutions Series. (2020). Decarbonizing Heavy Industry. [Viitattu 12.6.2022]. Saatavissa: <https://www.csis.org/analysis/climate-solutions-series-decarbonizing-heavy-industry>
- Clonet Oy. (2022). Strategia- ja laskentapalvelut. [Viitattu 17.6.2022]. Saatavissa: <https://www.clonet.fi/strategia-ja-laskentapalvelut/>
- Ecoinvent. (2022a). ecoinvent Database. [Viitattu 11.2.2022]. Saatavissa: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>

- Ecoinvent. (2022b). About ecoinvent. [Viitattu 11.2.2022]. Saatavissa: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-association/>
- Euroopan komissio. (2022). Ilmastonmuutoksen syyt. [Viitattu 14.6.2022]. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/clima/climate-change/causes-climate-change\\_fi](https://ec.europa.eu/clima/climate-change/causes-climate-change_fi)
- Euroopan parlamentti. (2021). Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä? [Viitattu 14.6.2022]. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-menessa>
- Euroopan parlamentti. (2022). EU:n päästökauppajärjestelmä ja sen uudistaminen. [Viitattu 14.6.2022]. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/priorities/ilmastonmuutos/20170213STO62208/eu-n-paastokauppajarjestelma>
- Garcia, R., & Freire, F. (2014). Carbon footprint of particleboard: a comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration. *Journal of Cleaner Production*. Vol.66, pp.199–209.
- Greenhouse Gas Protocol. (n.d.). Global Warming Potential Values. Saatavissa: [https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29\\_1.pdf](https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf)
- GreenSpec. (2022). Steel production & environmental impact. [Viitattu 27.5.2022]. Saatavissa: <https://www.greenspec.co.uk/building-design/steel-products-and-environmental-impact/>
- Guine, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Udo de Haes, H. A., ... & Wrisberg, M. N. (2002). Life cycle assessment. An operational guide to ISO standards, vols, 1-3.
- Guinée, J. (2016). Life Cycle Sustainability Assessment: What Is It and What Are Its Challenges?. In: Clift, R., Druckman, A. (eds) *Taking Stock of Industrial Ecology*. Springer, Cham. Saatavissa: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-20571-7\\_3](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-20571-7_3)
- IEA. (2019). Transforming Industry through CCUS. [Viitattu 12.6.2022]. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/transforming-industry-through-ccus>
- J. B. Guinee, R. Heijungs, G. Huppes, A. Zamagni, P. Masoni, R. Buonamici, T. Ekvall & T. Rydberg. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science and Technology*. Vol. 45(1), pp.90-96.
- Kaukokiito. (2022). Vastuullisuuden teemojen ja tavoitteiden syntyminen. [Viitattu 17.6.2022]. Saatavissa: <https://www.kaukokiito.fi/fi/tutustu-meihin/vastuullisuus/>
- Kauppalehti. (2019). Yritykset vitkastelevat ilmastoasioissa – Suurista 60 prosenttia tavoittelee hiilijalanjälkensä vähentämistä. [Viitattu 7.1.2022]. Saatavissa: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/yritykset-vitkastelevat-ilmastoasioissa-suurista-60-prosenttia-tavoittelee-hiilijalanjalkensa-vahentamista/d6758d96-b842-416d-8d3e-dfc8842194a0>
- Kohdeyrityksen kotisivut. (2022).

Kohdeyrityksen suunnitteluohje. (2020).

Kumar, M. S. & Nidheesh, P. V. (2019). An overview of environmental sustainability in cement and steel production. *Journal of Cleaner Production*. Vol.231, pp.856–871.

L.E.K. Consulting LLP. (2007). The L.E.K. Consulting carbon footprint report: Carbon footprints and the evolution of brand-consumer relationships. L.E.K. Consulting Research Insights. I. London. 5 p.

LAB Open. (2020). Energian hiilidioksidipäästöjen laskenta materiaalikatselmuksissa. [Viitattu 27.4.2022]. Saatavissa: <https://www.labopen.fi/lab-pro/energian-hiilidioksidipaastojen-laskenta-materiaalikatselmuksissa/>

LCA Consulting. (2022). Hiilijalanjälki. [Viitattu 15.6.2022]. Saatavissa: <https://lca-consulting.fi/palvelumme/hiilijalanjalki/#tuotteenhiilijalanjalki>

LIPASTO. (2017a). Puoliperävaunulla varustettu yhdistelmä Kokonaismassa 40 t, kantavuus 25 t Maantieajo. [Viitattu 22.4.2022]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kapptie.htm>

LIPASTO. (2017b). Varsinaisella perävaunulla varustettu yhdistelmä Kokonaismassa 60 t, kantavuus 40 t Maantieajo. [Viitattu 22.4.2022]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kavp60tie.htm>

LIPASTO. (2022). LIPASTO - Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. [Viitattu 11.2.2022]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/index.htm>

Liu, Y. (2015). Dynamic study on the influencing factors of industrial firm's carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*. Vol.103, pp.411–422.

M. M. Khasreen, P. F. Banfill & G. F. Menzies. (2009). Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. *Sustainability*. Vol.1(3), pp.674–701.

M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum and S. Olsen. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer. 1215 p.

Olatunji, O. O., Akinlabi, S. A., Ayo, O. O., Madushele, N., Adedeji, P. A., & Fatoba, S. O. (2019). Drivers and barriers to competitive carbon footprint reduction in manufacturing supply chain: A brief review. *Procedia Manufacturing*. Vol.35, pp.992–1000.

Open Access Government. (2019). Why businesses should be encouraged to reduce their carbon footprint. [Viitattu 13.4.2022]. Saatavissa: <https://www.openaccessgovernment.org/businesses-reduce-their-carbon-footprint/70383/>

OpenCO2.net. (2022a). [Viitattu 11.2.2022]. Saatavissa: <https://www.openco2.net/fi/taustaa>

OpenCO2.net. (2022b). [Viitattu 11.2.2022]. Saatavissa: <https://www.openco2.net/fi/>



OpenCO2.net. (2022c). Päästökertoimen tiedot – Veden tuotanto. [Viitattu 29.4.2022]. Saatavissa: <https://www.openco2.net/fi/paastokertoimet/tuote/veden-tuotanto/1722>

Pandey, D., Agrawal, M., & Pandey, J. S. (2011). Carbon footprint: Current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol.178, pp.135–160.

PG Quality Oy. (2022a). Parannamme yrityksesi ympäristötietoisuutta ja toimintaa. [Viitattu 19.6.2022]. Saatavissa: <https://pg-quality.fi/>

PG Quality Oy. (2022b). Hiilijalanjälki. [Viitattu 19.6.2022]. Saatavissa: <https://pg-quality.fi/palvelut/hiilijalanjaljen-laskeminen>

Rahman, M. M., Alam, K., & Velayutham, E. (2022). Reduction of CO2 emissions: The role of renewable energy, technological innovation and export quality. *Energy Reports*. Vol.8, pp.2793–2805.

Rakentamisen päästötietokanta. (2022). [Viitattu 11.2.2022]. Saatavissa: <https://co2data.fi/>

Rana, R. L., Andriano, A. M., Giungato, P., & Tricase, C. (2019). Carbon footprint of processed sweet cherries (*Prunus avium* L.): From nursery to market. *Journal of Cleaner Production*. Vol.227, pp.900–910.

Robaina-Alves, M.M., Moutinho, V. & Macedo, P. (2015). A new frontier approach to model the eco-efficiency in European countries. *Journal of Cleaner Production*. Vol.103, pp.562–573.

Sähköposti 6.5.2022

SFS-EN ISO 14040. (2006). Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Suomen Standardoimisliitto SFS. Helsinki. 28 s.

SFS-EN ISO 14067. (2018). Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjaljen laskemista koskevat vaatimukset ja ohjeet. Suomen Standardoimisliitto SFS. Helsinki. 53 s.

SSAB. (2022). HYBRIT – fossiilivapaa teräs. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: <https://www.ssab.com/fi-fi/tuotteet/brandit/greencoat/sustainable-building-with-greencoat/hybrid-fossil-free-steel>

Stål, H. I., Bonnedahl, K. J., & Eriksson, J. (2015). Micro-level translation of greenhouse gas (GHG) reduction - Policy meets industry in the Swedish agricultural sector. *Journal of Cleaner Production*. Vol.103, pp.629–639.

Suomen ympäristökeskus. (2017). Tietoa elinkaariarvioinnista (LCA) ja elinkaari- ja elinkaarikatoimintamallista pk-yrityksille. ToimintaMALLI yritysten elinkaaristen Ympäristövaikutusten kehittämiseksi (MALLI-Y) -hanke. 4 s.

Tilastokeskus. (2020). Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2019. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/khki/2019/khki\\_2019\\_2020-05-28\\_kat\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/khki/2019/khki_2019_2020-05-28_kat_001_fi.html)

Tilastokeskus. (2021). Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki\\_2020\\_2021-12-16\\_kat\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-12-16_kat_001_fi.html)

Tilastokeskus. (2022). Polttoaineluokitus. [Viitattu 27.4.2022]. Saatavissa: [https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.html](https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html)

US EPA. (2022). Understanding Global Warming Potentials. [Viitattu 11.2.2022]. Saatavissa: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>

Valtioneuvosto. (2021). Ilmastovuosikertomus 2021: Suomen päästöt vähenivät poikkeusvuonna. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi//1410903/ilmastovuosikertomus-2021-suomen-paastot-vahenivat-poikkeusvuonna>

Vattenfall. (2022a). HYBRIT tekee teräksen valmistuksesta fossiilivapaata. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: <https://www.vattenfall.fi/fokuksessa/innovaatiot/hybrid-tekee-teraksen-valmistuksesta-fossiilivapaata/>

Vattenfall. (2022b). HYBRIT – Edistysaskelia kohti fossiilivapaata terästuotantoa. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavissa: <https://www.vattenfall.fi/fokuksessa/fossiilivapaa/hybrid/>

Wang, S., Wang, W., & Yang, H. (2018). Comparison of Product Carbon Footprint Protocols: Case Study on Medium-Density Fiberboard in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Vol.15(10):2060. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102060>

Wiedmann, T. & Minx, J. (2007). A Definition of Carbon Footprint. *Ecological Economics Research Trends*. Ch.1, pp.1–11.

Winergy Technologies. (2022). Product Carbon Footprint Verification. [Viitattu 12.6.2022]. Saatavissa: <https://winergytechnologies.com/en/product-carbon-footprint-verification/>

World Steel Association. (2022). About steel. [Viitattu 6.9.2022]. Saatavissa: <https://worldsteel.org/about-steel/about-steel/>

Wright, L. A., Kemp, S., & Williams, I. (2011). “Carbon footprinting”: Towards a universally accepted definition. *Carbon Management*. Vol.2(1), pp.61–72.

WWF:n Ilmastolaskurin kertoimet - Suomi 2017. Saatavissa: [https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:5YDvtK90SsIJ:https://wwf.fi/ilmastolaskuri\\_laskenta-perusteet/+&cd=1&hl=fi&ct=clnk&gl=fi&client=firefox-b-d](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:5YDvtK90SsIJ:https://wwf.fi/ilmastolaskuri_laskenta-perusteet/+&cd=1&hl=fi&ct=clnk&gl=fi&client=firefox-b-d)

Ympäristöhallinto. (2013). Elinkaariarviointi, jalanjäljet ja panos-tuotosmalli. [Viitattu 21.1.2022]. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kulutus\\_ja\\_tuotanto/tuotesuunnittelu\\_ja\\_tuotteet/elinkaariarviointi\\_jalanjaljet\\_ja\\_panostuotosmalli](https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kulutus_ja_tuotanto/tuotesuunnittelu_ja_tuotteet/elinkaariarviointi_jalanjaljet_ja_panostuotosmalli)

Ympäristötuoteseloste A

Ympäristötuoteseloste B