



Tuotannon parametrien määrittely tuotekohtaista hiilijalanjälkilaskelmaa varten

Sanni Soininen

Opinnäytetyö, AMK

Tammikuu 2026

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma (AMK)

Soininen, Sanni

Tuotannon parametrien määrittely tuotekohtaista hiilijalanjälkilaskelmaa varten

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Tammikuu 2026, 45 sivua

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Valmistavan teollisuuden pk-yrityksissä hiilijalanjäljen laskenta on keskeinen työkalu vastuullisuusraportoinnin ja toimitusketjujen läpinäkyvyyden varmistamiseksi. EU:n kestävyysraportointidirektiivin CSRD:n ja ISO 14067:2018 -standardin ohjaamat vaatimukset lisäävät tarvetta tuotekohtaisille laskelmille, jotka tukevat yritysten kilpailukykyä ja ympäristövastuullisuutta.

Työn tavoitteena oli tuottaa menetelmä ja lukuarvot, joilla yksittäisen konepajatuotteen hiilijalanjälki voidaan laskea kehdosta portille -periaatteella. Laskenta suunniteltiin siten, että se soveltuu toimeksiantajan järjestelmään integroitavaksi ja täyttää GHG-protokollan sekä ISO-standardin periaatteet. Keskeiset tutkimuskysymykset liittyivät laskentaparametrien määrittämiseen, rajauksiin ja allokointilogiikkaan.

Menetelmä toteutettiin hyödyntämällä primääridataa raaka-aineista, energiankulutuksesta ja koneistusprosessista. Päästökertoimet haettiin kansainvälisistä tietokannoista ja standardeista. Laskenta perustui kaa-vaan, jossa huomioitiin materiaalien, energian ja työstön päästöt. Rajaukset dokumentoitiin standardien ohjeiden mukaan.

Tulosten mukaan materiaalihankinnat eli koneistettavat metallit, jotka ovat tuotannon pääraaka-aine, muodostivat valtaosan tuotteen hiilijalanjäljestä, kun taas logistiikan ja muiden syötteiden osuus jäi muutamaan prosenttiin. Laskentamalli osoittautui soveltuvaksi ERP-integraatioon ja tarjoaa yritykselle mahdollisuuden hyödyntää tuloksia automaattisessa hiilijalanjäljen raportoinnissa ja tuloksia voidaan mahdollisesti jatkossa hyödyntää muussa vastuullisuusraportoinnissa.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että tuotekohtainen hiilijalanjälkilaskenta on toteutettavissa kustannustehokkaasti pk-yrityksessä, kun menetelmä perustuu standardeihin ja primääridataan ja pohjatiedot kerätään systemaattisesti. Malli tukee strategisia tavoitteita ja vastaa kiristyviin raportointivaatimuksiin.

Avainsanat (asiasanat)

hiilijalanjälki, koneistus, parametri, vastuullisuusraportointi, GHG Product Standard, SFS-EN ISO 14067:2018-standardi

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Salassapitosopimus, tuotekohtainen laskelma

Soininen, Sanni

Specification of production parameters for product-level carbon footprint assessment

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, January 2026, 45 pages

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Carbon footprint calculation has become an essential tool for small and medium-sized enterprises in the manufacturing industry to meet sustainability reporting requirements and ensure transparency in supply chains. The tightening of EU regulations, such as the Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), and the ISO 14067:2018 standard have increased the need for product-level assessments that support competitiveness and environmental responsibility.

The objective was to develop a method for calculating the carbon footprint of a single product using the cradle-to-gate approach. The calculation was designed to comply with the principles of the GHG Protocol and ISO standards and to enable integration into an ERP system. Key research questions focused on defining calculation parameters, setting system boundaries, and designing allocation logic.

The method was implemented using primary data on raw materials, energy consumption, and machining processes. Emission factors were obtained from international databases and standards. The calculation formula included emissions from materials, energy, and machining, with boundaries documented according to standard requirements.

Results indicated that raw materials accounted the majority of the product's carbon footprint, while logistics and other inputs contributed only minimal percentages due to the use of fossil-free energy. The model proved suitable for ERP integration and offers opportunities for improving sustainability communication and identifying emission reduction targets.

In conclusion, product-level carbon footprint calculation can be implemented cost-effectively in SMEs when based on standards and the primary data is gathered systematically. The model supports strategic goals and meets evolving sustainability reporting requirements.

Keywords/tags (subjects)

carbon footprint, machining, parameter, sustainability reposting, GHG Product Standard, SFS-EN ISO 14067:2018 -standard

Miscellaneous (Confidential information)

The confidentiality marking of the thesis appendix, product level calculations

Sisältö

1	Johdanto	7
1.1	Tavoite.....	7
1.2	Työn merkitys toimeksiantajalle ja sidosryhmille	8
1.3	Kilpailukyky, maine ja raportoinnin hyödyt	9
1.4	Työelämälähtöinen kehittämistyö opinnäytetyönä.....	9
2	Raportointivaatimukset ja sääntely.....	10
2.1	EU-sääntely ja kansallisen tason sääntely.....	11
2.2	Pienten ja keski suurten yritysten näkökulmia vastuullisuusraportointiin.....	13
2.3	Pk-yrityksen vaikutuspiiri	14
2.4	Tietoperustasta	16
3	Hiilijalanjälki organisaatio- ja tuotetasolla.....	16
3.1	Hiilijalanjälki	17
3.2	Tuotetaso hiilijalanjäljen laskenta.....	17
3.2.1	ISO-standardi	18
3.2.2	GHG-protokolla.....	19
3.3	Organisaatiotason hiilijalanjäljen laskenta	19
4	Toimeksiannon toteutus	20
4.1	Datan laatu	21
4.2	Rajaukset	22
4.3	Allokointi	23
4.4	Parametrit	24
4.5	Rajauksista.....	25
5	Laskentaan sisältyvät parametrit	27
5.1	Raaka-aineet.....	28
5.2	Energiankulutus.....	28
5.3	Leikkuunesteet	29
5.4	Työkaluteräs.....	30
5.5	Logistiikka	30
5.6	Jätteet.....	31
5.7	Koneistus parametrinä	32
6	Tulokset.....	32
6.1	Tulokset esimerkkilaskelmassa	33
6.2	Arvio parametrien määrittämisen merkityksestä tuotannon päästöihin	37

6.3 Opinnäytetyön erityispiirteet ja osaamisvaatimukset	38
6.4 Työskentelyprosessin arviointi.....	38
6.5 Luotettavuuden analyysi	39
Lähteet	42

Kuviot

Kuvio 1. Hiilidioksidipäästöt sektoreittain Euroopassa.....	8
Kuvio 2. Taksonomian ympäristötavoitteet.....	9
Kuvio 3. Hiilidioksidipäästöt sektoreittain Suomessa	12
Kuvio 4. Hiilijalanjälkilaskennan vaiheet	20
Kuvio 5. Hiilijalanjäljen yksinkertaistettu laskentakaava	21
Kuvio 6. Osa laskennan parametreista ja niiden päästöjen kaava	23
Kuvio 7. Sähköenergian osuus päästöistä fossiilivapaasti tuotettuna.....	31
Kuvio 8. Sähköenergian osuus päästöistä yleisellä päästökertoimella.....	32
Kuvio 9. Vuositasolle skaalatut tuotannon päästöt	33
Kuvio 10. Vuosittainen tuotanto fossiilivapaalla energialla.....	33

Taulukot

Taulukko 1. Laskentaan sisältyvät syötteen	27
--	----

Keskeiset käsitteet

CFP	Tuotteen hiilijalanjälki
CSRD	Kestävyysraportointidirektiivi
EPD	Environmental Product Declaration, ympäristöseloste
ESG-raportointi, vastuullisuusraportointi	Yrityksen sosiaaliset, hallinnolliset ja ympäristöön liittyvät vastuut
GHG	Green House Gas, kasvihuonekaasut
Green House Gas Protocol -standardi	Green House Gas Protocol
GWP	Ilmaston lämmityspotentiaali, ominaislämmitysvaikutus, Global Warming Potential
Hiilijalanjälki	Carbon footprint
Hiilidioksidiekvivalentti CO ₂ e	Kasvihuonekaasujen ilmakehää lämmittävä vaikutus
Kestävän rahoituksen luokittelujärjestelmä	EU-taxonomy
Kestävä kehitys	Sustainable development
Kiertotalous	Circular economy
LCA	Elinkaariarviointi, Life Cycle Analysis
Parametri, muuttuja	Parameter
Päästötietokanta	Emission database
Vastuullisuusraportointi, kestävyysraportointi	Sustainability reporting
Toiminnanohjausjärjestelmä, ERP	Enterprise Resource Planning System
Kehittämistutkimus, toimintatutkimus	Design-based research
VSME	Vapaaehtoinen raportointistandardi pienille ja keskisuurille yrityksille
Vihreä siirtymä	Green Transition
Yritysvastuu	Corporate accountability

1 Johdanto

Valmistava teollisuus on ala, joka on hyvin energiantensiivinen ja kuluttaa merkittävästi raaka-aineita. Alan osuus resurssien käyttäjänä tekee siitä keskeisen kohteen päästövähennystoimille. Hiilijalanjalan laskenta on yksi työkaluista, joilla voidaan osoittaa sitoutumista kestävän kehityksen tavoitteisiin ja täyttää kiristyneet raportointivaatimukset sekä ohjata yrityksiä tunnistamaan toimintansa olennaiset päästölähteet. Sääntely, kuten kestävän kehityksen raportointidirektiivi (CSRD), ohjaa yrityksiä kohti läpinäkyvää vastuullisuusraportointia ja toimitusketjunsä laajuista tarkastelua päästöjen hallitsemisen tueksi. Hiilijalanjälkilaskenta tukee niin kilpailukykyä, riskienhallintaa ja strategista päätöksentekoa kuin ympäristövastuun osoittamista.

Resurssien jalostamisesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt osallistuvat ihmisen toiminnasta johtuvaan ilmastomuutokseen ja ohjauskeinoin pyritään niiden vaikutusten vähentämiseen. Vastuullisuusraportointi ohjaa yrityksiä sosiaalisesti, taloudellisesti ja ympäristön kannalta kestävään ja vastuulliseen toimintaan. Tarpeen hiilijalanjälkilaskennalle luovat EU:n jäsenvaltioilleen asettamat ohjauskeinot, jotka ohjaavat elinkeinoelämän toimijoita kestävän kehityksen ja kiertotalouden periaatteisiin ja toimenpiteisiin kuten energian ja materiaalien käytön tehostamiseen.

Opinnäytetyössä kuvataan tuotekohtaisen hiilijalanjalan laskennan prosessi valmistavan teollisuuden pk-yrityksessä. Työssä tarkastellaan laskennan keskeisiä vaiheita, kuten tuotantoprosessista määritettävien parametrien valintaa, laskennan rajauksia sekä laskentaan sovellettavia ohjeita ja standardeja. Työ kytketään ajankohtaiseen kestävän kehityksen sääntelyyn ja arvioidaan sen merkitystä sekä alan että toimeksiantajan näkökulmasta. Tietoperusta koostuu vastuullisuusraportoinnin sääntelystä ja teollisuuden raportointivelvoitteista. Työn kulku, laskentalogiikan valinta ja rajaukset esitellään luvussa 4 ja valitut parametrit luvussa 5. Luvussa 6 kuvataan työskentelyprosessia ja esitetään johtopäätökset.

1.1 Tavoite

Opinnäytetyön tavoitteena on tuotekohtaisen hiilijalanjälkilaskelman tuottaminen konepajayritykselle. Hiilijalanjälkeä ei laskettu tai raportoitu systemaattisesti työn aloittamisen hetkellä. Hiilijalanjälki- ja päästökyselyihin vastattiin kokoamalla tiedot tarpeen mukaan erikseen. Valittu aihe on

ajankohtainen kestävän kehityksen sääntelyn muuttuessa ja vastuullisuusraportoinnin sekä toimitusketjujen läpinäkyvyysvaatimusten kasvaessa.

Toimeksiantaja ei ole kokoluokkansa vuoksi opinnäytetyön kirjoittamisen aikana velvoitettu tuottamaan vastuullisuusraporttia kestävyysraportointidirektiivi CSRD:n mukaisesti. Tuotekohtaista hiilijalanjälkilaskelmaa, joka tässä opinnäytetyössä tuotettiin, haluttiin edistää yrityksen omasta aloitteesta.

Opinnäytetyön tilaajana on konepajayritys Ka-Mu Oy. Yritys keskittyy mittatarkkojen, monimuotoisten ja korkeaa laatua vaativien konepajatuotteiden valmistukseen. Lisäksi tarjotaan suunnittelu, tuotekehitys, kokoonpano- ja viimeistelypalveluita. Yrityksellä on käytössä sertifioitu johtamisjärjestelmä ISO 9001 ja ympäristö- ja laatuvarmuutta ohjaava ISO 14001. Vastuullisuus on osa strategiaa ja johdon agenda. Käytössä olevaan toiminnanohjausjärjestelmään on lisätty hiilijalanjäljen laskentaominaisuus osaksi tilaus-, valmistus- ja toimitusprosessia. (Ka-Mu Oy 2025.)

Tavoitteisiin vastaamiseksi työssä tarkastellaan seuraavia tutkimuskysymyksiä:

- Miten tuotekohtainen hiilijalanjälkilaskenta voidaan toteuttaa pk-yrityksen konepajaprosessissa laskentaa säätelevien ISO 14067:2018-standardin ja GHG-protokollan mukaisesti?
- Miten laskentaparametrit ja allokontilogiikka voidaan suunnitella siten, että ne soveltuvat yrityksen tarpeisiin?
- Mitkä ovat menetelmän ja aineiston rajoitteet ja miten ne vaikuttavat tulosten luotettavuuteen ja hyödynnettävyyteen sekä jatkokäyttöön?

1.2 Työn merkitys toimeksiantajalle ja sidosryhmille

Työn pääasiallinen kohderyhmä on toimeksiantaja, joka voi hyödyntää työn tuloksia ja tuotoksia osana vastuullisuusraportointiaan. Muita mahdollisia kohderyhmiä ovat valmistavan teollisuuden pienet ja keskisuuret yritykset, jotka voivat löytää työstä hyödyllisiä osia yhteisten materiaali-, energia- ja työaikasyötteiden kasvihuonekaasupäästöjen allokontointiin tuotetasolla ja standardeihin perustuvan tavan tarkasteltavan järjestelmän rajaamiseen.

Osana työn tavoitetta integroitiin hiilijalanjäljen laskennan tuloksina saadut päästölaskelmat tuotannonohjausjärjestelmään. Näin hyödynnetään järjestelmän laskentaa tukevia ominaisuuksia. Jatkossa on mahdollista lisätä tuote-erän hiilijalanjälkilaskelma toimitusraporteille sekä ilmoittaa tuotteiden hiilijalanjälki muussa toiminnassa kuten vastuullisuusraportoinnissa.

Työn toteutustapaa ja valittuja menetelmiä verrattiin konepajatoimintaan kehitettyyn DAMRC-tutkimuskeskuksen tuottamaan laskentaesimerkkiin sekä muihin vastaavan tasoisiin opinnäytetöihin ja alalla yleisesti vastuullisuusraportoinnissa esiintyviin päästöjen jakautumiseen. Tuotteen hiilijalanjälkeä on selvitetty vastaavasti energia- ja ympäristötekniikan töissä, mm. Aallon muovituotteen (2024) ja Härkösen (2022) pussisuodattimen hiilijalanjälkiselvitykset, joissa on tarkasteltu tietyn tuotteen tuottamisesta tai hankinnasta aiheutuvia päästöjä.

1.3 Kilpailukyky, maine ja raportoinnin hyödyt

Yritysten näkökulmasta kehittämistyön etuina ovat tyypillisesti lakisääteisen tai markkinaohjatun raportointivelvoitteen täyttämisen lisäksi mahdollisesti kilpailukykyyn, kustannussäästöihin ja maineeseen liittyvät seikat. Asiakkaat ja sidosryhmät odottavat yhä kattavampaa ja läpinäkyvämpää vastuullisuusraportointia. Standardien mukainen raportointi, silloinkin kun laki ei yritystä vielä velvoita, voi kertoa toimitusketjulle sitoutumisesta ympäristövastuulliseen toimintaan. Toimet luovat mahdollisuuksia kilpailijoista erottuvan markkinoinnin ja viestinnän suhteen. Elinkeinotoimijoita valvovat tahot sekä yritysten asiakkaat vaativat kestävyysraportointidirektiivi CSRD:n alle kuuluvien tietojen osalta läpinäkyvyyttä. (Vastuullisuusraportointi muuttuu pakolliseksi... 2025.)

Etua voi olla tietojen läpinäkyvyydestä, mutta tietojen tarkkuus ja kattavuus vaikuttavat siihen, miten uskottavana yrityksen vastuullisuustoimet näyttäytyvät. Hiilijalanjäljen selvittämisen aikana voidaan lisäksi saavuttaa muita etuja esim. tunnistaa päästövähennyskohtia, jotka voivat johtaa taloudelliseen hyötyyn ja energian ostokustannusten muutoksiin.

1.4 Työelämälähtöinen kehittämistyö opinnäytetyönä

Opinnäytetyö on työelämälähtöinen kehittämistyö, jonka tavoitteet ja tehtävät perustuvat toimeksiantajan käytännön tarpeisiin. Ennalta asetettu päämäärä luo työn lähtöasetelman, ja työn sisältö määräytyy yrityksen toiminnallisten tavoitteiden mukaan. Kehittämistyön onnistumista arvioidaan

sen perusteella, kuinka hyvin se tuottaa ratkaisun tunnistettuun käytännön ongelmaan. Opinnäytetyö ei ole tieteellinen tutkimus, sen menetelmällinen lähestymistapa pohjautuu tutkimusperinteisiin ja noudattaa hyvän tieteellisen käytännön periaatteita. Salonen, Eloranta, Hautala ja Kinos (2017, 7–8) määrittelevät kehittämistoiminnan yläkäsitteeksi, joka sisältää piirteitä tutkimuksesta, tutkimuksellisesta kehittämisestä ja projektityöstä. Opinnäytetyössä on elementtejä edellä mainituista, ja menetelmien valintaa ohjasivat toimeksiantajan tavoitteet sekä alaa koskevat standardit ja ohjeistukset. Opinnäytetyön eteneminen noudatti kehittämistoiminnan vaiheita: tarpeiden tunnistaminen, ideointi, suunnittelu, toteutus, tuloksen aikaansaaminen, arviointi ja työn päätös (Salonen ym. 2017, 53).

Työskentelyssä noudatettiin tutkimuseettisen toimikunnan määrittelemää hyvää tieteellistä käytäntöä, joka pohjautuu tutkimuseettiseen ohjeistukseen (HTK), joka korostaa huolellista suunnittelua, avoimuutta, rehellisyyttä ja puolueettomuutta sekä salassapidettävän ja luottamuksellisen tiedon asianmukaista käsittelyä (Hyvä tieteellinen käytäntö 2023, 11–14.) Eettisyyden ja luotettavuuden arvioinnissa on huomioitu käytettävän tiedon laatu, kattavuus ja alkuperä.

Tekoälyä hyödynnettiin raportin kieliasun tarkistamisessa ja rakenteen selkeyttämisessä. Tekoälysovelluksista käytettiin MS CoPilotia tiedonhaun tukena ja raportin sisällön tarkistamisen tukena ja Chat-GPT:tä laskentakaavojen visualisoinnissa. Käyttö rajoittui tekstin selkeyttämiseen ja terminologian yhdenmukaistamiseen, eikä se vaikuttanut aineiston keruuseen, analyysiin tai johtopäätöksiin. Kaikki tekoälyn tuottamat ehdotukset tarkistettiin ja korjattiin.

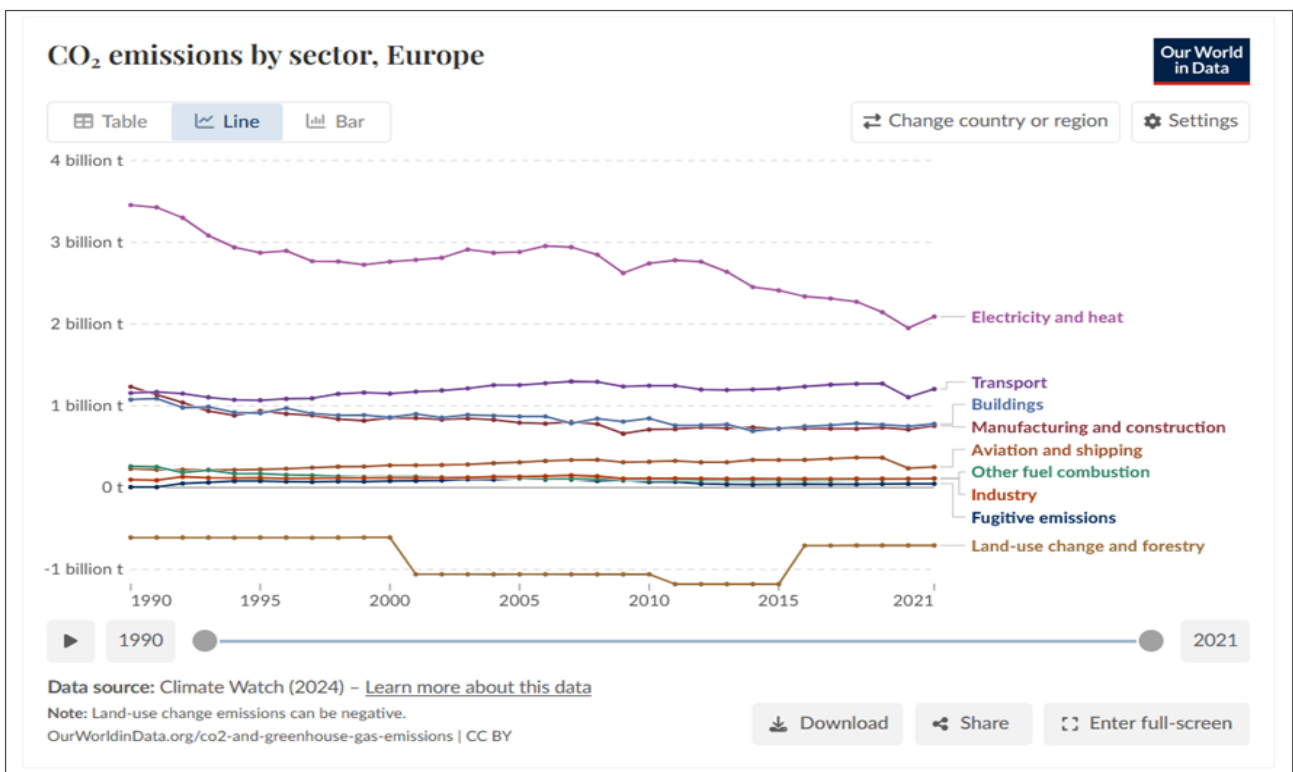
2 Raportointivaatimukset ja sääntely

Yritysten ympäristövastuullisuutta edistävät kansainväliset, Suomessa erityisesti EU:n laajuiset poliitiikat, sekä markkinat, jotka ohjaavat yrityksiä kiinnittämään huomiota tuotantonsa päästöihin, hiilijalanjälkeen ja mahdollisuuksiin vähentää oman toimintansa ympäristövaikutuksia. Kansalliset viranomaiset valvovat EU-säädösten noudattamista jäsenmaissa.

Resurssien tehokkaalla käytöllä ja uusiutuvan, fossiilittoman energian käytön lisäämisellä on osansa hiilineutraalin yhteiskunnan rakentamisessa. Vähähiilitiekartat edistävät teollisuuden toimijoiden sitoutumista vihreää siirtymää tukeviin toimenpiteisiin ja taloudellisten toimintaedellytysten ylläpitämiseen. (Vihreä siirtymä – elpymis- ja palautumissuunnitelma n.d.)

Euroopan komissio julkaisi 2025 teräs- ja metalli -toimintasuunnitelman, jossa esitetään toimenpiteitä hiilirajamekanismin käytölle, vähäpäästöisen energian käytölle ja hinnoittelulle sekä siihen kohdistuvien investointien tukemiselle (Vuori 2025.) Vuonna 2020 terästuotannon maailmanlaajuiset hiilidioksidipäästöt olivat yhteensä 7–9 % ihmisen toiminnasta johtuvista hiilidioksidipäästöistä. Jokainen tonni tuotettua terästä vapautti vuonna 2020 noin 1,9 tonnia kasvihuonekaasuja ilmakehään. (How much carbon does steel emit? 2025.)

Vuonna 2024 hiilidioksidipäästöt Euroopassa olivat jakautuneet sektoreittain seuraavassa kuvassa (Kuva 1.) esitetyn tilaston mukaisesti.



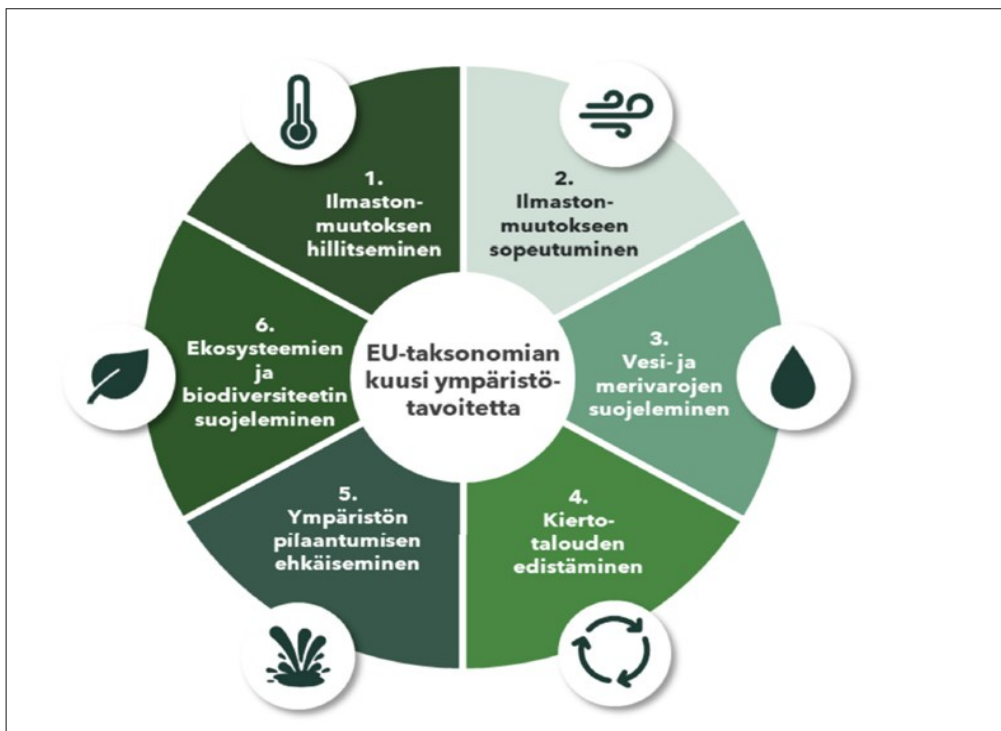
Kuva 1. Hiilidioksidipäästöt sektoreittain Euroopassa (Our World In Data 2025)

2.1 EU-sääntely ja kansallisen tason sääntely

EU:ssa yritysten vastuullisuusraportointia säätelevät useat tahot sekä erilaiset direktiivit ja säädökset. Euroopan parlamentti ja neuvosto hyväksyvät lainsäädännön, kuten direktiivit, joihin kuuluu kestävyysraportointidirektiivi, CSRD, josta johdetaan kestävä kehityksen ESRS-

raportointistandardit. CSRD ohjaa kansallista lainsäätelyä. Kansainväliset direktiivit ja kansalliset lait velvoittavat elinkeinoelämän toimijoita yritys vastuullisuusraportointiin. Raportoinnin osana yrityksiltä vaaditaan tiedot toimintansa päästöistä, hiilijalanjäljestä sekä ympäristövaikutuksista (Corporate sustainability reporting n.d.)

EU-tasolla sääntely on murroksessa. Direktiivejä ja säännöstöä uudistetaan vastaamaan ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi asetettuja tavoitteita. Direktiivimuutokset ovat osa EU:n 55-valmiuspakettia, jonka tavoitteena on vähentää EU:n päästöjä vähintään 55 prosenttia vuoteen 2030 mennessä (Suomen kansallinen ilmastopolitiikka 2022.) EU-taksonomian kuusi keskeistä ympäristötavoitetta on esitetty seuraavassa kuvassa **(Kuva 2.)**



Kuva 2. Taksonomian ympäristötavoitteet (Väylävirasto 2023)

Vuonna 2025 opinnäytetyöprosessin aikana Euroopan neuvosto hyväksyi ns. "Stop the Clock" -direktiivin, joka siirtää CSRD-raportointivelvoitteiden aikataulua kahdella vuodella. Omnibus-ehdotuksen tavoitteena on keventää hallinnollista taakkaa ja antaa yrityksille lisää aikaa valmistautua vastuullisuusraportointiin. Pk-yritysten osalta tämä tarkoittaa, että ei-listattujen mikro-, pienten ja keskisuurten yritysten, joissa on alle 250 työntekijää, ei tarvitse raportoida ennen vuotta 2028.

Monissa paikoin raportointia oltiin valmistelemassa. Vastuullisuusraportoinnin vähimmäisvaatimusten laajuus on myös tarkennettavana ja vaikuttanee raportoitavien tietojen sisältöön keventämällä vaaditun tiedon määrää.

Euroopan komissio suosittelee listatuille pienille ja keskisuurille yrityksille vastuullisuusraportointia vapaaehtoisuuteen perustuvaa VSME-standardin mukaan ensimmäisen kerran tilikauden 2028 mukaisesti alkuperäisen tilikauden 2026 sijasta. Käytännössä ensimmäinen raportti laaditaan tilikaudelta 2028 ja julkaistaan vuonna 2029. (EU:n Omnibus-ehdotus yksinkertaistaa vastuullisuusraportointia 2025.) Muutosten takia vastuullisuusraportointi ja päästölaskennan suorittaminen aiheuttaa tarpeenmukaisuuden arviointia yrityksissä ja tarvetta seurata muutoksia. Ennakoitavuus ja eri aloja koskevan sääntelyn yhteisvaikutukset ovat vaikeita ja monimutkaisia asiantuntijatasollakin hahmottaa.

Suomen valtiollisena tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteen avulla energiantuotannon ja teollisuuden vihreä siirtymää pyritään jouduttamaan (Hiilineutraali Suomi 2035 2022.) Samalla kun tavoitteet ohjaavat yrityksiä kestävä kehityksen periaatteisiin ja tunnistamaan potentiaalisia päästövähennyskohtia, suomalaisen teollisuuden kilpailukyky halutaan varmistaa ja sitä halutaan vahvistaa osana teollisuuden vähähiilisyystiekartoissa asetettuja kiertotalouden tavoitteita ja visioita tulevaisuuden teollisen tuotannon tavoista (Uudistuvan teollisuuden strategia 2021, 18.) Sääntely näkyy ESG-raportoinnissa, jossa sosiaaliset, taloudelliset, hallinnolliset ja ympäristöön vaikuttavat seuraukset otetaan huomioon.

2.2 Pienten ja keskisuurten yritysten näkökulmia vastuullisuusraportointiin

Vastuullisuusraportointi, hiilijalanjälki, ympäristövaikutukset ja taloudellisen kestävyden tarkastelu voivat auttaa yrityksiä hahmottamaan toimintansa ja alansa riskejä, joita materiaali- ja toimitajariippuvuudet, riippuvuus vakaasta energian tuotannosta ja neitseellisistä raaka-aineista ja sitä kautta kaivosteollisuuden toiminnasta ja mineraalien louhinnasta sekä niiden saatavuudesta ja hinnasta aiheuttavat. Aihe on siksi toimeksiantajan ja sen kaltaisten yritysten näkökulmasta merkityksellinen useammasta näkökulmasta.

ESG-raportointiin valmistautumiseen tai niiden aloittamiin vihreää siirtymää edistäviin toimenpiteisiin tai investointeihin voivat vaikuttaa vastuullisuusraportoinnissa tapahtuvat muutokset. Yrityksissä hallinto vastaa vastuullisuusstandardien noudattamisesta ja ESG-kriteerien täyttymisestä ja sitoutuu viemään yrityksen strategiaan kirjatut tavoitteet käytäntöön sekä tarkentamaan strategiaa ja ympäristöohjelmia ESG-vaatimusten mukaisiksi.

Pk-yritykset ovat osa globaaleja toimitusketjuja, ja niiden toimintaan vaikuttavat kansainväliset kriisit ja markkinamuutokset. Yrityksen markkinat voivat olla vakaanoisia ja verrattain pienessä mittakaavassa. Pienten ja keskisuurten yritysten toimitusketjuissa tapahtuvat äkilliset muutokset vaikuttavat lähes välittömästi niiden toimintaan. Esimerkkeinä maailmanmarkkinoiden suorista ja välillisistä vaikutuksista ovat kaivosteollisuuden tuotteiden hintojen muutokset, logistisista tai saatavuusongelmista johtuva komponenttipula, olennaisten toimittajien tai asiakkaiden katoaminen markkinoilta äkillisesti kaupankäynnin rajoitteiden takia ja energiakriisin takia tapahtuneet äkilliset ja ennalta-arvaamattomat hintojen nopeat vaihtelut.

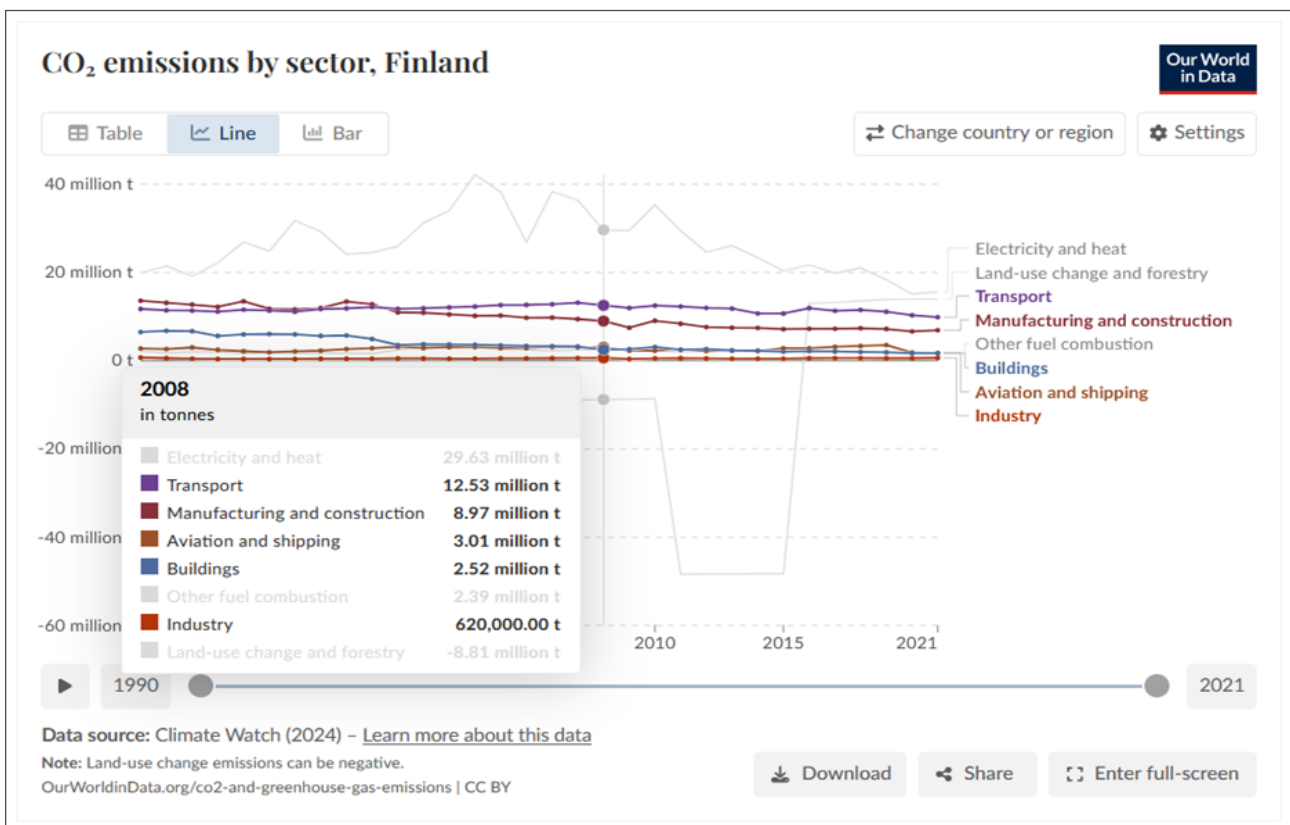
Yritykset varautuvat strategisella tasolla yhä useammin toimitusketjunsä epävarmuustekijöihin. Toimenpiteinä ovat mm. hankintojen hajauttaminen ja energiansaannin varmistamiseen kohdentuvat investoinnit kuten uusiutuvaan energiaan ja omaan energiantuotantoon panostaminen. Näitä ovat mm. pientuulivoimaloiden ja aurinkoenergian lisääminen. Aurinkoenergian käyttö on jo lisääntynyt Suomessa ja kasvaa tulevina vuosina arvioiden mukaan merkittävästi. Aurinkopaneelien tarjonta on lisääntynyt, hinnat madaltuneet ja asennusmäärät ovat edellisvuosina kasvaneet, kun yritykset sekä yksityiset henkilöt ovat investoineet aurinkoenergiatuotantoon. (Teollinen aurinkoenergia n.d.) Osa lisää investointeja pientuotantoon kattaakseen omalla tuotannolla osan kuluksestaan ja sitoutuakseen vihreään siirtymään.

2.3 Pk-yrityksen vaikutuspiiri

Teollisuuden toimijoiden tulisi alustavan tulkinnan mukaan kasvattaa uusiutuvan energian käyttöään 1,6 %:lla vuositasolla. Yritykset, jotka käyttävät merkittäviä määriä energiaa, logistiikkapalveluita tai biopolttoaineita, osallistuvat vähintään välillisesti tähän alueeseen asiakkaina tai energiantuotantonsa kautta. EU:n uusiutuvan energian direktiivi (RED III) määrittelee energia-alalle

toimenpiteitä uusiutuvan energian käytön edistämiseksi eri sektoreilla, kuten bioenergia-, lämmitys-, jäähdytys, rakennus-, liikenne- ja teollisuuden aloilla. Sen päätavoite on lisätä uusiutuvan energian tuotantoa EU:n alueella vuodelle 2030. (Mikä on Renewable Energy Directive III 2024.) Yksittäisen yrityksen vaikutuspiirissä on pääasiassa tuotanto. Sen lisäksi yritys voi hallita tai omistaa mm. kiinteistöjä kuten tuotantotiloja, energiantuotanto kuten pienemmän mittakaavan aurinko- ja tuulivoimaa, määrätä tuotannon ostoenergian alkuperästä, kalustosta sekä raaka-ainetoista ja urakoitsijoiden, yhteistyökumppanien sekä ostopalvelujen valinnasta.

Kiinteistöjen energiatehokkuutta säätelee rakennusten energiatehokkuusdirektiivi, joka siirtyy kansalliseen lainsäädäntöön valmistelun ja siirtymäajan jälkeen. Energy Performance of Buildings Directiven, EPBD:n, tavoitteena on rakennusten kasvihuonekaasupäästöjen ja energian loppukulutuksen vähentäminen vuoteen 2030 mennessä. (Ympäristöministeriö n.d.) Hiilidioksidipäästöjen jakautuminen sektoreittain Suomessa (**Kuva 3.**) on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 3. Hiilidioksidipäästöt sektoreittain Suomessa (Our World In Data 2025)

Energiatohokkuuslaki velvoittaa tietyn kokoluokan yritykset tekemään energiakatselmus, jolla selvitetään yrityksen tai konsernin toimipaikkojen energiankulutus ja etsitään mahdollisuudet energiansäästöön. (Energiavirasto n.d.) Yritysten hallitsemien kiinteistöjen osalta edellä mainitut seikat lisäävät energiatohokkuustarkasteluja ja voivat aiheuttaa tarpeen tehdä kiinteistöjen energiatohokkuutta parantavia toimia ja investointeja niissä kiinteistöissä, joissa direktiivin vähimmäisvaatimukset eivät täyty. Yritykset voivat vaikuttaa kiinteistöjensä osuuteen seuraamalla energiatohokkuutta kiinteistöissä, jotka ovat yrityksen omien energiasopimusten piirissä.

2.4 Tietoperustasta

Tietoperusta koostui ISO 14067:2018 -standardista ja GHG-protokollasta. Myös alan koulutukset tukivat työn päätavoitetta. Standardit ovat kansainvälisesti hyväksytyjä ja tarjoavat yhtenäiset periaatteet tuotekohtaisen hiilijalanjälkilaskennan toteuttamiseen valitulla kehosta portille -rajauksella. ISO-standardi määrittelee laskennan tekniset vaiheet ja rajausmallit, kun taas GHG-protokolla painottaa raportoinnin läpinäkyvyyttä ja päästöluokkien kattavuutta. Näiden vahvuutena on vertailukelpoisuus ja yhteensopivuus EU:n raportointivaatimusten kanssa. Heikkoutena on, että standardit eivät tarjoa valmiita menetelmiä pk-yritysten erityispiirteisiin, mikä edellytti soveltamista. Lisäksi käytettävissä olleet päästökertoimet perustuivat osin julkisiin tietokantoihin, mikä voi rajoittaa tarkkuutta tai ajantasaisimman kertoimen löytämistä.

Konepajateollisuuden päästölaskentaa käsittelevää tutkimusta on niukasti, mikä rajasi tietoperustaa. Soveltamisen tukena käytettiin muita lähteitä, kuten muita opinnäytetöitä ja DAMRC:n laskentamallia, joka ei ollut suoraan sovellettavissa toimeksiantajan prosesseihin. Tietoperusta oli alalle olennaista ja yleistä, mutta ei täysin kattavaa. Sitä voisi täydentää päivittyvillä standardeilla ja alakohtaisilla, yrityksen käyttöön räätälöidyillä laskentatyökaluilla tai maksullisia päästötietokantoja hyödyntämällä.

3 Hiilijalanjälki organisaatio- ja tuotetasolla

Hiilijalanjäljen selvittäminen on yksi osa yritysten vastuullisuusraportointia. Hiilijalanjäljen laskenta perustuu ilmastonmuutokseen hillitsemiseen, kestäväan kehitykseen ja muihin EU:n Green Dealissa määriteltyihin vihreän siirtymän tavoitteisiin. Hiilijalanjälkilaskenta noudattaa usein GHG-protokollaa eli The Greenhouse Gas-protokollan Corporate Accounting and Reporting -standardia.

(Green House Gas Protocol 2004). Laskenta suoritetaan koko organisaation vuoden päästöistä tai tuotekohtaisesti.

Laskentaan sisällytettävät pakolliset osiot sekä laskennan tekninen ohjeistus annetaan CSRD:ään pohjautuvassa GHG-protokollassa, jonka vaatimusten mukaiset tiedot toiminnasta on raportoitava. Hiilijalanjälkilaskennan toteuttaminen Suomessa perustuu kansainvälisiin ISO-standardeihin, jotka on vahvistettu kansallisina SFS-standardeina. Tuotetason laskentaa ohjaa eri standardi kuin organisaatiotason laskentaa. Standardit varmistavat laskennan vertailukelpoisuuden ja läpinäkyvyyden sekä täydentävät GHG-protokollaa, joka määrittelee raportoinnin periaatteet ja päästöluekat, kun taas ISO antaa tekniset ohjeet rajauksista, päästökertoimien käytöstä ja tietojen luotettavuuden arvioinnista.

3.1 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjälkeä määritettäessä käytetään hiilidioksidiekvivalenttia (CO₂e). Hiilidioksidiekvivalentilla ilmoitetaan kaikkien tarkasteltavien kasvihuonekaasujen ilmakehää lämmittävä vaikutus muunnetuna hiilidioksidin lämmittävää vaikutusta vastaavaksi. Hiilidioksidiekvivalentti sisältää hiilidioksidin (CO₂), metaanin (CH₄), rikkidioksidin (N₂O), rikkiheksafluoridin (SF₆), fluorihilivetyjen (HFC-yhdisteiden) ja perfluorihilivetyjen (PFC-yhdisteiden) päästöt ilmakehään ja niiden poiston. Muut laskentaan sisällytetyt kasvihuonekaasut tulee ilmoittaa erillisellä liitteellä. (GHG Protocol n.d, 27.)

Hiilijalanjälkilaskennassa käytetään yleisesti GWP100-arvoja, joka kuvaa kasvihuonekaasujen kumulatiivista ilmastoa lämmittävää vaikutusta sadan vuoden ajalta ja soveltuu siten pitkän aikavälin päästöjen vaikutusten seuraamiseen. IPCC:n viidennen arviointiraportoinnin (AR5) mukaisesti käytetään GWP100-arvoja (Global Warming Potential Values 2016.) Myös lyhyempiä aikajänteitä kuten GWP20 käytetään joissain tutkimuksissa.

3.2 Tuotetason hiilijalanjäljen laskenta

Tuotekohtaista hiilijalanjälkilaskentaa ja raportointia määrittää GHG:n Product Standard sekä ISO 14067:2018-standardi, joka perustuu elinkaariarvioinnin (LCA) periaatteisiin. Standardin mukaan laskennassa tulee tarkastella prosessin osia, jotka muodostavat vähintään 80 % lopputuotteen hii-

lijalanjäljestä. (SFS-EN ISO 14067:2018, 26.) ISO ja GHG ilmoittivat syyskuussa 2025 luovansa yhtenäisen standardiston, jossa yhdistyy ISO 1406X -sarja ja GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting -standardi sekä standardit koskien GHG scopeja 1–3 (ISO and GHG Protocol announce strategic partnership to deliver unified global standards for greenhouse gas emissions accounting 2025.)

Kehitystyö yhtenäisen, uuden, tuotekohtaisen hiilijalanjätkilaskennan standardia varten on vasta alussa. Yhtenäisen raportointikäytännön valmistumisen aikataulua ei vielä tiedetä. GHG-protokolla ja ISO-standardit lähestyvät hiilijalanjätkilaskentaa eri näkökulmista, mutta niiden yhdistäminen osoittaa pyrkimystä yhtenäiseen käytäntöön ja sen arvioidaan johtavan yksinkertaisempaa, yhtenäiseen ja luotettavampaan raportointitapaan.

3.2.1 ISO-standardi

ISO 14060-standardisarja käsittää kasviuonekaasupäästöjen ja -poistumien laskentaa, seurantaa, raportointia sekä todentamista koskevat standardit. ISO 14067:2018-standardi koskee tuotteiden hiilijalanjälkeä ja sen laskemista koskevia periaatteita elinkaarinäkökulmaan (LCA) perustuen. ISO määrittelee neljä hiilijalanjätkiselvityksen vaihetta; tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, elinkaari-inventaario, vaikutusarviointi ja elinkaariarvioinnin tulosten tulkinta. LCA:n mukaisessa hiilijalanjäljen laskennassa on otettava huomioon tuotteen elinkaaren kaikki vaiheet, mukaan lukien raaka-aineiden hankinta, suunnittelu, tuotanto, kuljetus tai toimitus, tuotteen käyttö sekä loppukäsittely. (SFS-EN ISO 14067:2018, 20–22.)

Hiilijalanjäljen laskenta tarkastelee yhtä vaikutusluokkaa, ilmastonmuutosta, jonka osalta vain raaka-aineiden hankintaan, suunnitteluun, tuotantoon, kuljettamiseen tai toimittamiseen, käyttöön ja loppukäsittelyyn liittyvät vaiheet. Tuotteen koko elinkaaren aikana voi tuotteella olla vaikutuksia muihin kuin edellä mainittuihin näkökohtiin. Elinkaariarviointi kattaisi muita näkökulmia kuten resurssien käytön, ilmaan, maaperään ja vesistöihin kohdistuvat vaikutukset ja muutokset ekosysteemeissä. (SFS-EN ISO 14067:2018, 20–22, 42.)

LCA on perusteellinen menetelmä, jolla resursseja ja vaikutuksia ympäristöön tarkastellaan ja arvioidaan tarkasti. Laajan LCA:n tekeminen on monimutkaista ja vaatii syvällistä ammattitaitoa. Yksinkertaistetussa elinkaariarvioinnissa tarkastellaan määrättyä osaa tuotantoprosessista tai tuotejärjestelmästä tai keskitytään tietyn päästön tai tietyn ympäristövaikutuksen analysointiin.

3.2.2 GHG-protokolla

Hiilijalanjäljen laskenta pohjautuu usein kansainvälisesti tunnustettuun Greenhouse Gas -protokolaan (GHG), joka antaa tarkat tekniset ohjeet laskennan suorittamiseen ja tarjoaa kattavan mallin erilaisen toiminnan rajojen määrittämiselle. GHG Product Standard antaa viisi tuotekohtaisessa laskennassa käytettävää periaatetta; soveltuvuus, täydellisyys, yhtenäisyys, läpinäkyvyys ja täsmällisyys (GHG Product Standard, 19.)

GHG jakaa yrityksen päästöt kolmeen vaikutusluokkaan, scopeen, joita ovat yrityksen suorat päästöt, ostoenergiasta johtuvat päästöt ja epäsuorat päästöt. Scope 3 kattaa tyypillisesti suurimman osan yrityksen hiilijalanjäljestä, sisältäen raaka-ainehankinnat, kuljetukset, jätteet ja alihankinnan päästöt. Scope 3:n raportointi on vapaaehtoista mutta usein se muodostaa merkittävän osan yrityksen hiilijalanjäljestä ja on kuvaavin osio yritysten vastuullisuusraportointiin.

3.3 Organisaatiotason hiilijalanjäljen laskenta

Organisaatio- ja konsernitason kalenterivuoden kestävyys- ja hiilijalanjälkilaskentaa ja raportointia määrittävät seuraavat yleisesti käytetyt standardit: ISO 1406X -sarja ja GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting. Vapaaehtoiseen raportointiin on kehitetty VSME, joka sopii virallisen raportointivelvoitteen ulkopuolelle jääville pk-yrityksille.

Osana ympäristöön liittyvää vastuullisuusraportointia, yrityksen hiilijalanjälki kattaa suorat ja epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt, huomioiden raaka-aineiden hankinnan, tuotannon, energiankäytön ja logistiikan. Valmistavassa teollisuudessa raaka-aineiden hankinta voi kattaa jopa 80–99 % yrityksen kokonaispäästöistä.

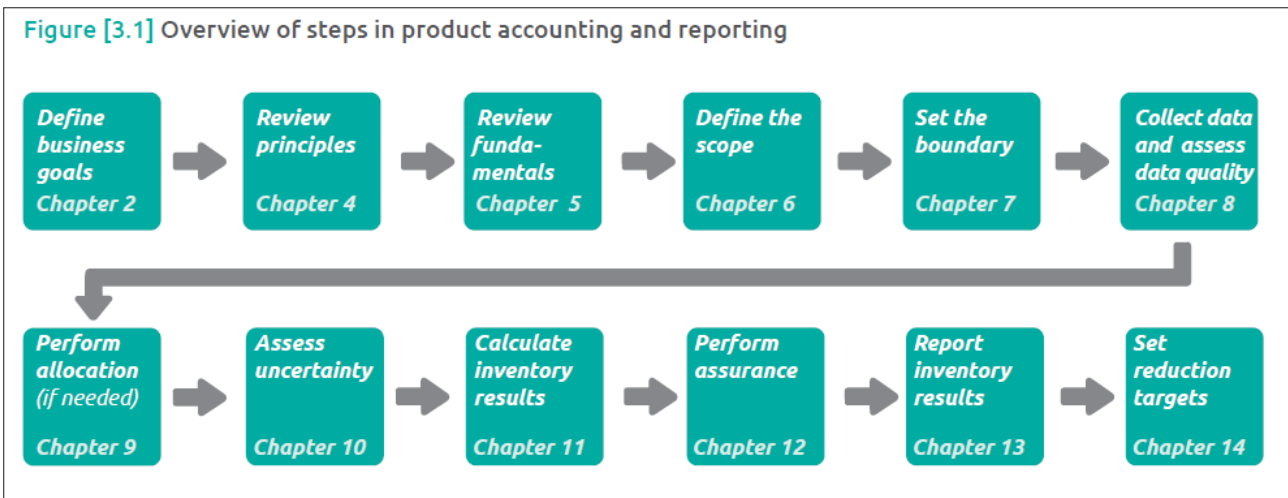
Euroopan tilinpäätösraportoinnin neuvoa-antava ryhmä (EFRAG) julkaisi 2024 vapaaehtoisen kestävyysraportointistandardin listaamattomille pk-yrityksille eli VSME-standardin, jonka tavoitteena

on mahdollista pienille ja keskisuurille yrityksille vastuullisuustiedon antaminen suurten yritysten tietopyyntöihin, parantaa niiden mahdollisuuksia rahoituksen saantiin tarjoamalla tietoa pankeille ja sijoittajille, tukea vastuullisuuskysymysten hallinnassa ja kilpailukyvyn kehittämisessä lyhyellä ja pitkällä aikavälillä sekä edistää kestävä ja osallistavaa taloutta. (EFRAG Welcomes European Commission's Recommendation on VSME 2024.)

4 Toimeksiannon toteutus

Opinnäytetyön tuottamalla laskentaparametreilla laskettiin tietyn tuotteen hiilijalanjälki. Tuotekohtainen hiilijalanjälkilaskenta ja järjestelmän rajaukset perustuvat GHG-protokollan Product Standardiin ja ISO 14607:2018-standardiin. Käytetyt päästökertoimet perustuvat GWP100-arvoihin, jotta laskenta olisi linjassa raportointistandardien kanssa. (GHG Protocol 2011, 28.)

Laskennan vaiheet on esitetty seuraavassa kuvassa GHG:n mukaan (**Kuva 4**)



Kuva 4. Hiilijalanjälkilaskennan vaiheet (GHG Product Standard, 13.)

Opinnäytetyön laajuuteen ja toimeksiantajan tarpeeseen soveltui yksinkertaistettu elinkaariarviointi, jonka periaatteen mukaisesti laskennassa keskityttiin rajattuihin päästöihin eli tuotteiden hiilijalanjälkilaskentaan sisältyviin, laskentastandardien vaatimiin kasvihuonekaasupäästöihin ja niiden ilmastoa lämmittäviin ympäristövaikutuksiin. Tuotekohtaisten laskelmien tarkat arvot salataan opinnäytetyöstä salassapitosopimusten mukaisesti. Tarkastelualue rajattiin tuotantoon.

Opinnäytetyöprosessin toimeksiannon toteutusvaihe eteni hiilijalanjäljen laskennan vaiheiden mukaisesti. Vaiheet olivat tarvittavien tietojen määrittäminen, parametrien määrittäminen, järjestelmiin tutustuminen, tietojen kerääminen ja tietopyyntöjen laatiminen, tietojen oikeellisuuden varmistaminen useammista lähteistä, rajausten tekeminen ja niiden valinta, allokointipäätökset ja allokointilogiikan kehittäminen, epävarmuustekijöiden pohdinta, laskennan suorittaminen ja tulosten jakaminen.

Menetelmien valinta tuki työn päätavoitetta ja valinnoilla pyrittiin varmistamaan, että laskenta perustuu luotettavaan, ajantasaiseen ja yrityksen toimintaan soveltuvaan tietoon. Aineisto koostui monipuolisista lähteistä, kuten raporteista, standardeista, päästötietokannoista, ohjeista, lainsäädännöstä, webinaareista sekä suullisista ja kirjallisista tiedonannoista. Tiedonkeruu toteutettiin perehtymällä toimeksiantajan toimintaan, haastatteluilla ja sähköisillä tietopyynnöillä. Lisäksi osallistuttiin koulutuksiin ja tehtiin teoriakatsaus, jonka avulla varmistettiin laskennan teoreettinen ja säädöspohjainen kestävyys. Menetelmien käyttökelpoisuus arvioitiin suhteessa työn tavoitteisiin ja toimeksiantajan tarpeisiin. Opinnäytetyöstä laadittiin sopimus, aineistonhallintasuunnitelma sekä salassapitosopimus toimeksiantajan kanssa. Salassapidettävät osiot ovat työn liitteenä mutta niitä ei julkaista.

Tuotekohtaisten parametrien arvojen havainnollistamiseksi esitetään esimerkkiarvoja. Hiilijalanjälkilaskenta tehtiin yrityksen hallinnassa olevan prosessin osalta, jolloin laskennan rajauksena käytettiin kehdosta portille -periaate. Laskennassa otettiin huomioon toimeksiantajan arvion mukaan prosessin olennaisimmat osat, jotka aiheuttavat merkittävimmän osan valmiin tuotteen hiilijalanjäljestä. Toimeksiantaja valmistaa välituotteita, jotka ovat osa lopputuotetta, jonka koko elinkaari ei ole toimeksiantajan hallinnassa. Tutkimuskysymyksistä menetelmän ja aineiston rajoitteiden arviointia ja niiden vaikutusta tulosten luotettavuuteen ja hyödynnettävyyteen pohditaan datan laatua, rajoituksia sekä allokointia käsittelevissä kappaleissa 4.1.–4.3.

4.1 Datat laatu

Standardien mukaan laskennan tulee perustua ensisijaisesti tarkkoihin todellisiin tietoihin kuten konekohtaisesti mitattuun tietoon. Mikäli tarkkaa tietoa ei ole saatavilla, voidaan käyttää arvioita ja yleisiä päästökertoimia. Hiilijalanjälkiraportoinnin ohjeen mukaisesti tulee mainita kohdat, joissa primääridataa ei ole ollut saatavilla ja miltä osin arviointia on tehty. (SFS-EN ISO 14067:2018, 31.)

Arvot, joita työssä käytettiin, pyrittiin määrittämään mahdollisuuksien mukaan luotettavasti lähteestä primääridatasta kuten ostolaskuista ja energiankulutustiedoista. Tietojen keruuseen panostettiin ja yleisiä keskiarvoja pyrittiin välttämään. Yleisiä alan kertoimia ja vastaaviin syötteisiin annettuja päästökertoimia sekä työn aikana laskettuja keskiarvoja käytettiin silloin kun primääridataa ei ollut saatavilla. Kohdat, joissa jouduttiin turvautumaan arvioihin ja keskiarvoihin, voivat lisätä laskennan epävarmuutta.

Aineiston kattavuuteen liittyvät rajoitteet olivat osin puuttumaan jääneet vastaukset tietopyyntöihin sekä se että kaikista hankinnoista tietoja ei ollut saatavilla tai ne saatiin viiveellä. Tämä vaikutti aikatauluun. Puuttuvia tietoja arvioitiin näissä tapauksissa laskentaohjeiden mukaisesti. Arviointi tehtiin arvioijan käytettävissä olevien tietojen perusteella ja parhaaseen ammattitaitoon perustuen. Tällaiset yksittäisten henkilöiden tai pienen ryhmän tekemät rajaukset ja arviot sisältävät inhimillisen virheen mahdollisuuden, monimutkaisen tiedon pelkistystä ja voivat siten vaikuttaa lopputulokseen. Näissä tapauksissa laskennassa hyödynnettiin yleisiä ja standardien mukaisia päästökertoimia, mikä on hyväksytty käytäntö erityisesti Scope 3 -päästöjen arvioinnissa. Tämä on voinut vaikuttaa yksittäisten tuotteiden päästöjen tarkkuuteen, mutta ei vaarantanut työn kokonaisluotettavuutta. Menetelmälliset valinnat tehtiin GHG-protokollan ja soveltuvien standardien mukaisesti, ja rajaukset ja arviot dokumentoitiin.

Tulokset saatiin toimeksiannon laajuuteen nähden eriteltyä tarpeellisella tarkkuudella. Erityisesti niiden parametrien osalta, joissa päädyttiin käyttämään sekundääridataa primääridatan puuttuessa, voisi tuotekohtaisten päästötietojen tarkentuminen muuttaa laskennan numeerisia lopputuloksia. Laskennan keskeiset havainnot kuten raaka-aineiden merkittävin osuus kokonaispäästöistä, säilyisivät silloinkin todennäköisesti ennallaan. Energiankulutukseen ja logistiikkaan liittyvien parametrien vaikutus kokonaispäästöihin on vähäisempi, koska näihin liittyvä aineisto on ollut tarkempaa.

4.2 Rajaukset

Hiilijalanjälkilaskennassa tehdään yrityskohtaisia rajauksia, jotta huomioidaan yrityksen toiminnan keskeisimmät päästölähteet. Päästölaskennan periaatteena voi olla cradle-to-gate eli kehdestä portille -malli, jossa tarkastellaan tuotteen elinkaaren aikaiset päästöt toimitukseen asti. Mallin va-

linta mahdollistaa eri vuosien vertailukelpoisen raportoinnin. Valinnan tekeminen ja rajaukset tarkoittavat kuitenkin, että joitakin tietoja jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Valinta tehdään laskentastandardien asettamissa rajoissa mutta kunkin yrityksen päätöksen mukaan. Rajauksilla voi olla vaikutuksia laskennan lopputulokseen. Rajauskriteerit mahdollistavat hiilijalanjäljen kannalta merkityksettömien materiaali- tai energiavirtojen poisrajaamisen yksikköprosessista. (SFS-EN ISO 14067:2018, 10–11, 25.)

Laskennassa tehtiin rajauksia ja kyseessä on siksi tuotteen osittainen hiilijalanjälki. Rajauksia suoritettaessa joko alitajuiset tai piilevät tavoitteet voivat vääristää tiedon laatua, ja tiedon siirrossa tapahtuvat virheet vaikuttavat. Analyysia suorittavan henkilön pätevyys ja ammattitaito, sekä aiheeseen perehtyneisyyden taso vaikuttavat työn laatuun. Voidaan katsoa, että opinnäytetyössä sopimussuhde luo mahdollisen riippuvuussuhteen, jonka takia on olennaista dokumentoida ja perustella laskenta kattavasti.

4.3 Allokointi

Työssä kehitettiin lähteitä ja standardeja mukailien yhteisten syötteiden allokointilogiikka toimek-siantajalle. Yhteiset syötteet jaettiin tuotteille syötteiden massa- ja työstöaikaan perustuen. Allokointi osoittautui välttämättömäksi, koska joiltain osin päästökerroin tai materiaalien määrä on tarkasti tiedossa ja osasta syötteitä ne ovat keskiarvoja tai lähinnä tuotetta olevan, toiseen tuotteen ympäristöselosteen mukaisia.

Allokointia tulisi standardien mukaan mahdollisuuksien mukaan välttää. Allokointimenetelmänä voi GHG:n mukaan olla massan, energian, taloudellisen arvon tai tuotteiden välisen suhteiden mukaan jakaminen. ISO 14067:2018:n mukaan syötteet ja tuotokset on allokoitava eri tuotteille selkeästi ilmoitetun ja perustellun allokointimenettelyn perusteella (GHG Product Standard 2011, 28; ISO 14067:2018, 30–31.)

Laskennan aikana pyrittiin käyttämään samaa logiikkaa kaikille yhteisille syötteille ja siksi päädyttiin allokointiin. Siten kunkin tuotteen laskennalliseen hiilijalanjälkeen tulee painoa vastaava määrä yhteisten syötteiden päästöistä. Eri lähteistä saatuja päästökertoimia verrattiin. Lisäksi etsittiin päästökertoimia, jotka ovat mahdollisimman ajantasaisia ja alueellisesti päteviä.

Tanskalaisten, koneistusta, sorvaamista ja jyrsintää prosesseissaan käyttävien yritysten tiedoilla ollaan kehittämässä koneistuksen päästöjen laskentaan sopivaa laskentatyökalua. DAMRC:n GHG Calculator soveltuu tuotekohtaiseen kasvihuonekaasupäästölaskentaan. Laskentamenetelmät perustuvat ISO-standardeihin ja alan GHG-laskentatapaan. (DAMRC 2024.) Mallin arvioitiin soveltuvan hyvin tämän opinnäytetyön tarkoituksiin. Työkaluna laskuria ei ollut käytössä mutta laskurin taustaselvityksenä toimivaa julkista teknistä selvitystä ja sen esimerkkejä mukaillen saatiin varmistusta laskennan suorittamiselle ja etenkin suuntaa yhteisten syötteiden määrittämiseen ja rajaamiseen.

4.4 Parametrit

Tehtävänä oli määrittää ja integroida laskentaparametrit toiminnanohjausjärjestelmään automaattisen hiilijalanjälkilaskennan taustalle. Työn lopputuloksena syntyi tuotantoon liittyvien osa-alueiden hiilijalanjäljen lukuarvot. Tuotannonaikaiset parametrit määritettiin materiaalivirtojen ja päästökertoimien avulla ja vietiin toiminnanohjausjärjestelmään tuotantoprosessin osien yhteenlaskettua hiilijalanjälkeä varten. Kaava perustuu ISO 14067:2018-standardin ja GHG Protocolin mukaisiin laskentaperiaatteisiin. Tuotteen hiilijalanjälki lasketaan kaavan (**Kuva 5**) mukaan

Laskentakaava

$$CO_2e_{yht} = P_{materiaali} + P_{energia} + P_{työstö}$$

Kuva 5 Hiilijalanjäljen yksinkertaistettu laskentakaava

jossa

CO_2e_{yht} = valmiin tuotteen päästöt (kgCO₂e)

$P_{materiaali}$ = raaka-aineen päästöt

$P_{energia}$ = energiankulutuksesta aiheutuvat päästöt

$P_{työstö}$ = koneistuksesta aiheutuvat päästöt

Järjestelmään syötettiin parametrit, jotka kuvaavat tuotantoprosessin syötteiden kuten raaka-ainesten päästöjä sekä koneistuksen päästöjä. Materiaaliparametrit sisältävät esimerkiksi painon ja materiaalilajin, kun taas koneistusparametrit laskettiin toimeksiantajan datasta, jota voidaan hyödyntää hiilijalanjäljen laskentamallissa. Yhdessä syötteet muodostavat tuotteen hiilijalanjäljen, joka lasketaan kunkin syötteen päästökertoimesta alla esitetyn kaavan mukaan.

Syötteinä käytettiin materiaalien kulutusta, energiankulutusta ja toimeksiantajan koneistuksesta laskettuja ja arvioituja päästöjä. Materiaaliparametrit sisältävät esimerkiksi materiaalilajin ja valmistuseräkohtaisen kulutuksen sekä syntyvän jätteen.

4.5 Rajauksista

Laskennasta rajattiin pois tuotantolaitoksen ylläpito ja huolto, muut jätelajit kuin metallilastujäte ja emulsioneste, hitsauskaasut ja muut alle 20 % tuotteen hiilijalanjäljen muodostavat erät. Edellä mainitut jätettiin huomiotta niiden osuuden ollessa vain joitakin prosentteja kokonaispäästöistä ja niiden yksityiskohtaisen erittelyn vaativuuden vuoksi. Eri vaiheisiin liittyvien parametrien määrittelyn ja tuotekohtaisen hiilijalanjälkilaskennan periaatteena oli kehdosta portille -malli, jolla tarkasteltiin tuotteen elinkaaren aikaiset päästöt sen saapumisesta toimeksiantajalle kuljetuksena aina valmistusprosessin loppuun asti.

Päästölaskennassa osa energiankulutukseen ja työvaiheisiin liittyvistä vaiheista rajataan tyypillisesti tarkastelun ulkopuolelle. Suunnitteluvaihe, simulointi, kalibrointi ja työkalujen vaihto kuluttavat energiaa mutta näitä ei huomioida erikseen. Hallinnolliset ja tukitoiminnot, kuten dokumentointi ja laadunvalvonta, jäävät myös usein päästölaskennan ulkopuolelle, ellei kyseessä ole koko elinkaaren kattava arviointi. (Energy consumption optimization strategies for sustainable machining 2025, 4.)

4.8 Hiilijalanjäljen laskentakaava

Hiilijalanjäljen muodostavien parametrien päästöjen laskenta perustuu kaavoihin seuraavassa kuvassa (**Kuva 6.**)

Parametrit

$$P_{\text{materiaali}} = m \cdot EF_{\text{materiaali}}$$

$$P_{\text{energia}} = E \cdot EF_{\text{energia}}$$

$$P_{\text{jäte}} = m \cdot EF_{\text{jäte}}$$

Kuva 6 Osa laskennan parametreista ja niiden päästöjen kaava

jossa

EF = päästökerroin (kgCO₂e kg valmista tuotetta kohden)

E = energian kulutus (kWh)

m = materiaalin määrä (esim. kilogrammoina)

Kaava perustuu ISO 14067:2018-standardin ja GHG Protocolin mukaisiin laskentaperiaatteisiin.

4.6 Rajausten vaikutuksia tuloksiin ja vertailtavuuteen

Kehdosta portille -mallin käyttö rajaa tarkastelun tuotteen valmistukseen asti, jolloin esimerkiksi käyttö- ja loppukäsittelyvaiheen päästöt jäävät huomioimatta. Tämä parantaa laskennan toistettavuutta ja soveltuvuutta toimitusketjujen raportointiin, mutta heikentää vertailtavuutta tuotteisiin, joiden laskenta kattaa koko elinkaaren.

Rajauksen vaikutus vertailtavuuteen voidaan osittain kompensoida dokumentoimalla rajaukset tarkasti ja käyttämällä standardoituja päästökertoimia. Jatkossa voidaan harkita laskennan laajentamista kehdestä hautaan -malliin, cradle-to-grave, jolloin myös käyttö- ja loppukäsittelyvaiheen päästöt sisältyvät lopputulokseen. Tämä parantaisi vertailtavuutta elinkaarivertailuissa mutta vaatisi tarkempaa tarkastelua eikä ole välttämättä tarpeenmukaista pk-yritykselle.

5 Laskentaan sisältyvät parametrit

Yhteiset ja laskennasta pois rajatut syötteen on perusteltu ISO 14067:2018 ja GHG Protocolin mukaisesti, ja ne on dokumentoitu seuraavassa taulukossa (**Taulukko 1.**).

Taulukko 1. Laskentaan sisältyvät syötteen

Erä	Sisällytetty / Poissuljettu	Perustelu
Raaka-aineet	Sisällytetty	Merkittävin osuus päästöistä (ISO 14067:2018)
Energiankulutus	Sisällytetty	Keskeinen osa tuotantoa (GHG)
Leikkuunesteet	Sisällytetty	Merkittävä päästölähde (DAMRC)
Työkaluteräs	Sisällytetty	Arvio perustuu elinkaareen (ISO)
Logistiikka (saapuvat)	Sisällytetty	GHG Product Standardin rajaus
Jätteet	Sisällytetty	GHG Product Standardin rajaus
Koneistusaika	Sisällytetty	GHG Product Standardin rajaus
Hallinnolliset toiminnot	Poissuljettu	Ei sisälly cradle-to-gate-malliin (ISO 14067:2018)
Tuotteen käyttö ja loppukäsittely	Poissuljettu	Rajattu toimitukseen asti (GHG Protocol, cradle-to-gate)
Investoinnit	Poissuljettu	GHG Product Standardin rajaus

Investointeja ovat mm. aurinkosähköenergiajärjestelmä, jonka elinkaaren aikaisia päästöjä ei ole jyvitetty tuotekohtaiseen laskentaan. Paneelien oletettu elinkaari on 25 vuotta. Tuotettuun sähkön suhteutettuna kWh:a kohden syntyvien päästöjen määrittäminen on monimutkaista ja aurinkopaneelien elinkaaren aikaiset päästöt riippuvat kennotyypistä, valmistajasta, hyötysuhteesta ja eliniästä ja vaihtelevat tuotantotavasta riippuen suurestikin (Korhonen 2018, 3–30.) Samalla tavalla laitehankinnat, varaosat ja muut investoinnit on rajattu pois tarkastelusta. Osa rajauksista, kuten laite- ja aurinkosähköjärjestelmäinvestointi, on tehty GHG:n ohjaamana, yrityksen valitsemien kategorioiden mukaisesti.

5.1 Raaka-aineet

Raaka-aineet ovat pääosin eri laatuista metalleja. Raaka-aineiden osuutta laskettaessa on käytetty toimittajilta sekä eri tietokannoista saatuja päästökertoimia. Päästökertoimien sekä materiaalin painon avulla on laskettu osien tuottamisesta aiheutuneet hiilidioksidiekvivalenttipäästöt.

Laskennassa huomioidaan pääraaka-aine, joka muodostaa valmiin tuotteen painosta vähintään 80 %. Standardin mukaan tarkastellaan niitä prosessin osia, jotka muodostavat vähintään 80 % lopputuotteen hiilijalanjäljestä. (SFS-EN ISO 14067:2018, 26.)

5.2 Energiankulutus

Konepajateollisuus on energiaintensiivinen ala. Metsä-, kemian- ja metallinjalostusteollisuus ovat suurimpia sähköenergian kuluttajia, kone- ja metallituoteteollisuus ovat maan neljänneksi suurin sähkökuluttaja Suomessa vuosina 2023 ja 2024 kun tarkastellaan sähkön kokonaiskäyttöä teollisuusaloittain (Tilastokeskus 2025.) Sähkö- ja lämpöenergiankulutus voivat muodostaa merkittävän osan alan yrityksen energiantarpeesta. Ympäristövastuun huomioiminen yrityksissä voi sisältää uusiutuvan energian käytön lisäämisen, materiaalien kierrätyksen ja tuotannon sähköistämisen potentiaalin selvittämisen. Metall- ja terästuotteiden valmistuksessa ja muokkauksessa on mahdollista vaikuttaa tuotannon kokonaisenergiankulutuksesta aiheutuvaan hiilijalanjälkeen esimerkiksi energian alkuperän valinnalla. Yritykset voivat mm. sitoutua uusiutuvilla tuotantomuodoilla kuten aurinko-, tuuli-, tai vesivoimalla tuotetun energian ostamiseen, jolloin niiden osalta päästökerroin on huomattavasti alempi kuin fossiilisilla polttoaineilla tuotetun energian päästökertoimet. Esimerkiksi tuotteen valmistaminen uusiokäytetyistä tai kierrätetyistä materiaaleista voi puolittaa sen hiilijalanjäljen verrattuna neitseellisiin raaka-aineisiin perustuviin tuotteisiin. (How the Circular Economy Tackles Climate Change 2021.)

Koneistuksessa energiankulutus jakautuu useisiin eri vaiheisiin, joista merkittävin osa kohdistuu itse koneistusprosessiin. Tutkimusten mukaan jopa 75 % valmistusprosessin sähköenergiasta kuluu koneistukseen, erityisesti koneiden leikkausaikaan, jossa tapahtuu materiaalin poisto. Muissa vaiheissa energiaa kuluu koneen käynnistykseen ja valmiustilassa eli asetusaikana. Leikkausparametrien, kuten syöttönopeuden ja leikkausnopeuden, optimointi ovat keskeinen keino vähentää energiankulutusta. Tutkimuksessa havaittiin, että syöttönopeuden optimointi voi vähentää

energiankulutusta jopa 87 %, mikä tekee optimoinnista tehokkaan säätöparametrin energiatehokkuuden näkökulmasta. (Energy consumption optimization...2025.)

Hiilijalanjälkilaskennassa itse tuotettu energia vähentää ostoenergian tarvetta ja voidaan raportoida erikseen mutta se ei vähennä laskennallisesti energiankulutusta. Tuotettua energiaa ei voi laskennassa vähentää kompensoimaan fossiililla polttoaineilla tuotetun ostoenergian määrää eikä se siten vaikuta tuotteen laskennalliseen energiankulutukseen tai siitä aiheutuviin päästöihin (GHG Product Standard, 92–93.)

Toimeksiantajan sähköntoimittajan ilmoittama fossiilivapaan sähkön päästökerroin on 0 energiantoimittajan takuun mukaan. Lisäksi toimeksiantaja tuottaa tarvitsemaansa energiaa aurinkoenergiajärjestelmällä. Energiankulutus ei tällöin tuota laskennallisia päästöjä, eikä tässä työssä ole siksi eritelty kiinteistön energiankulutusta tuotannon vaatimasta energiasta. Jos käytetty energia tuottaa laskennallisia päästöjä eikä konekohtaista energiamittausta ole käytettävissä, voidaan kiinteistön pohjateho eritellä koneistuksen vaatimasta energiasta. Tämä voidaan eritellä tarkastelemalla kiinteistön tai kiinteistöjen energiankäyttöä tilojen ollessa tyhjiään esimerkiksi tuotannon seisakien aikana tai päivävuoroon perustuvassa työssä yöajan kulutuksia.

5.3 Leikkuunesteet

Leikkuunesteet ovat oleellinen osa CNC-koneistusta ja niitä kuluu kaikissa vastaavissa tuotantotavoissa koneiden jäähdytykseen ja lastujen poistumisen. Nesteiden käyttö vaikuttaa hiilijalanjälkeen sekä suoraan valmistuksen ja kuljetuksen että epäsuorasti jätehuollon ja kierrätyksen kautta. Leikkuu- tai lastuamisnesteet jaetaan synteettisiin, puolisynteettisiin, emulsioihin ja öljyihin öljypitoisuuden mukaan. Öljypohjaiset nesteet aiheuttavat tyypillisesti suuremman ilmastovaikutuksen kuin synteettiset vaihtoehdot, koska niiden valmistus perustuu fossiilisiin raaka-aineisiin. (Cutting fluid 2021.)

Kulutukset voidaan määrittää ostotilausten perusteella. Päästökertoimet laskettiin GHG Calculatoria mukaillen, joka perustuu ISO 14067:n ja GHG-protokollaan (GHG Calculator ---CO2 footprint...2024.) Nesteiden osuus kokonaispäästöistä on pieni verrattuna raaka-aineisiin, mutta niiden merkitys korostuu, jos käytetään öljypohjaisia tuotteita tai jos kierrätys ei ole järjestetty. Tark-

kuutta voidaan parantaa mittaamalla todellinen kulutus prosessikohtaisesti ja huomioimalla nesteiden kierrätys. Lisäksi yritys voi varmistaa vähäpäästöisten leikkuunesteiden käytön osana päästövähennysstrategiaa, jos se on prosessin vaatimukset huomioiden mahdollista.

5.4 Työkaluteräs

Koneistuksessa työkaluterien kulumisnopeudella ja niiden kasvihuonekaasupäästöjen määrittämiselle ei ole nykyisellään laskettavissa luotettavaa arvoa. Arvot ovat aina arvioita riippuen arvioidusta terän elinkaaresta. Laskennan perustuminen arvioon johtuu elinkaareen vaikuttavista useista, osin tuntemattomista muuttujista, kuten leikkausterien valmistukseen käytetyistä eri materiaaleista, terien pyörimisnopeudesta, poistettavan materiaalin määrästä ja koneistajan ammattitaidosta.

Työkaluteräksen elinkaarta voidaan selvittää kulumisnopeuden avulla, joka saadaan Taylorin laskentakaavalla, kun tunnetaan leikkausterän pyörimisnopeus, työkaluterän käyttöikä ja leikkausnopeus, joka johtaa työkaluterän minuutin käyttöikään sekä materiaalin kovuudesta riippuva vakio. Tätä laskentatapaa ei kuitenkaan suositella käytettävän vaativassa koneistuksessa, jota tilaajan työluonteenomaisesti on. (DAMRC 2024, 12.) Laskennassa käytetään siksi tilausmäärien painoa ja keskiarvokerrointa työkaluteräkselle.

5.5 Logistiikka

Kuljetuksista otetaan huomioon yritykseen tilatut eli saapuvat syötteen ja raaka-aineet ts. yrityksen maksamat kuljetukset GHG:n tuotekohtaisen laskentaoppaan mukaan. Tuotteiden toimitukset asiakkaille voi jättää pois tai ne voi eritellä eri kategoriaan ja raportoida halutessaan erikseen. (GHG Protocol 2015.)

Logistiikkayritysten päästöjen laskentamenetelmät ja kertoimet vaihtelevat jonkin verran laskentatavan mukaan. Yritykset ilmoittavat kuljetustensa päästöt tyypillisesti joko TTW, Tank-to-Wheel tai WTW, Well-to-Wheel-periaatteen mukaan laskettuna. TTW sisältää vain ajoneuvon käytön aikaiset päästöt eikä sisällä polttoaineen tuotantoa. WTW sisältää polttoaineen tuotannon ja käytön päästöt ja ottaa huomioon kaikki kuljetusmuodot ja terminaalit. (What is well-to-tank...? n.d.)

Kuljetusten päästöjen laskemiseen on käytetty kuljetusten tonnikilometrejä ja kuljetuspalveluja tuottavien yritysten käyttämiä päästöintensiteettiarvoja, joiden perusteella kuorman kulkema matka ja raaka-aineen paino määrittävät kasvihuonekaasupäästöt. Saapuneiden toimitusten kuljetusten päästöt on laskettu tonnikilometrien kautta ja jaettu osaksi yhteisiä syötteitä samalla logiikalla kuin muutkin kuluvat yhteiset syötteet. Kuormassa voi olla useita materiaalilajeja ja muitakin kuin tuotteiden valmistukseen kuluvia osia, joita ei lasketa varsinaisen tuotteen päästöihin mutta kuljetusten päästöt päädyttiin allokoimaan kokonaan niiden kokonaisvaikutuksen ollessa varsin mitätön.

Esimerkiksi Posti käyttää ISO 14083:2023-standardia ja GLEC Frameworkia päästöjen laskentaan. Postin laskentatavassa päästöintensiteetti huomioi eri kuljetusmuodot ja varastoinnin aikana tapahtuvan sähkön ja lämmityksen kulutuksen. Laskennassa huomioidaan ajoneuvon tyyppi ja päästöluokka, polttoaineen tyyppi ja kulutus, kuormitusaste, kuljetusmatka, energiankulutus ja polttoaineen päästökerroin, päästötyypit ja niiden kertoimet. Näiden tekijöiden perusteella kuljetusyrityksen laskevat päästöintensiteettilukeman. (Postin tiedonanto 2025.)

5.6 Jätteet

Globaalisti 85 % kaikesta kerätystä teräsjätteestä kierrätetään. Terästuotannossa käytetään kierrätettyä terästä, sillä se vähentää merkittävästi luonnonvarojen käyttöä ja pienentää hiilijalanjälkeä koko arvoketjussa. Kierrätetty teräs korvaa neitseellisiä raaka-aineita, kuten malmia, mikä vähentää kaivostoiminnan ympäristövaikutuksia ja energiankulutusta. Lisäksi kierrätys parantaa tehtaiden kustannustehokkuutta, koska kierrätysmateriaali on taloudellisesti edullisempaa ja sen sulatusprosessi vaatii vähemmän energiaa kuin uuden teräksen valmistus. (Ruostumattoman teräksen kierrätys n.d.)

Terästuotteiden elinkaari on noin 40 vuotta. Nykyisin käytössä olevat ja juuri valmistuvat tuotteet muuttuvat osaksi kierrätettyä metallijätettä seuraavan sukupolven aikana. Teräksen kierrätysprosentit ovat materiaalijätteestä maailman suurimpia sillä se on täysin kierrätettävää, ja sitä sulattaa ja uudelleen käyttää ilman että lujuus- tai kestävyysominaisuudet kärsivät. (How much carbon does steel emit? 2025.) Tuotannossa syntyvän lastujätteen määrä ja päästöt eli pääasiallisen jätelajin päästöt on allokoitu samalla logiikalla aikaa kohden kuin muutkin yhteiset päästöt.

5.7 Koneistus parametrinä

Tuotannon päästöt määräytyvät työvaiheisiin kuluvan ajan, energian ja syötteen massan mukaan. Jokaiselle työstettävälle materiaaliladulle on saatavilla tai arvioitavissa päästökerroin. Materiaalien massavirtojen kautta laskettiin materiaalien osuus päästöistä. Työvaiheen kokonaisaika sisältää alalla asetusajaa sekä työstöaikaa. Asetusaikaan huomioidaan asetuksen tekoon kuluva aika ja työstöaikaan koneelta luettu kappaleen työstöaika tai erilaisilla laskureilla arvioitu työstöaika. Asetusaikaa, työstöaikaa ja energiankulutusta seurataan tyyppillisesti alalla toiminnanohjausjärjestelmän avulla niiden muodostaessa laskutusperusteen tuotteille. CNC-koneistuksen työstöajalle tai asetusajalle ei ole laskettu tiettyä päästökerrointa. (Environmental and Carbon Reduction Report 2024.)

Tarvittaessa työstöajan ja asetusajan energiankulutus voidaan selvittää konekohtaisella mittauksella, käyttämällä koneen tietoja tai käyttämällä keskiarvoa modernille konekannalle. Konekohtainen mittaus on luotettavin tieto sillä keskiarvot vaihtelevat paljon koska tyyppinen työstöaika vaihtelee valmistusprosessin mukaan runsaasti. (How long does CNC Machining Take 2025.) Sähkönkulutus on työstöaikana tyyppillisesti 1–15 kWh ja se vaihtelee riippuen työstettävästä materiaalista ja eri teollisuuden alojen toleranssi- ja vahvuusvaatimuksista. (How Much Electricity Does A CNC Machine Use? 2023.)

6 Tulokset

Tuloksina tuotteiden hiilijalanjäljestä päädyttiin tuotteiden vaihtuvista pääraaka-aineista riippuen päästöjen jakaumaan, jossa raaka-aineet muodostivat 85–99 % tuotteiden päästöistä muiden yhteisten syötteiden jäädessä merkittävästi pienempiin osuuksiin. Tuotteissa raaka-aineet muodostavat merkittävimmän osuuden hiilijalanjäljestä kaikissa tuotteissa.

Fossiilivapaan energian käyttö johti energiankulutuksen osalta nollapäästöihin. Fossiilivapaasta energiasta johtuen yhteiset syötteet tuottivat vuositason arvion mukaan 1–2 % tuotannon vuosittaisesta hiilijalanjäljestä. Pieni osuus osoittaa, että yhteisten syötteiden päästöt ovat pienin osa kokonaisuutta. Osuus toisintaa tulosta, joka on yleinen muissa laskelmissa materiaali- ja energiaintensiivisellä alalla, joilla päästöt muodostuvat tyyppillisesti energiankulutuksesta ja raaka-ainesyötteistä.

Suurimmat päästölähteet muista yhteisistä syötteistä pois lukien pääraaka-aine, olivat lastujäte, leikkuuneste ja työkalujen kulumisen aiheuttamat päästöt. Lastujäte, leikkuunesteet ja työkalut tuottivat varsin pienen osuuden koko tuotteen päästöistä, silloin kun energiankulutusta ei huomioida sen päästövapaa-luokittelun vuoksi.

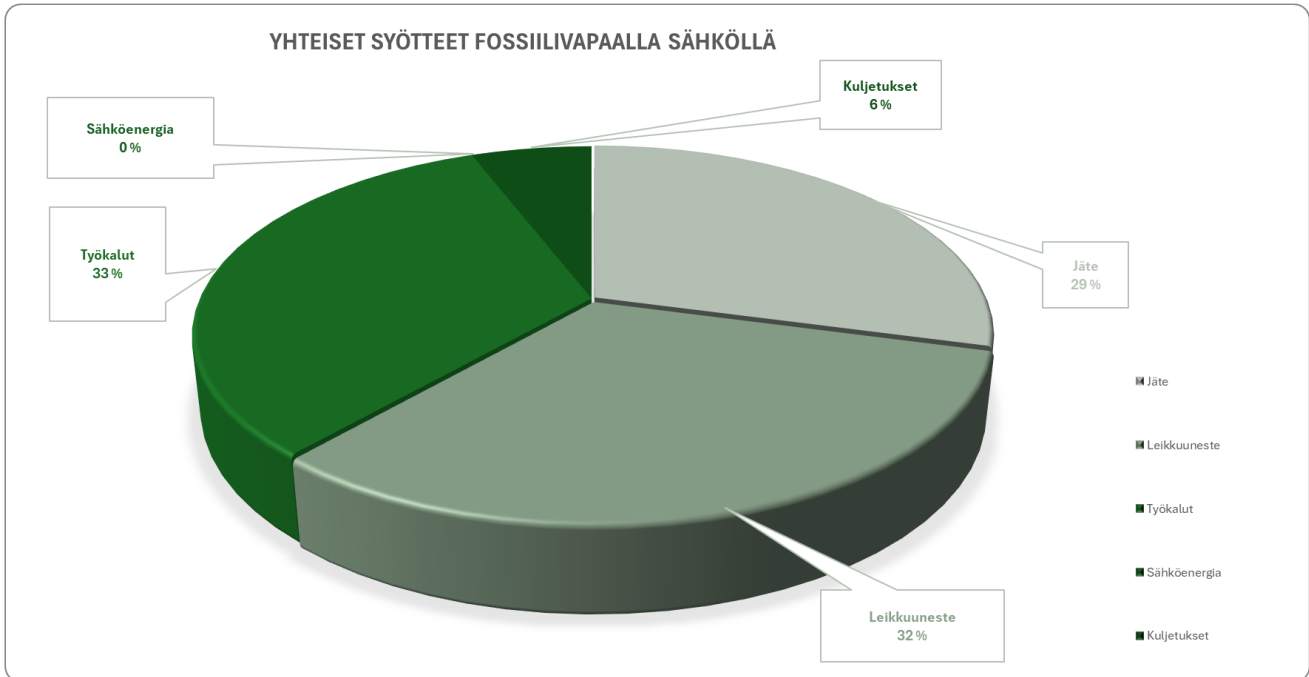
Laskennan tulokset tukevat toimeksiantajan strategisia tavoitteita, jotka liittyvät vastuullisuuden ja ympäristövastuun kehittämiseen. Hiilijalanjälkilaskenta on osa laajempaa vastuullisuusohjelmaa, ja sen avulla voidaan osoittaa konkreettisia toimenpiteitä päästöjen vähentämiseksi. Tuloksia voidaan hyödyntää asiakasviestinnässä, tarjouslaskennassa ja ESG-raportoinnissa. Lisäksi ne tukevat toimitusketjujen vaatimuksia ja voivat toimia kilpailuetuna ja edesauttavat läpinäkyvyyttä ja tulevaan raportointiin varautumista.

6.1 Tulokset esimerkkilaskelmassa

Materiaalisyötteiden ja energian päästövaikutusten jakautuminen esitetään tässä luvussa esimerkkilaskelman kautta. Laskelman tavoitteena on havainnollistaa päästölaskentaa. Laskelma ei kuvaa yrityksen tai minkään tietyn tuotteen hiilijalanjälkeä, vaan perustuu kuvitteellisiin, vastaavalla tavalla metallista tai teräksestä valmistettuihin tuotteisiin, joiden materiaalisyötteet muodostavat yli 80 % tilausten arvosta ja siten valtaosan valmiin tuotteen päästöistä.

Seuraavissa kuvissa esitetään laskennan havainnollistamiseksi yhteisten syötteiden jakauma fossiilivapaalla energialla tuotettuna ja vertailun vuoksi jakauma energialla, jolle käytetään Suomessa tuotetulle sähkölle laskettua keskimääräistä päästökerrointa.

Yhteisten syötteiden päästöjen jakautuminen fossiilivapaasti tuotettuna esitetään seuraavassa kuvassa (**Kuva 7**). Yhteiset syötteet eivät seuraavassa esimerkkikuvaajassa sisällä pääraaka-ainetta.

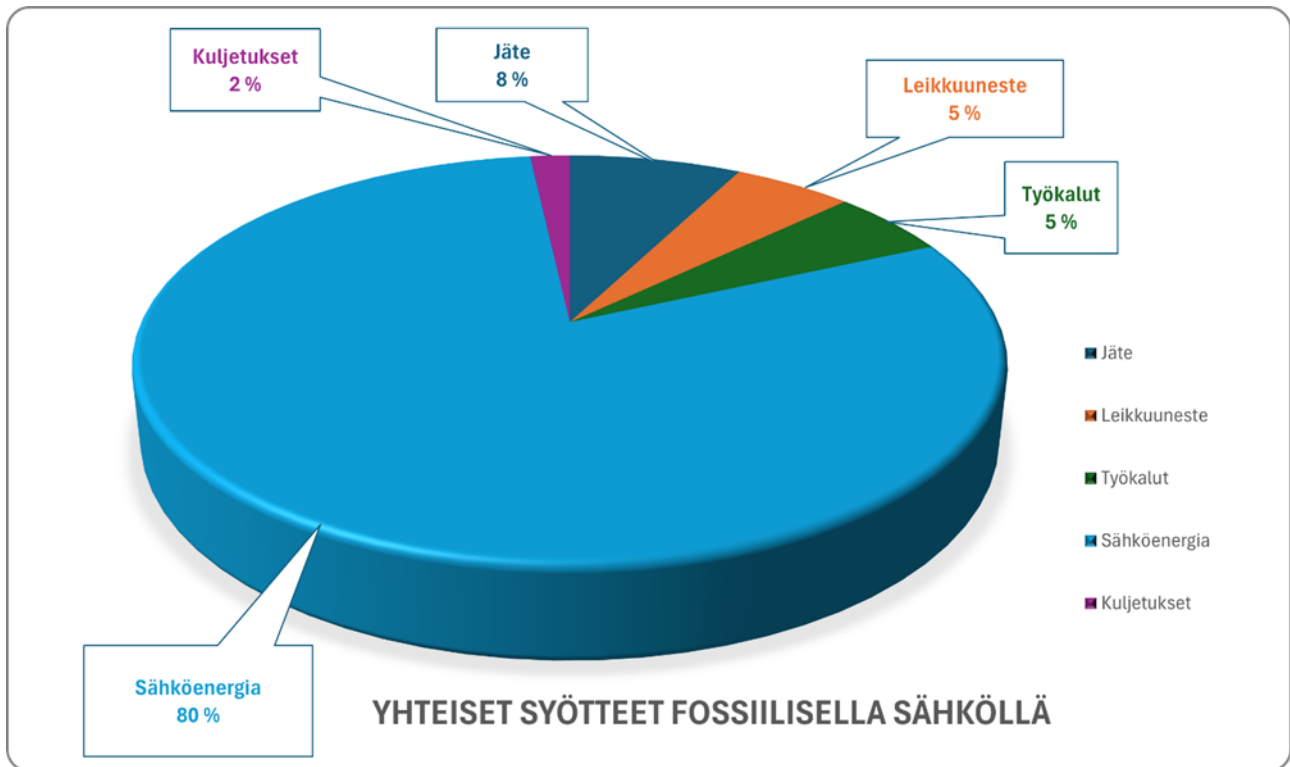


Kuva 7 Sähköenergian osuus päästöistä fossiilivapaasti tuotettuna

Kun tuotannon kuluttama sähkö on tuotettu fossiilivapaasti, saadaan yhteisten syötteiden päästöjakaumassa työkaluteräksen kulumisesta, leikkuunesteen kulumisesta ja jätelastun muodostumisesta aiheutuneet päästöt suurimmiksi osatekijöiksi kukin noin 30 %:n osuudella. Kuljetus muodostaa tällöin 6% päästöistä.

Kun käytetään samoja syötteiden lukuarvoja kuin edellisen kuvan 7 esimerkissä, yhteisten syötteiden jakauma on fossiilisella sähköllä tuotettuna huomattavan erilainen. Tässä tapauksessa 80 % tuotteen päästöistä muodostuu energiankäytöstä, jolloin työkaluteräs, leikkuuneste ja jäte muodostavat kukin 5–8 % päästöistä ja kuljetukset 2 %.

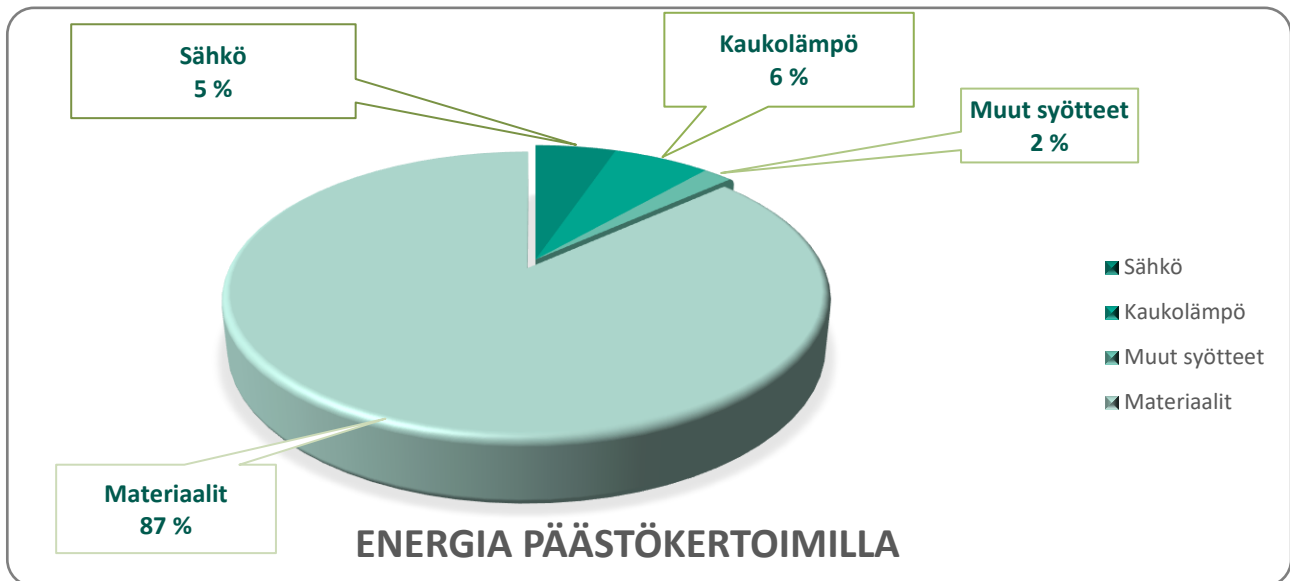
Yhteisten syötteiden päästöjen jakauma esitetty seuraavassa kuvassa (**Kuva 8**).



Kuva 8 Sähköenergian osuus päästöistä yleisellä päästökertoimella laskettuna

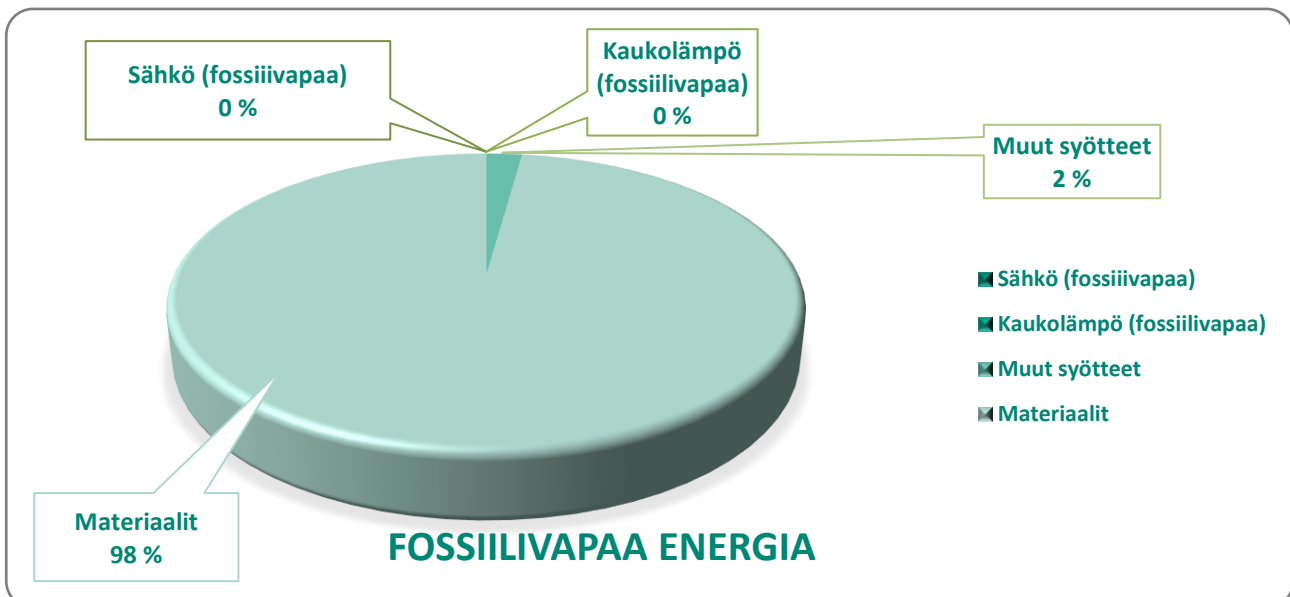
Skaalattuna vuoden tuotantomäärään, jos energia tuotetaan fossiilisia lähteitä hyödyntäen, syötteiden päästöjakauma muuttuu. Esimerkiksi Suomessa kaukolämmön päästökerroin on vuosien 2021–2023 keskiarvona 130 kgCO₂e/MWh ja sähköenergian 60 kgCO₂e/MWh (Tilastokeskus 2025). Jos raaka-aineita ostettaisiin 300 000 kg vuodessa, käyttäen päästökertointa 3 kgCO₂e/kg on niiden päästöosuus 900 tCO₂e/a. Jos yritys kuluttaisi sähköä 900 MWh vuodessa, sähkön osuus tuottaisi päästöjä 54 tCO₂e. Jos kaukolämmön kulutus olisi 500 MWh, tuottaisi sen kulutus päästöjä 65 tCO₂e. Muut yhteiset syötteet tuottavat esimerkissä vuodessa 20 tCO₂e.

Tällöin energian osuus yhteisten syötteiden tuotannon päästöistä voi nousta 12–13 %:iin alla olevan kuvan (Kuva 9) mukaisesti.



Kuva 9 Vuositasolle skaalatut tuotannon päästöt

Fossiilivapaalla energialla, sähkönkulutuksen ollessa sama 900 MWh ja kaukolämmön edelleen 500 MWh, tuottaisivat ne päästöjä 0 tCO₂e (Kuva 10)



Kuva 10 Vuosittainen tuotanto fossiilivapaalla energialla

Samoilla arvoilla, raaka-aineet 300 000 kg vuodessa, päästökertoimena 3 kgCO₂e/kg, tuottaisi päästöjä 900 tCO₂e/a. Muut yhteiset syötteen tuottavat esimerkiksi edelleen vuodessa 20 tCO₂e.

Tällöin raaka-aineiden päästöjen osuus on huomattavasti isompi 98 %:n osuudella verrattuna kuvassa 9 esitettyyn 87 %:n osuuteen.

6.2 Arvio parametrien määrittämisen merkityksestä tuotannon päästöihin

Yhteisten syötteiden osuuden vaihtelu alle 2 %:sta jopa 13 %:in, osoittaa, että pk-yrityksen valinnoilla erityisesti energian osalta, on merkittävä vaikutus tuotteen hiilijalanjälkeen. Vastuullisuusraportoinnissa nämä luvut konkretisoivat yrityksen toimenpiteiden vaikutuksia ja voivat toimia kilpailuetuna, markkinointitietona tai tukena rahoitusneuvotteluissa. Laskennallinen data tukee päätöksentekoa, mahdollistaa kustannusanalyysit ja säästökohteiden tunnistamisen.

Vertailu kilpailijoiden tuotteisiin ei ole mielekästä, elleivät laskentaperusteet ole yhteneväiset ja tieto niistä avoimesti saatavilla. Usein rajaukset ovat luottamuksellisia, jolloin vertailu ei ole mahdollista. Yrityksen päästödata voi olla kilpailijalle arvokasta tietoa. Laskentamallin valinta mahdollistaa yrityksessä sisäisesti eri vuosien vertailukelpoisuuden. Valinnan tekeminen ja rajaukset tarkoittavat kuitenkin, että joitakin tietoja jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Valinnoilla ja rajauksilla voi olla vaikutusta laskennan lopputulokseen ja siten keskenään samanlaisen tuotteen eri valmistajan ilmoittamien lukemien vertailukelpoisuuteen. Rajauksilla on merkittävä vaikutus hiilijalanjälkilaskennan tuloksiin ja eri tuotteiden välinen vertailu vaatii samanlaiset rajaukset ollakseen vertailukelpoista (SFS-EN ISO 14067:2018, 45.)

Laskennassa käytettävän päästökertoimen valinta voi vaikuttaa myös yrityksen kilpailuasemaan. Alempi päästökerroin voi tuottaa yrityksen näkökulmasta edullisemmän hiilijalanjälkiluvun, jota voidaan hyödyntää markkinoinnissa, tarjouskilpailuissa tai rahoitusneuvotteluissa. Toisaalta liian optimistinen kerroin voi heikentää raportoinnin läpinäkyvyyttä ja uskottavuutta. Päästökertoimien vertailun tärkeys korostaa tarvetta käyttää avoimia ja dokumentoituja tietolähteitä, jotka kokoavat päästötietoja varmennetuista lähteistä. Tällaiset lähteet tukevat vertailukelpoista ja auditoinneissa menestyvää päästölaskentaa.

6.3 Opinnäytetyön erityispiirteet ja osaamisvaatimukset

Tuotekohtainen hiilijalanjäljen laskenta edellytti hiilijalanjätkilaskennan menetelmien hallintaa, standardien soveltamista sekä päästökertoimien vertailua useista lähteistä. Taustatyönä toimi perehtyminen vastuullisuusraportointiin ja laskennan teknisiin ohjeisiin, kestävän kehityksen periaatteisiin, yrityksen toimialaan ja alan standardeihin sekä edeltävä kokemus organisaatiotason laskennasta harjoittelutyönä.

Allokointilogiikan suunnittelu oli toimeksiannon keskeisin osa, joka vaati soveltamista sekä luovaa osaamista. Opinnäytetyössä kehitettiin allokointilogiikka, jota ei ole valmiina standardeissa. Standardit antoivat periaatteet yhteisten syötteiden jakamiseen, mutta eivät tarjoa valmista mallia konepajateollisuuden tuotekohtaiseen laskentaan. Kehittäminen edellytti tuotantoprosessin ymmärrystä kuten materiaalivirtojen, ajan- ja energiankulutuksen merkitystä ja virhelähteiden ymmärrystä ja ohjeiden ja standardien tulkintaa sekä soveltamista laskennassa.

Eräs keskeinen vaihe oli Excel-pohjaisten laskentataulukoiden suunnittelu ja toteutus siten että ne sisältävät tarvittavat parametrit, päästökertoimet ja allokointilogiikan. Lasketut lukuarvot voitiin siten siirtää suoraan ERP-järjestelmään ilman lisämuokkausta ja ratkaisu mahdollistaa laskentataulun jatkokäytön. Laskentakaavat rakennettiin siten että muuttuvien tietojen päivitys onnistuisi jatkossa ilman taulukon rakenteen muutoksia.

Virhelähteitä hallittiin siten että arviointia ja keskiarvojen käytettiin silloin, kun primääridata ei ollut saatavilla ja arviot dokumentointiin läpinäkyvästi. Kohdat, joissa jouduttiin turvautumaan arviointiin ja keskiarvoihin, voivat lisätä laskennan epävarmuutta. Valinnat dokumentoitiin ja perusteltiin.

6.4 Työskentelyprosessin arviointi

Tutkimuskysymyksistä menetelmän ja aineiston rajoitteiden arviointia ja niiden vaikutusta tulosten luotettavuuteen ja hyödynnettävyyteen pohdittiin tarkemmin luvussa 4. Ratkaisujen kriittinen arviointi oli olennainen osa prosessia, sillä jokainen valinta vaikutti tulosten luotettavuuteen ja vertailtavuuteen.

Työ toteutettiin pääosin itsenäisesti, mikä vaati kykyä hallita aikataulua ja reagoida muutoksiin työn edetessä. Prosessin aikana tehtiin useita itsenäisiä rajauspäätöksiä sekä kehitettiin allokointilogiikka. Nämä osiot vaativat kriittistä harkintaa ja dokumentointia. Rajaukset perusteltiin standardien ISO 14067:2018:n ja GHG-protokollan mukaisesti ja arvioitiin niiden vaikutus tulosten luotettavuuteen. Ohjausta hyödynnettiin rajallisesti, mikä lisäsi itsenäisen päätöksenteon ja lähteiden kriittisen arvioinnin merkitystä.

Työskentelyprosessin kriittinen tarkastelu osoitti, että rajaukset ja lähteiden tulkinta vaativat soveltuvaa ammattiosaamista ja jatkuvaa seuranta. Kehittämismahdollisuuksia havaittiin erityisesti prosessin hallinnassa, jota voisi parantaa välitarkistusvaiheiden lisäämisellä, auditointikelpoisen dokumentoinnin vahvistamisella ja tiedonsiirron taajemmalla suorittamisella tehokkuuden ja läpinäkyvyyden vahvistamiseksi.

6.5 Luotettavuuden analyysi

Työn luotettavuus perustui primääridatan käyttöön ja standardien noudattamiseen, mutta siihen vaikuttivat rajaukset ja arvioiden käyttö. Virhelähteitä saattoi syntyä allokointilogiikassa ja rajauksissa, joissa subjektiiviset päätökset voivat vaikuttaa tuloksiin. Riskejä hallittiin vertaamalla päästökertoimia useista lähteistä ja dokumentoimalla rajaukset.

Eettisyyttä varmistettiin työn edetessä noudattamalla hyvää tieteellistä käytäntöä lähteiden merkitsemisellä, salassapidettävän tiedon rajaamisella ja tekoälytyökalujen käytön dokumentoinnilla. Datan keruun automatisoinnilla silloin kun se on tarkoituksenmukaista, voisi vähentää inhimillisiä virheitä. Työskentelyn etiikan ja tarkkuuden toteutumista olisi voitu parantaa lisäämällä auditointikelpoisia tarkistusvaiheita, dokumentoimalla laskennassa tehdyt valinnat yksityiskohtaisemmin ja varmistamalla että kaikki laskentaperusteet ovat jäljitettävissä ja perusteltuja.

6.4 Johtopäätökset ja kehittämissuhteet

Tulosten mukaan tuotteen suurin päästölähde oli raaka-ainehankinnat, jotka muodostivat jopa 99 % päästöistä ja vain pieni osuus muodostui kuljetuksista ja muista syötteistä. Fossiilivapaan energian käyttö selittää suurelta osin tämänkaltaisen päästökäytön.

Tuloksia verrattiin toisiin vastaaviin töihin. Hakalan opinnäytetyössä (2023) laskenta perustuu GHG Protocol -standardiin ja laskenta on suoritettu tuotekohtaisesti muoviputkille ja -kaivoille. Tuloksista kävi ilmi, että suurimmat päästölähteet olivat raaka-ainehankinnat, jotka muodostivat noin 85 % päästöistä sekä logistiikka, joka muodosti noin 8 % tuotteiden päästöistä. Tulokset ovat verrattavissa tämän työn tuloksiin. Laskennan tuloksia voitaisiin tarkistaa hyödyntämällä kolmannen osapuolen virallista verifiointia. Tuotteiden hiilijalanjälkilaskenta voidaan toteuttaa pk-yrityksessä kustannustehokkaasti ja luotettavasti, kun opitaan hyödyntämään päästökantoja ja dokumentoidaan rajaukset huolellisesti ja valmistellaan pohjalle mahdollisimman vähän päivittämistä vaativa malli kerätä tarvittavat tiedot.

Työn tuloksena laskentaparametrit vietiin järjestelmään manuaalisesti erillisen tiedoston kautta. Automaattisesti rajapinnan kautta päivittyvää järjestelmää ei ole käytössä. Manuaalinen tiedonsiirto mahdollistaa kuitenkin laskennan toteuttamisen tuotekohtaisesti ja tukee toimitusraporttien laatimista. ERP-integraation automatisointi parantaisi tiedon saatavuutta ja vähentäisi manuaalista työtä. Tämä vaatisi päästökertointen hakemisen vahvistetusta päästötietokannasta ja lopulta mahdollistaisi reaaliaikaisen hiilijalanjäljen laskennan, joka voisi parantaa tiedon saatavuutta ja vähentää manuaalista työtä. Kustannukset ja tarpeenmukaisuus sekä järjestelmien ominaisuudet huomioiden pienemmissä yrityksissä tarvetta täysin automatisoidulle laskennalla ei luultavasti ole.

Työssä tehdyt rajaukset ja aineiston laatu vaikuttavat merkittävästi tulosten hyödynnettävyyteen. Kehdosta portille -malli, jota käytettiin, tuottaa vertailukelpoisia tuloksia toimitusketjussa raportointiin, mutta rajoittaa sovellettavuutta elinkaariarviointeihin, joissa tarkastellaan myös käyttö- ja loppukäsittelyvaiheita. Primääridatan käyttö parantaa luotettavuutta, mutta arvioiden ja keskiarvojen osuus heikentää tarkkuutta ja voi vääristää yksittäisten tuotteiden hiilijalanjälkeä. Käytetty GWP100-mittari tukee kansainvälistä raportointia, mutta se ei huomioi lyhyen aikavälin ilmastovaihtuksia.

Tulosten hyödynnettävyys toimeksiantajalle on hyvä, mutta vertailtavuus muihin vastaaviin prosesseihin, kuten alan muihin toimijoihin tai kilpailijoihin, edellyttäisi avoimuutta laskennan rajausperiaatteista ja valinnoista sekä raportointivaatimusten jatkuvaa seuranta. Jatkoonkaan ei suositella laskennan laajentamista kehdesta hautaan-malliin, sillä käyttö- ja loppukäsittelyvaiheen päästöt eivät tule olemaan toimeksiantajan toiminnallisessa vaikutuspiirissä eikä laskentatapaa

vaadita nykyisissä ohjeissa. Seuraavina vuosina pk-yritysten on seurattava sääntelymuutoksia ja päivitettävä vastuullisuusraportointiosaamistaan ja laskentamenetelmiä. Käytössä olevia malleja on hyvä tarkastella ja päivittää vastaamaan muutoksia kuten GHG:n ja ISO:n uuden standardiston myötä tulevia muutoksia seuraavien vuosien aikana sekä vapaaehtoisen raportoinnin uusimpia raportointiohjeita.

Lähteet

Aalto E. 2024. Teollisuudenalan yrityksen muovituotteen hiilijalanjälki. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu. Energia- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 31.8.2025.

Alma Insights 2025. Blogikirjoitus. Julkaistu 14.8.2025. Viitattu 8.11.2025. almainights.fi/blogi/eun-omnibus-ehdotus-yksinkertaistaa-vastuullisuusraportointia.

Business Finland. 2024. Älykäs valmistus. Tiekartta 2035. Viitattu 12.9.2025. businessfinland.fi/globalassets/finnish-customers/news/news/2024/alykas_valmistus_2035_tiekartta_final.pdf.

Completing the picture: How the circular economy tackles climate change. 2021. Julkaistu 26.5.2021. Viitattu 17.1.2026. ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture.

Corporate sustainability reporting. Euroopan komissio. N.d. Viitattu 19.4.2025. finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en.

Er. Amrit K. Cutting Fluid: Definition, Purpose, Properties, Methods, Types, Advantages, Applications, and Selection. 2021. Julkaistu 1.4.2021. Viitattu 17.1.2026. themechanicalengineering.com/cutting-fluid.

GHG Calculator (GHG – Green House Gas). CO2 footprint estimation for machining. 2024. Danish Advanced Manufacturing Research Center DAMRC. Viitattu 8.11.2025. damrc.dk/wp-content/uploads/2024/04/231005_GHG-Technical-Report.pdf.

Global Warming Potential Values.2016. The Greenhouse Gas Protocol. ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf.

Direktiivi 2022/2464. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi asetuksen (EU) N:o 537/2014, direktiivin 2004/109/EY, direktiivin 2006/43/EY ja direktiivin 2013/34/EU muuttamisesta yritysten kestävyysraportoinnin osalta. Annettu 14.12.2022. Viitattu 19.4.2025. eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022L2464.

EFRAG Welcomes European Commission's Recommendation on VSME. Uutinen EFRAGin verkkosivulla. Julkaistu 30.07.2025. Viitattu 23.9.2025. www.efrag.org/en/news-and-calendar/news/press-release-efrag-welcomes-european-commissions-recommendation-on-vsme.

Energiavirasto. N.d. Energiakatselmustoiminta. energiavirasto.fi/energiakatselmukset.

The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard. N.d. Päivitetty versio. 2015. World Resources Institute. Sähköinen julkaisu. Viitattu 19.4.2025. ghgprotocol.org/corporate-standard.

Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. 2022. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. Sähköinen julkaisu Valtioneuvoston verkkosivuilla. Viitattu 19.4.2025. julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164321.

Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa. 2023. Tutkimuseettinen neuvottelukunta. 1. painos. Tutkimuseettisen neuvottelukunnan julkaisu 2/2023.

How long does CNC Machining Take. 2025. Julkaisu anebon.com -sivustolla. Julkaistu 25.3.2025. Viitattu 30.11.2025. anebon.com/fi/news/how-long-does-cnc-machining-take.

How much carbon does steel emit? 2025. Artikkel. Viitattu 30.11.2025. ecologiclife.com/how-much-carbon-does-steel-emit.html.

How Much Electricity Does A CNC Machine Use? Artikkel. Viitattu 30.11.2025. unitymanufacture.com/how-much-electricity-does-a-cnc-machine-use.

Hyötyläinen, R. 2007. Tutkimusavusteisen kehittämisen metodologian kaksoisluonne. Teoksessa Ramstad, Elise Alasoini Timo (toim.) 2007. Työelämän tutkimusavusteinen kehittäminen Suomessa. Lähestymistapoja, menetelmiä, kokemuksia, tulevaisuuden haasteita. Työelämän kehittämisohjelman julkaisu. Viitattu 7.4.2025. docplayer.fi/108175-Tyoelaman-tutkimusavusteinen-kehittaminen-suomessa-lahestymistapoja-menetelmia-kokemuksia-tulevaisuuden-haasteita.html.

Härkönen A. 2022. Pussisuodattimien hiilijalanjälki. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT. Ympäristötekniikan kandidaatintyö. Viitattu 31.8.2025. lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/165138/Kandidaatinty%C3%B6_H%C3%A4rk%C3%B6nen_Atso.pdf?sequence=1.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2024. Global Warming Potential Values. Viitattu 10.11.2025. ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf.

ISO and GHG Protocol announce strategic partnership to deliver unified global standards for greenhouse gas emissions accounting. Uutinen ISO.org -verkkosivustolla. Julkaistu 9.9.2025. Viitattu 19.9.2025. www.iso.org/news/2025/09/iso-and-ghgp-partnership.

Korhonen H. 2018. Opinnäytetyö. Aurinkoenergian hiilidioksidipäästöt. Energiatekniikan koulutusohjelma. Oulun ammattikorkeakoulu. Viitattu 31.8.2025. theseus.fi/bitstream/handle/10024/143009/Korhonen_Himmi.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Kumar, R., Singh, D., Singh, S. & Singh, R. 2025. Energy consumption optimization strategies for sustainable machining: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 184, 113497. Viitattu 15.11.2025. doi.org/10.1016/j.rser.2024.113497.

Ka-Mu Oy:n verkkosivu. Viitattu 17.4.2025. ka-mu.fi/.

Mikä on Renewable Energy Directive III, ja miten se heijastuu eri aloihin? Pinja.com. Julkaistu 29.04.2024. Viitattu 12.10.2025. blog.pinja.com/fi/mika-on-renewable-energy-directive-iii-ja-miten-se-heijastuu-eri-aloihin.

Our World In Data. N.d. Viitattu 31.8.2025. ourworldindata.org/emissions-by-sector.

Posti 2025. Sähköpostiviesti 6.6.2025. Vastaanottaja Soininen S. Postin raportti kuljetusten päästöistä.

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin uudistus. N.d. Ympäristöministeriö. Viitattu 12.10.2025. ym.fi/rakennusten-energiatehokkuusdirektiivin-uudistus.

Ruostumattoman teräksen kierrätys. N.d. Viitattu 12.12.2025. damstahl.com/fi/about/csr-ja-kestavae-kehitys/ruostumattoman-teraeksen-kierraetys.

SFS-EN ISO 14067:2018. Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista koskevat vaatimukset ja ohjeet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 5.10.2018. Viitattu 10.10.2025. janet.finna.fi, SFS Online.

Salonen K., Eloranta S., Hautala T. & Kinos S. 2017. Kehittämistoiminta ja kehittämisen menetelmiä ammatillisessa korkeakoulutuksessa. Turun ammattikorkeakoulun julkaisu.

Segal M. 2026. Most investors concerned simplified EU sustainability reporting standards will reduce information quality: EFRAG study. Julkaistu 13.1.2026. Viitattu 18.1.2026. esgto-day.com/most-investors-concerned-simplified-eu-sustainability-reporting-standards-will-reduce-information-quality-efrag-study.

Simplification: Council gives final green light on the ‘Stop-the-clock’ mechanism to boost EU competitiveness and provide legal certainty to businesses. Euroopan neuvoston lehdistötiedote. Julkaistu 14.4.2025. Viitattu 23.9.2025. consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/04/14/simplification-council-gives-final-green-light-on-the-stop-the-clock-mechanism-to-boost-eu-competitiveness-and-provide-legal-certainty-to-businesses.

Suomen kansallinen ilmastopoliittika. 2022. Julkaisu Ympäristöministeriön verkkosivuilla. Viitattu 23.9.2025. ym.fi/suomen-kansallinen-ilmastopoliittika.

Sähkön kokonaiskäyttö teollisuusaloittain 2023 ja 2024. Tilastokeskuksen tilasto. Julkaistu 27.11.2025. Viitattu 17.1.2026. stat.fi/tilasto/tene.

Teollinen aurinkoenergia. N.d. Viitattu 17.1.2026. sary.fi/aurinkoenergia/teollinen-aurinkoenergia.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2021. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu. Yritykset. 2021:44. Uudistuvan teollisuuden strategia. Viitattu 20.11.2025. julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163275/TEM_2021_44.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Vastuullisuusraportointi muuttuu pakolliseksi – mitä uudesta CSRD-säädöksestä tulisi tietää? Artikkel Greenstep Oy:n verkkosivulla. Viitattu 19.4.2025. greenstep.fi/artikkelit/vastuullisuusraportointi-muuttuu-pakolliseksi--mita-uudesta-csrd-saadoksesta-tulisi-tietaa.

Vihreä siirtymä – elpymis- ja palautumissuunnitelma. N.d. Valtiovarainministeriö. Viitattu 3.11.2025. vm.fi/vihrea-siirtyma.

Vuori S. 2025. Blogi Metallinjalostajat ry:n sivulla. Julkaistu 20.3.2025. Viitattu 17.1.2026. teknologiateollisuus.fi/metallinjalostajat/komission-teras-ja-metalli-toimintasuunnitelma-tunnistaa-oi-keat-asiat-toimeenpanon-onnistuminen-ensiarvoisen-tarkeaa/

What is well-to-tank, tank-to-wheel and well-to-wheel? N.d. Artikkele Shypple.com. Viitattu 15.11.2025. help.shypple.com/en/articles/5756553-what-is-well-to-tank-tank-to-wheel-and-well-to-wheel.