

Aada Rauhala

HIILIKÄDENJÄLJEN LASKENTAMENETELMÄN SOVELTAMINEN

Pilottilaskenta Teknologiateollisuudessa

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Hannele Auvinen
Tarkastaja: Henrik Tolvanen
4/2025

TIIVISTELMÄ

Aada Rauhala: Hiilikädenjäljen laskentamenetelmän soveltaminen – Pilottilaskenta
Teknologiategollisuudessa
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2025

Ilmastotavoitteiden saavuttaminen edellyttää yrityksiltä sekä omien päästöjen vähentämistä, että enenevässä määrin positiivisten ilmastovaikutusten osoittamista asiakkaille. Hiilikädenjäljen malli tarjoaa työväliseen positiivisten ilmastovaikutusten kvantifointiin, sillä sen avulla voidaan osoittaa tuotteiden ja palveluiden mahdollistamia päästövähennyspotentiaaleja suhteessa muihin markkinoilla oleviin toimijoihin. Tämän työn tavoitteena oli arvioida hiilikädenjäljen laskentamallin sovellettavuutta teknologiategollisuudessa kahden toisistaan poikkeavan toimialan, metallin jalostuksen sekä suunnittelun ja konsultoinnin osalta.

Hiilikädenjäljen määrittämiselle ei ole tällä hetkellä olemassa standardoitua ja vakiintunutta yhdenmukaista menetelmää. Saatavilla on useita erilaisia metodologioita, joiden välillä on sekä yhtäläisyyksiä että eroja. Lisäksi merkittävänä haasteena hiilikädenjäljen määrittämisessä on vertailutaso valinta, johon ei ole olemassa yhdenmukaisuutta. Tässä työssä lähempään tarkasteluun on valittu kaksi mallia, joiden välillä on synergiaa. Tarkasteltaviksi metodologioiksi valikoituivat VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimalli sekä WBCSD:n vältettyjen päästöjen malli, joista VTT:n ja LUT:n tuotekohtainen hiilikädenjälkimalli valikoitui työssä sovellettavaksi malliksi. Malli pohjautuu ISO-standardeihin ja tarjoaa helpomman laajennettavuuden esimerkiksi LCA-arviointiin.

VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallia sovellettiin metallin jalostuksen sekä suunnittelun ja konsultoinnin toimialojen tapauksissa, joista molemmista tarkasteluun valittiin niitä edustavien yritysten kautta kaksi erilaista tutkimuskohdetta. Ensimmäinen valittu tutkimuskohde käsitteli ohjauspotkurit sisältäviin laivoihin asennettavia Elogrid –virtausohjaimia, joiden avulla voidaan optimoida laivojen potkuriteknologiaa ja energiatehokkuutta. Toinen tutkimuskohde käsitteli erikoislujaa Strenx-terästä ja sen mahdollistamia päästövähennyksiä suhteessa kuljetettuun tavaratoniin tukkirekan tapauksessa.

Työssä saadut tulokset osoittavat, että hiilikädenjäljen malli tarjoaa käyttökelpoisen ja sovellettavan työkalun positiivisten ympäristöasioiden kvantifointiin. Erityinen potentiaali kädenjälkimallilla on viennin edistämisen työkaluna, sillä sen avulla voidaan osoittaa liiketoiminnan avulla saavutettavia ympäristöhyötyjä asiakkaille ja vahvistaa kilpailukykyä suhteessa markkinoilla oleviin toimijoihin. Kädenjälkilaskennan tulokset vaihtelivat herkkyystarkastelun pohjalta tehtyjen rajausten osalta voimakkaasti. Elogrid -virtausohjaimille hiilikädenjälkien arvoiksi yhden tarkasteluvouden aikana saatiin 268,7–463,8 t CO_{2e} ja hiilidioksidiekvivalenttien takaisinmaksuajaksi 5–15 vuorokautta. Strenx-teräksestä valmistetuille tukkirekan lastipankon pystypalkeille hiilikädenjäljen arvoiksi saatiin 0,653 t CO_{2e} ja 1,355 t CO_{2e} sekä käytön aikaisiksi päästövähennyksiksi 0,871 g CO_{2e}/tkm. Hiilidioksidiekvivalenttien takaisinmaksuajaksi saatiin 5–10 kuukautta.

Hiilikädenjäljen kvantifoinnin ja siitä viestinnän tulisi perustua vapaaehtoisuuteen, ollen samalla riittävän systemaattista uskottavuuden näkökulmasta. Hiilikädenjäljen laskenta on hyvin taupauskohtaista ja riippuvaista laskennassa tehtävistä rajauksista. Työläyttä metodologian soveltamisessa aiheuttaa tarvittavan datan kerääminen, jonka helpottaminen lisäisi myös metodologian sovellettavuutta. Kädenjälkimalli tarjoaa kuitenkin potentiaalia yritysten vastuullisuusviestinnän, tuotekehityksen sekä investointipäätösten tueksi sekä erityisesti työkalun viennin edistämiseen.

Avainsanat: kädenjälki, jalanjälki, hiilikädenjälki, hiilijalanjälki, vältetyt päästöt, linkaariarviointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Aada Rauhala: Application of the carbon handprint calculation method – Pilot calculation in the Technology Industries of Finland
Master's Theses
Tampere University
Environmental and Energy Engineering
April 2025

Achieving climate goals requires companies to both reduce their own emissions and increasingly demonstrate positive climate impacts to customers. The carbon handprint model provides a tool for quantifying positive climate impacts, as can be used to demonstrate the emission reduction potential enabled by products and services in relation to other operators on the market. The aim of this work was to assess the applicability of the carbon handprint calculation model in the technology industry for two different industries, metal industry and consulting engineering.

There is currently no standardized and well-established uniform method for determining the carbon handprint. There are several different methodologies available, with both similarities and differences. In addition, a major challenge in determining the carbon handprint is the choice of the reference level, for which there is no uniformity. In this work, two models have been selected for closer inspection, with synergies between them. The methods to be considered were the VTT and LUT carbon handprint model and the WBCSD avoided emissions model, of which the product-specific carbon handprint model of VTT and LUT was selected as the applicable model in the work. The model is based on ISO standards and provides easier extensibility, for example, for LCA assessment.

The carbon handprint model of VTT and LUT was applied in the cases of the metal industry and consulting engineering, both of which selected two different research subjects for the review through their respective companies. The first research object selected was the Elogrid flow controllers to be installed on ships with thrusters, which can be used to optimize the propeller technology and energy efficiency of ships. Another area of study dealt with high-strength Strenx steel and the emission reductions it allowed in relation to the ton of goods transported in the case of a log truck.

The results of the work show that the carbon handprint model provides a useful and applicable tool for quantifying positive environmental issues. The potential of the handprint model is a tool for promoting exports, as it can be used to demonstrate the environmental benefits achieved by companies to customers and to strengthen competitiveness vis-à-vis market operators. The results of the handprint calculation varied strongly regarding the demarcations made based on the sensitivity analysis. For Elogrid flow controllers, the values of carbon handprints during one year of inspection were 268.7–463.8 t CO_{2e} and the payback period of carbon dioxide equivalents was 5–15 days. The carbon handprint values were 0.653 t CO_{2e} and 1.355 t CO_{2e} for Strenx steel cargo bank vertical beams and 0.871 g CO_{2e}/tkm for emissions during use. The payback period for carbon dioxide equivalent was 5–10 months.

Carbon handprint quantification and communication from it should be voluntary, while being sufficiently systematic from the point of view of credibility. The calculation of the carbon handprint is extremely case-specific and dependent on the demarcations made in the calculation. The difficulty in applying the methodology is caused by the collection of the necessary data, the facilitation of which would also increase the applicability of the methodology. However, the handprint model offers potential to support corporate responsibility communications, product development and investment decisions, and especially to promote the export of the tool.

Keywords: handprint, footprint, carbon handprint, carbon footprint, avoided emissions, life cycle assessment

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

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: ChatGPT, Connected Papers ja Consensus.

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGPT4.0, Connected Papers ja Consensus.

Käyttötarkoitus: Tekoälyä on käytetty vertaisarvioitujen lähteiden hakuun kädenjälkeä ja vältettyjä päästöjä käsittelevien artikkelien osalta sekä tekstin siistimiseen.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Tekoälyä on käytetty aineiston haussa, mutta kaikki työssä käytetyt lähteet ja esitetyt tiedot on käyty manuaalisesti läpi. Lisäksi tekoälyä on käytetty luvuissa kaksi ja kolme osana työn siistimistä ja tiivistämistä.

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

ALKUSANAT

Mitä jos hiilikädenjälki ei olisikaan vain tapa mitata saavutettuja ilmastohyötyjä, vaan konkreettinen työkalu, jolla suomalainen teknologia voi erottua maailmalla? Tästä ajatuksesta diplomityön aihe oikeastaan lähti muotoutumaan.

Työsuhteeni Teknologiateollisuus ry:n Kestävä kehitys -yksikön projektityöntekijänä alkoi toukokuussa 2024. Kulunut vuosi on ollut paitsi opettavainen, myös äärimmäisen antoisa sekä ammatillisesti että sosiaalisesti. Haluan kiittää Vähähiilisyys -tiimiämme koko kulu-neesta vuodesta, tässä porukassa on ollut mielekästä ja turvallista työskennellä. Erityisen kiitoksen haluan välittää tiimimme johtajalle, diplomityöni ohjaajalle Annukka Saarelle, joka on koko työn läpi kannustanut, innostanut ja rohkaissut. Kiitän myös yliopiston puolelta ohjaajiani Hannele Auvista ja Henrik Tolvasta asiantuntevasta ohjauksesta ja heittäytymisestä uuden aiheen äärellä.

Työssä on Teknologiateollisuus ry:n lisäksi ollut mukana useita tahoja. Haluan kiittää Elomatic Oy:n Teemu Turusta, Jari Yli-Tolppaa ja Axel Ala-Heikkilää sekä SSAB:n Harri Leppästä saumattomasta yhteistyöstä ja mielenkiinnosta koko diplomityön ajan. Erityinen kiitos myös Sari Siitoselle, joka on ollut valmis tukemaan, kommentoimaan ja keskustelemaan kaikista työhön liittyvistä seikoista. Kiitos myös työn ohjausryhmälle työtä kehittäivistä kommentteista ja TT-säätiölle työn rahoituksesta.

Koen syvää kiitollisuutta sekä perhettäni ja kaikkia ystäviäni kohtaan, jotka ovat läpi opintojen ja diplomityön kannustaneet ja ymmärtäneet kaikissa eri vaiheissa. Ja kiitos Severi, erityisesti ehtymättömästä kärsivällisyydestäsi sekä loputtomasta tukemisestä projektin eri vaiheissa – se on kantanut, kannatellut ja mahdollistanut.

Helsingissä, 8.4.2025

Aada Rauhala

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VÄHÄHIILISYYS TEKNOLOGIATEOLLISUUDESSA.....	3
2.1 Suomen ilmastopolitiikan tavoitteet ja toimintaympäristö	3
2.2 Teknologiateollisuuden vähähiilisyystiekartta.....	6
2.2.1 Suunnittelu ja konsultointi	8
2.2.2 Metallin jalostus	9
3. ELINKAARIARVIOINTI JA HIILIJALANJÄLKILASKENTA HIILIKÄDENJÄLJEN PERUSTANA.....	10
3.1 Elinkaariarviointi	10
3.2 Hiilijalanjälki.....	11
3.2.1 Hiilijalanjäljen määrittäminen tuotteille ja palveluille	12
3.2.2 Hiilijalanjäljen määrittäminen organisaatiolle	14
4. HIILIKÄDENJÄLJEN LASKENTA.....	15
4.1 Hiilikädenjälki.....	15
4.2 Hiilikädenjäljen laskentametodologiat	16
4.2.1 VTT & LUT-hiilikädenjälkimalli.....	18
4.2.2 Guidance on Avoided Emissions.....	22
4.2.3 Metodologioiden välinen vertailu ja synteesi	25
5. AINEISTO JA MENETELMÄT	27
5.1 Tutkimuksen rakenne	27
5.2 Laskentamenetelmän valinta	28
5.3 Tutkimuskohde 1: Suunnittelu ja konsultointi	28
5.3.1 Hiilikädenjälki – Elinkaariarviota koskevat vaatimukset	32
5.3.2 Hiilikädenjälki - Kvantifiointi.....	33
5.4 Tutkimuskohde 2: Metallin jalostus	39
5.4.1 Hiilikädenjälki – Elinkaariarviota koskevat vaatimukset	42
5.4.2 Hiilikädenjälki – Kvantifiointi	43
6. TULOKSET JA TULOSTEN TULKINTA	47
6.1 Hiilikädenjälki suunnittelun ja konsultoinnin kontekstissa	47
6.2 Hiilikädenjälki metallin jalostuksen kontekstissa.....	54
6.3 Hiilikädenjäljen määrittämisen luotettavuus ja sovellettavuus	59
7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	64

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Scope 1–2 päästövähennyspolut teknologiateollisuudessa. Muokattu lähteestä [18].</i>	5
<i>Kuva 2. Teknologiateollisuudelle olennaiset päästölähteet vuonna 2022 GHG-protokollan luokkien mukaisesti jaoteltuina. Muokattu lähteestä [18].</i>	6
<i>Kuva 3. Teknologiateollisuuden toimialakohtaiset päästöt vuonna 2022. Muokattu lähteestä [18].</i>	7
<i>Kuva 4. Metallin jalostuksen ja suunnittelun ja konsultoinnin toimialakohtaiset kasvihuonekaasupäästöt. Muokattu lähteestä [18].</i>	7
<i>Kuva 5. Elinkaariarvioinnin neljä vaihetta. Muokattu lähteestä [44].</i>	11
<i>Kuva 6. Hiilikädenjäljen ja hiilijalanjäljen erot. Muokattu lähteestä [14].</i>	18
<i>Kuva 7. Hiilikädenjäljen kasvattaminen. Mustalla palkilla kuvataan vertailutason tuotteen hiilijalanjälkeä ja harmaalla palkilla vertailutason tuotteen käytönaikaista hiilijalanjälkeä. Muokattu lähteestä [13], [14].</i>	19
<i>Kuva 8. Hiilikädenjäljen määrittämisen vaiheet. Muokattu lähteestä [14].</i>	20
<i>Kuva 9. Vertailutason määrittäminen. Muokattu lähteestä [14].</i>	21
<i>Kuva 10. Päästöjen vähentämisen ja vältettyjen päästöjen välinen ero.</i>	23
<i>Kuva 11. Kelpoisuuskriteerit vältettyjen päästöjen hyväksyttävyyden vahvistamiseksi. Muokattu lähteestä [10].</i>	23
<i>Kuva 12. Vältettyjen päästöjen määrittämisen vaiheet. Muokattu lähteestä [10].</i>	24
<i>Kuva 13. Vertailutason määrittäminen. Muokattu lähteestä [10].</i>	25
<i>Kuva 14. Diplomityön tiedonhankintaprosessi. TK viittaa tutkimuskysymyksiin.</i>	27
<i>Kuva 15. Hiilikädenjäljen määrittämisen vaiheet VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin mukaisesti.</i>	29
<i>Kuva 16. Elogrid -virtausohjaimet asennettuna M/S Viking Cinderellaan, lähikuva [66].</i>	30
<i>Kuva 17. Elogrid -virtausohjaimet asennettuna M/S Viking Cinderellaan [66].</i>	30
<i>Kuva 18. Elogrid -virtausohjainten elinkaaren aikaset keskeisimmät päästöt.</i>	31
<i>Kuva 19. Vertailutason valinta Elogrid- virtausohjainten tapauksessa.</i>	31
<i>Kuva 20. Järjestelmäraajat tarjotun ratkaisun tilanteessa (S2).</i>	32
<i>Kuva 21. Hiilikädenjäljen määrittämisen vaiheet VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin mukaisesti Strenx-teräksen tapauksessa.</i>	40
<i>Kuva 22. Strenx-teräksestä valmistetut tukkirekan lastipankon pystypalkit. [92].</i>	40
<i>Kuva 23. Strenx- ja standarditeräksen elinkaarien keskeisimmät vaiheet.</i>	41
<i>Kuva 24. Vertailutason valinta Strenx-teräksen tapauksessa.</i>	41
<i>Kuva 25. Järjestelmäraajat sekä vertailutason tilanteessa, että tarjotun ratkaisun kanssa.</i>	43
<i>Kuva 26. M/S Viking Cinderellan polttoainekulutuksesta aiheutuvat päästöt sekä vertailutilanteessa että tarjotun ratkaisun kanssa, aika 1 vuosi.</i>	49
<i>Kuva 27. Neljän Elogrid -virtausohjaimen hiilikädenjälki ja -jalanjälki yhden vuoden aikana.</i>	49
<i>Kuva 28. Elogrid -virtausohjainten takaisinmaksuaika GHG-päästöjen näkökulmasta.</i>	50
<i>Kuva 29. Elogrid -virtausohjainten takaisinmaksuaika taloudellisesta näkökulmasta, MGO:n hinta 700 €/t.</i>	52
<i>Kuva 30. Elogrid -virtausohjainten takaisinmaksuaika taloudellisesta näkökulmasta, MGO:n hinta 800 €/t.</i>	52
<i>Kuva 31. Elogrid -virtausohjainten takaisinmaksuaika taloudellisesta näkökulmasta, MGO:n hinta 1200 €/t.</i>	52

<i>Kuva 32. Tukkirekan käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt yhden tarkasteluvuoden aikana sekä Strenx-teräksen hiilikädenjälki (S1-skenaario).....</i>	<i>56</i>
<i>Kuva 33. Tukkirekan käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt yhden tarkasteluvuoden aikana sekä Strenx-teräksen hiilikädenjälki (S2-skenaario).....</i>	<i>56</i>
<i>Kuva 34. Strenx-teräksen hiilijalanjälki ja -kädenjälki.....</i>	<i>57</i>
<i>Kuva 35. Strenx-teräksestä valmistettujen tukkirekan lastipankon pystypalkkien takaisinmaksuaika taloudellisesta näkökulmasta, hintaero 9000–12000 €.....</i>	<i>58</i>
<i>Kuva 36. Strenx-teräksestä valmistettujen tukkirekan lastipankon pystypalkkien takaisinmaksuaika taloudellisesta näkökulmasta, hintaero 21000–28000 €.....</i>	<i>58</i>
<i>Kuva 37. Hiilikädenjäljen potentiaali elinkaaren aikana.....</i>	<i>61</i>
<i>Kuva 38. Työssä tarkasteltujen tuotteiden kädenjälkipotentiaali elinkaaren ajalta tarkasteltuna.....</i>	<i>62</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AEF	The Avoided Emissions Framework
baseline	vertailutaso
BAU	business as usual
BF	Blast Furnace
BOF	Basic Oxygen Furnace
CCUS	Carbon capture, utilization and storage
CFD	Computational Fluid Dynamics
COP	Conference of the Parties
CO_2e	hiilidioksidiekvivalentti
EAF	Electric Arc Furnace
EK	Elinkeinoelämän keskusliitto
GHG	greenhouse gas
GWP	global warming potential
IMO	International Maritime Organization
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
LCA	life cycle assessment
LCI	life cycle inventory analysis (inventaarioanalyysi)
LCIA	life cycle impact assessment (vaikutusarviointi)
LUT	Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
Mt	miljoona tonnia
ppm	parts per million
SBTi	The Science Based Targets Initiative
SHINE	Sustainability and Health Initiative for NetPositive Enterprise
UNFCCC	The United Nations Framework Convention on Climate Change
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WRI	World Resources Institute

1. JOHDANTO

Maapallon pintalämpötila on ollut noin 1,1 °C astetta korkeampi vuosien 2011–2020 aikana suhteessa vuosiin 1850–1900 [1], [2]. Keskeisin syy tähän lämpötilan nousuun ovat ihmisen toiminnasta aiheutuneet, Kioton protokollassa määritellyt kasvihuonekaasut, joista merkittävimpiä ovat hiilidioksidi (CO₂) ja metaani (CH₄) [1], [3], [4]. Ilmaston lämpenemisen rajaaminen alle 1,5 °C:een vuosisadan loppuun mennessä edellyttää merkittävää hiilinegatiivisuutta eli päästöjen vähentämisen lisäksi hiilen laajamittaista poistamista ilmakehästä [5]. Suomi on sitoutunut tähän Pariisin ilmastosopimuksen mukaiseen tavoitteeseen pyrkimyksenään vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 60 % vuoteen 2030 mennessä ja saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä ilmasolain mukaisesti [6], [7]. Myös Teknologiateollisuus ry on sitoutunut Suomen ilmastolain mukaisiin päästövähennystavoitteisiin [8]. Hiilineutraaliustavoitteiden rinnalla globaalisti energian kokonaiskulutuksen ennustetaan kuitenkin nousevan vuoteen 2035 mennessä nykyisestä 445 EJ:sta yli 500 EJ:n, josta merkittävä rooli on teollisuuden alan kasvulla. [9]

Liiketoiminta tulee olemaan merkittävässä roolissa, jotta yhteiskunnan hiilineutraaliustavoitteet onnistutaan toteuttamaan tehokkaasti. Globaalin keskilämpötilan nousun pysäyttämiseksi yritysten, poliitikkojen ja taloushallinnon toimijoiden on saatava käyttöön sellaisia työkaluja, joiden avulla tätä tavoitetta voidaan edistää. [10] Historiallisesti tarkasteltuna huomataan, että yritykset ja organisaatiot ovat keskittyneet tarkastelemaan ainoastaan suoria CO₂-päästöjään eli GHG protokollan mukaisia scope 1-päästöjä. [10], [11] Nykyisin kestävä kehitys ja vähähiiliset innovaatiot ovat tärkeässä roolissa kilpailukyvyyn saavuttamisessa, ja joiden avulla rakennetaan vähähiilistä taloutta [12].

Yksi potentiaalinen tarkastelukulma päästövähennyksiin ja niiden kuvaamiseen on hiilikädenjälki, jolla tarkoitetaan tuotteen tai palvelun ilmastohyötyä eli päästövähennyspotentiaalia tuotteen käyttäjälle [13], [14]. Kädenjälkeen ei lasketa mukaan ratkaisun tarjoavan toimijan omia päästövähennyksiä vaan ainoastaan muiden toimijoiden ratkaisun avulla saavuttamat päästövähennykset [14], [15], [16] ja sitä voidaan käyttää työkaluna arvioitaessa yrityksen liiketoiminnan myönteistä ilmastovaikutusta [17].

Pääministeri Orpon hallitusohjelmassa ”Vahva ja välittävä Suomi” puhutaan ilmastokädenjäljestä ja nostetaan esille Suomen rooli sekä puhtaan energian että ilmastokäden-

jäljen edelläkävijänä [5]. Hallitusohjelmassa todetaan, että hallitus alkaa luoda kädenjäljen laskentamallia yhdessä elinkeinoelämän kanssa sekä kartoittamaan sen potentiaalia. Lisäksi Orpon hallitusohjelman tavoitteena on asettaa viennin ilmastokädenjäljen kasvulle numeeriset tavoitteet hiilijalanjäljen tavoin sekä saada kädenjälkimalli EU-lainsäädäntöön jalanjälkimenetelmän rinnalle. Kädenjälki esitellään myös Suomen kansallisessa ilmasto- ja energiastrategiassa ”Hiilineutraali Suomi 2035”, jossa suomalaisten yritysten hiilikädenjäljen vahvistaminen nostetaan esille ja korostetaan suomalaisten yritysten vähähiiliratkaisujen kädenjälkivaikutusta globaalilla tasolla [15].

Teknologiaeteollisuus ry:n vuoden 2024 vähähiilisyystiekartassa tunnistettiin suomalaisen teknologiaeteollisuuden erityisominaisuudeksi suuri hiilikädenjälkipotentiaali suhteessa toimialan hiilijalanjälkeen. Kädenjälkipotentiaalin suuruuden arviotiin olevan noin 75 MtCO_{2e} ja sitä voidaan kasvattaa uusilla teknologisilla ratkaisuilla [15], [18]. Vastaavasti teknologiaeteollisuuden koko arvoketjun hiilijalanjäljen arvioitiin olevan noin 29 MtCO_{2e}. Teknologiaeteollisuuden vienti toimialana vastaa noin 50 % koko Suomen tavara- ja palveluviennistä, jonka takia tähän liittyy merkittävä liiketoiminnallinen näkökulma [18].

Työn tavoitteena on selvittää Teknologiaeteollisuuden jäsenyritysten tarjoamien tuotteiden hiilikädenjälkipotentiaalin todellista suuruutta ja soveltaa hiilikädenjäljen laskentamenetelmää. Tarkasteltaviksi toimialoiksi on valikoitunut metallien jalostus sekä suunnittelu ja konsultointi, niiden toisistaan merkittävästi poikkeavien kasvihuonekaasupäästöjakaumien takia. Työ rajataan käsittelemään ainoastaan tuotekohtaista hiilikädenjälkeä, jossa tavoitteena on, että kädenjäljestä saataisiin tulevaisuudessa vakiintunut laskentamenetelmä yrityksissä.

Luvussa 2 käsitellään vähähiilisyttä teknologiaeteollisuudessa, luvussa 3 hiilikädenjäljen taustalla vaikuttavia tekijöitä, luvussa 4 saatavilla olevia hiilikädenjälkimetodologioita, luvussa 5 työhön valittuja esimerkkitapauksia, luvussa 6 saatuja tuloksia ja luvussa 7 yhteenvetoa työstä.

Tutkimuskysymykset:

1. Mitä laskentamalleja hiilikädenjäljen laskentaan on saatavilla ja mitä ominaispiirteitä laskentamalleissa on?
2. Millaiset tekijät ovat hiilikädenjäljen kannalta tärkeimmät ja miten nämä vaikuttavat lopputulokseen?
3. Miten hiilikädenjäljen laskentaan liittyvä vertailutaso (baseline) valitaan? Tutkimustehtävä: laskentamallin tai laskentaproseduurin soveltaminen.
4. Mitkä ovat tarkasteltujen tuotteiden hiilikädenjäljet?

2. VÄHÄHIILISYYS TEKNOLOGIATEOLLISUUDESSA

Luvussa käsitellään Suomen ilmastopolitiikan tämänhetkisiä tavoitteita, nykyistä toimintaympäristöä ja kunnianhimoisten päästövähennystavoitteiden vaatimia toimenpiteitä sekä teknologiateollisuuden vähähiilisyystavoitteita.

2.1 Suomen ilmastopolitiikan tavoitteet ja toimintaympäristö

Suomi on sitoutunut EU:n ilmastolakiin ja sen pohjalta laaditun kansallisen ilmastolain mukaisesti Suomi tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2035 mennessä [6], [7]. Suomen kansallisessa ilmasto- ja energiastrategiassa linjataan tähän tavoitteeseen konkreettisia toimia, joilla nämä EU:n ilmastolain mukaiset päästövähennystavoitteet tullaan saavuttamaan [15]. EU:n hiilineutraaliustavoitteen toteutuessa se tulisi saavuttamaan hiilineutraaliuden ensimmäisenä maanosana ennen vuotta 2050 [6], [7], [8], [9]. Tämä tavoite on linjassa IPCC:n (The Intergovernmental Panel on Climate Change) SR15 –skenaarioiden (Special Report on Global Warming 1,5 °C) kanssa, jotka kuvaavat toimia Pariisin ilmastosopimuksen 1,5 °C:een lämpötilatavoitteen saavuttamiseksi ja hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi vuoteen 2050 mennessä [19], [20]. Kuvassa 1 on havainnollistettu Teknologiateollisuuden vähähiilisyystiekartassa esitettyjä kolmea päästövähennyskenaariota scope 1–2-luokkien osalta vuoteen 2050 mennessä. Kuvan skenaariot keskilämpötilan nousun arvioista vuoteen 2100 mennessä pohjautuvat IPCC:n skenaarioihin. Scopeilla tarkoitetaan GHG-protokollan (The Greenhouse Gas Protocol, A Corporate Accounting and Reporting Standard) mukaisia luokkia, joihin kasvihuonekaasupäästöt on jaoteltu arvoketjun ajalta [3], [4]. Näitä sekä GHG-protokollan mukaista kasvihuonekaasupäästöjen inventaariota on avattu tarkemmin kuvassa 2 ja luvussa 3.

IPCC:n skenaarioiden mukaan lämpötilan nousun rajoittaminen 1,5 °C:een ja hiilidioksidipäästöjen nettonollatavoitteiden saavuttaminen vuoteen 2050 mennessä on paras vaihtoehto välttää katastrofiset seuraukset ilmastonmuutoksessa niin terveyden, yhteiskuntien kuin talouden osalta [1], [19]. Skenaariot vaativat hiilidioksidin vähentämisen lisäksi merkittäviä päästövähennyksiä muidenkin kasvihuonekaasujen osalta globaalin energiajärjestelmän, teollisuuden sekä kaupunki- ja maaseudun systeemisen sektoreilla. Globaalin vähähiilistymisen rinnalla Euroopan teollisuussektorin tulisi saavuttaa lähes täydellinen tai täydellinen hiilineutraalius vuoteen 2050 mennessä, jonka lisäksi tarvitaan LULUCF-sektorin kasvihuonekaasupoistumia ja CCUS-tekniikoita (carbon capture, utilization and storage) jäännöspäästöjen neutralisoimiseksi nettonegatiivisiksi [19], [21].

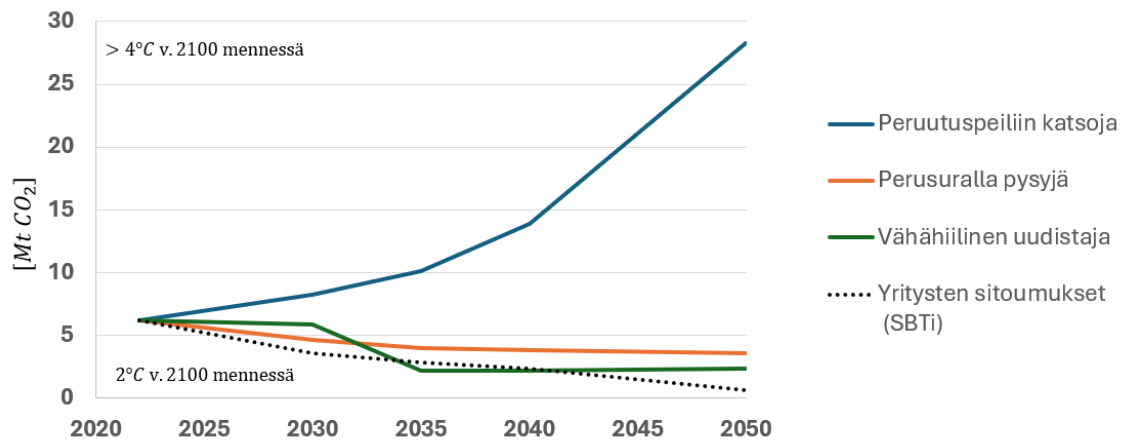
Yritykselle nettonollatavoitteiden saavuttaminen tarkoittaa tilannetta, jossa sen arvoketjusta ei aiheudu kasvihuonekaasujen nettokertymää ilmakehään [22], se on saavuttanut pitkän aikavälin tieteeseen perustuvat päästövähennystavoitteet (The Science Based Targets Initiative, SBTi) sekä neutralisoinut jäännöspäästöt [19]. Hiilineutraaliudella puolestaan tarkoitetaan tilannetta, jossa kasvihuonekaasupäästöt sekä niitä vastaavat hiilinielut ja päästöjen kompensointi ovat samalla tasolla [15], [23].

EU:n komission helmikuussa 2024 julkaisemassa ilmastotiedonannossa suositellaan kiristyviä kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteita suhteessa EU:n nykyiseen ilmastolakiin ilmastoneutraaliuden saavuttamiseksi: EU:n tulisi vähentää kasvihuonekaasujen nettopäästöjä 90 % vuoteen 2040 mennessä verrattuna vuoden 1990 tasoon [24]. Vuoden 2035 kasvihuonekaasujen nettomäärä määritellään vuoden 2040 tavoitteen asettamisen jälkeen [24]. Komission ehdottama kiristyvä tavoite pohjautuu kolmen vaihtoehdon vaikutustenarviointiin, joissa uusien teknologioiden rooli vaihtelee merkittävästi ja se muodostaa hyväksymisen jälkeen perustan EU:n uudelle Pariisin sopimuksen mukaiselle kansallisesti määritellylle panokselle (Nationally determined contribution, NDC) vuoteen 2050 mennessä [24]. Tavoite edellyttää nopeaa siirtymistä hiilettömiin ja vähähiilisiin teknologioihin vuoteen 2040 mennessä, jotta ilmastotoimia ei lykätä ja hiilineutraalius saavutetaan vuoteen 2050 mennessä. Toimien avulla voidaan myös pienentää inhimillisiä ja taloudellisia kustannuksia sekä ennallistamiseen ja sopeutumiseen tarvittavaa rahoitusta, joka ilmastonmuutoksesta aiheutuu. [24] Samanaikaisesti nykyisen komission alkavalla viisivuotiskaudella avautuu mahdollisuus uudistaa EU:n energia- ja ilmastopolitiikan keskeisiä työkaluja ja periaatteita vuosille 2031–2040 [25].

EU:n kunnianhimoiset tavoitteet ovat olleet myös vahvasti esillä Ursula von der Leyenin poliittisissa suuntaviivoissa seuraavalle Euroopan komission toimintakaudelle vuodelle 2029 saakka [7], [26]. Tavoitteiden saavuttaminen tulee Draghin raportin mukaisesti edellyttämään johdonmukaista suunnitelmaa hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi ja kilpailukyvyyn parantamiseksi [27]. EU:n ilmastotavoitteet voivat tarjota Euroopalle merkittäviä mahdollisuuksia energiariippumattomuuden, puhtaan energian globaalin johtajuuden, teollisuuden kilpailuedun ja energiakustannusten alentamisen näkökulmasta [9], [12], [27]. Myös globaali hiilineutraaliustavoite voi edetessään avata mahdollisuuksia EU:n teollisuuden kasvulle [12], [27], sillä EU:lla on myös globaalilla tasolla johtava asema kestäväen kehityksen, ympäristönormien ja kiertotalouden edistämisen alalla, jota tukevat globaalilla tasolla kunnianhimoisimmat tavoitteet hiilestä irtautumiselle [27].

Hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen liittyy kuitenkin riskejä kilpailukyvyyn ja talouskasvun kannalta, mikäli politiikka ei ole riittävän koordinoitua. Keskeisessä asemassa on yhtenäinen, hyvin suunniteltu regulaatio, joka integroi energia- ja ilmastopolitiikan sekä

tukee energiakustannusten hallintaa. [12], [28]. EU-maiden tasolla on havaittu, että tehokas ilmastopolitiikka voi edistää kilpailukykyä, kun tuetaan kestävästä kehitystä ja siihen liittyviä investointeja [12]. Pidemmällä aikavälillä eurooppalaisten energiainfrastruktuurien tiiviimpi integraatio voi ehkäistä kunnianhimoisten hiilineutraaliustavoitteiden heikentävän vaikutuksen eurooppalaisten tuotteiden ja palveluiden kilpailukykyyn [28]. Näiden lisäksi Euroopan vihreän siirtymän odotetaan luovan uusia työpaikkoja erityisesti uusiutuvan energian, energiatehokkuuden ja kiertotalouden aloilla [12], [27].



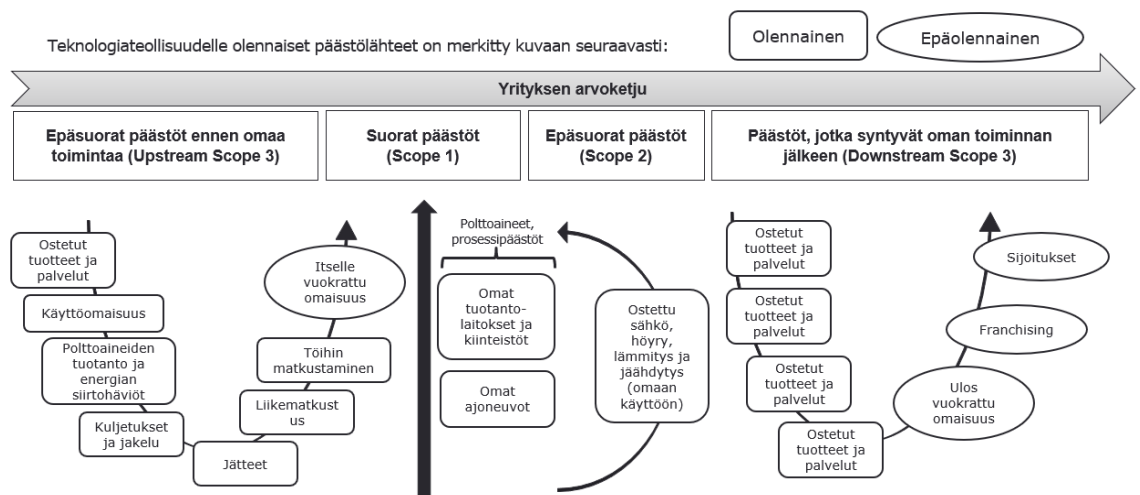
Kuva 1. Scope 1–2 päästövähennyspolut teknologiateollisuudessa. Muokattu lähteestä [18].

Kuvassa 1 mustalla katkoviivalla merkitty skenaario kuvastaa tilannetta, jossa Suomen teknologiateollisuuden kaikki yritykset olisivat sitoutuneet SBTi-tavoitteisiin. Nämä SBTi:n julkaisemat standardit pohjautuvat IPCC:n vuosien 2018 ja 2021 raportteihin ja ne antavat yrityksille työkalut hillitsemistavoitteiden mukaisiin hiilidioksidipäästövähennyksiin [18], [19]. ”Peruutuspeiliin katsoja” -skenaario kuvaa tilannetta, jossa on huomioitu ainoastaan teknologiateollisuuden toimialan ja energiankulutuksen kasvuennusteet, mutta ei politiikkatoimia tai oletuksia yhteiskunnan vähähiilistymisestä. Nämä tekevät siitä itsenäisenä skenaariona hyvin epärealistisen. Skenaariolla ”Perusuralla pysyjä” kuvataan tilannetta, jossa otetaan ”Peruutuspeiliin katsoja” -skenaariota olettamuksien lisäksi huomioon nykyisen regulaation mukainen yhteiskunnan vähähiilistymisen. Tässä skenaariossa ei kuitenkaan oteta huomioon mahdollisia tulevaisuuden muutoksia regulaatiossa ja toisaalta nykyisen regulaation mukaisten toimenpiteiden oletetaan jatkuvan vuoteen 2050 saakka. ”Vähähiilinen uudistaja” -skenaariossa oletuksena on EK:n (Elinkeinoelämän keskusliitto) dataikkunan mukaisten [29] vihreiden investointien toteutuminen, koko teknologiateollisuuden toimialan energiatehokkuusparannukset sekä Suomen energiateollisuuden kunnianhimoisin päästövähennysskenaario. [18] Tämän skenaarion toteutuessa saavutettaisiin 42 prosentin päästövähennykset vuoteen 2030 mennessä ja 90 prosentin päästövähennykset vuoteen 2050 mennessä scope 1 ja scope 2 –luokkien

osalta [18], mutta se ei riitä täyttämään EU:n komission suosittelemia kiristyneitä kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteita. Hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttamiseksi tarvitaan myös hiilensidontaan keskittyviä teknologioita, erityisesti CCUS-tekniikoita, joiden avulla mahdollistetaan päästövähennystavoitteet toimialoilla, joissa sähköistyminen on vaikeaa toteuttaa [24].

2.2 Teknologiateollisuuden vähähiilisyystiekartta

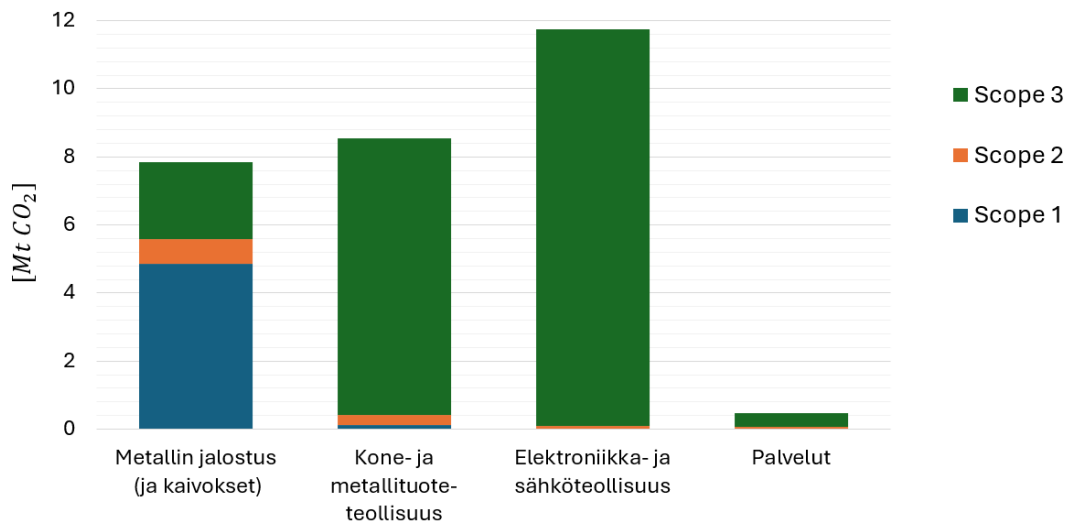
Teknologiateollisuuden ilmasto- ja energialinjaukset sisältävät kymmenen teemakokonaaisuutta, joiden avulla toimialalla saavutetaan nettonollapäästöt ennen vuotta 2050 [8]. Näistä yksi koskee Suomen kansallisessa ilmasto- ja energiastrategiassa esitettyä vähähiilisyystiekarttojen päivittämistä, joka kuvaa toimialan reittiä kohti vähähiilisyttä [15], [18]. Teknologiateollisuuden vähähiilisyystiekartta on päivitetty vuoden 2024 aikana vastaamaan EU:n uusia ilmastotoimenpiteitä ja tiekartan perusteella arvoketjun päästöjen vähentäminen vaatii yritysten välistä yhteistyötä [18]. Vähähiilisyystiekartan päivityksessä on laskettu toimialakohtaiset kasvihuonekaasupäästöt GHG-protokollan organisaatioiden päästölaskennan mukaisella laskentametodologialla ja näitä on havainnollistettu kuvassa 3. Kuvassa 2 on selvennetty teknologiateollisuudelle olennaisia päästölähteitä ja niiden sijoittumista GHG-protokollan mukaisiin luokkiin [18], [30].



Kuva 2. Teknologiateollisuudelle olennaiset päästölähteet vuonna 2022 GHG-protokollan luokkien mukaisesti jaoteltuina. Muokattu lähteestä [18].

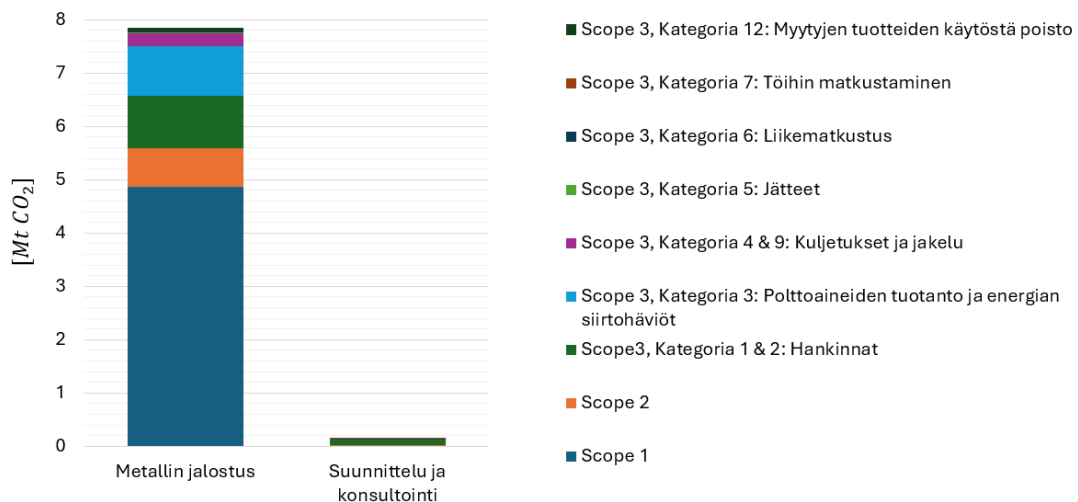
Teknologiateollisuus koostuu viidestä päätoimialasta, joita ovat elektroniikka- ja sähköteollisuus, kone- ja metallituote-teollisuus, metallien jalostus, suunnittelu ja konsultointi sekä tietotekniikka [31]. Toimialan kokonaispäästöt ovat tällä hetkellä 29 MtCO₂e, josta suurin osa koostuu arvoketjun aikaisista epäsuorista päästöistä eli GHG-protokollan mukaisesti scope 3 –luokan kasvihuonekaasupäästöistä [18]. Toimialan kokonaispäästöt ovat laskeneet aiemmin julkaistusta vuoden 2020 vähähiilitekarttataarkastelusta scope 1-

luokassa 7 % ja scope 2-luokassa 45 %. Vuoden 2020 vähähiilitiekarttatarkastelussa ei ole huomioitu scope 3-luokkaa, joten sille ei ole vertailuarvoa. [18], [32]



Kuva 3. Teknologiateollisuuden toimialakohtaiset päästöt vuonna 2022. Muokattu lähteestä [18].

Kuvassa 4 on havainnollistettu tarkemmin metallin jalostuksen ja suunnittelun ja konsultoinnin toimialakohtaisia toteutuneita kasvihuonekaasupäästöjä kategorioittain.



Kuva 4. Metallin jalostuksen ja suunnittelun ja konsultoinnin toimialakohtaiset kasvihuonekaasupäästöt. Muokattu lähteestä [18].

Vähähiilisyystiekartan päivityksessä on hiilijalanjälkilaskemien lisäksi korostettu kädenjälkitiedon hyödyntämisen mahdollisuuksia. Kädenjäljen avulla voidaan luoda kilpailuetua suhteessa muihin toimijoihin sekä osoittaa potentiaalisia paikallisia ja globaaleja päästövähennyshyötyjä [15], [18]. Tämä on noussut esille myös Tuppuran et al. vuonna 2023 toteuttamassa kyselytutkimuksessa, jossa tutkittiin yritysten käyttökokemuksia hiilikädenjälkityökalun hyödynnettävyydestä. Mukana olleista seitsemästä yrityksestä kuusi edusti pörssiyrityksiä sekä neljä toimi valmistavassa teollisuudessa. Tuppuran et al. kyse-

lytutkimus osoitti lisäksi, että hiilikädenjälkimalli koetaan arvokkaaksi työkaluksi liiketoiminnasta syntyvien positiivisten ympäristövaikutusten arvioimiseen [33]. Hiilikädenjälkimallin tunnistettiin tukevan strategista päätöksentekoa, tuotekehitystä ja kilpailijoista erottautumista sekä vahvistavan viestinnän uskottavuutta [15], [18]. Vähähiilisen teknologiakehityksen kärjessä olevat yritykset voivat siis saavuttaa tuotteillaan suuren kädenjäljen lisäksi myös merkittävän vientipotentiaalin globaaleilla markkinoilla [15]. Hiilikädenjäljen avulla voidaan myös kvantifioida sekä yksilöiden, että yritysten tekemiä muutoksia nettonollatavoitteiden saavuttamiseksi [34].

Teknologiaateollisuus ry:n tiekartassa on arvioitu suomalaisen teknologiaateollisuuden vientituotteiden hiilikädenjäljen suuruus, jonka potentiaali on noin 75 MtCO_{2e}. Tämä perustuu arvioon, jossa vientituotteiden globaali markkinaosuus olisi 0,1–20 %. Tiekartassa toteutetut arviot huomioivat tuotteiden vaikutukset sekä oman että asiakkaiden hiilijalanjäljen pienentämiseen. [18] Vähähiilisyystiekartan päivityksessä tunnistettiin teknologiaateollisuuden yritysten kädenjälkipotentiaalin kannalta keskeisimpiä avainteknologioita, joita tämän työn kontekstissa tärkeimpiä olivat teräs- ja meriteollisuuden tuotteet [18] tarkasteluun valikoituneiden toimialojen, metallin jalostuksen sekä suunnittelun ja konsultoinnin osalta. Työssä tarkasteltavilla toimialoilla on toisistaan merkittävästi poikkeavat päästökäytännöt: metallin jalostuksen suurimmat päästöt aiheutuvat scope 1–luokasta, kun taas suunnittelun ja konsultoinnin suurimmat päästöt sijoittuvat scope 3 – luokkaan kuvan 4 mukaisesti. Tällä rajauksella pystytään tarkastelemaan hiilikädenjäljen määrittämiseen liittyviä kriteereitä toisistaan selkeästi poikkeavilla toimialoilla. Avainteknologialla tarkoitetaan vähähiilisyystiekartassa sellaista teknologiaateollisuuden yritysten tuottamaa teknologiaa, jolla on merkittävää hiilikädenjälkipotentiaalia.

2.2.1 Suunnittelu ja konsultointi

Suomessa suunnittelun ja konsultoinnin sektorilla kasvuhuonekaasupäästöjen kokonaiskertymä on hyvin pieni [18]. Toimialan suurimmat kasvuhuonekaasupäästöt aiheutuvat arvoketjun epäsuorista päästöistä, scope 3 luokkien 1 & 2 päästöistä (ostetut tuotteet ja palvelut sekä tuotantohyödykkeet), jotka kattavat hankinnoista syntyvät kasvuhuonekaasupäästöt [18]. SKOL ry:n vuonna 2021 tuottamassa selvityksessä suunnittelun ja konsultoinnin alan merkittävimmäksi päästölähteeksi identifioitiin liikematkustus, joka on kuitenkin vuoden 2024 teknologiaateollisuuden tiekartatarkasteluun nähden pienentynyt merkittävästi, erityisesti lisääntyneiden etäkokouksien takia. Scope 3-luokan päästöt ovat toimialan näkökulmasta kaikista haastavimpia vähentää, sillä se edellyttää myös muiden arvoketjuun kuuluvien tahojen sitoutumista päästövähennyksiin [35].

SKOL ry:n teettämän selvityksen mukaan suunnittelun ja konsultoinnin alalla hiilikädenjäljen arvioidaan olevan merkittävästi suurempi toimialan aiheuttamaan jalanjälkeen nähden. Selvityksessä on arvioitu yhden konsultointialalla työskentelevän henkilön keskimääräistä hiilijalanjälkeä ja toisaalta keskimääräistä hiilikädenjälkeä. Tulosten mukaan toimialalla työskentelevän henkilön keskimääräinen hiilikädenjälki on 1300-kertainen suhteessa keskimääräiseen hiilijalanjälkeen [35]. Selvityksessä kuitenkin korostetaan, että tämä kädenjälki ei täysin kuulu suomalaiselle konsultointialalle, mutta toimialalla on merkittävä rooli kädenjäljen muodostumisessa arvoketjussa.

2.2.2 Metallin jalostus

Rauta- ja teräsalat ovat hiili- ja energiaintensiivisimpiä teollisuudenaloja ja teräksellä on keskeinen rooli maailmantaloudessa [36]. Sen kulutus kokonaisuudessaan on kaksinkertaistunut vuosien 2000–2023 välillä, jotta kasvavaan taloudelliseen ja sosiaaliseen tarpeeseen on pystytty vastaamaan. Globaalisti teräksen kulutuksen odotetaan kasvavan vielä noin 30 % vuoteen 2050 mennessä [37], [38] ja terästeollisuus on yksi kriittisimmistä teollisuuden aloista, jossa kasvihuonekaasupäästöjä tulisi vähentää [9], [37]. Tällä hetkellä globaalia teräksen tuotannosta 70 % tapahtuu BF/BOF-tekniikalla (Blast Furnace/Basic Oxygen Furnace), jossa keskeisimmät kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiin tähtäävät toimet ovat sekä CCUS-tekniikat että vedyn käyttö [37], [38], [39]. Muita teräksen valmistuksessa käytettäviä tekniikoita on kierrätysteräksen valmistuksessa käytettävä EAF-tekniikka (Electric Arc Furnace) [36], [38], [39]. Vuonna 2050 BF/BOF-tekniikalla arvioidaan tuotettavan vielä 35–50 % teräksen tuotannosta, jonka takia BF/BOF-tekniikan hiilestä irtautumisen arvioidaan olevan keskeisessä roolissa prosessien kestävyuden lisäämisessä [37], [38]. Suomessa metallin jalostuksen suurimmat kasvihuonekaasupäästöt aiheutuvat scope 1-kategoriassa eli toimialan suorista päästöistä. Scope 3-kategoriassa suurimmat päästöt syntyvät polttoaineiden tuotannosta ja energian siirtohäviöistä sekä hankinnoista, joihin kuuluvat esimerkiksi tarvittavat raaka-aineet [18]. Nämä ovat ennen omaa toimintaa syntyviä päästöjä eli upstream päästöjä. Tällä hetkellä metallien jalostuksessa merkittävimmät kasvihuonekaasupäästöjä aiheuttavat tuotantovaiheet ovat raudan valmistus, pelkistysprosessi BF/BOF:ssa ja sähkön kulutus EAF:ssa. Tärkeimmät kasvihuonekaasupäästövähennysten reitit toimialalla ovat vähähiilisen raudan valmistus, pelkistysprosessin kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen sekä teräsromun kierrätyksen lisääminen EAF-tekniikalla [36], [37]. Näiden maittujen toimenpiteiden avulla teräksen valmistuksesta aiheutuvia globaaleja kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää 25 % vuoteen 2050 mennessä [37].

3. ELINKAARIARVIOINTI JA HIILIJALANJÄLKI-LASKENTA HIILIKÄDENJÄLJEN PERUSTANA

Hiilijalanjäljen laskenta on standardoitu ilmastovaikutusten arvioimiseen käytettävä indikaattori, johon hiilikädenjäljen laskenta perustuu [14], [40], [41]. Hiilikädenjäljen ymmärtämiseksi on tarkasteltava sen taustalla vaikuttavia asioita ja luvussa käsitellään elinkaariarviointia ja hiilijalanjälkeen liittyviä standardeja.

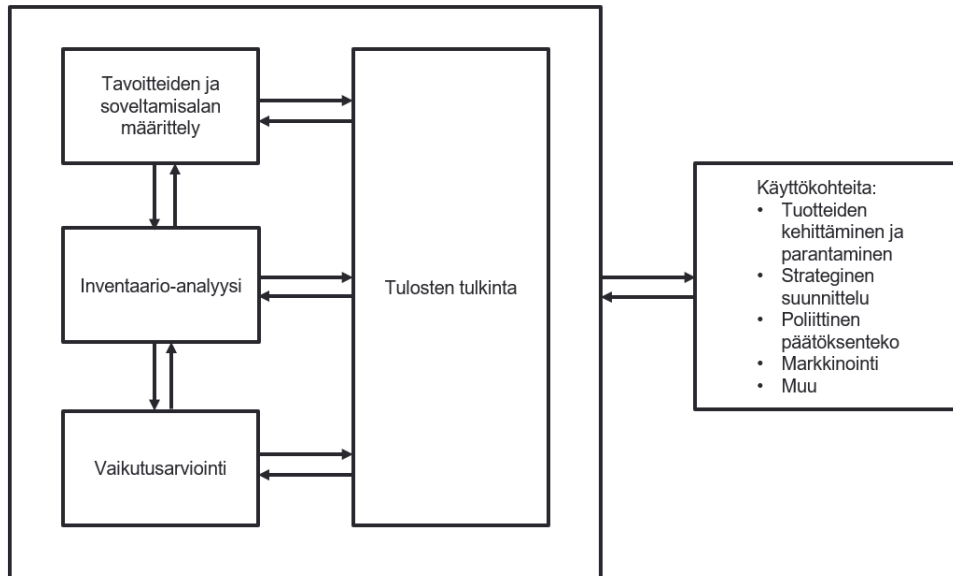
3.1 Elinkaariarviointi

Kasvihuonekaasupäästöjen mittaaminen ja hallinta eri arvoketjuissa on olennaista ilmastomuutoksen hillitsemisessä [9], [10], [20], [42]. Viime vuosikymmeninä kasvihuonekaasut ovat lisääntyneet voimakkaasti ilmakehässä, jota kuvaa esimerkiksi se, että vuonna 2019 ilmakehän hiilidioksidipitoisuus saavutti ensimmäistä kertaa 410 ppm tason [1]. IPCC:n vuoden 2015 raportissa kriittiseksi hiilidioksidipitoisuudeksi on määritelty 450 ppm, jotta maapallon keskilämpötilan nousu voidaan rajoittaa alle 2 °C:een [1], [37], [43].

Elinkaariarviointia käsittelevä standardi ISO 14040:2006 (Life Cycle Assessment, LCA) on yksi ympäristöasioiden hallinnan tekniikoista, jonka kansainvälinen standardointijärjestö ISO (The International Organization for Standardization) on standardoinut. Sen avulla tarkastellaan tuotteen tai palvelun koko elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia raaka-aineen hankinnasta tuotantoon, käyttöön, kierrätykseen ja lopulliseen hävitykseen. Sitä voidaan soveltaa esimerkiksi kasvihuonekaasupäästöjen todentamiseen. Standardin mukaisesti tuotteet voivat olla palveluita, tavaroita tai tietotuotteita, ja palvelut voivat sisältää sekä aineellisia että aineettomia osia, kuten asiakkaalle suoritettuja toimenpiteitä tai ilmapiirin luomista [44]. Elinkaariarvioinnin tarkkuus ja laajuus vaihtelevat hyvin paljon selvityksen tavoitteiden mukaan ja siinä on kokonaisuudessaan neljä vaihetta: tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaihe, inventaarioanalyysivaihe (LCI), vaikutusarviointivaihe (LCIA) sekä tulkintavaihe [44]. Näitä on havainnollistettu kuvassa 5. Lisäksi on kehitetty elinkaariarviointia tukeva standardi ISO 14044, joka käsittelee elinkaariarvioinnin vaatimuksia ja tarkempia ohjeita [44], [45].

Elinkaariarviointi on iteratiivinen prosessi, jossa yksittäiset vaiheet hyödyntävät toistensa tuloksia ja kaikki analyysit perustuvat toiminnalliseen yksikköön, kuten tiettyyn tuotemäärään tai palveluun [44], [45]. Tämä toiminnallinen yksikkö toimii vertailukohtana, johon inventaarioanalyysin tulokset ja ympäristövaikutukset suhteutetaan. Lähestymistapa varmistaa analyysin kattavuuden ja johdonmukaisuuden, mikä auttaa välttämään virheitä

ja ympäristövaikutusten siirtymistä elinkaaren eri vaiheiden välillä. Elinkaariarvioinnin tulosten käyttötarkoitus, kohderyhmä ja raportoinnin julkisuus on tärkeää määrittellä tulosten kumuloituvuuden takia. [44] Lisäksi todellisuudessa useimmat teollisuusprosessit tuottavat useampaa kuin yhtä tuotetta ja ne kierrättävät raaka-aineita, joka hankaloittaa tiedonkeruuta merkittävästi [44].



Kuva 5. Elinkaariarvioinnin neljä vaihetta. Muokattu lähteestä [44].

Elinkaariarvioinnin ensimmäisessä vaiheessa määritellään tarkastelun rajat ja yksityiskohtaisuuden taso riippuen siitä, mitä aihetta selvitetään ja mihin käyttötarkoitukseen. Toisessa vaiheessa, inventaarioanalyysissä, kerätään kaikki tarvittava tieto tarkasteltavan järjestelmän syötteistä ja tuotoksista, eli siitä, mitä materiaaleja ja energiaa kuluu ja mitä syntyy lopputuloksena. Kolmannessa vaiheessa, vaikutusarvioinnissa, analysoidaan näiden inventointitietojen ympäristövaikutukset, jotta niiden merkitys voidaan ymmärtää paremmin. Viimeisessä vaiheessa tulkitaan arvioinnin tuloksia ja tehdään niistä johtopäätöksiä, jotka vastaavat alkuperäisiä tavoitteita. Läpi prosessin on tärkeää pitää näkyvissä valitut rajaukset ja mahdolliset tulkintaan vaikuttavat subjektiiviset tekijät, jotta arviointi on läpinäkyvää ja tulokset voidaan arvioida kriittisesti. [44]

3.2 Hiilijalanjälki

Tuotekohtaisen hiilijalanjäljen laskentaa varten on kehitetty useita standardeja, joista tunnetuimpia ovat PAS 2050 (Publicly Available Specification 2050), GHG-protokollan tuotestandardi (The GHG Protocol Product Standard) sekä ISO 14067:2018 –standardi [4], [16], [41], [46]. Näiden standardien eroja ja yhtäläisyyksiä on koottu taulukkoon 1. Kuitenkin hiilijalanjäljestä ja elinkaariarvioinnista puhuttaessa on tärkeää huomioida, että

niiden laskennan välillä on keskeinen ero siinä, mitä ne ottavat huomioon: elinkaariarviointi huomioi kaikki ympäristövaikutukset tuotteen elinkaaren ajalta, kun hiilijalanjäljen laskenta keskittyy kasvihuonekaasupäästöjen kvantifointiin. Näiden tuotekohtaisten hiilijalanjälkien määrittämiseen tarkoitettujen standardien lisäksi on olemassa erikseen ohjeet organisaatioiden, hankkeiden ja kaupunkien hiilijalanjälkien arviointiin [4], [16].

Hiilijalanjälkiselvityksen vaikutusarvioinnissa jokaisen tuotejärjestelmän nettopäästöjen potentiaalista ilmastonmuutosvaikutusta arvioidaan IPCC:n ilmoittamien uusimpien GWP (100) -kertoimien avulla (Global Warming Potential, GWP) [1], [4], [41]. Kioton protokollassa esitetyt kasvihuonekaasut ovat hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4), dityppioksidi (N_2O), HFC-yhdisteet, PFC-yhdisteet, rikkiheksafluoridi (SF_6) ja typpitrifluoridi (NF_3) [3] ja ilmastonmuutoksen näkökulmasta ne eroavat toisistaan merkittävästi siinä, millainen kyky niillä on absorboida energiaa ja kuinka pitkään ne pysyvät ilmakehässä [9], [42]. Niitä kuitenkin tarkastellaan usein hiilidioksidiekvivalentteina.

3.2.1 Hiilijalanjäljen määrittäminen tuotteille ja palveluille

Hiilijalanjälkiselvitysten päätavoitteena on kvantifioida tuotteiden ja palveluiden elinkaarien aikaiset kasvihuonekaasupäästöt ja -vähennykset hiilidioksidiekvivalentteina CO_2e [16] ja indikaattorina on aina ilmastonmuutos. Tärkeimpiä prosesseja hiilijalanjälkiselvityksessä ovat ne, jotka muodostavat yhdessä vähintään 80 % hiilijalanjäljestä ja tarkastelu aloitetaan aina rajaamisen jälkeen suurimmasta kokonaisuudesta kohti pienintä [41]. Eri tuotejärjestelmien hiilijalanjälkiä vertailtaessa keskenään niiden on perustuttava samaan tai samoihin toiminnallisiin yksiköihin. Tämä pätee sekä hiilijalanjäljessä, että osittaisessa hiilijalanjäljessä, jossa vertailu voidaan suorittaa ainoastaan silloin, kun poistetut elinkaaren vaiheet ovat samat [41]. Osittaisella hiilijalanjäljellä tarkoitetaan yhden tai useamman valitun prosessin hiilijalanjälkeä. Siihen lasketaan mukaan ilmastovaikutukset siihen pisteeseen, jossa valmis tuote lähtee markkinoille (cradle-to-gate) [44].

Standardin ISO 14067:2018 mukaisesti tuotekohtaisen hiilijalanjälkilaskennan on sisällettävä elinkaariarvioinnin kaikki neljä vaihetta; tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaihe, inventaarioanalyysivaihe, vaikutusarviointivaihe sekä tulkintavaihe. Nämä on esitelty kappaleessa 3.1. [41] Yleisesti ottaen hiilijalanjälkilaskentaan tulee ottaa mukaan kaikki prosessit ja virrat, jotka voidaan yhdistää analysoitavaan järjestelmään. Yksittäiset materiaali- tai energiavirrat voidaan kuitenkin rajata perustellusti ulos tarkastelusta, jos ne havaitaan kokonaisuuden kannalta merkityksettömiksi. Tuotejärjestelmän jakaminen yksikköprosesseihin helpottaa siihen sisältyvien syötteiden ja tuotosten tunnistamista. Usein joitakin syötteitä myös käytetään varsinaisen tuotteen komponenttina, kun taas

toisia käytetään yksikköprosesseissa, mutta ne eivät ole varsinaisen tuotteen osia. Hiilijalanjälkiselvityksessä onkin eriteltävä ja tunnistettava ne prosessit, joita jaetaan muiden tuoteprosessien kanssa. Tällaisissa tapauksissa esimerkiksi energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt on allokoitava eri tuotejärjestelmien tai tuotteiden välillä [41]. Standardin mukaisesti hiilijalanjäljen tai osittaisen hiilijalanjäljen laskentaan ei saa sisällyttää mukaan päästöjen kompensointia [41].

Taulukko 1. Olemassa olevia standardeja tuotetason hiilijalanjäljen määrittämiseksi. [41], [46], [47]

	The GHG Protocol Product Standard	PAS 2050:2008	ISO 14067:2018-standardi
Vaikutusluokka ja yksikkö	Ilmastonmuutos (CO ₂ e)	Ilmastonmuutos (CO ₂ e)	Ilmastonmuutos (CO ₂ e)
Perusta	The GHG Protocol Corporate Standard BS EN ISO 14044 -standardi ja BS EN ISO 14040 -standardi PAS 2050:2008	BS EN ISO 14044 -standardi ja BS EN ISO 14040 -standardi	ISO 14044 -standardi ja ISO 14040 -standardi
Laajuus (scope)	Tuotteet	Tuotteet, palvelut	Tuotteet (tavarat ja palvelut)
Erot	Vaatimukset tuotekohtaisten julkiselle raportoinnille Tarjoaa tuotekohtaiset säännöt	Keskittyy tuotekohtaisten GHG-päästöjen kirjaamiseen Tarjoaa tuotekohtaiset säännöt	Monipuolisin, helpoiten laajennettavissa LCA-tutkimukseksi
Yhtäläisyydet	Kaksoislaskennan välttäminen Maankäytön muutokset sisällytettävä ja raportoitava		

LCA = life cycle assessment; ISO = International Organization for standardization; GHG = greenhouse gas; PAS = Publicly Available Specification 2050

Tuotekohtaisten hiilijalanjälkien arvioimiseen on olemassa myös kaksi hyvin samankaltaista standardia, PAS 2050 ja GHG protokollan tuotestandardi, joiden kummankin tavoitteena on identifioida, ymmärtää ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä tuotteiden elinkaarien ajalta [46], [47]. PAS 2050 on tuotteiden ja palveluiden elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen kvantifioimiseen käytettävissä oleva standardi, joka on kehitetty vuonna 2008 BSI:n (British Standards Institution) toimesta [46] ja GHG protokollan tuotestandardi WRI:n (World Resources Institute) sekä WBCSD:n (World Business Council for Sustainable Development) toimesta vuonna 2011 [47]. PAS 2050 on ensimmäinen tuotekohtaisten hiilijalanjälkien mittaamiseen luotu standardi, johon monet muut kansainväliset standardit pohjautuvat. Sillä onkin paljon yhtäläisyyksiä GHG-protokollan kanssa, mutta standardien erilaiset tarkoitukset ja kehitysprosessit ovat johtaneet kahteen eri

standardiin. Yksi merkittävimmistä eroista näiden välillä on se, että GHG-protokollan tuotestandardi tarjoaa hiilijalanjäljen kvantifioinnin lisäksi vaatimukset julkiseen raportointiin [47] kun taas PAS 2050 keskittyy kasvihuonekaasupäästöjen johdonmukaiseen kirjaimiseen eikä aseta viestintää tai viestintätekniikoita koskevaa standardointia [46]. PAS 2050 antaa ISO 14067 -standardin tavoin vaatimukset järjestelmän rajojen tunnistamiseen, niitä vastaavien relevanttien kasvihuonekaasupäästölähteiden tunnistamiseen, analyysin suorittamisen tietovaatimuksiin sekä tulosten laskentaan. Aivan kuten ISO 14067 –standardin tapauksessa, standardien mukaan hiilijalanjäljen laskentaan ei saa sisällyttää mitään päästökompensatioita [41], [46], [47].

3.2.2 Hiilijalanjäljen määrittäminen organisaatiolle

GHG-protokolla (The Greenhouse Gas Protocol, A Corporate Accounting and Reporting Standard) on globaalisti yksi yleisimmin käytetyistä kansainvälisistä kasvihuonekaasupäästöjä koskevista standardeista organisaatioiden hiilijalanjäljen laskentaan ja se on kirjoitettu erityisesti yrityksille, jotka suorittavat kasvihuonekaasupäästöjen inventaarion [17]. Standardi keskittyy kasvihuonekaasupäästöjen määrittämiseen, raportointiin ja verifiointiin eli se tarjoaa yrityksille vaiheittaisen oppaan, jota voi hyödyntää kasvihuonekaasupäästöjen kvantifioinnissa ja raportoinnissa [4]. Se jakaa päästöt kolmeen eri luokkaan, scope 1, scope 2 ja scope 3, joiden avulla voidaan laskea koko yrityksen arvoketjun aikana syntyvät päästöt [3]. Aiemmin kuvassa 2 havainnollistettiin päästöjen jakautumista GHG-protokollan mukaisiin scope -luokkiin.

Scope 1 kattaa yrityksen omasta toiminnasta syntyvät suorat päästöt ja scope 2 ostotoenergian epäsuorat päästöt, joita ovat muun muassa ostetusta sähköstä, höyrystä, lämmityksestä ja jäähdytyksestä aiheutuvat päästöt [3], [4]. Scope 3 jaetaan kahteen osaan, downstreamiin ja upstreamiin ja näissä on yhteensä 15 eri kategoriaa, joissa kasvihuonekaasupäästöt voivat syntyä. Upstream tarkoittaa epäsuoria päästöjä, jotka tapahtuvat ennen yrityksen toimintaa ja downstream tarkoittaa päästöjä, jotka syntyvät yrityksen oman toiminnan jälkeen. [3] Yritystason kasvihuonekaasupäästöjen inventaariota tehtäessä tulee huomioida, että scope 2- tai scope 3-luokkaan ei lasketa mukaan sellaisia toteutuneita kasvihuonekaasupäästöjä, jotka on jo laskettu arvoketjussa toisen yrityksen scope 1-luokkaan [4]. Standardin mukaisesti yrityksen hiilijalanjälkeä laskettaessa päästöt on osoitettava siihen scopeen, jossa ne tapahtuvat [41]. On siis huomioitava, että mahdollista kaksoislaskentaa kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa ei ilmene allokoimalla samat päästöt ja poistumat vain kerran.

4. HIILIKÄDENJÄLJEN LASKENTA

Organisaatioiden toiminta tuottaa aina hiilijalanjälkeä, mutta niiden toiminnan avulla voidaan myös luoda positiivista kädenjälkeä [10], [15] ja globaalisti yritykset ovat enenevässä määrin halukkaita ymmärtämään omiin tuotteisiinsa liittyviä päästöjä sekä niiden päästövähennyspotentiaalia suhteessa markkinoilla oleviin kilpailijoihin [30], [48], [49]. Yritysten ymmärryksen lisääntyminen kasvihuonekaasupäästöistä auttaa heitä identifioimaan ja kehittämään sellaisia tuotteita, joilla voi olla positiivisia vaikutuksia päästövähennyksiin [30]. Suomalaisilla yrityksillä ja niiden luomilla vähähiiliratkaisuilla onkin mahdollisuus saavuttaa merkittäviä globaaleja kasvihuonekaasupäästövähennyksiä [15], [18].

4.1 Hiilikädenjälki

Liiketoimintasektorilla on keskeinen rooli yhdessä tieteen ja tutkimuksen sekä julkisen sektorin ja viranomaisten kanssa päästövähennystavoitteiden saavuttamisessa [10], [19]. Näistä liiketoimintasektorilla on keskeinen rooli konkreettisten ratkaisujen kehittämisessä kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa [10]. Toiminnan ja investointien positiivisten ympäristövaikutusten osoittamiseen hyödynnettävälle mittaristolle on enenevässä määrin tarvetta [10], sillä monet teollisuuden alat sekä yritykset ovat tunnistaneet tarpeen viestiä tuotteidensa tai palveluidensa ympäristöhyödyistä [48].

Hiilikädenjälki-termi on lanseerattu vuonna 2007 neljännessä kansainvälisessä ympäristökasvatuksen konferenssissa (The 4th International Conference on Environment Education) ja sen avulla on ennen kaikkea tarkoitus pyrkiä kuvaamaan yrityksen positiivisia ilmastovaikutuksia suhteessa kilpaileviin tuotteisiin tai palveluihin [11], [14], [33] eli se on merkittävä ilmastoviestinnän väline. Kädenjäljen käsite on luotu, jotta voidaan kvantifioida ja viestiä toiminnan positiivisia vaikutuksia, joita syntyy tuotteiden, palveluiden, prosessien, yritysten tai organisaatioiden elinkaarien aikana suhteessa kilpailijoihin [10], [16], [17], [49]. Metodologian avulla pystytään siis konkreettisesti osoittamaan yrityksen toiminnasta syntyvä arvon tuottaminen asiakkaille. Tuotekohtaisen määrittelyn lisäksi kädenjälkimallia on laajennettu myös kaupunkikohtaisten ja organisaatiotason hiilikädenjälkien tarkasteluun [50].

Tällä hetkellä yksi suurimmista haasteista kädenjälkikeskustelussa on selkeiden ohjeiden puuttuminen vertailutason valintaan liittyen ja siten kädenjälkimallien yhtenäisyyden puute [11], [33], [40]. Vertailutasolla tarkoitetaan hypoteettista skenaarioita siitä, mitä kasvihuonekaasupäästöt, -poistumat tai varastointi olisivat olleet ilman kyseistä tarjottua

ratkaisua [4], [48], [51]. Selkeää, kirjallisuudessa kuvattuja erilaisia kädenjäljen lähestymistapoja yhdistävää standardoitua laskentatapaa hiilijalanjäljen tapaan ei ole olemassa [33], [34], mutta kysyntä tälle on suuri [33]. Laskentamenetelmät vaativat myös hyvin paljon olettamuksia, mikä aiheuttaa tuloksiin epävarmuutta ja kiistanalaisuutta. Osittain näidenkin syiden, mutta myös lähtötietojen puutteellisuuden vuoksi hiilikädenjäljen käyttö virallisena arviointimenetelmänä esimerkiksi kansallisten tai toimialojen ilmastohyötyjen tapauksessa on vielä ennenaikaista. [52] [17] Tuppuraa et al. toteuttamassa kyselytutkimuksessa korostettiin, että kädenjälkimallin tuottaman tiedon arvo kasvaa sen globaalin tunnettavuuden myötä [33]. Lisäksi haasteeksi kädenjäljen hyödyntämisessä nousee metodologian monimutkaisuus: siinä tarvitaan hyvin laajaa tietopohjaa elinkaarien aikaisista ympäristövaikutuksista ja usein näiden tietojen kerääminen on työlästä. Haasteita aiheutuu siis selkeiden ohjeiden ja työkalujen puuttumisen lisäksi laskentaan tarvittavan datan keräämisestä. [11], [33], [48] Myös kädenjäljen viestintään liittyvät kysymykset ovat keskeisessä roolissa tulosten reliabiliteetin näkökulmasta [48], joihin yhtenäiset toimintaohjeet toisivat varmuutta.

Historian aikana kädenjälkimalleja on toisinaan käytetty harhaanjohtavasti kuvaamaan ainoastaan oman toiminnan myönteisiä ympäristövaikutuksia jättämällä negatiiviset vaikutukset huomiotta [10]. Yrityksen toiminnasta aiheutuneet päästöt sekä vältetyt päästöt ovat toisistaan irralliset asiat, eikä vältettyjä päästöjä voida hyödyntää kuvaamaan yrityksen saavuttamia hiilineutraaliustavoitteita neutralisoimalla niiden avulla toiminnasta aiheutuvia päästöjä [10]. Yrityksen näkökulmasta voi olla myös hyvin haastavaa erottaa positiivisia ympäristövaihteita käyttävistä kilpailijoista, sillä tässä voi syntyä hyvin helposti väärintulkintaa erilaisista ympäristövaihteista [33], [53]. Haasteita saattaa myös aiheutua epärealistisista arvioista, jotka suurentelevat vältettyjen päästöjen kokonaisuutta sekä sellaisten tilanteiden arvioinnista vältetyiksi päästöiksi, jotka eivät suoraan vaikuta hiilestä irtautumiseen [10]. Lisäksi kädenjälki -käsitteen erilaiset tulkinnat ja ymmärryksen puute eri sidosryhmien välillä saattaa aiheuttaa riskin sille, että jalanjälki ja kädenjälki sekoitetaan keskenään ja käsite tulkitaan viherpesuksi [33]. Tämä edelleen korostaa sitä, että tarve yhtenäiselle laskentamenetelmälle ja sen standardoinnille on olemassa, jotta kaikilla toimijoilla on yhteiset määritelmät ja laskentamenetelmät.

4.2 Hiilikädenjäljen laskentametodologiat

Hiilikädenjäljellä ja -jalanjäljellä on yhteneväisyyksiä, sillä ne hyödyntävät ympäristövaikutusten arvioimiseen koko elinkaaren huomioivaa lähestymistapaa ja ne voidaan laskea sekä tuotteelle, yritykselle, prosessille tai uudelle teknologialle [13], [14], [16].

Hiilikädenjäljen laskenta hyödyntää samanlaisia kvantitatiivisia menetelmiä kuin hiilijalanjäljen laskenta, mutta se ottaa lisäksi mukaan kannustimia, joilla päästään kohti nettonollatavoitteita [10]. Kädenjälki siis täydentää jalanjälkeä, mutta ne eroavat toisistaan merkittävästi siinä, että kädenjälki keskittyy tulevaisuudessa tapahtuviin muutoksiin [10], [14], [40]. Eroa on havainnollistettu kuvassa 6. Lisäksi kädenjälkikonseptissa muutosten vaikutusten arvioinnissa käytetään usein vertailua tavalliseen liiketoimintaan: mitä olisi tapahtunut ilman muutosta [10], [11]. Taulukossa 2 on esitetty positiivisten ympäristövaikutusten arvioimiseen olemassa olevia julkaisuja.

Taulukko 2. Positiivisten ympäristövaikutusten arvioimiseen olemassa olevat julkaisut. Muokattu lähteistä [14], [16].

Kädenjälki	Kirjoittajat	Laajuus (scope)	Sovelluskohtainen laajuus (scope)	Yhteensopiva standardi
Hiilikädenjälki VTT & LUT	Pajula et al. 2021 [14]	Ilmastonmuutos	Tuotteet ja palvelut	ISO 14040-44, ISO 14067
SHINE	Norris et al. 2021 [54]	Kaikki LCA-arvioinnin kannalta olennaiset kategoriat	Toiminta	Osittain ISO 14040-44 noudattava
Kühnen et al. 2019	Kühnen et al. 2019 [55]	37 ympäristöllistä, taloudellista ja sosiaalista indikaattoria	Tuotteet	ISO 14040-44
Vältetyt päästöt				
Avoided Emissions Framework (AEF)	Mission Innovation 2020 [56]	Ilmastonmuutos	Tuotteet, systeemit, ratkaisut, yritykset ja kaupungit	GHG Protokolla
Guidance on avoided emissions	NZI & WBCSD, 2023 [10]	Ilmastonmuutos	Tuotteet, palvelut, teknologiat ja projektit	GHG Protokolla
Comparative emissions	WRI, Russel 2019 [30]	Ilmastonmuutos	Tuotteet	GHG Protokolla

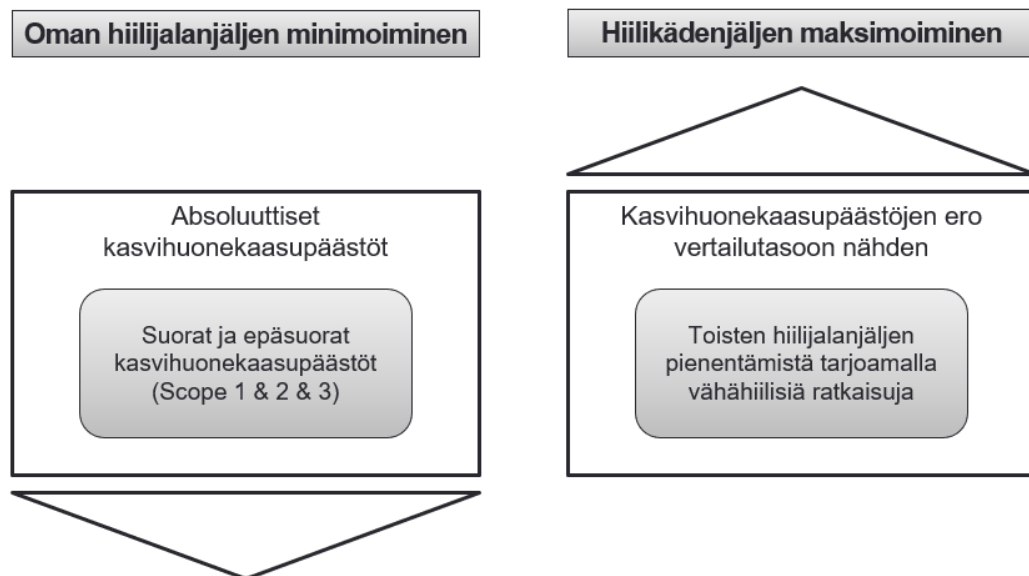
LUT = Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT; VTT = Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy; SHINE = Sustainability and Health Initiative for NetPositive Enterprise; WRI = World Resource Institute; LCA = life cycle assessment; ISO = International Organization for standardization; GHG = greenhouse gas

Tähän työhön tarkempaan tarkasteluun on otettu mukaan näistä kaksi vaihtoehtoa: VTT:n ja LUT:n hiilikädenjäljen malli sekä WBCSD:n vältettyjen päästöjen malli. Kyseisiin malleihin on päädytty niiden laajuuksien (scope) sekä sovelluskohtaisten laajuuksien

(scope) takia: molemmat ottavat huomioon ilmastonmuutoksen ja tarkastelevat kädenjälkeä tuotteiden ja palveluiden näkökulmasta. Metodologioiden yhteenvetotaulukko löytyy luvun 4.2.3 taulukosta 3.

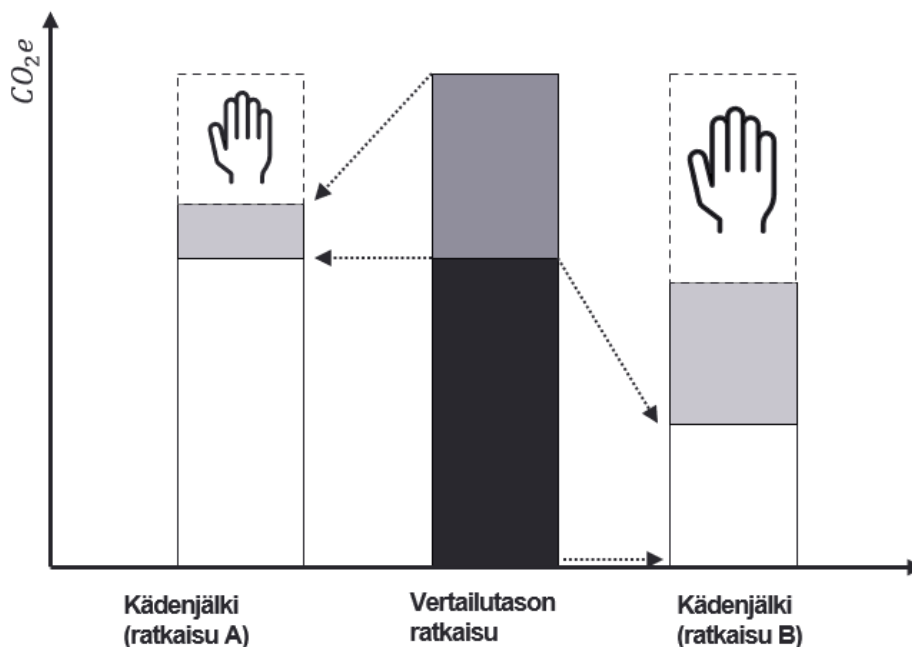
4.2.1 VTT & LUT-hiilikädenjälkimalli

Hiilikädenjälki on LCA-pohjainen lähestymistapa, joka mahdollistaa tuotteen tai tuotejärjestelmien positiivisten ilmastovaikutusten arvioinnin verrattuna BAU-skenaarioon (Business as usual) tai vertailutason tilanteeseen [14], [16], [48]. VTT:n (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy) ja LUT:n (Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT) yliopiston tutkijat ovat kehittäneet hiilikädenjäljen laskentaan liittyvän ohjekirjan (Carbon Handprint Guide), joka julkaistiin ensimmäisen kerran vuonna 2018 [13]. Kehitystyön tuloksena vuonna 2021 julkaistiin päivitetty versio, jossa hiilikädenjälki on laajennettu ympäristökädenjäljeksi [14]. Vuoden 2021 mallissa hiilikädenjäljestä puhuttaessa viitataan ympäristöön kohdistuviin positiivisiin vaikutuksiin, joita organisaatio voi saavuttaa tarjoamalla asiakkailleen tuotteita ja palveluita, joiden avulla he voivat pienentää omaa hiilijalanjälkeään. Hiilikädenjäljellä siis tarkoitetaan positiivisten ympäristövaikutusten arviointiin luotua mittaria, jonka avulla on mahdollista identifoida yrityksen kannalta potentiaalisia kehityskohteita [14], [16]. Kädenjälkeä voi kasvattaa esimerkiksi materiaali- tai energiatehokkuuden lisäämisellä, jätteiden vähentämisen kautta, elinkaaren pidentämisen kautta tai hiilidioksidin talteenoton sekä hyötykäytön kautta [48]. Hiilikädenjäljellä ei ole olemassa maksimiarvoa, kun taas hiilijalanjäljen arvo ei voi olla negatiivinen ja tätä eroa on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Hiilikädenjäljen ja hiilijalanjäljen erot. Muokattu lähteestä [14].

Hiilikädenjäljen kasvattaminen organisaation omalta osalta tarkoittaa muiden hiilijalanjäljen pienentämistä, eikä siihen lasketa mukaan organisaation oman hiilijalanjäljen pienentämistä [13], [14]. Siinä, missä hiilijalanjälki on absoluuttisten päästöjen mittari, hiilikädenjälki puolestaan riippuu hyvin vahvasti kontekstista ja viittaa hiilijalanjäljen eroihin kahden ratkaisun välillä. Hiilikädenjälkeä voidaan kasvattaa kahdella tavalla: tarjoamalla tuotteita, joilla on pienempi hiilijalanjälki kuin vertailutason tuotteilla (ratkaisu A, kuva 7) tai auttamalla asiakasta pienentämään prosessien hiilijalanjälkeä (ratkaisu B, kuva 7). Laskenta perustuu aina kahden hiilijalanjäljen vertaamiseen toisiinsa, jonka takia vertailutason määrittely vaihtoehdoisen tuotteen ja todellisen tuotteen välillä on laskennan kannalta välttämätöntä [13], [14], [17], tämä on tarkemmin esitetty kaavassa 3. Vertailutasolla tarkoitetaan viitetasoa, joka kuvaa niitä olosuhteita, jotka todennäköisesti toteutuvat tarjotun ratkaisun tai vaihtoedon puuttuessa [14] eli nykytilannetta ilman muutosta.

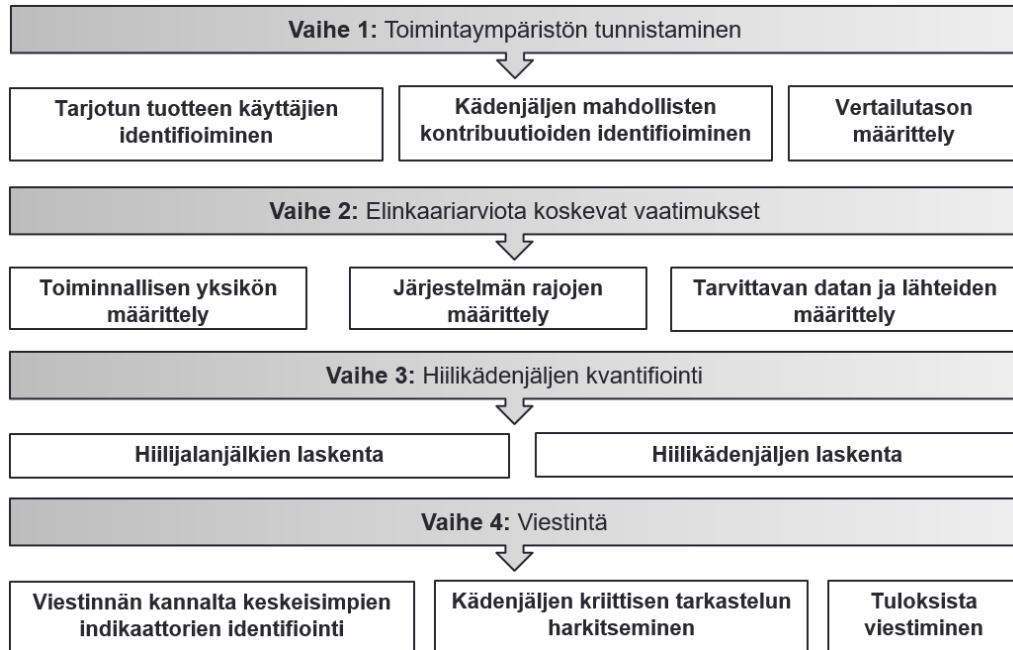


Kuva 7. Hiilikädenjäljen kasvattaminen. Mustalla palkilla kuvataan vertailutason tuotteen hiilijalanjälkeä ja harmaalla palkilla vertailutason tuotteen käytönaikaista hiilijalanjälkeä. Muokattu lähteestä [13], [14].

VTT:n ja LUT:n laatimassa kädenjälki-oppaassa hiilikädenjäljen tarkastelu on jaettu neljään eri vaiheeseen ja edelleen 11 askeleeseen [14], jotka on esitelty kuvassa 8. Nämä valinnat pohjautuvat standardeissa ISO 14040 ja ISO 14044 esitettyihin metodeihin elinkaariarvioinnin suorittamiseen.

Ensimmäisen vaiheen yksi keskeisimmistä tehtävistä on vertailutason määrittely [14], johon liittyy kaksi fundamentaalista kysymystä [13], [14]. Näitä on havainnollistettu myöhemmin kuvassa 9. Ensimmäinen kysymyksistä liittyy siihen, onko kädenjälkeä luova tuote tai palvelu korvaamassa jo markkinoilla olevaa tuotetta vai onko se täysin uusi

markkinoilla. Tuotteen ollessa uusi markkinoilla, tulee vertailu rakentaa nykyiseen tilanteeseen, jossa on käytössä joko uusi tuote tai vanha menetelmä. Jos kädenjälkeä tarjoava tuote kuitenkin korvaa jo markkinoilla olevan tuotteen, johtaa se seuraavaan fundamentaaliseen kysymykseen tuotteen tai palvelun kohdennuksesta: Kohdennetaanko tarjottu kädenjälkeä luova tuote tai palvelu jollekin tietylle ja tunnistetulle käyttäjälle tai edunsaajalle? Näiden kysymysten perusteella saadaan määritettyä vertailutaso, johon kyseistä vaihtoehtoista tuotetta verrataan.



Kuva 8. Hiilikädenjäljen määrittämisen vaiheet. Muokattu lähteestä [14].

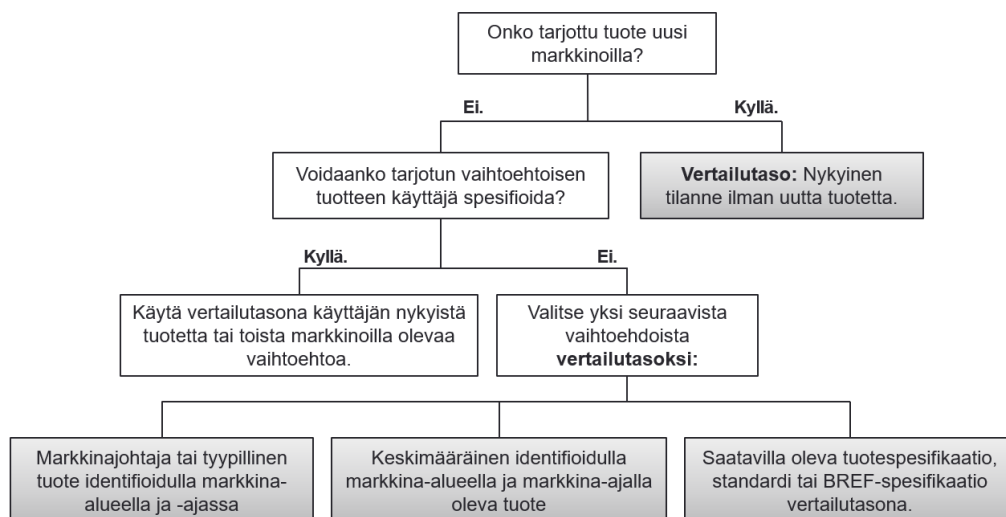
Toinen vaihe perustuu LCA-vaatimukseen ja sen pohjana ovat elinkaariarvioinnin standardit sekä hiilijalanjäljen ISO 14067 –standardi [14]. Askeleessa 4 määritellään toiminnallinen yksikkö, joka asettaa perusteet kvantifioitavalle systeemille. Perustana tässä on ISO 14040-44 –standardeissa määritetyt veloitteet toiminnallisen yksikön määrittelylle. Näistä on aiemmin mainittu kappaleessa 3.1. Askeleen 5 tavoitteena on määrittellä järjestelmän rajat eli mitä kaikkea yksikköprosessin tulee sisältää. Kädenjäljen määrittelyssä järjestelmään on kuuluttava tuotteen käytön aikaiset näkökulmat sekä monissa tapauksissa myös elinkaaren loppu tulee huomioida. Tarkemmin näistä järjestelmän rajojen asettamisesta puhutaan standardeissa ISO 14040, ISO 14044 ja ISO 14067, joita on käsitelty kappaleissa 3.1 ja 3.2. Askeleessa 6 määritellään laskentaan tarvittava data ja lähteet. Kädenjäljen tapauksessa on kaksi erilaista lähtökohtaa, joiden perusteella tarvittava data kerätään: Tarjotun tuotteen todellinen käyttäjä on tiedossa tai lopullista käyttäjää ei varmuudella tiedetä, mutta potentiaaliset käyttäjät voidaan identifioida.

Kolmas vaihe keskittyy hiilikädenjäljen kvantifioimiseen [13], [14]. Askeleessa 7 määritetään hiilijalanjäljet elinkaarien ajalta sekä tarjotulle ratkaisulle että vertailutason ratkaisulle. Optimaalisessa tapauksessa jalanjäljet sisältävät myös muita ympäristölle tärkeitä indikaattoreita kuin kasvihuonekaasupäästöt, kuten vesi- ja ympäristöjalanjälkien huomiointi. [14], [54]. Askel 8 koskee hiilikädenjäljen laskentaa, joka määritellään kahden jalanjäljen erotuksena. Kaavassa (1) kuvataan hiilikädenjäljen määrittämistä, jossa vertailutason hiilijalanjäljestä vähennetään tarjotun ratkaisun hiilijalanjälki.

$$Kädenjälki_{ratkaisu} = Jalanjälki_{vertailutason\ ratkaisu} - Jalanjälki_{kädenjälkeä\ luova\ ratkaisu} \quad (1)$$

jossa ratkaisun kädenjälki tarkoittaa tarjotun tuotteen tai palvelun kädenjälkipotentiaalia käytössä ja asiakkaalle kädenjälkeä luovan ratkaisun jalanjälki tarkoittaa sen käytössä toteutuvaa jalanjälkeä [14]. Positiivinen ratkaisu kuvaa tilannetta, jossa tarjotun ratkaisun tuottamat kasvihuonekaasut ovat pienemmät kuin vertailutason tilanteen kasvihuonekaasupäästöt eli se kuvastaa saavutettuja hyötyjä vertailutilanteeseen nähden. Negatiivinen arvo puolestaan kuvaa tilannetta, jossa tarjotun ratkaisun avulla syntyy vertailutilanteeseen nähden enemmän kasvihuonekaasupäästöjä eikä päästövähennyksiä saavuteta lainkaan.

Kädenjälkioppaan neljäs osa käsittelee kädenjälkeen liittyvää viestintää [13], [14]. Askeleen 9 tavoitteena on identifioida viestinnän kannalta keskeisimmät indikaattorit hiilikädenjäljen osalta. Askeleen 10 tavoitteena on suorittaa kädenjäljelle kriittinen arviointi, jonka avulla on mahdollista todentaa laskentaprosessi ja saadut tulokset ja askeleen 11 tavoitteena on viestiä saaduista tuloksista ja niiden rajauksista läpinäkyvästi.



Kuva 9. Vertailutason määrittäminen. Muokattu lähteestä [14].

VTT:n ja LUT:n -kädenjälkimallin voidaan katsoa olevan yhteensopiva EU:n Green Claims -direktiiviehdotuksessa esitettyjen vaatimusten kanssa [14], [33], [57], [58]. Näitä

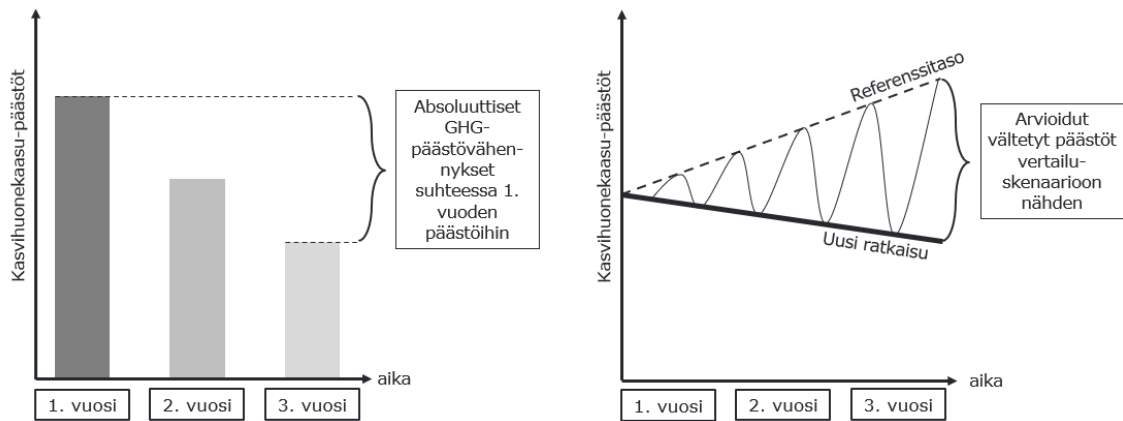
perusteita ovat direktiivin vaatimukset elinkaarinäkökulmasta, uusimman saatavilla olevan tiedon hyödyntämisestä, uuden ratkaisun vertaamista nykytilanteen ratkaisuun, ohjeet merkityksellisten ympäristövaikutusten huomioimiseen sekä siihen, ettei laskennassa saa ottaa huomioon kasvihuonekaasupäästöjen kompensointia [14], [57]. Kuitenkin kädenjälkilaskennan toteuttajan tulee aina tehdä oikeudenmukaisimmat ja realistisimmat valinnat laskennassa, vaikka metodologia pohjautuukin ISO-standardeihin.

VTT:n ja LUT:n luomalle hiilikädenjälkimenetelmän soveltamiselle löytyy kirjallisuudesta muutamia esimerkkejä. Sitä on sovellettu esimerkiksi Nesteen uusituvan dieselin [48] sekä Metso Oyj:n metallien ja mineraalien jalostusteknologioiden hiilikädenjäljen laskeamiseen [17]. Lisäksi Remeo Group Oy on soveltanut menetelmää määrittäessään kierätettyjen polttoaineiden ja materiaalien hiilikädenjälkeä [17]. Näiden esimerkkien avulla voidaan osoittaa, että VTT:n ja LUT:n luomaa kädenjälkimenetelmää voidaan soveltaa myös toimialariippumattomasti hyvin vaihtelevissa tarkastelukohteissa. Lakanen et al. on myös soveltanut kädenjälkimenetelmää Helsingin kaupungin autokannan ilmansaastevähennyspotentiaalin arviointiin [59]. Tämän lisäksi Lakanen et al. on arvioinut myös Espoon kaupungin hiilikädenjälkeä sähköautojen latausasemien näkökulmasta tarkasteltuna [50]. Mallia on myös sovellettu seitsemän suuren yrityksen keskuudessa, joiden käyttäjäkokemuksia mallin hyödynnettävyydestä on kerätty Tuppuran et al. toteuttamassa kyselytutkimuksessa. Näiden yritysten nimiä ei kuitenkaan ole tarkemmin saatavilla. [60]

4.2.2 Guidance on Avoided Emissions

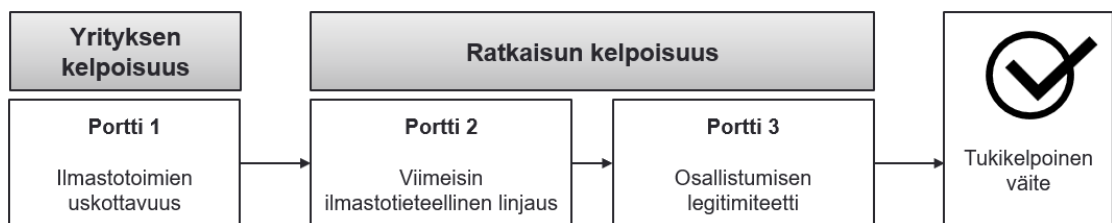
WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) on kehittänyt Guidance on Avoided Emissions -metodologian yhteistyössä NZI:n (Net Zero Initiative) kanssa vältettyjen päästöjen laskemiseen ja se perustuu GHG-protokollaan. Metodologian päätarkoitus on tarjota menetelmä, jolla voidaan arvioida ja vertailla uusien ratkaisujen nykyisiä ja potentiaalisia vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja siten edistää kehitystä kohti nettonollatavoitteita [10]. Vältetyt päästöt ovat siis ero kasvihuonekaasupäästöjen välillä, jotka tulisivat tapahtumaan uuden ratkaisun avulla ja niiden kasvihuonekaasupäästöjen välillä, jotka olisivat tapahtuneet ilman tarjottua ratkaisua koko arvoketjussa [10]. Tätä on havainnollistettu kuvassa 10. Metodologia antaa ohjeita kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen johtavien innovaatioiden vaikutusten mittaamiseen, arviointiin sekä vertailuun [10] ja sen fokuksena on absoluuttisten globaalien kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen yritysten kontribuutioiden avulla. Yleensä vältettyjen päästöjen konseptilla pyritään viestimään, mahdollistaako tuote tai palvelu saman toiminnon vähemmällä kasvihuonekaasupäästöillä ja se on tarkoitettu sekä tuotteille, palveluille, ratkaisuille, yrityksille että kaupungeille [10], [16]. Vältettyjen päästöjen avulla ei

voida kuitenkin alkaa tekemään väittämiä nettonollasaavutuksista [10], [33]. Kirjallisuudessa on niukasti esimerkkejä WBCSD:n vältettyjen päästöjen mallia soveltavista tarkastelukohteista. Kuitenkin Lundin yliopistossa tehdyssä maisterityössä on hyödynnetty WBCSD:n Guidance on Avoided Emissions –mallia PowerCell:n polttoainojärjestelmälle määritettäville vältetyille päästöille [61].



Kuva 10. Päästöjen vähentämisen ja vältettyjen päästöjen välinen ero.

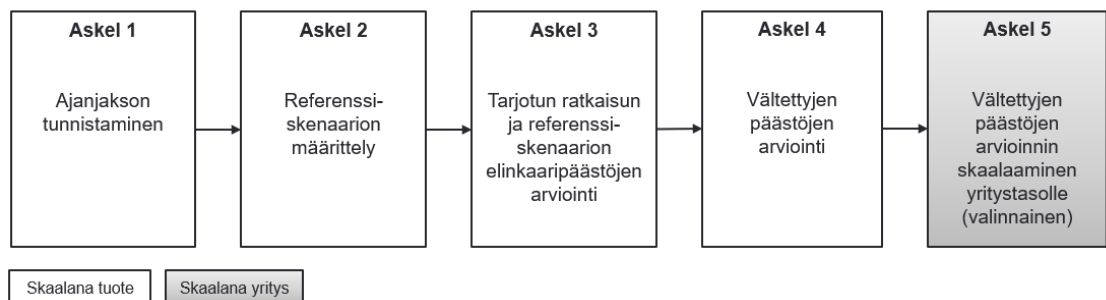
Vältetyistä päästöistä viestiminen käynnistyy kuvassa 11 esitettyjen kolmen kelpoisuus-kriteerin täyttämisestä, joilla voidaan varmistaa erityisesti väärinkäytösten välttäminen. Näistä ensimmäinen kriteeri kattaa yrityksen asettamat ilmastotavoitteet, jotka ovat yhdenmukaiset viimeisimmän olemassa olevan ilmastotieteen kanssa. Ilmastotavoitteiden tulee kattaa kaikki GHG-protokollan mukaiset luokat, scope 1–3. Lisäksi ilmastotavoitteiden tulee sisältää sekä pitkän, että lyhyen aikavälin tavoitteita ja mittareita, joilla edistymistä on mahdollista seurata. Toisen kriteerin mukaisesti tarjotulla ratkaisulla on oltava ilmastonmuutoksen hillitsemisen potentiaalia uusimman ilmastotieteen ja tunnustettujen lähteiden mukaan. Kriteeriin mukaisesti tarjottua ratkaisua ei myöskään saa suoraan soveltaa fossiilisiin polttoaineisiin liittyviin toimintoihin. Kolmannen kriteerin mukaisesti tarjotulla tuotteella tulee olla lisäksi suora ja merkittävä vaikutus hiilestä irtautumiseen.



Kuva 11. Kelpoisuus-kriteerit vältettyjen päästöjen hyväksyttävyyden vahvistamiseksi. Muokattu lähteestä [10].

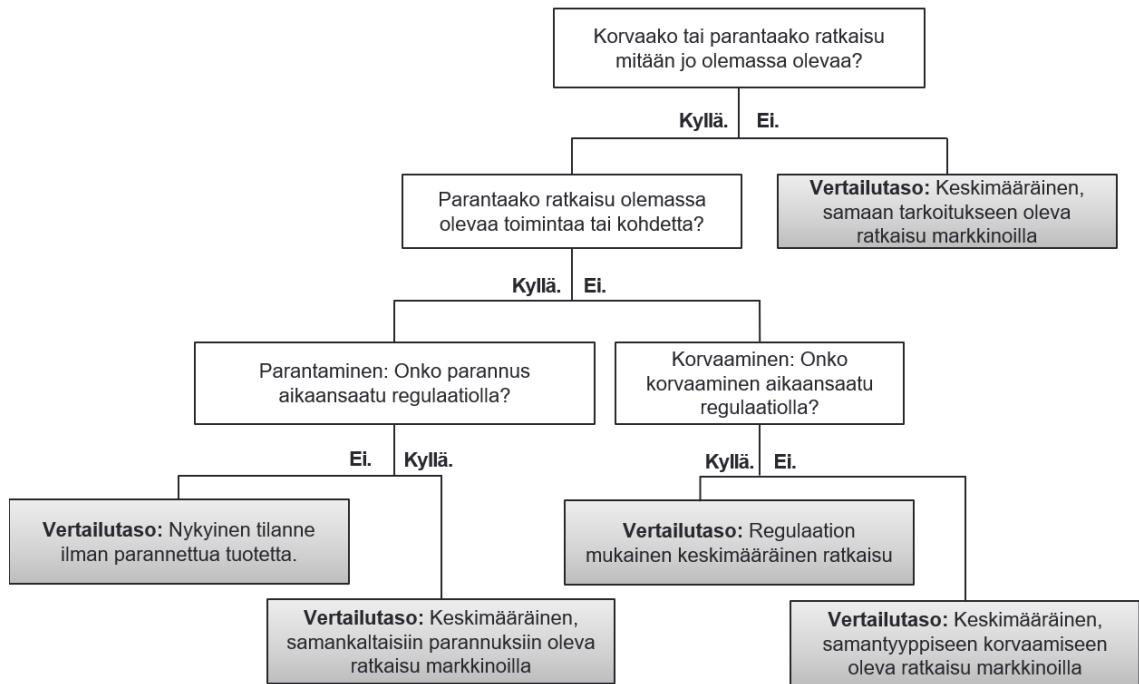
Vältettyjen päästöjen arviointi on jaettu metodologiassa viiteen eri askeleeseen kuvan 12 mukaisesti. Ensimmäisessä askeleessa tulee määrittää vältettyjen päästöjen rapor-

tointiaikataulu: koko elinkaaren ajalta kumuloituvat vältetyt päästöt myyntivuodesta katsoen (forward-looking avoided emissions) tai vuosittain arvioitavat ja raportoitavat vältetyt päästöt (year-on year avoided emissions) ratkaisun käyttöön ajalta. Toisessa askeleessa määritetään vertailutaso, jonka valintaa on havainnollistettu myöhemmin kuvassa 13. Vertailutason valinnassa tulisi välttää skenaariota, jossa vältettyjen päästöjen suuruutta liioiteltaisiin käytössä olevan ja tarjotun ratkaisun välillä. Kolmannessa askeleessa määritetään tarjotun ratkaisun ja vertailutason ratkaisun elinkaaren aikaiset päästöt. Arviot tehdään tilanteista, joissa ratkaisu on käytössä ja vertailutasosta, jossa uutta ratkaisua ei ole käytössä. Neljännessä askeleessa määritetään vältettyjen päästöjen suuruus vähentämällä vertailutason elinkaaren aikaisista päästöistä tarjotun ratkaisun kanssa tapahtuvat elinkaaren aikaiset päästöt. Viides askel laajentaa tuotekohtaisen vältettyjen päästöjen tarkastelun koko yrityksen mittakaavaan, jossa yritykset voivat arvioida vältetyt kokonaispäästönsä laskemalla yhteen kaikkien niiden tarjoamiensa ratkaisujen vältetyt päästöt, joille on toteutettu vaiheiden 1–4 mukaiset toimenpiteet. Näiden viiden askeleen lisäksi malli sisältää, taulukkoon 3 kootut, yhdeksän kohdan ohjeet vältettyihin päästöihin liittyvään raportoimiseen ja niistä viestimiseen.



Kuva 12. Vältettyjen päästöjen määrittämisen vaiheet. Muokattu lähteestä [10].

NZI:n mukaan yritysten yhteensopivuuden arvioiminen vähähiilisen talouden kanssa vaatii kolmen eri indikaattorin samanaikaista seuranta: yrityksen hiilijalanjäljen, vältettyjen päästöjen sekä hiilen poistojen seuranta [62]. Vältetyt päästöt kvantifioivat hyödyt, joita yritys tarjoaa omien tuotteidensa tai palveluidensa kautta vertailuskenaarioon verrattuna. Kuvassa 13 on havainnollistettu vertailutason valintaan liittyvää päätöksentekoa. Hiilen poistoihin puolestaan lukeutuvat yrityksen toimintaan kuuluvat hiilinielut, jotka voidaan edelleen jakaa sekä arvoketjun sisällä esiintyviin nieluihin, että arvoketjun ulkopuolisiin nieluihin. Vältetyt päästöt tulisi erottaa toisistaan sen perusteella, syntyvätkö ne arvoketjussa tuotteiden ja palveluiden myynnin kautta esiintyvistä päästöistä vai yrityksen rahoittamien toimenpiteiden seurauksena. [10]



Kuva 13. Vertailutason määrittäminen. Muokattu lähteestä [10].

Yksi menetelmän rajoitteista koskee kasvihuonekaasujen lisäpäästöjen (added emissions) käsitettä, jota metodologiassa ei ole käsitelty. Added emissions kuvaa tilannetta, jossa tarjotulla ratkaisulla saavutettavien kasvihuonekaasuvähenemien sijaan tuotetaan vertailutilannetta enemmän kasvihuonekaasupäästöjä. Lisäksi viherpesun välttämiseksi yrityksen on tärkeää kvantifioida se prosenttiosuus yrityksen liikevoitosta, joka tuottaa sille vältettyjä päästöjä. Lisäksi viestinnässä on tärkeää antaa realistiset ja rehelliset arviot vältettyjen päästöjen aikaansaamista hyödyistä ja viestiä myös toiminnasta aiheutuvasta hiilijalanjäljestä [10].

4.2.3 Metodologioiden välinen vertailu ja synteesi

Rungoltaan VTT:n ja LUT:n sekä WBCSD:n metodologiat ovat hyvin samankaltaisia, mutta vaikutukset arvoketjuissa syntyvät eri tavalla. Samankaltaisuus syntyy siitä, että molemmassa saavutettavat hyödyt lasketaan vertaamalla uutta ratkaisua vertailutasoon [10], [14], [17], jonka määrittely on koko metodologian kannalta kriittistä. Aivan kuten VTT:n ja LUT:n luomassa hiilikädenjäljen metodologiassa, myös vältettyjen päästöjen mallissa vertailutaso voi vaihdella eri markkinoilla. Vältettyjen päästöjen tapauksessa vertailutasona käytetään yleisintä markkinoilla olevaa tuotetta tai palvelua ja usein tämä vertailutaso määritellään maantieteellisten, ajallisten ja järjestelmän rajojen mukaisesti. [10], [14], [17]. Lisäksi molemmat metodologiat tarjoavat kvantitatiivista tukea positiivisten ilmastoväitteiden tekemiseen. Taulukkoon 3 on koottu metodologioiden suurimmat yhtäläisyydet ja erot.

Taulukko 3. VTT:n ja LUT:n sekä WBCSD:n metodologioiden vertailu.

	LUT & VTT Carbon handprint guide (2021)	WBCSD Guidance on Avoided Emissions (2023)
Perusta	ISO 14040-44, ISO 14067:2018	GHG Protocol Corporate Standards
Indikaattori	Ilmastonmuutos	Ilmastonmuutos
Vertailutaso	Valinta kuvassa 9	Valinta kuvassa 13
Vahvuudet	Ensisijaisesti viestintäväline Tukee positiivisten vaikutusten todistamisessa Tukee tuotekehitystä Laajennettavissa LCA-arviointiin	Keskittyy todellisiin päästövähennystoimenpiteisiin Kriteerit yrityksen kädenjälkiväitteille Estää kaksoislaskennan Apu päätösten erityisvaikutusten arvioinnissa Ei ota huomioon hiilinieluja
Puutteet	Ei kriteereitä sille, miksi yritys voi tehdä kädenjälkiväitteitä [33] Otaa huomioon hiilinielut	Ei sektorikohtaista ohjeistusta Ei huomioida muita kestävyystavoitteita Portin 2 kriteerille ilmastotieteellisistä linjauksista ei ole määrällistä indikaattoria (kuva 11)
Raportointi ja viestintä	Perustuu standardiin ISO 14026 Tulosten mahdollinen verifiointi	Raportoitava erillään hiilijalanjäljestä, hiilinieluista ja Ei voi käyttää hiilineutraaliväitteisiin Kuvaus vertailtavien tuotteiden elinkaarien aikaisista hiilijalanjäljistä Käytetty raportointiaikaväli Kelpoisuuslaitteiden täytyminen Vältettyjen päästöjen osuus kokonaisliikvaihdosta Tulosten mahdollinen verifiointi Identifioitujen negatiivisten sivuvaikutukset Mahdolliset elpymistoimet

LUT = Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT; VTT = Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy; WBCSD = World Business Council for Sustainable Development; LCA = life cycle assessment; ISO = International Organization for standardization; GHG = greenhouse gas

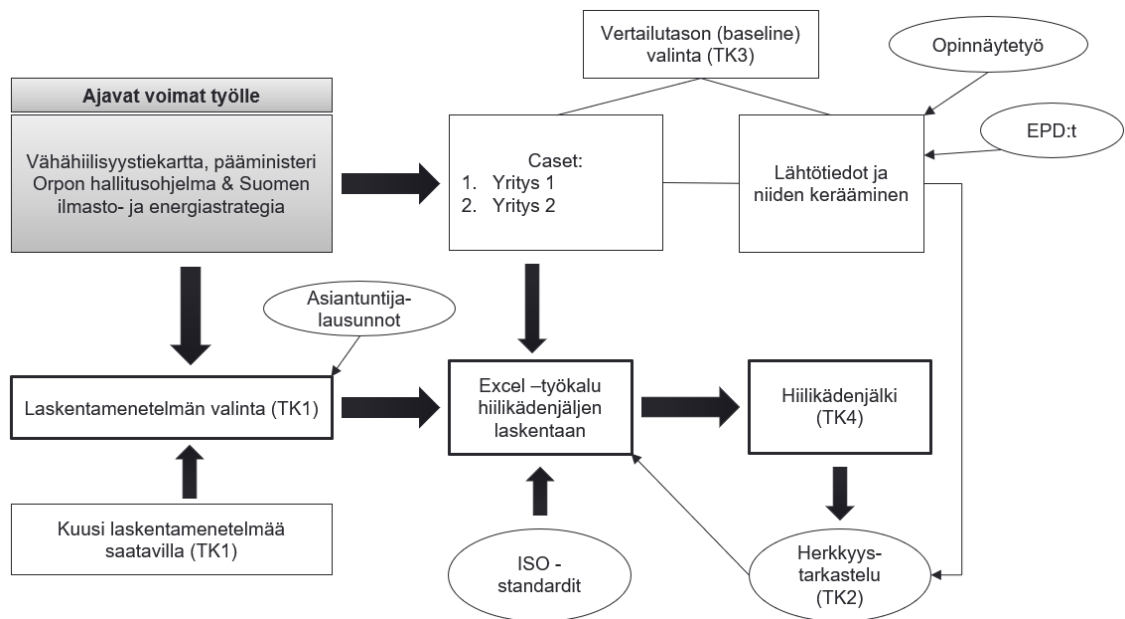
Suurimmat erot metodologioiden välillä ovat niiden käyttökohteissa – VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimalli on ensisijaisesti viestintäväline, kun taas Guidance on Avoided Emissions -malli keskittyy todellisiin päästövähennystoimenpiteisiin. Lisäksi raportoinnin ja viestinnän osalta metodologioiden välillä on suuria eroja, sillä Guidance on Avoided Emissions -mallissa raportointi- ja viestintä vaatimukset on määritetty VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallia yksityiskohtaisemmin.

5. AINEISTO JA MENETELMÄT

Tässä luvussa kuvataan tutkimuksen rakenne sekä syvennyttään esimerkitapausten hiilikädenjälkien yksityiskohtaiseen määrittämiseen. Hiilikädenjäljen laskennat on toteutettu molemmissa esimerkitapauksissa hyödyntäen VTT:n ja LUT:n vuoden 2021 hiilikädenjälkimallia. Luvussa kuvataan myös perusteet laskentametodologian valinnalle.

5.1 Tutkimuksen rakenne

Työllä on ollut kolme ajavaa voimaa: Teknologiateollisuuden vähähiilisyystiekartassa saadut tulokset toimialan kädenjälkipotentiaalista, pääministeri Orpon hallitusohjelman mukaiset linjaukset kädenjälkimetodologian edistämisestä yhdessä elinkeinoelämän kanssa sekä Suomen energia- ja ilmastostrategiassa esiin nostetut huomiot suomalaisten tuotteiden kädenjäljestä. Kuvassa 14 on havainnollistettu yksityiskohtaisemmin diplomityön tiedonhankintaprosessia tutkimuskysymyksiin perustuen. Laskentamenetelmän valinnassa keskeisessä roolissa ovat olleet asiantuntijoiden konsultoinnit [63], [64] sekä syvälinen tutustuminen olemassa oleviin metodologioihin.



Kuva 14. Diplomityön tiedonhankintaprosessi. TK viittaa tutkimuskysymyksiin.

Tarkasteltavat toimialat ja niitä edustavat yritykset ovat valikoituneet työhön mukaan niiden toisistaan merkittävästi poikkeavien päästöjakaumien takia. Tämän rajauksen perustana ovat Teknologiateollisuus ry:n vähähiilisyystiekartan päivityksessä syntyneet huomiot toimialojen päästörakenteista, joita on havainnollistettu aiemmin luvun 2.2 kuvassa 3. Suurimmat suorat päästöt eli scope 1-päästöt aiheutuvat metallin jalostuksesta

ja puolestaan suunnittelun ja konsultoinnin alalla suurimmat päästöt aiheutuvat epäsuorista päästöistä eli scope 3-päästöistä. Tällä rajauksella voidaan tarkastella hiilikädenjäljen laskentametodologian toimimista kahdessa toisistaan poikkeavassa tapauksessa: yritysten suurimpien päästökertymien syntyessä sekä scope 1- että scope 3-luokassa.

5.2 Laskentamenetelmän valinta

VTT:n ja LUT:n vuoden 2021 hiilikädenjälkimalli on valikoitu laskentamenetelmäksi, sillä se mahdollistaa tuotekohtaisen hiilijalanjäljen laskennan. Tässä työssä hiilijalanjälkilaskelmien perustana käytettiin ISO-standardeja 14067, 14044 ja 14040, joihin myös VTT:n ja LUT:n -hiilikädenjälkimalli pohjautuu. Valinta sovellettavan hiilikädenjälkimallin kohdalla tehtiin sen perusteella, että tuotekohtaisen hiilijalanjäljen määrittämisessä tyypillisin ja vakiintunein menetelmä alalla on edellä esitetyt ISO-standardit, kun taas organisaatiotason hiilijalanjälkeä määritettäessä GHG-protokollan mukainen scope 1–3 laskenta on vakiintunein menetelmä. Lisäksi ISO 14067:2018 on uusin saatavilla oleva tuotekohtaisen hiilijalanjäljen määrittämiseen liittyvä standardi. Metodologian valinnassa on myös huomioitu taulukossa 4 esitettyjen asiantuntijoiden näkemykset [63], [64].

Taulukko 4. Asiantuntijakonsultoinnit sovellettavan metodologian ja vertailutapojen valinnassa.

Asiantuntija	Yritys	Yhteydenottotapa
Sari Siitonen	OpenCO2net	Teams/Puhelin
Tiina Pajula	AFRY	Teams/sähköposti

Työssä keskeisinä tekijöinä ovat olleet tieteellisen lähestymisen ensisijaisuus ja kansainvälisiin sopimuksiin pohjaaminen. Lisäksi rajauksella koskien kansainvälisesti tunnettujen asiakirjojen soveltamista on pyritty parantamaan mahdollista vertailtavuutta eri tuoteryhmien sisällä standardin ISO 14067 mukaisesti. [41]

5.3 Tutkimuskohde 1: Suunnittelu ja konsultointi

Ensimmäinen tutkimuskohde käsitteli esimerkkitapausta suunnittelu- ja konsultointialalta ja tarkasteltavana yrityksenä oli Elomatic Consulting & Engineering Oy. Laskentaan mukaan otettu tarkastelukohde koskee varustamokonserni Viking Linen omistamaan matkustaja-autolautta M/S Viking Cinderellaan suunniteltuja neljää Elogrid –virtausohjainta [65], jotka asennettiin laivaan kuivatelakoinnin yhteydessä tammikuussa 2024 [65], [66], [67], [68]. Tällä hetkellä M/S Viking Cinderella liikennöi Helsingistä Maarianhaminan kautta Tukholmaan kulkevalla reitillä [65]. Hiilikädenjäljen arvo määritettiin näille Elogrid

–virtausohjaimille, jotka Elomatic Oy on suunnitellut ja valmistuttanut [66], [67]. Kuvassa 15 on havainnollistettu VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin mukaista kädenjäljen määrittämistä mallin vaiheiden 1–3 mukaisesti.



Kuva 15. Hiilikädenjäljen määrittämisen vaiheet VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin mukaisesti.

Elogrid –virtausohjaimet ovat energiasäästöjä mahdollistava ratkaisu ohjauspotkurit sisältäville laivoille ja niillä on tarkoitus maksimoida kohteen energiatehokkuutta ja minimoida merenkulun ympäristövaikutuksia. Ratkaisut räätälöidään kuhunkin kohteeseen erikseen käyttämällä hyväksi laskennallista virtausdynamiikkaa (CFD), jonka avulla tarjottu ratkaisu saadaan mukautettua kohteen rungon muodon ja toiminnallisten ominaisuuksien mukaan. [69], [70] Lisäksi CFD-mallinnuksen avulla voidaan optimoida kohteen hydrodynaamista suorituskykyä [71]. Hiilikädenjäljen näkökulmasta tarkasteltuna Elogrid –virtausohjainten yksi merkittävimmistä eduista on aluksen polttoainetehokkuuden parantaminen [69], joka on myös VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin mukainen tapa kasvattaa kädenjälkeä [14], [48]. Virtausohjaimet asennetaan ohjauspotkurin tunnelin aukoihin, jolloin hyötyjä saavutetaan sekä tunneleiden aiheuttaman lisävastuksen pienentämisessä laivan ollessa liikkeessä että sivutyöntövoiman parantamisessa potkureita käytettäessä [69], [70]. Kuvissa 16 ja 17 on havainnollistettu tilannetta, jossa Elogrid –virtausohjaimet ovat asennettuna M/S Viking Cinderellaan.



Kuva 16. Elogrid -virtausohjaimet asennettuna M/S Viking Cinderellaan, lähikuva [66].

Referenssitapauksina saavutetuille ympäristöhyödyille ovat muun muassa Viking XPRS, Viking Line M/S Gabriella ja DFDS A/S:n operoima MS Crown Seaways –autolautta, joilla Elogrid –virtausohjaimet ovat osoittaneet parantunutta suorituskykyä sekä tärinän vähentämisessä, ohjailtavuudessa että erityisesti polttoainesäästöissä [69], [70]. Viking Line M/S Gabriellan tapauksessa on mitattu aluksen tärinän vähentyneen noin 12 % ja M/S Viking XPRS:n polttoaineen kulutuksen on laskettu alenevan noin 2 % [70], [72].



Kuva 17. Elogrid -virtausohjaimet asennettuna M/S Viking Cinderellaan [66].

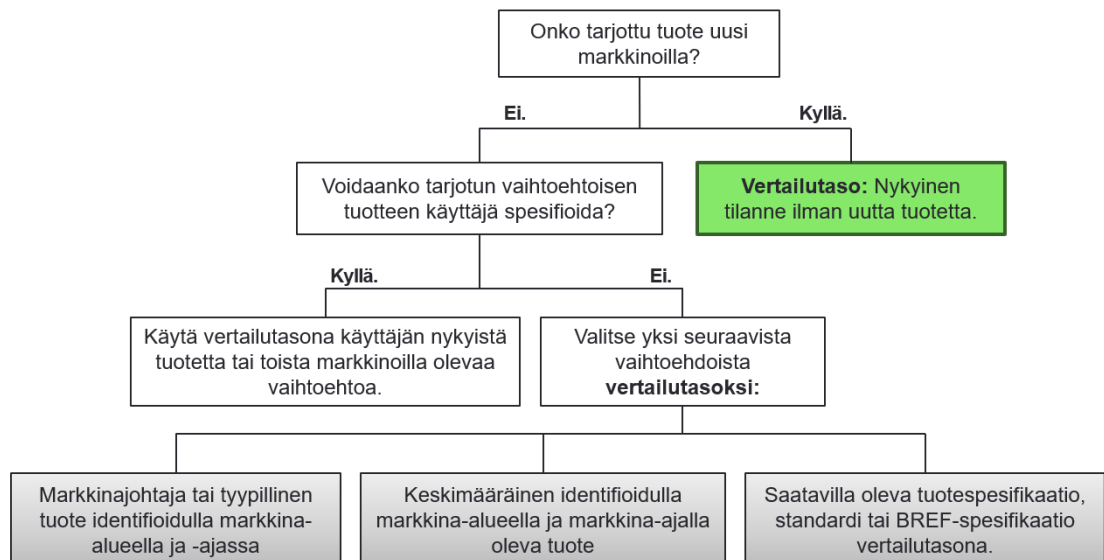
Tarkastelu aloitettiin laskennalla koskien Elogrid –virtausohjainten tuotekohtaisten hiilijalanjälkien määrittämistä, joka toteutettiin ISO standardien 14040, 14044 ja 14067 mukaisesti. Kuvassa 18 on havainnollistettu kaikki vaiheet, jotka on otettu tarkasteluun mu-

kaan. Vaiheet A1-A5, C3-C4 sekä D koskevat Elogrid- virtausohjainten elinkaaren aikaisia päästöjä ja vaiheet B1 sekä B6 koskevat M/S Viking Cinderellan käytön aikaisia polttoainepäästöjä. Elogrid- virtausohjainten hiilijalanjälki määritettiin kahdella skenaariolla: ensimmäiseksi koskemaan ainoastaan vaiheita A1-A3 (S1), joka on standardin ISO 14067:2018 mukaisesti osittainen hiilijalanjälki. Toiseksi määritettiin skenaario, jossa huomioidaan vaiheet A1-A5, C3-C4 ja D (S2).

Tuotantovaihe			Rakennusvaihe	Käyttövaihe								Elinkaaren loppu				Kierrätys
Raaka-aineiden hankinta	Kuljetus tuotantovaiheessa	Tuotanto	Kuljetus portilta työmaalle	Asennusvaihe	Käyttö	Kunnossapito	Korjaus	Korvaaminen	Peruskorjaus	Toiminnallinen energian käyttö	Toiminnallinen veden käyttö	Purkutytöt	Kuljetus	Jätteiden käsittely	Hävittäminen	Kierrätys, hyötykäyttö- ja kierrätyspotentiaali
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1

Kuva 18. Elogrid -virtausohjainten elinkaaren aikaiset keskeisimmät päästöt.

Vertailutason valinta on tehty VTT:n ja LUT:n mallin mukaisesti: Kyseessä on markkinoilla oleva uusi tuote, jolle ei löydy referenssiä tähän M/S Viking Cinderellaan asennettuna, joten vertailutasona käytetään asiakkaan nykytilannetta ilman tarjottua ratkaisua. Valintaa tässä tarkastelukohteessa on havainnollistettu kuvassa 19.



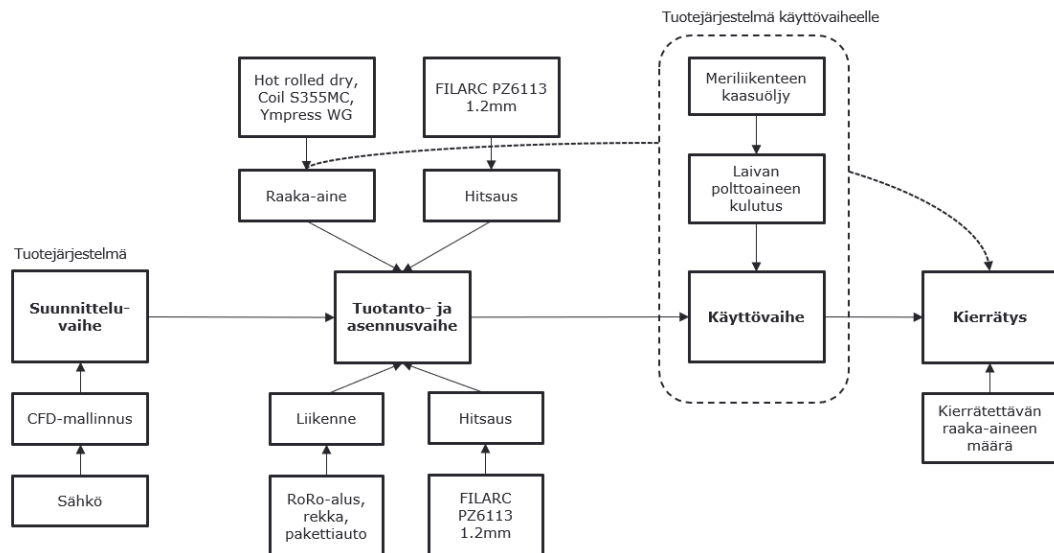
Kuva 19. Vertailutason valinta Elogrid- virtausohjainten tapauksessa.

VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin vaiheessa 4 keskitytään tuloksista viestimiseen ja kädenjäljen kriittisen tarkastelun pohtimiseen. Näihin vaiheen 4 vaatimukseen vastataan sekä luvuissa 5.3.1, 5.3.2 että luvussa 6.

5.3.1 Hiilikädenjälki – Elinkaariarviota koskevat vaatimukset

Hiilikädenjälki -mallin vaiheessa 2 määritellään elinkaariarvioita koskevat vaatimukset, joka aloitettiin toiminnallisen yksikön määrittelyllä. Tässä tarkastelukohteessa toiminnallinen yksikkö on laivan käyttöpäivien määrä vuodessa, sillä hiilikädenjälkeä tarkasteltaessa toiminnallisen yksikön on oltava sama sekä vertailutason, että tarjotun ratkaisun tilanteessa [14], [41]. Laivan polttoainekulutus on laskennassa muuttuja, josta kasvihuonekaasupäästöt ovat suoraan riippuvaisia.

Hiilikädenjäljen tarkastelu tehtiin kahdella erilaisella skenaariolla koskien järjestelmärajajoja, S1- ja S2-skenaariolla, joiden rajaukset avattiin aiemmin luvussa 5.3. S2-skenaariossa Elogrid –virtausohjainten inventaarioanalyysi jaettiin kuvan 20 mukaisesti neljään vaiheeseen, joista oli riittävästi tietoa saatavilla: suunnittelu-, tuotanto-, asennus- ja käyttövaiheeseen sekä kierrätykseen. Kunkin vaiheen hiilijalanjäljen laskentaa avataan tarkemmin seuraavassa alaluvussa 5.3.2. Valittavan tuotejärjestelmän rajat tarjotun ratkaisun tilanteessa on määritetty standardin ISO 14067 mukaisesti niin, että vähintään 80 % Elogrid -virtausohjainten elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä on huomioitu laskentaan mukaan. S1-skenaariossa huomioitiin kuvan 20 osalta suunnitteluvaihe, tuotanto- ja asennusvaiheesta raaka-aineet, sekä käyttövaihe, jotka muodostavat osittaisen hiilijalanjäljen. Vertailutason tilanteessa järjestelmärajat kattoivat ainoastaan käyttövaiheen, jossa huomioitiin laivan polttoaineen kulutus samalla polttoaineoletuksella kuin tarjotun ratkaisun tilanteessa.



Kuva 20. Järjestelmärajat tarjotun ratkaisun tilanteessa (S2).

Tarvittava data kerättiin Elogrid -virtausohjainten koko suunnittelun, valmistuksen ja kierrätyksen sekä laivan polttoaineen kulutuksen osalta niin vertailutason tilanteessa, kuin tarjotun ratkaisun kanssa ennustettavissa tilanteissa.

5.3.2 Hiilikädenjälki - Kvantifiointi

Hiilikädenjälki -mallin vaihe 3 koskee valitun tuotteen tai palvelun hiilikädenjäljen kvantifiointia. Tähän kuuluu sekä vertailutason että tarjotun ratkaisun kanssa toteutuvan tilanteen hiilijalanjälkien kvantifiointi, joiden perusteella määritetään tarjotun ratkaisun hiilikädenjälki luvussa 4.2.1 esitetyn kaavan (1) mukaisesti. Vertailutason hiilijalanjäljen sekä tarjotun ratkaisun tilanteen hiilijalanjäljen laskennoissa käytetyt päästökertoimet on koottu taulukkoon 5.

Päästökertoimia valittaessa hyödynnettiin standardin ISO 14067:2018 mukaisesti vertaisarvioituja julkaisuja tai päästökertoimia kansallisista inventaarioista, jotka ovat viranomaisten kelpuuttamia. Tällaisen tieteellisen lähestymistavan ja kansainvälisesti tunnettujen asiakirjojen soveltamisen avulla voidaan parantaa tulosten vertailtavuutta tuoteryhmän sisällä. [41] Useat päästökertoimista perustuvat sekundaaritietolähteisiin, jotka ovat olleet julkisesti saatavilla. DEFRA:n tietokantaa [73] hyödynnettiin liikennesektorin päästökertoimille, koska se on alalla yleisesti käytetty, laajin avoimesti saatavilla oleva tietokantalähde. Lisäksi teräksen tuotantoon, loppusijoitukseen ja kierrätykseen liittyen on hyödynnetty valmistajan ilmoittamia päästökertoimia tuotteen EPD:stä (Environmental Product Declaration). Työssä hyödynnetty Tata Steelin EPD on voimassa 2/2029 saakka ja se pohjautuu standardeihin ISO 14021, 14040 ja 14044 [74]. Sähkötuotannon osalta on hyödynnetty Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin ilmoittamaa keskimääräistä sähkön tuotannon päästökeroa [75]. Tarkastelussa ei otettu huomioon maankäytön muutoksia, koska niistä ei ollut riittävästi lähtötietoja saatavilla.

Taulukko 5. Laskennassa käytetyt päästökertoimet.

Parametri	Päästökerroin	Yksikkö	Lähde
Tata Steel (A1-A3)	2,12	t CO ₂ e / t teräs	[74], [76]
Tata Steel (C3)	0,00	t CO ₂ e / t teräs	[71]
Tata Steel (C4)	0,05	t CO ₂ e / t teräs	[71]
Tata Steel (D)	-1,38	t CO ₂ e / t teräs	[71]
Puoliperävaunurekka (3,5–33 t) (diesel) (AVG)	0,11311	kg CO ₂ e/ km	[73]
RoRo-alus	0,05159	kg CO ₂ e/ km	[73]
Pakettiauto (AVG)	0,61643	kg CO ₂ e/ km	[73]
MAG täytelankahitsaus	0,7	kg CO ₂ e / kg hitsi	[77]
MGO	3,206	kg CO ₂ e / kg tuotetta	[78]
Sähköntuotanto (kulutettu)	0,04	g CO ₂ e / kWh	[75]

AVG = average (keskiarvo); MGO = Marine Gas Oil; RoRo = roll on – roll off; LCA = life cycle assessment; MAG = Metal Active Gas; kWh = kilowattitunti; Tata Steel = Tata Steel Ltd

Vertailutason hiilijalanjälki toiminnallista yksikköä kohden määritettiin tarkastelemalla M/S Viking Cinderellan vuoden 2024 kuivatelakointia edeltävää päiväkohtaista polttoainekulutusta ja tähän vaadittavat lähtötiedot on koottu taulukkoon 6. Tarkasteltavaksi ajanjaksoksi valittiin 1 vuosi, sillä tällä aikavälillä toimintaympäristön voidaan olettaa pysyvän vakiona sekä laivan käyttämän polttoaineen, että mahdollisten muiden laivan energiatehokkuuteen vaikuttavien tekijöiden kautta, jolloin saadut tulokset pysyvät vertailukelpoisina ja voimassaolevina. Laivan ja Elogrid –virtausohjainten käyttöä on kuitenkin arvioitu 20 vuotta eteenpäin nykyhetkestä, jolloin hiilikädenjäljen todellinen arvo määritettäisiin laskemalla sen kumulatiivinen vaikutus koko käyttöajan ajalta. Lopullisen hiilikädenjäljen suuruus saadaan siis suorittamalla vuosittain hiilikädenjäljen laskenta kunkin ajankohdan toimintaympäristössä ja yhteen laskemalla nämä arvot koko käyttöajan ajalta.

Taulukko 6. Toiminnallisen yksikön lähtöarvot.

Parametri	Lähtöarvo	Yksikö	Lähde
Tarkastelu-aika	1	a	Arvio
Käyttöaika (arvio)	20	a	[68]
Käyttöaika (M/S Viking Cinderella)	350	vrk/a	[68]
Polttoaineen kulutus (vertailutaso)	16,69	t/vrk	[68]

M/S Viking Cinderellan käyttövaiheen hiilijalanjälkeä tarjotun ratkaisun, neljän Elogrid –virtausohjaimen kanssa, tarkasteltiin kahdessa osassa. Ensin määritettiin Elogrid –virtausohjainten osittainen hiilijalanjälki (S1) ja hiilijalanjälki (S2) ISO-standardien 14040, 14044 ja 14067 mukaisesti, niin että vähintään 80 % tuotteen hiilijalanjäljen muodostavasta kokonaisuudesta huomioitiin tarkasteluissa. Elogrid -virtausohjainten hiilijalanjäljen järjestelmärajoiden määrittämisessä on ollut apuna Elomaticin opinnäytetyöntekijä [68], joka on kirjoittanut opinnäytetyönsä Elogrid -virtausohjainten hiilijalanjäljen määrittämisestä [79]. Tässä työssä käytetyt lähtöarvot ovat sekundaaritietoa, sillä ne on saatu opinnäytetyöhön tehdyn tarkastelun pohjalta. Toiseksi tarkasteltiin M/S Viking Cinderellan polttoainekulutuksen hiilijalanjälkeä asennettujen Elogrid -virtausohjainten kanssa. Tähän lähtötiedot on saatu Elomaticin asiantuntijalta [66].

Tuotteen suunnitteluvaiheessa on huomioitu ainoastaan CFD-laskennan vaatima sähköteho, sillä muista suunnitteluvaiheen aikaisista päästöistä ei ole riittävästi tietoa saatavilla, eikä luotettavaa laskentaa voida näiden osalta tehdä. CFD-laskennan aikainen

energiankulutus kattaa kuitenkin merkittävimmän osan suunnitteluvaiheen energiankäytöstä, jolloin muut suunnitteluvaiheen aikaiset syötteet on perusteltua rajata tarkastelun ulkopuolelle. Laskennan lähtöarvot on koottu taulukkoon 7.

Taulukko 7. Suunnitteluvaiheen lähtöarvot S1- ja S2-skenaarioissa toiminnallista yksikköä kohden neljälle Elogrid-virtausohjaimelle.

Parametri	Lähtöarvo	Yksikkö	Lähde
CFD-laskenta (teho)	4	kW	[68]
CFD-laskenta (aika)	30	vrk	[68]
CFD-laskenta (käyttöaika)	24	h/vrk	[68]

Tuotanto- ja asennusvaiheessa on huomioitu tuotteen valmistuksesta aiheutuvat päästöt raaka-aineen valmistuksen ja hitsauksen osalta sekä tuotteen logistiikasta aiheutuneet päästöt. Muut mahdolliset tuotanto- ja asennusvaiheen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt on rajattu tarkastelusta pois lähtötietojen puutteellisuuden takia. Maalauksesta syntyvien VOC-päästöjen osuus kokonaisuudessa on vähäinen ja niiden hiilidioksidiekvi-valentin määrittäminen on haasteellista. Tästä syystä niitä ei ole sisällytetty laskentaan. Elogrid -virtausohjaimet on valmistettu Hollannissa Maastrichin tehtaalla Tata Steelin tuottamasta Ympress S355MC -teräksestä kuvan 20 mukaisesti. Elogrid -virtausohjainten raaka-aineiden hankinnasta syntyneet kasvihuonekaasupäästöt laskettiin ostetun raaka-aineen perusteella, vaikka ostetusta raaka-aineesta syntyikin tuotantovaiheessa merkittävästi hukkamateriaalia, jonka oletettiin menevän suoraan kierrätykseen. Raaka-aineen jakauma hukkamateriaalin ja tuotteiden välillä on koottu taulukkoon 10. Tuotanto- ja asennusvaiheessa käytettäväksi hitsausmenetelmäksi valittiin MAG-täytelankahitsaus, jonka kulutus on koottu molempien vaiheiden osalta taulukkoon 8.

Logistiikan päästöjä määritettäessä tarkastelussa otettiin huomioon ainoastaan kuljetusmatkoilla syntyneet kasvihuonekaasupäästöt, eikä laskennassa huomioitu paluumatkoja puutteellisten lähtötietojen takia. Logistiikan osalta jätettiin myös huomioimatta valmistus- ja asennuspaikoilla tapahtuva sisäinen logistiikka lähtötietojen puutteellisuuden takia. Lisäksi sen arvioitiin olevan kokonaisuuteen nähden hyvin merkityksetön. Laskennassa käytetyt lähtöarvot ja tuotteen valmistus- ja asennusvaiheen raaka-aineet on esitetty taulukossa 8. Taulukossa merkintä S2 tarkoittaa, että kyseiset lähtöarvot on huomioitu ainoastaan S2-skenaariossa. Logistiikan päästöjä laskettaessa kunkin kuljetun reitin matkalta on laskettu jyvitetty suorite koskien Elogrid -virtausohjaimia standardin ISO 14083 mukaisesti [80]. Taulukossa 9 ilmoitetut kuljetusmatkat RoRo-aluksella, rekka-autolla ja pakettiautolla on ilmoitettu kuljettujen matkojen kokonaispituutena kyseisellä

kuljetusmenetelmällä. RoRo-aluksella ja rekka-autolla kuljetukset hoidettiin yhdellä lastilla, mutta pakettiautoilla kuljetukset hoidettiin erillisinä lasteina kullekin Elogrid -virtausohjaimelle. Kuljetut matkat on määritetty tieliikenteen osalta Google Maps -karttapalvelua hyödyntämällä [81] ja merimatkan osalta Sea Distance -karttapalvelua hyödyntämällä [82], jonka hyödyntämiseen saatiin asiantuntijalta suositus [63].

Taulukko 8. Tuotanto- ja asennusvaiheen lähtöarvot S1- ja S2-skenaarioille toiminnallista yksikköä kohden neljälle Elogrid-virtausohjaimelle.

Parametri	Lähtöarvo	Yksikkö	Lähde
Ostettu raaka-aine	5,5	t	[68]
Elogrid keskiarvopaino	0,706	t	[68]
Elogridien määrä	4	kpl	[68]
Kierrätettävän teräksen määrä (S2)	5,5	t	[68]
Tarkastelu-aika	1	a	[68]
Käyttöaika (arvio)	20	a	[68]
Käyttöaika	350	vrk/a	[68]
Hitsausaineen määrä (valmistus) (S2)	1,728	t	[68]
Hitsausaineen määrä (asennus) (S2)	0,288	t	[68]

Taulukko 9. Logistiikan lähtöarvot S2-skenaariolle toiminnallista yksikköä kohden neljälle Elogrid-virtausohjaimelle.

Parametri	Lähtöarvo	Yksikkö	Lähde
Kuljetus (rekka) Maastricht – Antwerpen, satama Turku, satama – Teräspalvelukeskus, Naantali Teräspalvelukeskus, Naantali – Lasakeskus, Laitila	258,1	km	[81]
Kuljetus (pakettiauto) Laserkeskus, Laitila – Koneistus, Salo Koneistus, Salo – Synkronex, Pansio Synkronex, Pansio – Teollisuusmaalaamo, Masku Teollisuusmaalaalo, Masku – Asennuspaikka, Naantali	403,5	km	[81]
Kuljetus (RoRo-alus) Antwerpen, satama – Turku, satama	2221	km	[82]

Standardin ISO 14067 mukaisesti käyttövaiheen katsotaan alkavan, kun ratkaisun käyttäjä ottaa tuotteen haltuunsa ja päättyvän, kun tuote on valmis kierrätettäväksi [41]. Käyttövaiheessa tarkasteltiin matkustaja-autolautta M/S Viking Cinderellan polttoainekulutusta Elogrid –virtausohjainten kanssa. Käytettävänä polttoaineena oletettiin olevan kuvan 20 mukaisesti meriliikenteen kaasuöljy (Marine Gas Oil, MGO), joka täyttää MARPOL-yleissopimuksen ja EU:n lainsäädännön tämänhetkiset vaatimukset rikkipitoisuuden osalta (0,1 %) [78], [83], [84]. Staattisen CFD-mallinnuksen avulla saaduilla tuloksilla potentiaalisten polttoainesäästöjen arvioitiin olevan M/S Viking Cinderellan tapauksessa 1,5–2,5 % tyynessä vedessä. Todellista toteutuvaa polttoainesäästöä on kuitenkin vaikea määrittää, sillä staattisessa CFD-laskennassa ei oteta huomioon erilaisia reaaliolosuhteiden muuttujia ja epävarmuustekijöitä [66], [85]. CFD-laskenta voidaan kuitenkin toteuttaa myös muuttuviin olosuhteisiin, mutta tulokset ovat voimassa ainoastaan valitun tarkasteluhetken mukaisissa olosuhteissa. Lisäksi haasteita todellisen polttoainekulutuksen vähenemisen arviointiin tuo laivan reitin muutos Tukholma-Maarianhamina liikenteestä Helsinki-Tukholma liikenteeseen. Viking Linen Sustainability Managerin mukaan laivan vertailukelpoinen polttoainekulutus on kuitenkin vähentynyt kokonaisuudessaan 6,4 % kuivatelakoinnin jälkeen [60]. CFD-laskennan avulla saadut päiväkohtaiset polttoainesäästöt on koottu taulukkoon 10, jonne on myös listattu M/S Viking Cinderellan päiväkohtainen polttoainekulutus vertailutason tilanteessa.

Taulukko 10. Neljän Elogrid –virtausohjaimen vaikutus toiminnallisen yksikön polttoainekulutukseen tarjotun ratkaisun tilanteessa.

Parametri	Lähtöarvo	Yksikö	Lähde
Polttoaineen kulutus (vertailutaso)	16,69	t/vrk	[66], [68]
Polttoaineen säästöpotentiaali - 1,5 %	0,25	t/vrk	[66], [68]
Polttoaineen säästöpotentiaali - 2,0 %	0,33	t/vrk	[66], [68]
Polttoaineen säästöpotentiaali - 2,5 %	0,42	t/vrk	[66], [68]

S1-skenaariossa elinkaaren loppua ei huomioitu lainkaan, sillä kierrätysvaiheen päästöjen allokointi on hyvin haasteellista. S2-skenaariossa Elogrid –virtausohjainten elinkaaren loppua tarkasteltiin kategorioiden C3-C4 ja D osalta. Tata Steelin valmistaman teräksen EPD:n mukaan 95 % materiaalista voidaan hyödyntää kierrättämiseen ja 5 % materiaalista menee loppusijoitukseen. EPD:n mukaisesti kategorian D päästökerroin on negatiivinen, joka tarkoittaa sitä, että kierrätyksen avulla neitseellisen teräksen käyttöä onnistutaan vähentämään. [74] Kategorian D huomioiminen siis pienentää saatavien Elogrid –virtausohjainten hiilijalanjälkeä suhteessa tarkasteluun, jossa otetaan huomioon ainoastaan kategoriat A1-A3. Haasteeksi kierrätysvaiheen kasvihuonekaasupäästöjen

allokoinnissa nousee kaksoislaskennan riski: voidaanko kierrätysmateriaalista valmistetusta tuotteesta laskea kierrätyksen antamia hyötyjä myös elinkaaren loppuvaiheessa. Tästä syystä tarkastelu tehtiin myös tilanteelle, jossa elinkaaren loppua ja kierrätysvaihetta ei oteta laskennassa huomioon. Taulukkoon 11 on koottu kierrätyksen laskentaan tarvittavat lähtötiedot.

Taulukko 11. Kierrätysvaiheen lähtöarvot S2-skenaariolle toiminnallista yksikköä kohden neljälle Elogrid-virtausohjaimelle.

Parametri	Lähtöarvo	Yksikö	Lähde
Ylimäärä teräksen massa (raaka-aine)	2,68	t	[68]
Elogrid- virtausohjainten massa	2,82	t	[68]
Kierrätettävän teräksen massa	5,225	t	[68]
Loppusijoitettavan teräksen massa	0,275	t	[68]

Hiilikädenjäljen määrittämisen lisäksi Elogrid –virtausohjaimille tehtiin taloudellisen takaisinmaksuajan tarkastelu kolmella eri skenaariolla. Skenaarioissa hyödynnettiin “Rotterdam Bunker Prices” -sivustolla olevaa MGO:n hintatilastoa ja valittiin kolme eri tasoa, jolla hinnan oletettiin tarkastelujaksolla pysyvän vakiona: 700 €/t, 800 €/t ja 1200 €/t [86]. Lisäksi Elogrid –virtausohjaimille oletettiin kolme eri hintatasoa, jotka ovat mahdollisia suuruusluokkia kyseiselle tuotteelle: 200 k€, 300 k€ ja 400k€. Hinnat kuitenkin riippuvat voimakkaasti kohteesta, jonne ne suunnitellaan, eivätkä nämä asetetut hintakatot tarjoa täsmällisiä vastauksia tuotteiden hinnoista. Taloudellinen takaisinmaksuaika Elogrid –virtausohjaimille määritettiin siis saavutettavien kumuloituvien polttoainesäästöjen kautta kaikilla kolmella 1,5–2,5 % polttoainesäästöskenaariolla. Sekä Elogrid –virtausohjainten että MGO:n hintatasot on koottu taulukkoon 12.

Taulukko 12. Taloudellisen tarkastelun lähtöarvot.

Parametri	Lähtöarvo	Yksikkö	Lähde
MGO – hintataso 1	700	€/t	[86]
MGO – hintataso 2	800	€/t	[86]
MGO – hintataso 3	1200	€/t	[86]
Elogrid – hintakatto 1	200	k€	[66], [85]
Elogrid – hintakatto 2	300	k€	[66], [85]
Elogrid – hintakatto 3	400	k€	[66], [85]

Työssä arvioitiin myös karkeasti Elogrid -virtausohjainten globaalia päästövähennyspotentiaalia ja taulukkoon 13 on listattu lähtöarvoja tarkastelua varten. Elomaticin asiantuntijat ovat arvioineet, että tällä hetkellä globaalisti ohjauspotkureita sisältäviä laivoja on noin 40000 kappaletta. Jos esimerkiksi 5 % näistä asennettaisiin Elogrid –virtausohjaimet, tarkoittaisi se noin 2000 laivaa. [66] Skaalaus on suhteutettu keskimääräisen suomalaisen henkilöauton suhteen sekä päästökertoimen, että vuodessa ajettujen kilometrien suhteen [87], [88].

Taulukko 13. Arvio skaalattavuudesta.

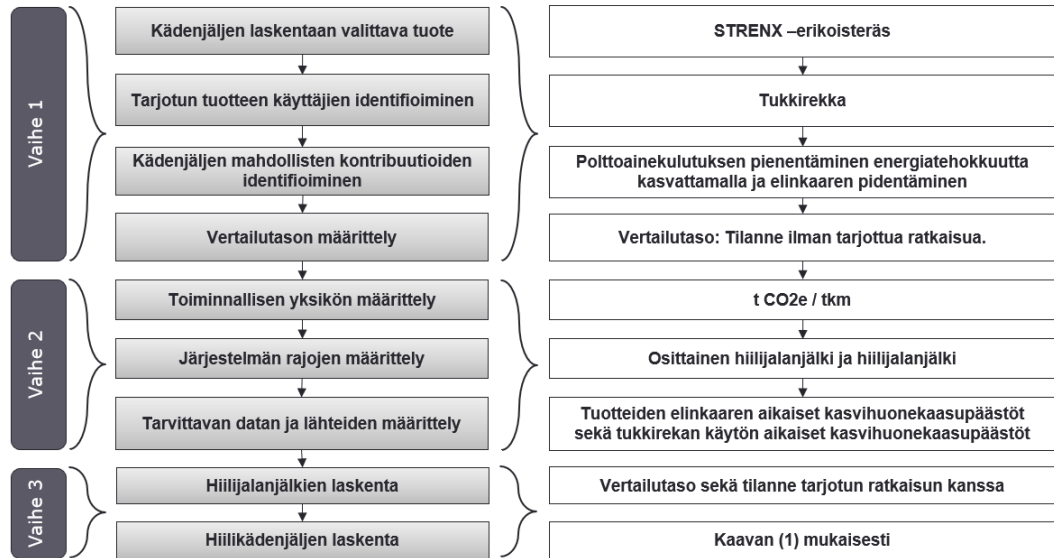
Parametri	Lähtöarvo	Yksikö	Lähde
Ohjauspotkurilaivoja globaalisti	40 000	kpl	[66]
Elogrid –virtausohjaimet asennettuina globaalisti	5	%	[66]
Elogrid –virtausohjaimia sisältävät laivat	2000	kpl	[66]
Suomalaisen henkilöauton päästökerroin (2024)	136,3	g CO ₂ e/ km	[89]
Ajoneuvon käyttöpäivät	365	vrk/a	[87]
Ajoneuvon ajokilometrit (2020)	41	km/vrk	[87]
Suomen autokanta	3 744 469	kpl	[88]

Taloudellisen takaisinmaksuajan sekä globaalin vaikuttavuuden arviot ovat molemmat luonteeltaan suuntaa antavia, eivätkä tarjoa siten täsmällisiä lukuarvoja hyödynnettäväksi tehtyjen oletusten ja yksinkertaistusten takia. Tehtyjen tarkastelujen pohjalta on kuitenkin mahdollista arvioida taloudellisen takaisinmaksuajan suuruusluokkaa sekä saavutettavia ympäristöhyötyjä globaalin laivaliikenteen näkökulmasta.

5.4 Tutkimuskohde 2: Metallin jalostus

Toinen tarkastelukohde käsitteli SSAB:n valmistamaa erikoislujuutta Strenx-terästä (Strenx 700 high strength steel), josta valmistettiin tukkirekan lastipankon pystypalkit. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 22. Strenx-teräs korvaa aiemman, kyseisen tarkastelukohteen tukkirekassa käytössä olleen teräslaadun, 310 Mpa:n standarditeräksen, joka oli myös SSAB:n valmistama. Molemmat näistä teräslaaduista on valmistettu kuumavalsauksella (hot-rolled coil). Strenx-teräs on laadultaan kestävämpää ja kevyempää erikoislujuutta terästä suhteessa standarditeräksen ja mahdollistaa asiakkaan ajoneuvon kokonaismassan pienenemisen sekä kuljetettavan kokonaiskuorman kasvun. Kuvassa 21

on havainnollistettu VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin mukaista kädenjäljen määrittämistä mallin vaiheiden 1–3 mukaisesti.



Kuva 21. Hiilikädenjäljen määrittämisen vaiheet VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin mukaisesti Strenx-teräksen tapauksessa.

Erikoislujuutta Strenx-terästä käytetään usein esimerkiksi liikennesektorin tarpeisiin ja suuriin ajoneuvoihin [90]. Sen suurimpia kädenjälkeen vaikuttavia tekijöitä on kaksi – pienempi tarvittavan raaka-aineen määrä materiaalin lujuuden ansiosta sekä suurempi kuljetettavan tavarannon kokonaismäärä [91]. Strenx-teräksen avulla voidaan siis laskea kuljetettua tavarannon kohden kertyviä kasvihuonekaasupäästöjä. Referenssitapauksena saavutetuille ympäristöhyödyille ovat SSAB:n tuottamat laskelmat valittua tarkastelukohtaa vastaavassa tilanteessa. Laskelmissa on saatu tuotteen mahdollistamien elinkaaren aikaisen kasvihuonekaasupäästösäästöjen suuruudeksi 25 t CO₂e ja tuotteen takaisinmaksuajaksi CO₂e-päästöjen näkökulmasta 7 kuukautta. [91]



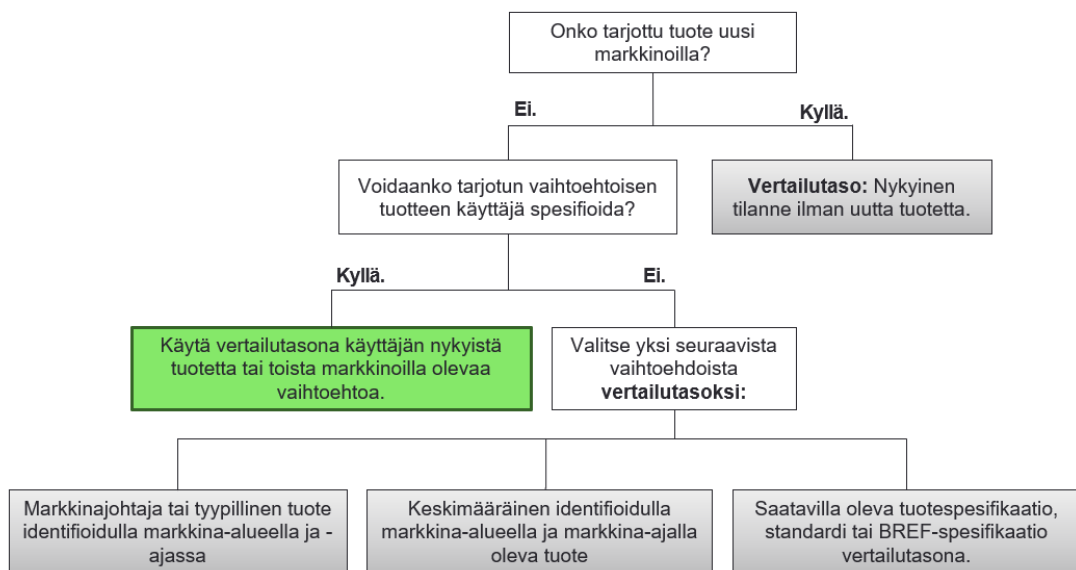
Kuva 22. Strenx-teräksestä valmistetut tukkirekan lastipankon pystypalkit. [92]

Tarkastelu aloitettiin laskennalla koskien Strenx- ja standarditeräksen tuotekohtaisten hiilijalanjälkien määrittämistä, jotka toteutettiin ISO-standardien 14040, 14044 ja 14067 mukaisesti. Kuvassa 23 on havainnollistettu kaikki vaiheet, jotka on otettu tarkasteluun mukaan. Vaiheet A1-A3, C3-C4 sekä D koskevat teräksen elinkaaren aikaisia päästöjä ja vaiheet B1 sekä B6 koskevat tukkirekan käytön aikaisia polttoainepäästöjä. Tukkirekan teräsrakenteiden hiilijalanjälki määritettiin kahdella skenaariolla: ensimmäiseksi koskemaan ainoastaan vaiheita A1-A3 (S1), joka on standardin ISO 14067 mukaisesti osittainen hiilijalanjälki. Toiseksi määritettiin skenaario, jossa huomioidaan vaiheet A1-A3, C3-C4 ja D (S2).

Tuotantovaihe			Rakennusvaihe		Käyttövaihe								Elinkaaren loppu				Kierrätys
Raaka-aineiden hankinta	Kuljetus tuotantovaiheessa		Kuljetus portilta työmaalle		Asennusvaihe	Käyttö	Kunnossapito	Korjaus	Korvaaminen	Peruskorjaus	Toiminnallinen energian käyttö	Toiminnallinen veden käyttö	Purkutytöt	Kuljetus	Jätteiden käsittely	Hävittäminen	Kierrätys, hyötykäyttö- ja kierrätyspotentiaali
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1

Kuva 23. Strenx- ja standarditeräksen elinkaarien keskeisimmät vaiheet.

Vertailutason valinta on tehty VTT:n ja LUT:n mallin mukaisesti: Kyseessä oleva tuote ei ole markkinoilla uusi, mutta sen asiakas voidaan määrittää, joten vertailutasona käytetään asiakkaan käyttämää tuotetta ennen tarjottua ratkaisua. Valintaa tässä tarkastelu-kohteessa on havainnollistettu kuvassa 24.



Kuva 24. Vertailutason valinta Strenx-teräksen tapauksessa.

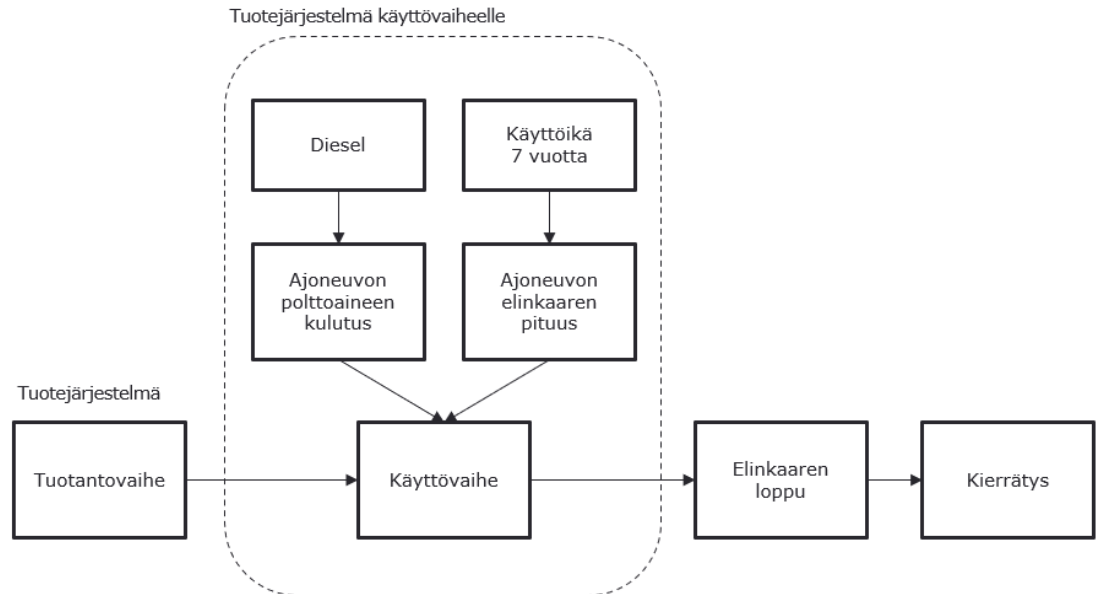
VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin vaiheessa 4 keskitytään tuloksista viestimiseen ja kädenjäljen kriittisen tarkastelun pohtimiseen. Näihin vaiheen 4 vaatimukseen vastataan sekä luvuissa 5.4.1, 5.4.2 että luvussa 6.

5.4.1 Hiilikädenjälki – Elinkaariarviota koskevat vaatimukset

Hiilikädenjälki -mallin vaiheessa 2 määritellään elinkaariarvioita koskevat vaatimukset, joka aloitettiin toiminnallisen yksikön määrittelyllä. Tässä tarkastelukohteessa toiminnallinen yksikkö on kuljetettua tavaratonnia kohden syntyvät päästöt, sillä hiilikädenjälkeä tarkasteltaessa toiminnallisen yksikön on oltava sama sekä vertailutason, että tarjotun ratkaisun tilanteessa [14], [41]. Tarkastelussa toiminnallisen yksikön polttoainekulutuksen pieneneminen on seurausta teräslaatueroista eli polttoainekulutus on laskennassa muuttuja, josta kasvihuonekaasupäästöt ovat suoraan riippuvaisia.

Molemmat tarkasteluun valittavat tuotteet on valmistettu BF-tekniikalla SSAB:n tehtaalla Raahessa [90], [92]. Tuotteiden valmistusvaiheen päästökertoimissa ei ole eroja tuote-kohtaisten EPD:iden mukaan [93], sillä niiden valmistusprosessi on samanlainen. Hiilikädenjäljen arvoa määritettäessä tarkastelusta on jätetty ulos sellaiset elinkaaren vaiheet, joiden voidaan olettaa olevan samanlaiset molemmissa tapauksissa ja kokonaisuuteen nähden merkityksettömät. Näin voidaan olettaa, koska kyseessä on saman valmistajan kaksi erilaista tuotetta, joita verrataan keskenään. Tuotejärjestelmän rajat on tehty standardin ISO 14067:2018 mukaisesti niin, että hiilijalanjäljen kannalta merkittävimmät näkökulmat on huomioitu ja tarkastelussa on mukana vähintään 80 % hiilijalanjäljen muodostavasta osasta. Elinkaaren käyttövaiheen aikaisia merkityksellisimpiä tarkastelukohtia hiilikädenjäljen kannalta on havainnollistettu kuvassa 25. LUT:n ja VTT:n hiilikädenjälkimallin mukaisesti kädenjälkeä voidaan tässä tarkastelukohteessa kasvattaa energiatehokkuutta parantamalla sekä tarjottavan tuotteen pienemmällä hiilijalanjäljellä [14].

Hiilikädenjäljen tarkastelu tehtiin kahdella erilaisella skenaariolla koskien järjestelmärajajoja, S1- ja S2-skenaariolla, joiden rajaukset avattiin aiemmin luvussa 5.4. S2-skenaariossa Strenx-teräksen inventaarioanalyysi jaettiin kuvan 25 mukaisesti neljään vaiheeseen, joista oli riittävästi tietoa saatavilla: tuotanto- ja käyttövaiheeseen, elinkaaren loppuun sekä kierrätykseen. Kunkin vaiheen hiilijalanjäljen laskentaa avataan tarkemmin seuraavassa alaluvussa 5.4.2. S1-skenaariossa huomioitiin kuvan 25 perusteella tuotantovaiheesta raaka-aineet, sekä käyttövaihe, jotka muodostavat osittaisen hiilijalanjäljen. Vertailutason tilanteessa järjestelmärajat olivat samat kuin tarjotun ratkaisun kanssa ja vertailu toteutettiin keskenään samanlaisten skenaarioiden välillä.



Kuva 25. Järjestelmärajat sekä vertailutason tilanteessa, että tarjotun ratkaisun kanssa.

Tarvittava data kerättiin Strenx- ja standarditeräksen valmistuksen, elinkaaren lopun ja kierrätyksen sekä ajoneuvon polttoaineen kulutuksen osalta niin vertailutason tilanteessa, kuin tarjotun ratkaisun kanssa ennustettavassa tilanteessa.

5.4.2 Hiilikädenjälki – Kvantifiointi

Hiilikädenjälki -mallin vaihe 3 koskee valitun tuotteen tai palvelun hiilikädenjäljen kvantifiointia. Tähän kuuluvat sekä vertailutason että tarjotun ratkaisun kanssa toteutuvan tilanteen hiilijalanjälkien kvantifiointi sekä näiden perusteella tarjotun ratkaisun hiilikädenjäljen määrittäminen luvussa 4.2.1 esitetyn kaavan (1) mukaisesti. Vertailutason hiilijalanjäljen sekä tarjotun ratkaisun tilanteen hiilijalanjäljen laskennoissa käytetyt päästökertoimet on koottu taulukkoon 14.

Päästökertoimia valittaessa hyödynnettiin standardin ISO 14067:2018 mukaisesti valmistajan ilmoittamia päästökertoimia teräksen EPD:stä, jotka ovat kolmannen osapuolen varmentamia [90] sekä päästökertoimia kansallisista inventaarioista, jotka ovat viranomaisten kelpuuttamia [73]. DEFRA:n tietokantaa [73] hyödynnettiin dieselin päästökertoimelle, koska se on alalla yleisesti käytetty, laajin avoimesti saatavilla oleva tietokantalähde. Tällaisen tieteellisen lähestymistavan ja kansainvälisesti tunnettujen asiakirjojen soveltamisen avulla voidaan parantaa tulosten vertailtavuutta tuoteryhmän sisällä. Päästökertoimet perustuvat sekundaaritietolähteisiin, jotka ovat olleet julkisesti saatavilla. Työssä hyödynnetty SSAB:n EPD on voimassa 3/2025 saakka ja se pohjautuu standardeihin ISO 14025 ja EN 15804 [90]. SSAB:n asiantuntijan mukaisesti nykyiselle

EPD:lle on saatu varmentajalta käyttöluja virallisen voimassaoloajan päättymisen jälkeen ennen kuin päivitetty EPD on saatavilla [94]. EPD kattaa teräksen valmistuksen tuotantovaiheet A1-A3, elinkaaren lopun (C3-C4) ja kierrätyksen (D). Vaiheet avattiin yksityiskohtaisemmin kuvassa 23. Tarkastelussa ei otettu huomioon maankäytön muutoksiin liittyviä näkökulmia, koska niistä ei ollut riittävästi lähtötietoja saatavilla.

Taulukko 14. Laskennassa käytetyt päästökertoimet.

Parametri	Päästökerroin	Yksikkö	Lähde
SSAB Strenx- ja standarditeräs (A1-A3)	2,71	t CO ₂ e / t teräs	[90]
SSAB Strenx- ja standarditeräs (C3)	0,00249	t CO ₂ e / t teräs	[90]
SSAB Strenx- ja standarditeräs (C4)	0,000744	t CO ₂ e / t teräs	[90]
SSAB Strenx- ja standarditeräs (D)	-1,48	t CO ₂ e / t teräs	[90]
Diesel	2,66155	kg CO ₂ e / l	[73]

Vertailutason hiilijalanjälki toiminnallista yksikköä kohden määritettiin tarkastelemalla tukkirekan nykyistä polttoaineenkulutusta yksikössä l / 100 km ja tähän vaadittavat lähtötiedot on koottu taulukkoon 15. Tarkasteltavaksi ajanjaksoksi valittiin 1 vuosi, sillä tällä aikavälillä toimintaympäristön voidaan olettaa pysyvän vakiona sekä ajoneuvon käyttämän polttoaineen, että mahdollisten muiden ajoneuvon energiatehokkuuteen vaikuttavien tekijöiden kautta, jolloin saadut tulokset pysyvät vertailukelpoisina ja voimassaolevina. Ajoneuvon käyttöikäksi on kuitenkin arvioitu 7 vuotta eteenpäin nykyhetkestä, jolloin hiilikädenjäljen todellinen arvo määritettäisiin laskemalla sen kumulatiivinen vaikutus koko käyttöajan ajalta. Lopullisen hiilikädenjäljen suuruus saadaan siis suorittamalla vuosittain hiilikädenjäljen laskenta kunkin ajankohdan toimintaympäristössä ja yhteen laskeamalla nämä arvot koko käyttöajan ajalta. Tässä työssä käytetyt lähtöarvot ovat sekundaaritietoa, sillä ne on saatu SSAB:n asiantuntijalta [92].

Tuotantovaiheessa huomioitiin tuotteen valmistuksesta aiheutuvat päästöt raaka-aineen valmistuksen osalta. Muut mahdolliset tuotantovaiheen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt rajattiin tarkastelusta pois lähtötietojen puutteellisuuden takia. Ajoneuvon rakenteiden raaka-aineiden hankinnasta syntyneet kasvihuonekaasupäästöt laskettiin ostetun raaka-aineen perusteella, vaikka ostetusta raaka-aineesta syntyikin tuotantovaiheessa hukkamateriaalia, jonka oletettiin menevän suoraan kierrätykseen. Raaka-aineen jakauma hukkamateriaalin ja tuotteiden välillä on koottu taulukkoon 15.

Taulukko 15. Tuotanto- ja käyttövaiheen lähtöarvot S1- ja S2-skenaarioille toiminnallista yksikköä kohden tukkirekalle.

Parametri	Lähtöarvo (vertailutaso)	Lähtöarvo (tarjottu ratkaisu)	Yksikkö	Lähde
Ostettu raaka-aine	1,45	0,95	t	[92]
Ostetusta raaka-aineesta hukkaan	0,116	0,076	t	[92]
Tuotteen paino	1,45	0,95	t	[92]
Ajoneuvon käyttöpäivät	300	300	vrk	[92]
Tarkastelu-aika	1	1	a	[92]
Käyttöaika	7	7	a	[92]
Ajoneuvon ajokilometrit	175 000	175 000	km/a	[92]
Polttoaineen kulutus (100 % kuorma)	71	71	l / 100 km	[92]
Polttoaineen kulutus (0 % kuorma)	35	35	l / 100 km	[92]
Kuljettu matka 100 % kuormalla	50	50	%	[92]
100 % kuormassa tavaraa	40,0	40,5	t	[92]

Standardin ISO 14067 mukaisesti käyttövaiheen katsotaan alkavan, kun ratkaisun käyttäjä ottaa tuotteen haltuunsa ja päättävän, kun tuote on valmis kierrätettäväksi [41]. Käyttövaiheessa tarkasteltiin ajoneuvon polttoainekulutusta sekä Strenx- että standarditeräksestä valmistettujen rakenteiden kanssa S1- ja S2-skenaarioilla. Käytettävänä polttoaineena oletettiin olevan kuvan 25 mukaisesti fossiilinen diesel [95], joka on ollut Suomen tieliikenteessä yleisimmin käytetty polttoaine vuonna 2023. Strenx-teräksen avulla saavutettavat hyödyt kokonaiskuormassa on koottu taulukkoon 15, jonne on myös listattu ajoneuvon kilometrikohtainen polttoaineenkulutus vertailutason tilanteessa.

S1-skenaariossa elinkaaren loppua ei huomioitu lainkaan, sillä kierrätysvaiheen päästöjen allokointi on hyvin haasteellista. S2-skenaariossa Strenx- ja standarditeräksen elinkaaren loppua tarkasteltiin kategorioiden C3-C4 ja D osalta. SSAB:n valmistamien terästen tuotekohtaisen EPD:n mukaan 95 % materiaalista voidaan hyödyntää kierrättämiseen ja 5 % materiaalista menee loppusijoitukseen [90]. EPD:n mukaisesti kategorian D päästökerroin on negatiivinen, joka tarkoittaa sitä, että kierrätyksen avulla neitseellisen teräksen käyttöä onnistutaan vähentämään. Kategorian D huomioiminen siis pienentää valmistettavien ajoneuvon rakenteiden hiilijalanjälkeä suhteessa tarkasteluun, jossa otetaan huomioon ainoastaan kategoriat A1-A3. [90] Haasteeksi kierrätysvaiheen kasvihuonekaasupäästöjen allokoinnissa nousee kaksoislaskennan riski: voidaanko kierrätysmateriaalista valmistetusta tuotteesta laskea kierrätyksen antamia hyötyjä myös elinkaaren loppuvaiheessa. Tästä syystä tarkastelu tehtiin myös tilanteelle, jossa elinkaaren loppua

ja kierrätysvaihetta ei oteta laskennassa huomioon. Taulukkoon 16 on koottu kierrätyksen laskentaan tarvittavat lähtötiedot.

Taulukko 16. Kierrätysvaiheen lähtöarvot S2-skenaariolle toiminnallista yksikköä kohden neljälle Elogrid-virtausohjaimelle.

Parametri	Lähtöarvo (vertailutaso)	Lähtöarvo (tarjottu ratkaisu)	Yksikkö	Lähde
Loppusijoitettavan teräksen massa	0,0725	0,0475	t	[92]
Kierrätettävän teräksen massa	1,3775	0,9025	t	[92]

Hiilikädenjäljen määrittämisen lisäksi Strenx- ja standarditeräksille tehtiin taloudellisen takaisinmaksuajan tarkastelu kahdella eri skenaariolla. Skenaarioissa hyödynnettiin Tilastokeskuksen dieselin hintatilastoa ja valittiin kolme eri tasoa, jolla hinnan oletettiin tarkastelujaksolla pysyvän vakiona: 1,5 €/l, 1,8 €/l ja 2,1 €/l [96]. Lisäksi teräksille oletettiin kaksi eri hintatasoa, kun tiedettiin, että Strenx-teräs on 1,3–1,4-kertainen suhteessa standarditeräksen hintaan. Hinnat kuitenkin riippuvat voimakkaasti kohteesta, jonne ne suunnitellaan, eivätkä nämä asetetut hintakatot tarjoa täsmällisiä vastauksia tuotteiden hinnoista. Taloudellinen takaisinmaksuaika Strenx-teräkselle määritettiin siis saavutettavien kumuloituvien polttoainesäästöjen kautta kaikilla kolmella dieselin hintaskenaariolla. Sekä terästen välinen hintaero että dieselin hintatasot on koottu taulukkoon 17.

Taulukko 17. Taloudellisen tarkastelun lähtöarvot.

Parametri	Lähtöarvo	Yksikkö	Lähde
Diesel – hintataso 1	1,5	€/l	[96]
Diesel – hintataso 2	1,8	€/l	[96]
Diesel – hintataso 3	2,1	€/l	[96]
Terästen hintaero – skenaario 1	30	%	[92]
Terästen hintaero – skenaario 2	40	%	[92]

Taloudellisen takaisinmaksuajan arviot ovat luonteeltaan suuntaa antavia, eivätkä tarjoa siten täsmällisiä lukuarvoja hyödynnettäväksi tehtyjen oletusten ja yksinkertaistusten takia. Tehtyjen tarkastelujen pohjalta on kuitenkin mahdollista arvioida taloudellisen takaisinmaksuajan suuruusluokkaa.

6. TULOKSET JA TULOSTEN TULKINTA

Tässä luvussa esitetään ensin molempien tarkastelukohteiden lasketut hiilikädenkädenjäljen arvot tutkimuskysymysten mukaisesti. Lisäksi luvussa pohditaan saatujen tulosten perusteella tehtäviä johtopäätöksiä yleisemmällä tasolla sekä pohditaan tuloksia tehtyjen alkuoletusten valossa.

6.1 Hiilikädenjälki suunnittelun ja konsultoinnin kontekstissa

Elogrid –virtausohjainten hiilikädenjäljeksi saatiin herkkyystarkastelun avulla tehtyjen laskentojen mukaan kuusi erisuuruista arvoa. Saadut hiilikädenjälkien arvot riippuivat voimakkaasti valituista päästövähennysskenaarioista. Taulukkoon 18 on koottu Elogrid -virtausohjainten hiilijalanjäljen arvot, sekä M/S Viking Cinderellan käyttövaiheen polttoaineenkulutuksesta aiheutuva hiilijalanjälki. Käyttövaiheen hiilijalanjälki on ilmoitettu sekä vertailutason tilanteelle, että Elogrid -virtausohjainten kanssa kaikilla kolmella skenaariolla. Elogrid -virtausohjainten hiilijalanjäljen arvoksi saatiin työssä tehdyillä rajauksilla kaksi arvoa. Huomioitaessa ainoastaan teräksen tuotannon vaiheet A1-A3 (S1) hiilijalanjäljen suuruus oli 11,78 t CO₂e ja huomioitaessa vaiheet A1-A5, C3, C4 sekä D (S2) hiilijalanjäljen suuruudeksi saatiin 7,50 t CO₂e.

Taulukko 18. Elogrid -virtausohjainten hiilijalanjälki.

	Vertailu- taso	Tarjotun ratkai- sun tilanne S1- skenaario	Tarjotun ratkai- sun tilanne S2- skenaario	
Hiilijalanjälki	Arvo	Arvo	Arvo	Yksikkö
Suunnitteluvaihe (Elogrid)	0	0,115	0,115	t CO ₂ e
Tuotanto- ja asennus- vaihe (Elogrid)	0	11,66	14,58	t CO ₂ e
Käyttövaihe (M/S Viking Cinderellan polttoaineku- lutuksesta aiheutuvat kas- vihuonekaasupäästöt)	18 727,8	S1,5: 18 447,3 S2,0: 18 357,6 S2,5: 18 256,6	S1,5: 18 447,3 S2,0: 18 357,6 S2,5: 18 256,6	t CO ₂ e
Elinkaaren loppu	0	0	0,013	t CO ₂ e
Kierrätys (Elogrid)	0	0	-7,21	t CO ₂ e

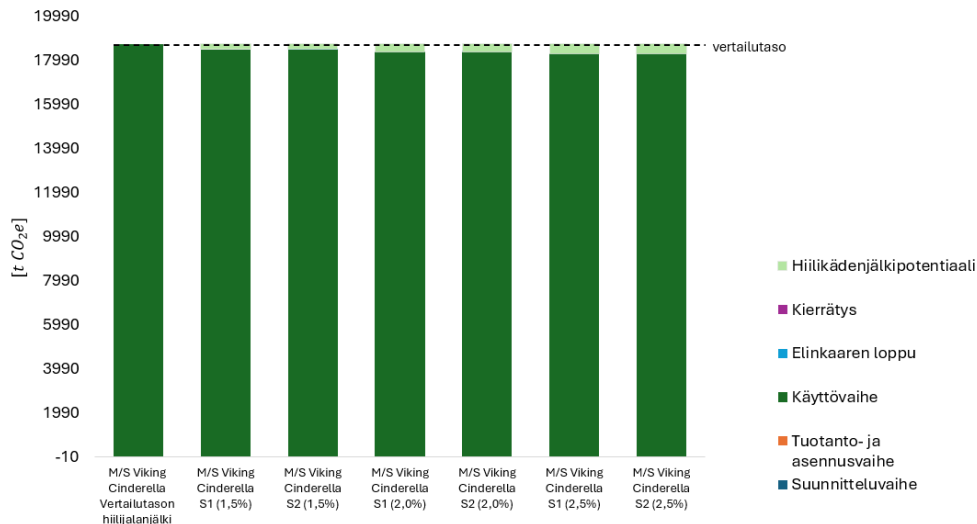
S1,5 = 1,5 % polttoainesäästöskenaario; S2,0 = 2,0 % polttoainesäästöskenaario; S2,5 = 2,5 % polttoainesäästöskenaario

Taulukoon 19 on koottu tulokset, jotka Elogrid -virtausohjainten hiilikädenjälkien arvoksi saatiin kolmella eri päästövähennysskenaariolla tarkasteltuna ensimmäisen käyttövuoden aikana sekä S1- että S2-skenaarioiden tapauksessa. Nämä ovat jo toteutuneita arvoja, sillä Elogrid -virtausohjaimet ovat olleet käytössä tammikuusta 2024 saakka. Kuitenkin ne toimivat samalla myös tulevan vuoden kädenjälkipotentiaalina, jos toimintaolosuhteet käytetyn polttoaineen, MGO:n, sekä muiden energiatehokkuuteen vaikuttavien tekijöiden kautta pysyvät vakioina. Kädenjälkipotentiaaleja ne ovat tulevalle vuodelle siitä syystä, että ne realisoituvat vasta käyttövuoden tullessa täyteen.

Taulukko 19. Elogrid- virtausohjainten hiilikädenjälkipotentiaali yhden vuoden ajalta tarkasteltuna kolmella eri skenaariolla.

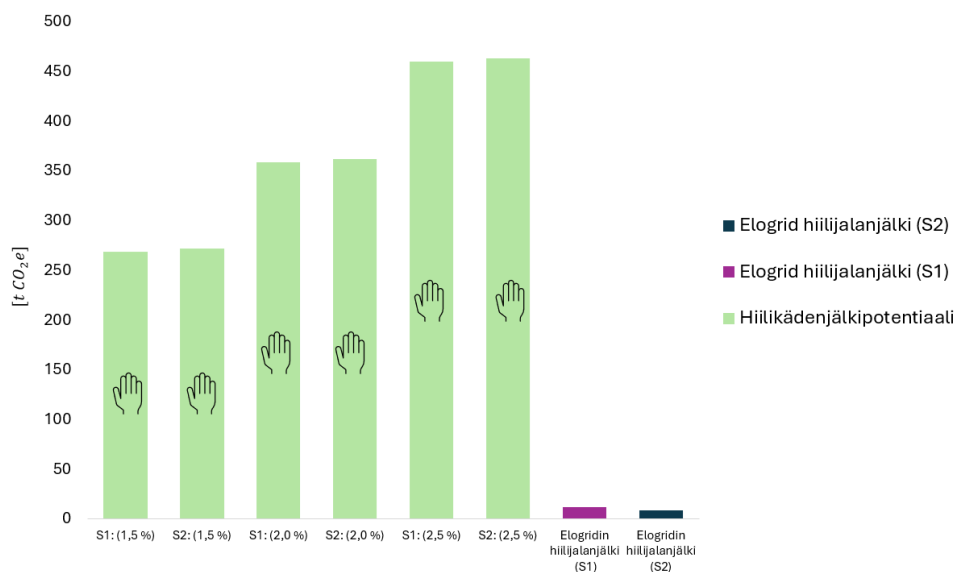
Hiilikädenjälkipotentiaali	Tarjotun ratkaisun tilanne (S1)	Tarjotun ratkaisun tilanne (S2)	Yksikkö
-1,5 % skenaario	268,7	273,0	t CO ₂ e/vuosi
-2,0 % skenaario	358,5	362,8	t CO ₂ e/vuosi
-2,5 % skenaario	459,1	463,8	t CO ₂ e/vuosi

Hiilikädenjäljelle saadut tulokset osoittavat selkeästi, kuinka herkkiä kädenjäljen arvot ovat tehtäville rajauksille ja oletuksille. Suurimmat erot arvojen välillä syntyivät käytettävästä polttoainesäästöskenaarioista, kun taas S1- tai S2-skenaarioiden valinta ei tuottanut merkittäviä poikkeamia tuloksissa. Kuvissa 26 ja 27 on vielä havainnollistettu tuloksia, jotka on saatu Elomaticin esimerkkitapauksen laskennassa arvioiduilla 1,5–2,5 % polttoainesäästöillä sekä S1- että S2-skenaarioissa. Kuvaan on havainnollistettu sekä vertailutason tilanteen, että tarjotun ratkaisun tilanteen välinen suhde M/S Viking Cinderellan tapauksessa. Vertailutason tilanteessa on kuvattu laivan potentiaalisia kasvihuonekaasupäästöjä sen polttoaineen kulutuksen osalta yhden käyttövuoden ajalta nykyhetkestä tarkasteltuna, nykyhetken regulaatio huomioon ottaen. Regulaation mukaiset rajaukset on avattu luvussa 5.3.1. Vertailutason tilanteen vieressä on esitelty puolestaan M/S Viking Cinderellan potentiaaliset yhden vuoden aikaiset kasvihuonekaasupäästöt polttoaineen kulutuksen osalta, kun käytössä on neljä Elogrid -virtausohjainta. Tarjotun ratkaisun tilanteeseen on otettu huomioon myös Elogrid -virtausohjainten elinkaaren aikaiset päästöt standardien ISO 14044 ja ISO 14067 mukaisesti osittaisen hiilijalanjäljen (S1) ja hiilijalanjäljen (S2) osalta. Kuvasta voidaan nähdä, että Elogrid -virtausohjainten hiilijalanjälkien suuruus on lähes merkityksetön suhteessa M/S Viking Cinderellan käytön aikaisiin kasvihuonekaasupäästöihin. Hiilikädenjälki muodostuu tässä esimerkkitapauksessa kasvihuonekaasupäästövähennyksistä asiakkaan käytön aikaisissa päästövähennyksissä VTT:n ja LUT:n -mallin mukaisesti.



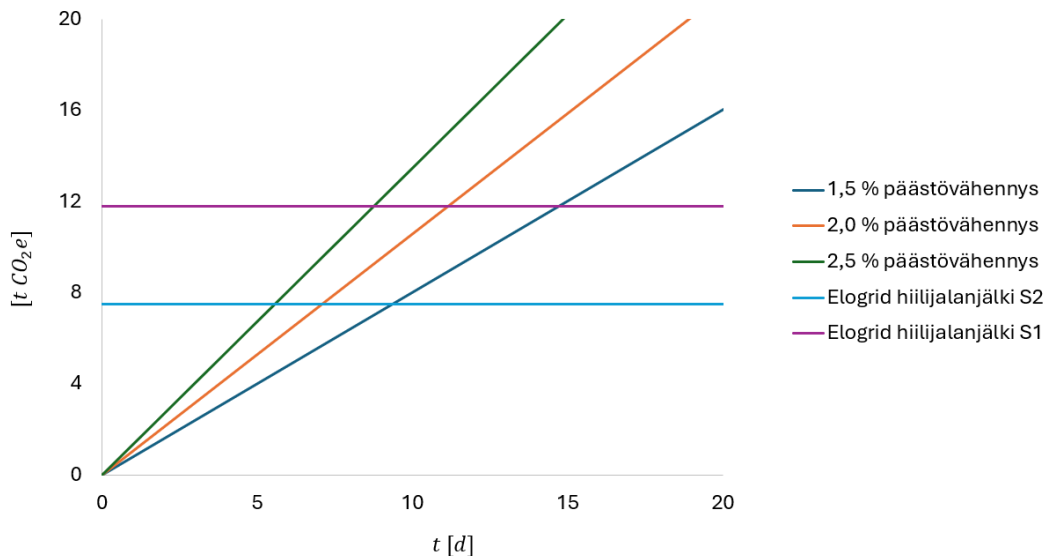
Kuva 26. M/S Viking Cinderellan polttoainekulutuksesta aiheutuvat päästöt sekä vertailutilanteessa että tarjotun ratkaisun kanssa, aika 1 vuosi.

Kuvassa 27 on havainnollistettu Elogridin –virtausohjainten hiilikädenjälkeä ja hiilijalanjälkeä. Kuvan suhde havainnollistaa yhden vuoden ajalta kumuloituvaa hiilikädenjälkeä suhteessa Elogrid -virtausohjainten kertaluontoiseen hiilijalanjälkeen, eikä arvoja saa laskea keskenään yhteen päästöjen nettoväitteiden tekemiseksi. Elogrid -virtausohjainten hiilijalanjäljen arvo on kertaluonteinen ja käyttöiän aikana vakio, sillä siitä ei käytön aikana aiheudu kasvihuonekaasupäästöjä. Sen sijaan Elogrid -virtausohjainten hiilikädenjälki M/S Viking Cinderellan tapauksessa kertyy polttoaineen kulutuksen pienemisen kautta ja on siten riippuvainen Elogrid -virtausohjainten käyttöajasta, tarkastelujakson pituudesta sekä käytetystä polttoaineesta. Tarkastelu tehtiin kaikille kolmelle päästövähennysskenaariolle huomioiden Elogrid -virtausohjainten S1 - ja S2-skenaariot erikseen. Kädenjälkipotentiaaliin on huomioitu Elogrid –virtausohjainten hiilijalanjäljet mukaan.



Kuva 27. Neljän Elogrid -virtausohjaimen hiilikädenjälki ja -jalanjälki yhden vuoden aikana.

Kuvassa 28 on havainnollistettu Elogrid –virtausohjainten elinkaaren aikaisten päästöjen suhdetta M/S Viking Cinderellan polttoainekulutuksesta syntyviin kumuloituviiin kasvihuonekaasupäästöihin kolmella eri skenaariolla. Kuvasta nähdään, että kaikilla polttoaineen säästöskenaarioilla tarkasteltuna virtausohjainten elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästökertymät on saavutettu 5–15 käyttöpäivän jälkeen, riippuen Elogrid –virtausohjainten elinkaaren määrittämiseen valittavasta skenaariosta S1 tai S2. Tarkastelukohdeesta huomataan myös, että Elogrid –virtausohjainten elinkaaren aikaisia päästöjä määrittäessä kädenjäljen kannalta on hyvin merkityksentöntä, käytetäänkö S1- vai S2-skenaariota. Yhden vuoden tarkastelujaksolla, jossa laivaa käytetään 350 päivää, Elogrid-virtausohjaimet alkavat siis tuottaa nettopäästövähennyksiä viimeistään 15 käyttöpäivän jälkeen vertailutasoon nähden.



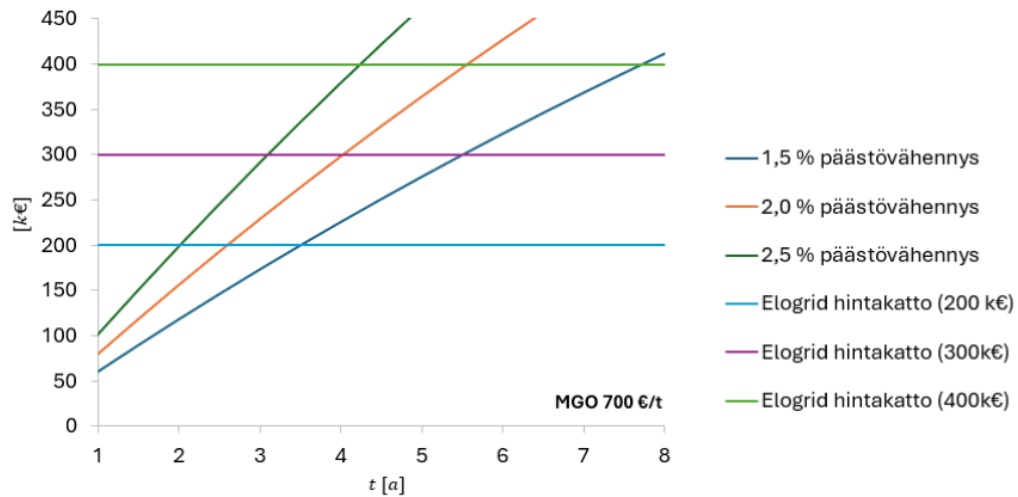
Kuva 28. Elogrid -virtausohjainten takaisinmaksuaika GHG-päästöjen näkökulmasta.

Tässä tutkimuskohteessa saadut tulokset ovat linjassa aiemman kirjallisuuden kanssa. Bouman et al. (2017) toteuttamassa tutkimuksessa tunnistettiin neljä laivasektorille potentiaalista hiilidioksidipäästöjen vähennyskeinoa, joista yksi liittyi tehoon ja potkuriteknologiaan. Tutkimuksen mukaan potkuriteknologian hyötysuhteen optimoinnilla voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä 1–25 % [97]. Vastaavasti Tsvetkova et al. (2024) toteuttamassa tutkimuksessa havaittiin, että potkuriteknologiaa kehittämällä ja alukseen jälki-asennettavilla energiatehokkuusratkaisuilla voidaan vähentää polttoaineen kulutusta jopa 10 % sekä alentaa laivojen operointikustannuksia [98]. Nämä olivat myös keskeisiä havaintoja Schwartzin (2024) väitöskirjassa, jossa tarkasteltiin meriliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä taloudellisesti kannattavalla tavalla. Väitöskirjassa esiin nousseiden havaintojen mukaan yksi merkittävä keino meriliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen ovat erilaiset tekniset ratkaisut esimerkiksi laivan vastuksen

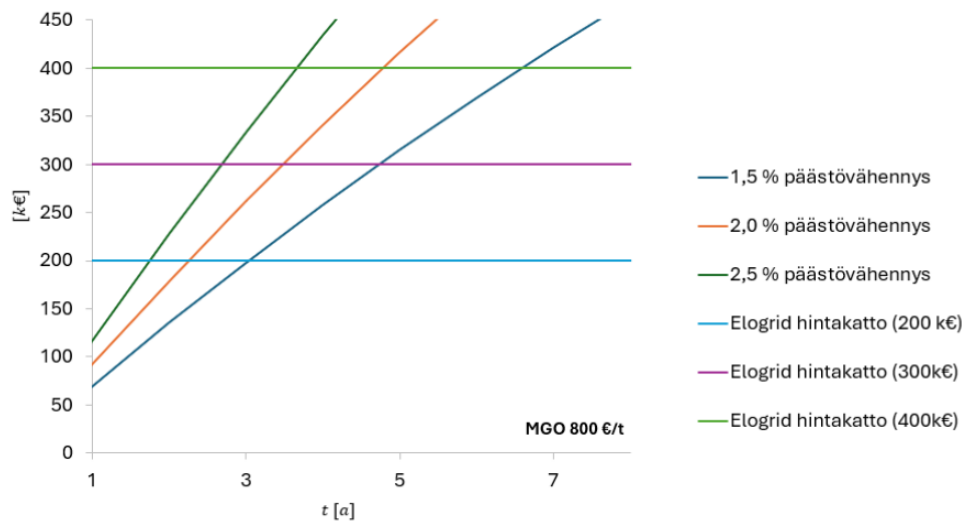
pienentämiseen ja potkurijärjestelmien optimointiin [99], joita myös Elogrid –virtausohjaimet edustavat.

Swartzin et al. (2020) toteuttamassa tutkimuksessa arvioitiin, että potkuriteknologian optimoinnilla saavutettavat vuosittaiset hyödyt kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksessä olisivat 3,68 % [100]. Kirjallisuuden tulokset energiatehokkuusparannuksista tukevat myös Viking Linen Sustainability Managerilta saatua tietoa, jonka mukaan M/S Viking Cinderellan polttoainekulutus laskee kuivatelakokinnin jälkeen 6,4 %. Swartzin väitöskirjassa tehtyjen havaintojen perusteella Elogrid-virtausohjaimet voidaan nähdä tällaisessa transitionvaiheessa merkittävä energiatehokkuuteen vaikuttavana optimointitekijänä, kun kalustossa on samaan aikaan sekä vanhaa että uutta potkuriteknologiaa [99]. Väitöskirjassa saadut tulokset ovatkin yhteneväisiä tässä tutkimuksessa saatujen tulosten kanssa, joiden mukaan laivan potkurijärjestelmää optimoimalla voidaan saavuttaa merkittäviä kasvihuonekaasupäästövähennyksiä suhteessa vertailutasoon.

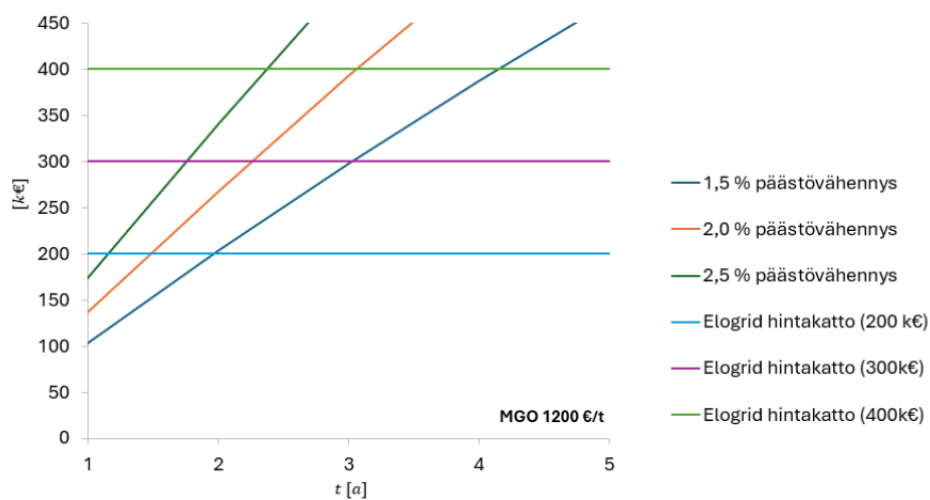
Kuvissa 29, 30 ja 31 on havainnollistettu tuloksia Elogrid -virtausohjainten taloudellisen takaisinmaksuajan suhteen. Huomataan, että taloudellinen takaisinmaksuaika on voimakkaasti riippuvainen sekä polttoaineen hinnasta että polttoaineensäästöskenaariosta. Lisäksi saaduista tuloksista huomataan, että taloudellisen takaisinmaksuajan suuruudessa puhutaan vuosista, kun hiilidioksidiekvivalenttien näkökulmasta kyse on päivistä. Kuitenkin yritysten tekemiin investointipäätöksiin vaikuttaa merkittävästi, lainsäädännön velvoittamien päästövähennysten lisäksi, taloudelliset näkökulmat. Tästä syystä on keskeistä hahmottaa, millä laajuudella näillä molemmilla tarkastelutasoilla voidaan saavuttaa hyötyjä. Taloudellisuutta tarkasteltiin myös Swartzin et al. (2020) tutkimuksessa, jossa arvioitiin potkuriteknologian optimoinnin avulla saavutettavien taloudellisten hyötyjen suuruuden olevan –65,69 € vähennettyä hiilidioksiditonnia kohden [100]. Taloudellisella tarkastelun tarvetta tukee myös Kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n vuoden 2023 strategiassa ehdotettu toimenpidekokonaisuutta kunnianhimoisten päästövähennystavoitteiden tueksi. Toimenpidekokonaisuus sisältäisi meripolttoainestandardin lisäksi kasvihuonekaasupäästöjen hinnoittelumekanismia. [101] Tämä korostaa sitä, että uusien teknologisten ratkaisujen mahdollistamat päästövähennykset ja taloudelliset hyödyt voivat toimia kannustimina ilmastoystävällisemmän teknologian käyttöönotossa.



Kuva 29. Elogrid -virtausohjainten takaisinmaksuaika taloudellisesta näkökulmasta, MGO:n hinta 700 €/t.



Kuva 30. Elogrid -virtausohjainten takaisinmaksuaika taloudellisesta näkökulmasta, MGO:n hinta 800 €/t.



Kuva 31. Elogrid -virtausohjainten takaisinmaksuaika taloudellisesta näkökulmasta, MGO:n hinta 1200 €/t.

Tämän yksittäisen tarkastelukohteen tuloksilla on saatavissa myös viitteitä globaalisti laajemmin saavutettavista päästövähennyksistä. Elomaticin asiantuntijat ovat arvioineet, että tällä hetkellä globaalisti ohjauspotkureita sisältäviä laivoja on noin 40000 kappaletta. Jos esimerkiksi 5 % näistä asennettaisiin Elogrid –virtausohjaimet, tarkoittaisi se noin 2000 laivaa. Laskenta toteutettiin kaikilla kolmella 1,5–2,5 % päästövähennysskenaariolla, kun Elogrid -virtausohjaimista huomioitiin sekä S1- että S2-skenaario. Tulokset on skaalattu Suomen vuoden 2023 autokannan suuruuteen ja ne on koottu taulukkoon 20. Tulokset tukevat myös IMO:n asettamaa kunniainhimoista hiilineutraaliustavoitetta kansainväliselle merenkululle vuoteen 2050 mennessä, jossa yhtenä toimenpiteenä nähdään energiatehokkuutta parantavat innovaatiot [101].

Taulukko 20. Elogrid- virtausohjainten hiilikädenjälkipotentiaali yhden vuoden ajalta tarkasteltuna kolmella eri skenaariolla.

Hiilikädenjälkipotentiaali	Suhde Suomen autokannan suuruuteen (S1)	Suhde Suomen autokannan suuruuteen (S1)	Yksikkö
-1,5 % skenaario	6,97	7,08	%
-2,0 % skenaario	9,29	9,41	%
-2,5 % skenaario	11,91	12,02	%

Saatujen karkeiden tulosten perusteella siis huomataan, että 2000 tuhanteen laivaan asennetut Elogrid -virtausohjaimet ja niiden avulla saavutettavat päästövähennyshyödyt vastaavat suuruudeltaan 7,0–12,0 % koko Suomen henkilöautokannan vuoden aikana tuottamista kasvihuonekaasupäästöistä. Tulokset ovat kuitenkin luonteeltaan suuntaa antavia, koska tarkastelu on nyt tehty suhteessa M/S Viking Cinderellan polttoainekulutukseen ja valittuun toiminnalliseen yksikköön. Lisäksi tulosten epävarmuutta lisää, suhteutettuna absoluuttisiin henkilöautomääriin, valittu päästökerroin, joka tässä tapauksessa on suomalaisen keskimääräisen henkilöauton päästökerroin, eikä esimerkiksi globaali keskiarvo. Tarkastelu on kuitenkin haluttu toteuttaa suhteessa Suomen autokantaan, jolloin käytetty päästökerroin on perusteltua.

Päästövähennykset syntyvät arvoketjussa vasta oman toiminnan jälkeen, aivan kuin kädenjälkimallin mukaisesti kuuluukin olla ja Elogrid –virtausohjainten avulla onnistutaan vähentämään asiakkaan käytön aikaisia päästöjä. Tulos on myös yhdenmukainen vähähiilitiekartassa saatujen tulosten kanssa siitä, missä toimialan suurimmat kädenjälkipotentiaalit ovat, erityisesti luokassa 3, jossa määritetään oman toiminnan jälkeisiä päästöjä. Tarkastelukohteen valittu toiminnallinen yksikkö, laivan käyttöpäivät vuoden aikana, kuitenkin aiheuttaa pieniä epävarmuustekijöitä. Oletuksena tässä siis käytetään sitä, että

kyseinen laiva liikennöi samaa reittiä jokaisena käyttöpäivänä tarkastelun aikana ja kuljetut kilometrit pysyvät päivätasolla vakiona. Luotettavampi toiminnallinen yksikkö tässä tapauksessa olisi ollut esimerkiksi kertyneet kasviuonekaasupäästöt laivalla kuljettua tonnia kohden, mutta saatu kädenjäljen arvo olisi silti suhteessa täysin samansuuruinen riippumatta toiminnallisesta yksikön valinnasta. Tehty herkkyystarkastelu ja rajaukset kuitenkin osoittavat kädenjäljen absoluuttisten arvojen voimakkaan riippuvuuden rajauksista, mikä edelleen korostaa tulosten avoimen raportoinnin tärkeyttä, jota myös VTT:n ja LUT:n mallissa painotetaan.

6.2 Hiilikädenjälki metallin jalostuksen kontekstissa

Strenx-teräksen hiilikädenjäljelle saatiin herkkyystarkastelun avulla tehtyjen laskentojen perusteella kaksi erisuuruista arvoa. Saadut hiilikädenjälkien arvot eivät poikenneet merkittävästi toisistaan erilaisista rajauksista huolimatta. Tulokset on koottu taulukkoon 22. Taulukkoon 21 on koottu Strenx- ja standarditeräksestä valmistettujen tukkirekan lastipankon pystypalkkien sekä tukkirekan käyttövaiheen polttoaineenkulutuksesta aiheutuva hiilijalanjälki. Käyttövaiheen hiilijalanjälki on ilmoitettu sekä vertailutason tilanteelle, että Strenx-teräksestä valmistettujen osien kanssa toteutuvalla tilanteella. Strenx- ja standarditeräksestä valmistettujen pystypalkkien hiilijalanjälkien arvoksi saatiin työssä tehdyillä rajauksilla kaksi arvoa. Huomioitaessa ainoastaan teräksen tuotannon vaiheet A1-A3 (S1) hiilijalanjäljen suuruus Strenx-teräkselle oli 2,57 t CO₂e ja standarditeräkselle 3,93 t CO₂e. Huomioitaessa vaiheet A1-A5, C3, C4 sekä D (S2) hiilijalanjäljen suuruudeksi saatiin Strenx-teräkselle 1,24 t CO₂e ja standarditeräkselle 1,89 t CO₂e.

Taulukko 21. Strenx- ja standarditeräksen hiilijalanjäljet sekä tukkirekan käyttövaiheen hiilijalanjälki.

	Vertailu- taso (S1)	Vertailu- taso (S2)	Tarjottu ratkaisu (S1)	Tarjottu ratkaisu (S2)	
Hiilijalanjälki	Arvo	Arvo	Arvo	Arvo	Yksikkö
Tuotantovaihe	3,9295	3,9295	2,5745	2,5745	t CO ₂ e
Käyttövaihe (Tukkirekan polttoainekulutus)	0,0705	0,0705	0,0697	0,0697	t CO ₂ e / t km
Elinkaaren loppu	0	0,0037	0	0,0024	t CO ₂ e
Kierrätys	0	-2,038	0	-1,336	t CO ₂ e

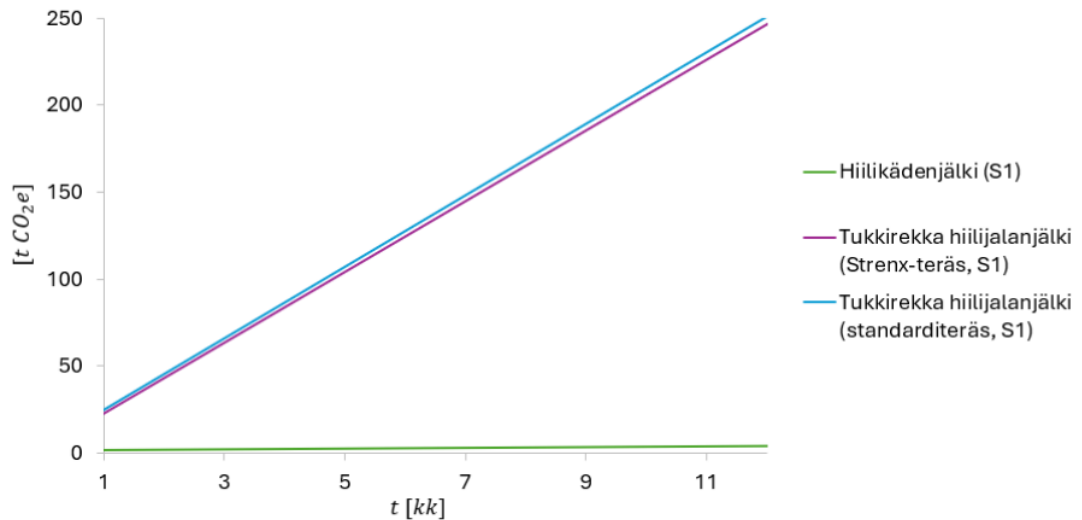
Taulukkoon 22 on koottu tulokset, jotka Strenx-teräksestä valmistettujen tukkirekan lastipankon pystypalkkien hiilikädenjälkien arvoksi saatiin ensimmäisen käyttövuoden aikana

sekä S1- että S2-skenaarioiden tapauksessa. Nämä ovat jo toteutuneita arvoja, sillä Strenx-teräksestä valmistetut tukkirekan lastipankon pystypalkit ovat olleet käytössä kyseisessä tukkirekassa vuodesta 2019 saakka [91]. Kuitenkin ne toimivat samalla myös tulevan vuoden kädenjälkipotentiaalina, jos toimintaolosuhteet käytetyn polttoaineen, dieselin, sekä muiden energiatehokkuuteen vaikuttavien tekijöiden kautta pysyvät vakioina. Kädenjälkipotentiaaleja ne ovat tulevalle vuodelle siitä syystä, että ne realisoituvat vasta käyttövuoden tullessa täyteen.

Taulukko 22. Strenx-teräksestä valmistettujen tukkirekan lastipankon pystypalkkien hiilikädenjälkipotentiaali yhden vuoden ajalta tarkasteltuna kahdella eri skenaariolla.

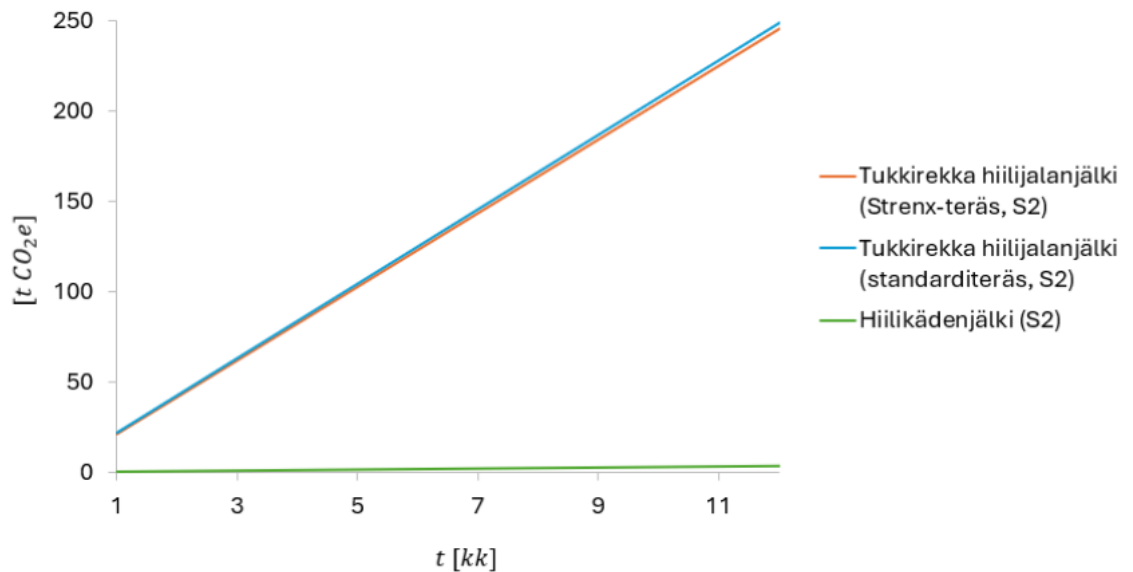
	Tarjotun ratkaisun tilanne (S1)	Tarjotun ratkaisun tilanne (S2)	Yksikkö
Hiilikädenjälkipotentiaali (raaka-aine)	1,355	0,653	t CO ₂ e
Hiilikädenjälkipotentiaali (käytön aikainen)	0,00087075	0,00087075	kg CO ₂ e / t km

S1- tai S2-skenaarioiden valinta ei tuottanut merkittäviä poikkeamia tuloksiin. Kuvassa 32 on esitetty tukkirekan käytön aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä sekä vertailutason tilanteessa että tarjotun ratkaisun kanssa S1-skenaariolla tarkasteltuna ja kuvassa 33 on puolestaan esitetty S2-skenaario. Ajanjaksona näissä on yksi vuosi. Kuvassa 32 violetti viiva kuvaa tukkirekan potentiaalisia yhden vuoden aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä polttoaineen kulutuksen osalta, kun käytössä on Strenx-teräs ja sininen viiva kuvaa standarditeräksen tapausta. Molempiin tarkasteluihin on otettu huomioon myös Strenx- ja standarditeräksen elinkaaren aikaiset päästöt standardien ISO 14044 ja 14067 mukaisesti. Kuvasta nähdään, että Strenx- ja standarditeräksen hiilijalanjälkien suuruus on lähes merkityksetön suhteessa tukkirekan käytön aikaisiin kasvihuonekaasupäästöihin. Hiilikädenjälki muodostuu tässä esimerkkitapauksessa kasvihuonekaasupäästövähennyksistä asiakkaan käytön aikaisissa päästövähennyksissä sekä tarjottavan tuotteen pienemmästä hiilijalanjäljestä VTT:n ja LUT:n –mallin mukaisesti.



Kuva 32. Tukkirekan käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt yhden tarkasteluvuoden aikana sekä Strenx-teräksen hiilikädenjälki (S1-skenaario).

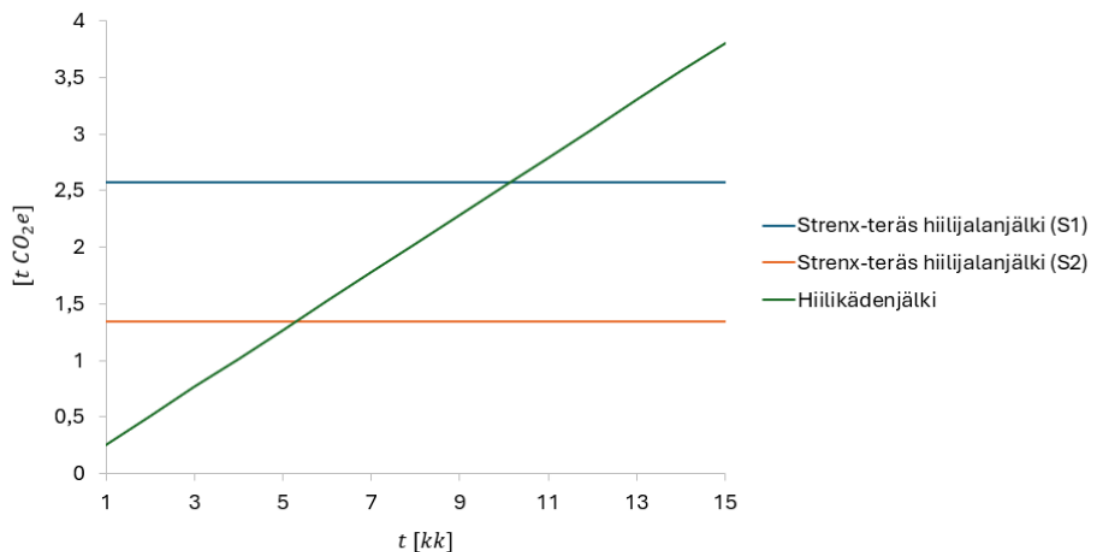
Kuvassa 33 oranssi viiva kuvaa tukkirekan potentiaalisia yhden vuoden aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä polttoaineen kulutuksen osalta, kun käytössä on Strenx-teräs ja sininen viiva kuvaa standarditeräksen tapausta.



Kuva 33. Tukkirekan käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt yhden tarkasteluvuoden aikana sekä Strenx-teräksen hiilikädenjälki (S2-skenaario).

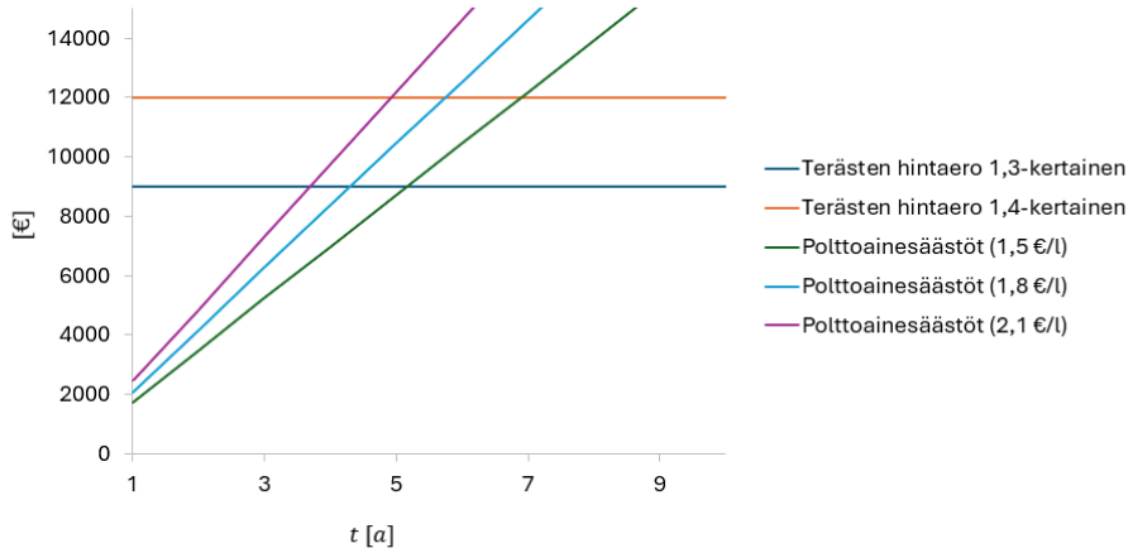
Kuvaan 34 on havainnollistettu Strenx-teräksen hiilikädenjälkeä ja hiilijalanjälkeä. Kuvan suhde havainnollistaa yhden vuoden ajalta kumuloituvaa hiilikädenjälkeä suhteessa Strenx-teräksen kertaluonteiseen hiilijalanjälkeen, eikä arvoja saa laskea keskenään yhteen päästöjen nettoväitteiden tekemiseksi. Tukkirekan lastipankon pystypalkkien hiilijalanjälki on kertaluonteinen ja käyttöiän aikana vakio, sillä siitä ei käytön aikana aiheudu kasvihuonekaasupäästöjä. Sen sijaan Strenx-teräksen hiilikädenjälki tukkirekan tapauksessa on polttoainetarkastelun näkökulmasta täysin riippuvainen siitä pystypalkkien käyttöajasta, tarkastelujakson pituudesta sekä käytettävästä polttoaineesta. Tarkastelu

tehtiin S1 - ja S2-skenaarioille erikseen. Kädenjälkipotentiaaliin on huomioitu Strenx-teräksen hiilijalanjäljet mukaan. Kuvasta nähdään, että Strenx-teräksestä valmistettujen pystypalkkien elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästökertymät on saavutettu 5–10 käyttökuukauden jälkeen, riippuen Strenx-teräksen elinkaaren määrittämiseen valittavasta skenaariosta S1 tai S2. Yhden vuoden tarkastelujaksolla, jossa tukkirekkaa käytetään 300 päivää, Strenx-teräksestä valmistetut pystypalkit alkavat siis tuottaa nettopäästövähennyksiä viimeistään 10 kuukauden jälkeen vertailutasoon nähden.

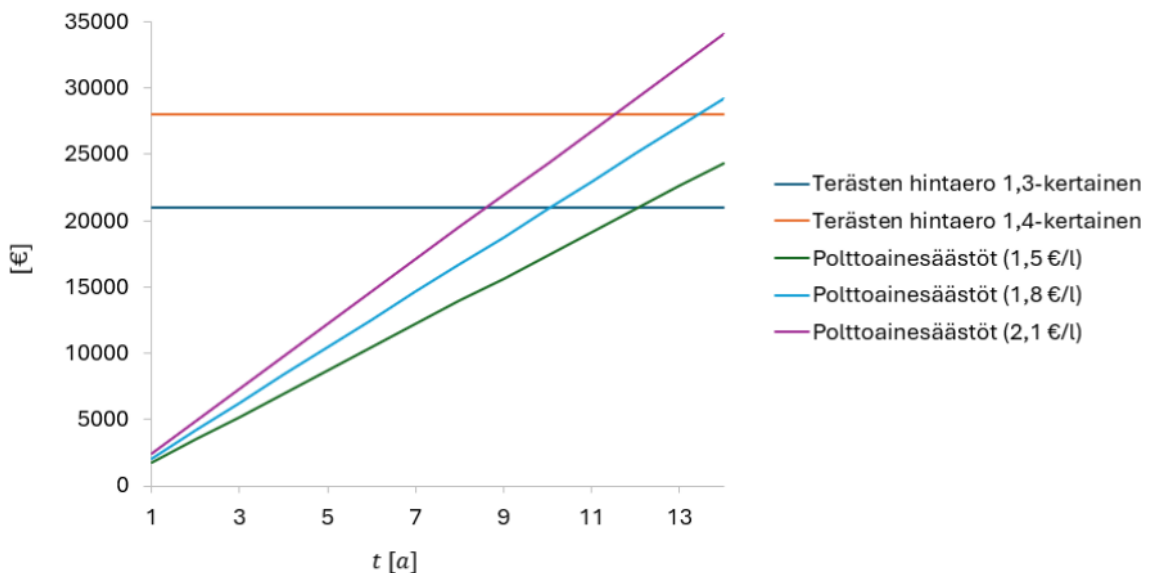


Kuva 34. Strenx-teräksen hiilijalanjälki ja -kädenjälki.

Kuvissa 35 ja 36 on havainnollistettu Strenx-teräksen taloudellisen takaisinmaksuajan arvioita suhteessa standarditeräkseen, kun vuosittaisen polttoainesäästön suuruudeksi saatiin 1159,4 l kuljetettuja tavaratonneja kohden. Huomataan, että taloudellinen takaisinmaksuaika on voimakkaasti riippuvainen polttoaineen hinnasta, hintaerosta investointien välillä sekä tarjotun tuotteen mahdollistamista polttoaineensäästöistä. Lisäksi saaduista tuloksista huomataan, että taloudellisen takaisinmaksuajan suuruudessa puhutaan vuosista, kun hiilidioksidiekvivalenttien näkökulmasta kyse on kuukausista. Kuitenkin yritysten tekemiin investointipäätöksiin vaikuttaa merkittävästi, lainsäädännön velvoittamien päästövähennysten lisäksi, taloudelliset näkökulmat. Tästä syystä on keskeistä hahmottaa, millä laajuudella näillä molemmilla tarkastelutasoilla voidaan saavuttaa hyötyjä.



Kuva 35. Strenx-teräksestä valmistettujen tukkirekan lastipankon pystypalkkien takaisinmaksuaika taloudellisesta näkökulmasta, hintaero 9000–12000 €.



Kuva 36. Strenx-teräksestä valmistettujen tukkirekan lastipankon pystypalkkien takaisinmaksuaika taloudellisesta näkökulmasta, hintaero 21000–28000 €.

Tässä tutkimuskohteessa päästövähennykset syntyvät arvoketjussa kahdella tapaa: oman toiminnan jälkeen ja tarjottavan tuotteen pienempänä hiilijalanjälkenä, aivan kuin kädenjälkimallin mukaisesti kuuluukin olla. Strenx-teräksestä valmistettujen pystypalkkien avulla onnistutaan siis vähentämään sekä asiakkaan käytön aikaisia päästöjä että tarjottavan tuotteen elinkaaren aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä.

Tulokset ovat myös yhdenmukainen vähähiilitiekartassa saatujen tulosten kanssa siitä, missä toimialan suurimmat kädenjälkipotentiaalit ovat, erityisesti luokassa 1, jossa määritetään oman toiminnan suoraa päästöjä. Vähähiilisyystiekartassa tunnistettiin toimialan

suurimmaksi kädenjälkipotentiaaliksi vähähiilinen teräs [18], joka myös nousee esille esimerkiksi Kim et al. vuonna 2022 [102] sekä Assadi et al. vuonna 2020 toteuttamissa tutkimuksissa [103], joissa vihreän vedyn käytön avulla saavutettavat hyödyt pelkistysprosessissa nousevat esille. Samoin Suer et al. (2021) toteuttamassa tutkimuksessa vedyn hyödyntäminen kuumavalssatun teräksen valmistusprosessissa nähdään merkittävänä toimialan päästövähennyskeinona [36].

Tässä tutkimuskohteessa kädenjäljen kannalta keskeisimmät hyödyt saavutetaan kuljettua tavaratonnia kohden syntyvistä kasvihuonekaasupäästöistä – Strenx-teräksen avulla tukkirekan kokonaismassa laskee, jolloin pystytään kuljettamaan suurempaa tavaralastia. Kirjallisuudessa on saatu hyvin samansuuntaisia arvioita erikoislujan teräksen avulla saavutettavista ympäristöhyödyistä tämän tutkimuskohteen kanssa. Esimerkiksi Kelly et al. vuonna 2015 toteuttamassa tutkimuksessa tarkasteltiin ajoneuvojen elinkaaren aikaisia päästöjä yhdenmukaisella toiminnallisella yksiköllä tämän tutkimuskohteen kanssa [104]. Saadut tulokset ovat linjassa tässä työssä tehtyjen havaintojen kanssa siitä, että erikoislujan teräksen avulla voidaan saavuttaa sekä pienempiä elinkaaren aikaisia päästöjä käytettävälle materiaalille, että ajoneuvon polttoaineen kulutuksen pienelemiselle käyttöiän aikana. Myös Kim et al. vuonna 2010 toteuttamassa tutkimuksessa ajoneuvoille on saatu erikoislujan teräksen avulla pienemmät elinkaaren aikaiset päästöt vertailutasoon nähden [105].

Tarkastelukohteen valittu toiminnallinen yksikkö, tukkirekan kuljetettua tavaratonnia kohden syntyvät kasvihuonekaasupäästöt, kuitenkin aiheuttaa pieniä epävarmuustekijöitä. Epävarmuustekijöistä ovat tuotteen lujuuden ja kestävyuden arviointi, sillä niiden vaikutuksia ei voida täysin tarkasti arvioida. Lisäksi sääolosuhteet ja kuljettajan ajotyylit vaikuttavat tukkirekan polttoainekulutukseen. Tällöin polttoainekulutus voi vaihdella merkittävästikin erilaisten tilanteiden välillä. Tehty herkkyystarkastelu ja rajaukset kuitenkin osoittavat kädenjäljen absoluuttisten arvojen voimakkaan riippuvuuden rajauksista, mikä edelleen korostaa tulosten avoimen raportoinnin tärkeyttä, jota myös VTT:n ja LUT:n mallissa painotetaan.

6.3 Hiilikädenjäljen määrittämisen luotettavuus ja sovellettavuus

Hiilikädenjäljen laskentamalliin on tällä hetkellä saatavilla useampia, monella tapaa toisiaan muistuttavia malleja. Kaikissa näissä kuitenkin on myös eroavaisuuksia toisiinsa liittyen niin vertailutason valintaan kuin niiden laajuuksien (scope) osalta. Toiset malleista keskittyvät ainoastaan hiilen kvantifointiin, kun taas osa kädenjälkimalleista ottaa myös

muita ympäristölle merkityksellisiä, esimerkiksi vesi- tai ympäristökädenjälkeä havainnollistavia indikaattoreita huomioon. Nämä mallit esitettiin tarkemmin luvun 4 taulukossa 2, johon on koottu tällä hetkellä saatavilla olevat kädenjälkimallit sekä näiden perustat ja laajuudet. Tässä työssä tarkemmin tarkasteltujen kädenjälkimallien, VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin sekä WBCSD:n vältettyjen päästöjen -mallin suurimpia eroja sekä yhtäläisyyksiä on puolestaan koottu taulukkoon 3. Kuitenkin näistä kahdesta mallista VTT:n ja LUT:n malli tarjosi tämän työn tarkoituksiin laajemmat hyödyntämismahdollisuudet taustansa, ISO-standardien, pohjalta. Tuotekohtaiseen hiilijalanjäljen ja -kädenjäljen laskentaan ISO-standardit 14040, 14044 ja 14067 tarjoavat laajemmat ja tarkemmat elinkaaren aikaisten päästöjen laskentaan tarvittavat määritelmät kuin GHG protokollan tuotestandardin mukaisesti tehtävät laskennat. Lisäksi ISO 14067:2018-standardi on uusin tuotekohtaisten hiilijalanjälkien määrittämiseen oleva standardi ja se tarjoaa monipuolisemmat mahdollisuudet hiilijalanjälkilaskennan laajentamiseksi LCA-arviointiin kuin GHG protokollan tuotestandardi.

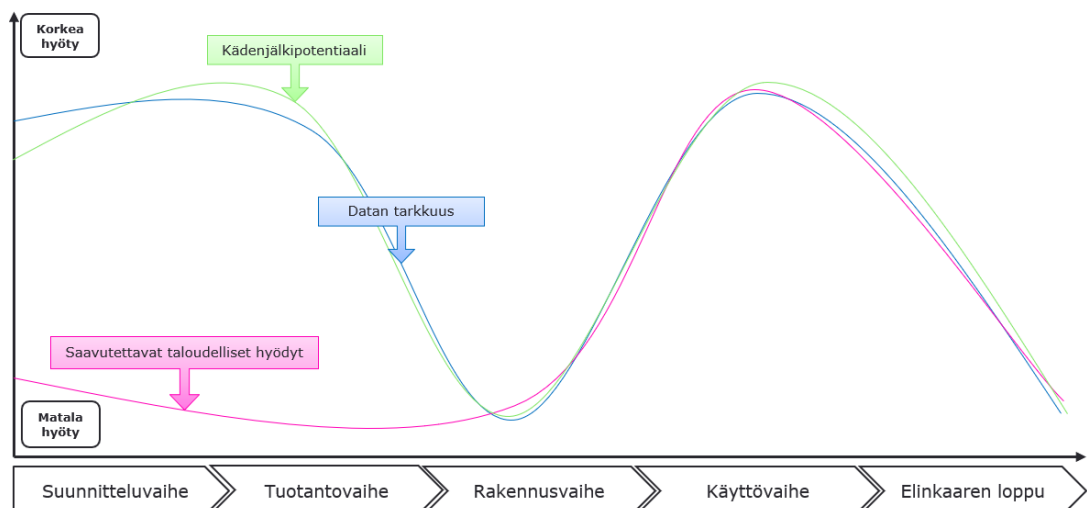
Valittu malli, vuoden 2021 VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimalli on laajennettu koskemaan ympäristökädenjälkeä, jolloin se tarjoaa mahdollisuuden tarkastella myös muita ympäristölle tärkeitä indikaattoreita. Tämä on keskeinen ero WBCSD:n Guidance on Avoided Emissions -malliin, joka huomioi ainoastaan ilmastonmuutoksen. Pelkästään hiilen näkökulmaa tarkasteltaessa voidaan helposti sivuuttaa muu ympäristölle aiheutuva kuorma. Vaikka tällöin ilmastonmuutoksen näkökulmasta tarkasteltuna tulokset olisivat positiiviset, saattaa muiden näkökulmien sivuuttaminen aiheuttaa sen, että toiminnasta aiheutuukin todellisuudessa enemmän haittaa, vaikka hiilen näkökulma onkin myönteinen. Tarkasteluissa olisikin tärkeää pystyä identifioimaan kaikki toiminnasta aiheutuvat negatiiviset vaikutukset ympäristölle, jolloin vaikutuksia voitaisiin arvioida kokonaisvaltaisemmin ja luotettavammin.

Kädenjäljen laskennan kannalta tärkeimpiä tietoja pohdittaessa esiin nousee neljä keskeistä tekijää: valittava toiminnallinen yksikkö ja vertailutaso, tarkasteltavan elinkaaren osat sekä hiilijalanjälkien määrittämiseen käytettävät päästökertoimet. Päästökertoimien valintaan ja tarkasteltavan elinkaaren osiin tosin on olemassa standardi, joissa näistä annetaan yksityiskohtaiset ohjeet, jotta jalanjälkilaskentojen tulosten vertailtavuus ja tarkkuus olisivat yhdenmukaiset kaikkialla. Sen sijaan kädenjäljen määrittämiseen liittyvälle vertailutason valinnalle ei ole olemassa standardia. Tähän liittyykin yksi suurimmista haasteista kädenjälkeä määritettäessä, sillä vertailutason valinnalla voidaan tehdä hyvin merkittäviä eroja kädenjäljen suuruudessa. Tässä myös piilee merkittävä, virheelisten positiivisten ympäristöväitteiden riski. Kädenjäljestä viestittäessä onkin siis ensiarvoisen tärkeää viestiä avoimesti kaikista sen taustalla vaikuttavista tekijöistä: käytetyistä

päästökertoimista, valitun tuotejärjestelmän elinkaaren vaiheista sekä kädenjäljen vertailutasosta.

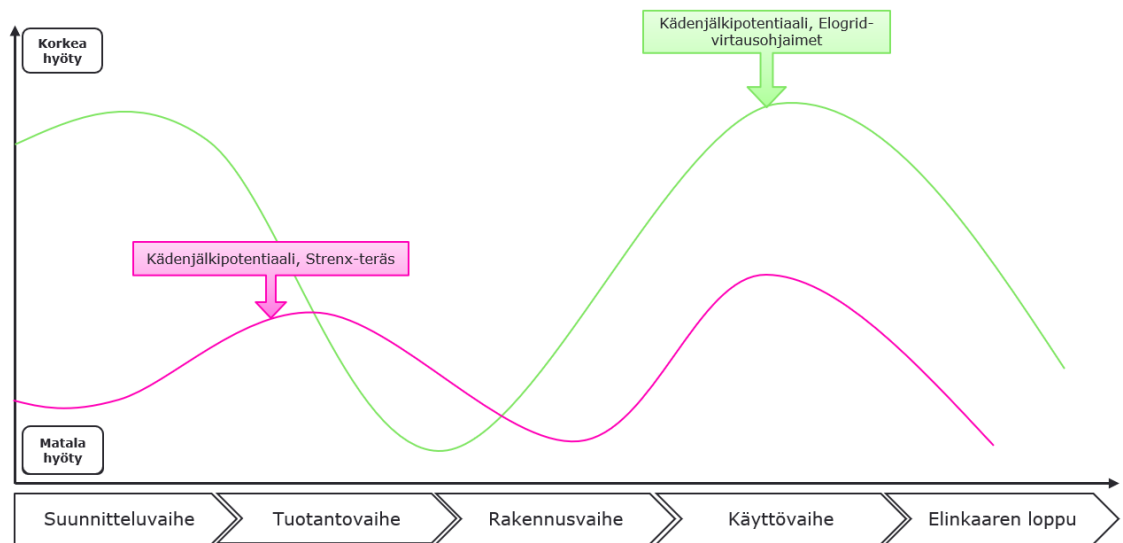
Kuvassa 37 on havainnollistettu tässä työssä saatujen tutkimuskohteiden sekä kirjallisuudesta saatujen tulosten pohjalta tehtyjä havaintoja tuotekohtaisen kädenjäljen potentiaalista koko arvoketjun matkalta. Kuvaajassa on havainnollistettu sekä kädenjälkipotentiaalia, kädenjäljen määrittämiseen tarvittavan datan tarkkuutta sekä saavutettavia taloudellisia hyötyjä. Kädenjälkipotentiaalin voidaan nähdä olevan suurimmillaan elinkaaren alkupäässä suunnittelu- ja tuotantovaiheen osalta sekä tuotteen käyttövaiheen aikana. Tehdyt havainnot ovat myös yhdenmukaiset VTT:n ja LUT:n -hiilikädenjälkimallin kanssa, jossa kädenjälki syntyy joko pienentämällä asiakkaalle tarjottavan tuotteen jalanjälkeä tai käytönaikaisia päästöjä suhteessa vertailutasoon [14]. Työssä tehtyjen havaintojen pohjalta saatavan datan tarkkuus on myös tarkinta suunnittelu-, tuotanto- ja käyttövaiheessa. Rakennusvaiheeseen ja elinkaaren loppuun sijoittuviin elinkaaren vaiheisiin on yrityksillä niukasti tarkkaa dataa saatavilla ja nämä elinkaaren vaiheet sisältävätkin eniten olettamuksia ja epävarmuustekijöitä.

Kuvassa 37 on myös havainnollistettu tarjottavan tuotteen avulla saavutettavia taloudellisia hyötyjä asiakkaan näkökulmasta suhteessa vertailutasoon. Hyödyt sijoittuvat erityisesti tuotteen käyttövaiheeseen, jossa myös kädenjälkipotentiaali on suurimmillaan. Tähän liittyikin perusteltu jatkokehitys työlle, jossa tarkasteltaisiin erityisesti teollisuuden näkökulmasta tuotteiden kädenjälkien ja taloudellisten hyötyjen välistä suhdetta. Tässä CO₂-päästövähennykset suhteutettaisiin esimerkiksi investoinnin kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin suhteessa vertailutasoon. Päästövähennysten ohella toiminnan taloudellisuus on yksi ratkaisevista tekijöistä investointipäätöksissä ja tähän olisikin hyödyllistä kehittää mittaristoa, jolla voitaisiin yhdistää saavutettavat ilmasto- ja myös taloudelliset hyödyt arviointikelpoiseksi kokonaisuudeksi.



Kuva 37. Hiilikädenjäljen potentiaali elinkaaren aikana.

Kuvaan 38 on havainnollistettu työssä tarkasteltujen tuotteiden kädenjälkipotentiaalia elinkaaren ajalta. Työssä saatujen tulosten pohjalta Elogrid -virtausohjainten suurin kädenjälkipotentiaali on tuotteen suunnitteluvaiheessa, joka mahdollistaa siten myös käytönaikaisen kädenjälkipotentiaalin. Strenx-teräksestä valmistettujen lastipankon pystypalkkien osalta suurin kädenjälkipotentiaali on sekä tuotteen tuotanto- että käyttövaiheessa. Kuvasta nähdään, että molempien työssä tarkasteltujen esimerkkitempausten tilanteessa kädenjälkipotentiaali on vähähiilitiekartassa tehtyjen havaintojen mukainen. Työssä tehdyn herkkyystarkastelun pohjalta voidaan havaita, että kädenjälkipotentiaalit asettuvat samoille elinkaarien vaiheille, mutta niiden suuruusluokat eroavat toisistaan.



Kuva 38. Työssä tarkasteltujen tuotteiden kädenjälkipotentiaali elinkaaren ajalta tarkasteltuna.

Kädenjälkimallin ja kädenjäljen laskennan tulisi olla vapaaehtoisuuteen perustuvaa. Samanaikaisesti sille tulisi saada selkeyttä vertailutason valintaan liittyen. Vertailutason valinnan tulisi olla niin yksiselitteistä, että valinnoissa ei voisi tulla epäselvyyksiä, joka ehkäisisi myös mahdollisten virheellisten ympäristöväitteiden tekemistä. Valinnassa tulisi huomioida mahdollisimman realistisesti vertailutason tilanteeseen vaikuttavat näkökulmat, jotta saatava kädenjäljen arvo olisi mahdollisimman realistinen. Lisäksi erityisen tärkeää on muistaa myös valitusta vertailutasosta avoimesti ja läpinäkyvästi viestiminen. Seuraava askel kädenjälkityössä tulisi olla vertailutason valintaa liittyvä standardi, joka mahdollistaisi samat pelisäännöt toimialoista ja tarkastelukohteista riippumatta. Teollisuuden aloille tarvittaisiin myös spesifioituja ohjeita metodologian hyödyntämisestä ja vertailutason valinnasta.

Saadut kädenjälkien arvot ovat hyvin merkittäviä itsessään, erityisesti suunnittelun ja konsultoinnin alalle tehtynä, sillä ne osoittavat, että kädenjälkeä pystytään kvantifioimaan. Toimialalle tehtävät kädenjäljen laskennat tiedetään hyvin haastaviksi allokoinnin

näkökulmasta – on vaikeaa rajata, mitkä päästöt ja toisaalta kädenjäljen näkökulmasta päästövähennykset voidaan katsoa toimialan suoraksi ansioksi. Tulokset korostavat myös SKOL ry:n teettämässä selvityksessä saatuja tuloksia toimialan korkeasta kädenjälkipotentiaalista [35]. Kädenjälkilaskennat kuitenkin vanhentuvat aina tietyn ajan jälkeen ja on tärkeää huomioida, että vertailutaso elää markkinan mukana jatkuvasti, jolloin sille ei voida määrittää vakiona pysyvää arvoa. Tämä toisaalta ajaa kilpailua ja markkinaa koko ajan eteenpäin: jokaisesta uudesta innovaatiosta tulee jossain vaiheessa vertailutaso tai markkinoilta poistuva ratkaisu parempien tieltä.

Työssä tehtyjen, VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimallin mukaisten laskentojen perusteella voidaan pohtia sitä, onko mallin soveltaminen kuitenkin melko työläs ja resursseja vievä kokonaisuus yritystasolla hyödynnettäväksi. Työläyttä aiheuttaa erityisesti tarvittavan datan kerääminen, joka tässä työssä toteutettiin manuaalisesti. Tulevaisuudessa merkittävänä laskentaa helpottavana tekijänä voisikin olla datan saatavuuden lisääminen, johon myös liittyy merkittävä liiketoimintamahdollisuus. Datan saatavuuden lisääminen helpotaisi erityisesti jalanjälki- ja sitä kautta myös kädenjälkilaskentojen toteutettavuutta.

Kädenjälkimallilla on kuitenkin erittäin merkittävä rooli päätöksenteon työvälineenä, sillä sen avulla voidaan kvantifioida potentiaaliset saavutettavat hyödyt. Se voidaan siis nähdä erityisesti viennin edistämisen työkaluna, jolla voidaan osoittaa oman liiketoiminnan avulla saavutettavista hyödyistä asiakkaille ja näin vahvistaa kilpailukykyä suhteessa muihin markkinoilla oleviin toimijoihin. Kädenjälkilaskentojen vakiinnuttaminen yritystasolla hyödynnettäväksi voi olla myös siitä näkökulmasta potentiaalista, että se linkittyy vahvasti jalanjälkilaskentoihin, joita yritystasolla tehdään jo nykyisen lainsäädännön velvoittamana. Lisäksi jatkotutkimusta kaivataan erityisesti siitä, mikä tekee juuri suomalaisesta teknologiasta erityistä verrattuna esimerkiksi eurooppalaisiin tai globaaleihin kilpailijoihin kädenjäljen näkökulmasta.

7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tarkasteltiin hiilikädenjäljen mallin soveltuvuutta teknologiateollisuuden kahden toimialan, metallin jalostuksen sekä suunnittelun ja konsultoinnin kontekstissa. Työssä saadut tulokset osoittavat, että hiilikädenjäljen malli toimii yrityksille hyödyllisenä työkaluna tuotteiden ja palveluiden positiivisten ympäristövaikutusten kvantifiointiin ja tarjoaa siten lisäarvoa sekä yritysten ilmastoviestintään, että kilpailukyvyyn vahvistamiseen vientimarkkinoilla. Kädenjälkilaskentojen vakiinnuttaminen yritystasolla hyödynnettäväksi voi olla potentiaalista myös siitä näkökulmasta, että se integroituu vahvasti jalankädenjälkilaskentoihin, joita yritystasolla tehdään jo nykyisen lainsäädännön velvoittamana. Erityinen potentiaali kädenjälkimallilla onkin viennin edistämisen työkaluna, sillä sen avulla voidaan osoittaa oman liiketoiminnan avulla saavutettavia hyötyjä asiakkaille ja näin vahvistaa kilpailukykyä suhteessa muihin markkinoilla oleviin toimijoihin.

Sovellettavan mallin valinnassa tarkasteltiin yksityiskohtaisemmin kahta metodologiaa, VTT:n ja LUT:n hiilikädenjäljen mallia sekä WBCSD:n vältettyjen päästöjen mallia. Näistä VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimalli tarjosi tähän työhön laajemmat soveltamismahdollisuudet taustansa, ISO-standardien pohjalta, ja on siten helpommin laajennettavissa koskemaan esimerkiksi LCA-arviointia. Valittu VTT:n ja LUT:n hiilikädenjälkimalli tarjoaa myös mahdollisuudet hiilikädenjäljen tarkastelun laajentamiseksi ympäristökädenjäljeksi, jonka avulla voidaan ottaa huomioon myös muita ympäristövaikutuksia ilmastomuutoksen ohella. Nämä näkökulmat tekivät siitä käyttökelpoisemmän metodologian tämän työn tavoitteisiin nähden.

Hiilikädenjäljen määrittäminen on äärimmäisen tapauskohtaista ja herkkää tehtäville oletuksille ja rajauksille. Laskennan kannalta keskeisimpiä tekijöitä ovat valittava toiminnallinen yksikkö, vertailutaso (baseline), tarkasteltavan elinkaaren osat sekä laskennassa käytettävät päästökertoimet. Kädenjäljen arvot ovat suoraan riippuvaisia tehdyistä rajauksista ja alkuoletuksista ja tästä syystä onkin äärimmäisen tärkeää raportoida avoimesti laskennassa tehdyistä valinnoista. Vertailutason valintaa tulisi ohjata, esimerkiksi standardoinnin avulla niin selkeäksi, että sen valinta olisi tapauskohtaisesti yksiselitteistä. Standardia kädenjälkeen tarvittaisiin juuri siitä näkökulmasta, että vertailutason valinnassa ei tulisi aukkoja. Tarkastelussa tulisi myös ottaa aina huomioon, että kokonaispäästöt tuotteen tai palvelun valmistuksesta sekä asiakkaan käytön aikana aiheutuvat päästöt laskisivat vertailutilanteeseen nähden.

Työssä tarkasteltiin kahta eri toimialaa edustavien yritysten tarjoamien tuotteiden hiilikädenjälkien arvoja. Molemmissa tapauksissa tarkasteluajaksi rajattiin koskemaan yhtä vuotta, mutta on tärkeää muistaa, että tuotteiden todelliset hiilikädenjäljen saadaan määrittämällä vuosittain tehtävät laskemat tuotteen koko käyttöajalle. Elogrid -virtausohjainten hiilikädenjälkien arvoiksi saatiin kuusi erilaista arvoa herkkyystarkastelun perusteella. S1-skenaariolla tarkasteltuna kädenjälkien arvot olivat 268,7 t CO₂e/a (-1,5 %), 358,5 t CO₂e/a (-2,0 %) ja 459,5 t CO₂e/a (-2,5 %). S2-skenaariolla tarkasteltuna kädenjälkien arvot olivat 273,0 t CO₂e/a (-1,5 %), 362,8 t CO₂e/a (-2,0 %) ja 463,8 t CO₂e/a (-2,5 %). Strenx-teräksestä valmistetuille tukkirekan lastipankon pystypalkeille saatiin herkkyystarkastelun pohjalta kaksi arvoa. S1-skenaariolla tuotteen elinkaaren aikainen hiilikädenjälkipotentiaali oli 1,355 t CO₂e ja S2-skenaariolla 0,653 t CO₂e. Strenx-teräksestä valmistetut tukkirekan osat mahdollistivat molemmilla skenaarioilla tarkasteltuna 0,871 g CO₂e / t km.

Diplomityössä tarkasteltiin hiilikädenjälkien ja hiilidioksidiekvivalenttien takaisinmaksuajan lisäksi taloudellista takaisinmaksuaikaa. Jatkotutkimuksessa olisi perusteltua kehittää mittaristoa, jolla voitaisiin yhdistää kasvihuonekaasupäästövähennykset saavutettiin taloudellisiin hyötyihin nähden koko investoinnin osalta. Tällä tavalla voitaisiin arvioida positiivisten ympäristövaikutusten taloudellista merkitystä päätöksenteon tukena.

Kädenjäljen kvantifioinnin ja siihen liittyvän viestinnän tulisi perustua vapaaehtoisuuteen, ollen samalla riittävän systemaattista uskottavuuden näkökulmasta. Erityisesti läpinäkyvä dokumentointi koko prosessin ajalta ja yhtenäiset laskentakäytännöt ovat keskeisiä tekijöitä kädenjälkimallien hyödynnettävyydessä ja vakiinnuttamisessa osaksi yritysten vastuullisuustyötä ja viennin edistämistä.

LÄHTEET

- [1] IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, s. 35-115, DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [2] European Scientific Advisory Board on Climate Change, "Scientific advice for the determination of an EU-wide 2040 climate target and a greenhouse gas budget for 2030–2050", *Publications Office of the European Union*, 2023. Saatavissa: <https://doi.org/10.2800/609405>
- [3] WBCSD ja WRI, "Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions (version 1.0)", *Greenhouse Gas Protocol*, 2013. Saatavissa: <https://ghgprotocol.org/scope-3-calculation-guidance-2>
- [4] WBCSD ja WRI, "GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard", *Greenhouse Gas Protocol*, 2004. Saatavissa: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>
- [5] Valtioneuvosto, "Vahva ja välittävä Suomi – Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023", 2023. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-763-8>.
- [6] The European Parliament and the Council of the European Union, "Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (European Climate Law)", *Official Journal of the European Union*, L243/1, 2021. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj/eng>
- [7] Ilmastolaki, L 10.6.2022/423, 2022. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2022/20220423>
- [8] Teknologiateollisuus ry, Ilmastotavoitteet, verkkosivu. Saatavissa: <https://teknologiateollisuus.fi/tavoitteemme/ilmastoj-energiailmastoj-energiapolitiikka/>
- [9] IEA (2024), World Energy Outlook 2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A).
- [10] WBCSD ja NZI, Guidance on Avoided Emissions – Helping Business Drive Innovations and Scale Solutions Toward Net Zero, *World Business Council for Sustainable Development*, 2023. Saatavissa: <https://www.wbcds.org/resources/guidance-on-avoided-emissions-helping-business-drive-innovations-and-scale-solutions-towards-net-zero/>
- [11] R. A. F. Alvarenga, S. Huysveld, S. E. Taelman, S. Sfez, N. Préat, M. Cooreman-Algoed, D. Sanjuan-Delmás, J. Dewulf, "A framework for using the handprint concept in attributional life cycle (sustainability) assessment", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 265, s. 121743, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121743.
- [12] I. Frecautan, C. Nastase, ja S. Grishunin, "Is Climate Policy Effectiveness Important for Country's Competitiveness Among EU Member States?", *Ovidius University Annals, Series Economic Sciences*, Vol. 23, No. 1, s. 368–377, 2023. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.61801/OUAESS.2023.1.48>
- [13] T. Pajula, S. Vatanen, H. Pihkola, K. Grönman, H. Kasurinen, ja R. Soukka, "Carbon Handprint Guide", *VTT Technical Research Centre of Finland Ltd.*, 2018. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/158938>
- [14] T. Pajula, S. Vatanen, K. Behm, K. Grönman, L. Lakanen, H. Kasurinen, ja R. Soukka, "Carbon handprint guide: V. 2.0 Applicable for environmental handprint", *VTT Technical Research Centre of Finland*, 2021. Saatavissa: https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2021/Carbon_handprint_guide_2021.pdf
- [15] R. Huttunen, P. Kuuva, M. Kinnunen, B. Lemström, ja P. Hirvonen, "Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia", *Työ- ja elinkeinoministeriö*, 2022. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0>
- [16] L. Lakanen, "Developing handprints to enhance the environmental performance of other actors", *Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT*, 2023. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-927-7>.
- [17] S. Raunio, J. Turkki, T. Pajula, ja S. Siitonen, "Introducing Carbon Handprint Methodology in International Arenas", *CLC*, 2023. Saatavissa: <https://clc.fi/publications/>
- [18] H. Vassinen, K. Järvinen, J. Auvinen, L. Aalto, J. Kallunki, A. Laine ja P. Pokela, "Teknologiateollisuuden vähähiilisyden tiekartta", *Teknologiateollisuus ry*, 2024. Saatavissa: <https://teknologiateollisuus.fi/wp-content/uploads/2024/06/vahahiilisyden-tiekartta-2024.pdf>
- [19] SBT, "SBTi Corporate Net-Zero Standard Version 1.2", *SBT*, 2024. Saatavissa: <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/Net-Zero-Standard-Criteria.pdf>

- [20] IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, y [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp., DOI: 10.1017/9781009157940.
- [21] European Commission, "Going climate-neutral by 2050: A strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy", *Publications Office of the European Union*, 2019. Saatavissa: <https://data.europa.eu/doi/10.2834/02074>
- [22] SBT, "SBTi Foundations for science-based net-zero targets setting in the corporate sector V1.0", *SBT*, 2020. Saatavissa: <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/foundations-for-net-zero-full-paper.pdf>
- [23] Suomen Standardoimisliitto SFS ry, "SFS-EN ISO 14021:2016 + A1:2021 Ympäristömerkit ja ympäristöselosteet. Omaehtoiset ympäristöväittämät (tyypin II ympäristöselosteet)", Helsinki, 2021, 72 s.
- [24] European commission, "COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society", COM/2024/63 final, 2024. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A63%3AFIN>
- [25] Elinkeinoelämän keskusliitto, "EU-komission 2040-ilmastoesitys antaa hyviä eväitä jatkoon", 2024. Saatavissa: <https://ek.fi/ajankohtaista/uutiset/eu-komission-2040-ilmastoesitys-antaa-hyvia-evaita-jatkoon/>
- [26] U. von der Leyen, "Political Guidelines for the next European Commission 2024-2029", *European Commission*, 2024. Saatavissa: https://commission.europa.eu/document/e6cd4328-673c-4e7a-8683-f63ffb2cf648_en
- [27] M. Draghi, "EU competitiveness: Looking ahead - European Commission", *European Commission*, 2024. Saatavissa: https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en
- [28] I. Faiella ja A. Mistretta, "The Net Zero Challenge for Firms' Competitiveness", *Environ Resource Econ*, Vol. 83, No. 1, s. 85–113, 2022, DOI: 10.1007/s10640-022-00652-7.
- [29] Elinkeinoelämän keskusliitto, "Vihreiden investointien dataikkuna", verkkosivu. Saatavissa: <https://ek.fi/tutkittua-tietoa/vihreat-investoinnit/>
- [30] S. Russell, "Estimating and Reporting the Comparative Emissions Impacts of Products", *WRI*, 2019, Saatavissa: <https://www.wri.org/research/estimating-and-reporting-comparative-emissions-impacts-products>
- [31] Teknologiateollisuus ry – Jäsenille, "Toimialat", 2024. Saatavissa: <https://jasenille.teknologiateollisuus.fi/verkostot-ja-tyoryhmat/toimialat/>
- [32] Teknologiateollisuus ry, "Teknologiateollisuuden vähähiilitiekartta 2035 – Tulokset", 2020. Saatavissa: https://teknologiateollisuus.fi/wp-content/uploads/2024/10/Teknologiateollisuuden-vahahiilitiekartta-tiivistelma_2020-06-08_FINAL.pdf
- [33] A. Tuppuru, K. Palomäki, K. Grönman, L. Lakanen, S. Pätäri, S. Vatanen ja R. Soukka, "Communicating positive environmental impacts – User experiences of the carbon handprint approach", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 434, No. 140292, 2024, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140292.
- [34] X. Zhao, A. J. Huning, J. Burek, F. Guo, D. J. Kropaczek, ja W. D. Pointer, "The pursuit of net-positive sustainability for industrial decarbonization with hybrid energy systems", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 362, No. 132349, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132349.
- [35] Vasara, Lehtinen, Takamäki ja Le, "Sustainable value creation of the consulting sector – Study for the Finnish Association of Consulting Firms", *SKOL ry*, 2021. Saatavissa: https://teknologiateollisuus.fi/skol/wp-content/uploads/sites/6/2024/08/SKOL_Sustainable_value_added_AFRY_Full_report_141221-1-1.pdf
- [36] J. Suer, M. Traverso, ja F. Ahrenhold, "Carbon footprint of scenarios towards climate-neutral steel according to ISO 14067", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 318, s. 128588, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128588.

- [37] B. Rahmatmand, A. Tahmasebi, H. Lomas, T. Honeyands, P. Koshy, K. Hockings ja A. Jayasekara, "A technical review on coke rate and quality in low-carbon blast furnace ironmaking", *Fuel*, Vol. 336, No. 127077, 2023, DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127077.
- [38] IEA (2020), Iron and Steel Technology Roadmap, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>, Licence: CC BY 4.0. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- [39] A. J. Davies ja A. Hastings, "Quantifying greenhouse gas emissions from decommissioned oil and gas steel structures: Can current policy meet NetZero goals?", *Energy Policy*, Vol. 160, No. 112717, 2022, DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112717.
- [40] K. Behm, R. Husgafvel, C. Hohenthal, H. Pihkola, ja S. Vatanen, Carbon handprint - Communicating the good we do, *VTT Technical Research Centre of Finland*, Espoo, 2016. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2016/VTT-R-00452-16.pdf>.
- [41] Suomen Standardoimisliitto SFS ry, "SFS-EN ISO 14067:2018 Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista koskevat vaatimukset ja ohjeet", Helsinki, 2018, 111 s.
- [42] United States Environmental Protection Agency, "Understanding Global Warming Potentials", verkkosivu. Saatavissa: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- [43] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp., ISBN: 978-92-9169-143-2. Saatavissa: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- [44] Suomen Standardoimisliitto SFS ry, "SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020 Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet", Helsinki, 2006, 58 s.
- [45] Suomen Standardoimisliitto SFS ry, "SFS-EN ISO 14044:2006 +A1:2018 + A2:2020 Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja", Helsinki, 2022, 122 s.
- [46] British Standards, "PAS 2050:2008. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services", 2008. Saatavissa: www.carbonconstruct.com/pdf/pas_2050.pdf
- [47] WRI ja WBCSD, "Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard", *Greenhouse Gas Protocol*, 2011. Saatavissa: <https://ghgprotocol.org/product-standard>
- [48] K. Grönman, T. Pajula, J. Sillman, M. Leino, S. Vatanen, H. Kasurinen, A. Soininen ja R. Soukka, "Carbon handprint – An approach to assess the positive climate impacts of products demonstrated via renewable diesel case", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 206, s. 1059–1072, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.233.
- [49] L. Lakanen, K. Grönman, H. Kasurinen, S. Vatanen, T. Pajula, K. Behm ja R. Soukka, "Approach for assessing environmental handprints", *E3S Web of Conferences*, Les Ulis: EDP Sciences, Vol. 349, s. 12001, 2022. DOI: 10.1051/e3sconf/202234912001.
- [50] L. Lakanen, H. Kumpulainen, O. Helppi, K. Grönman, ja R. Soukka, "Carbon Handprint Approach for Cities and Regions: A Framework to Reveal and Assess the Potential of Cities in Climate Change Mitigation", *Sustainability*, Vol. 14, No. 11, s. 6534, 2022, DOI: 10.3390/su14116534.
- [51] SFS Suomen Standardit ry, "SFS-EN ISO 14050:2020:en, Environmental management. Vocabulary (ISO 14050:2020)", Helsinki, 2020, 87 s.
- [52] H. Siikavirta, M. Cederlöf, K. Skoglund ja V. Ruponen, "Ilmastovuosikertomus 2024", *Ympäristöministeriö*, 2024. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-374-4>
- [53] European Commission, "Screening of websites for 'greenwashing': half of green claims lack evidence", *Press Release*, 2021. Saatavissa: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_269
- [54] G. A. Norris, J. Burek, E. A. Moore, R. E. Kirchain, ja J. Gregory, "Sustainability Health Initiative for NetPositive Enterprise handprint methodological framework", *The international journal of life cycle assessment*, Vol. 26, No. 3, s. 528–542, 2021, DOI: 10.1007/s11367-021-01874-5.
- [55] M. Kühnen, S. Silva, J. Beckmann, U. Eberle, R. Hahn, C. Hermann, S. Schaltegger ja M. Schmid, "Contributions to the sustainable development goals in life cycle sustainability assessment: Insights from the Handprint research project", *Sustainability Management Forum*, Vol. 27, No. 1, s. 65–82, 2019, DOI: 10.1007/s00550-019-00484-y.

- [56] A. Stephens & V. Thieme, "The Avoided Emissions Framework (AEF)", *Mission Innovation*, 2018. Saatavissa: <https://climate-solution-guide.misolutionframework.net/tools-and-initiatives/avoided-emissions-framework-ae/>
- [57] European Commission, "Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on substantiation and communication of explicit environmental claims (Green Claims Directive)", COM/2023/166 final, Bryssel, 2023. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2023%3A0166%3AFIN>
- [58] ARFY, "Carbon handprint", n.d. verkkosivu. Saatavissa: <https://afry.com/en/competence/carbon-handprint>
- [59] L. Lakanen, K. Grönman, S. Väisänen, H. Kasurinen, A. Soininen, ja R. Soukka, "Applying the handprint approach to assess the air pollutant reduction potential of paraffinic renewable diesel fuel in the car fleet of the city of Helsinki", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 290, s. 125786, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125786.
- [60] A. Tuppara, Tutkijaopettaja, Business Studies, LUT-kauppakorkeakoulu, Lappeenranta, 2025.
- [61] E. C. Karlsson ja F. Gelin, "Framework for Avoided Emissions Reporting – A case study of PowerCell Group and Hydrogen Electric Fuel Cell Solutions", *Lund University*, 2024. Saatavissa: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9158859>
- [62] R. Bettin, L. Bachelet, S. Amant, A. Joly, M. Moneuse ja A. Florentin, "Net Zero Initiative – A Framework For Collective Carbo Neutrality", *Net Zero Initiative*, 2020. Saatavissa: <https://www.net-zero-initiative.com/en>
- [63] S. Siitonen, Perustaja, Toimitusjohtaja, OpenCO2net, Helsinki, 2025.
- [64] T. Pajula, Senior Principal, Sustainability, AFRY Management Consulting, 2025.
- [65] Viking Line, "Viking Cinderella", [Viitattu: 10.3.2025]. Saatavissa: <https://www.vikingline.fi/valitse-matka/laivat/ms-cinderella/>
- [66] J. Yli-Tolppa, Vice President, Shipowner Services, Marine, Elomatic Oy, Turku, 2025.
- [67] Viking Line, "Viking Cinderella returning to Helsinki with a new red look", 2024. Saatavissa: <https://www.vikingline.com/press-room-old/27CA803609DF7C57/>
- [68] A. Ala-Heikkilä, insinööri, Elomatic Oy, Turku, 2025.
- [69] Elomatic: "Elogrid™ – Kohti kestäväää tulevaisuutta parantamalla laivan suorituskykyä", verkkosivu, n.d. Saatavissa: <https://www.elomatic.com/fi/meriteollisuus/varustamot/elogrid/>
- [70] J. Tanttari, R. Hämäläinen, ja P. Rautaheimo, "The Hydrodynamics of Elogrid", *SNAME 14th International Marine Design Conference*, 2022, DOI: 10.5957/IMDC-2022-298.
- [71] Elomatic: "Virtauslaskenta", verkkosivu, n.d. Saatavissa: <https://www.elomatic.com/fi/teknologiaratkaisut/virtauslaskenta/>
- [72] Elomatic Oy, "Onnistunut pilotti – Viking Line tilaa Elogridit jo toiseen laivaansa M/S Viking XPRSiin", 2021. Saatavissa: <https://news.cision.com/fi/elomatic-oy/r/onnistunut-pilotti---viking-line-tilaa-elogridit-jo-toiseen-laivaansa-m-s-viking-xprsiin,c3454034>
- [73] Department for Energy Security and Net Zero, "Greenhouse gas reporting: conversion factors 2024", *GOV.UK*, 2024. Saatavissa: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2024>
- [74] Tata Steel, "Pickled Hot Rolled Steel Coil – Environmental Profile", 2024. Saatavissa: <https://www.tatasteeluk.com/construction/download-centre/environmental-product-declarations>
- [75] Fingrid, "Sähköntuotannon ja -kulutuksen CO2-päästöarviot", verkkosivu, [Viitattu: 23.1.2025]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/co2/>
- [76] Tata Steel UK, "Product Specific EPDS", [Viitattu: 4.2.2025]. Saatavissa: <https://www.tatasteeluk.com/construction/download-centre/environmental-product-declarations>
- [77] C. González-González, J. Los Santos-Ortega, E. Fraile-García, ja J. Ferreira-Cabello, "Environmental and Economic Analyses of TIG, MIG, MAG and SMAW Welding Processes", *Metals*, Vol. 13, No. 6, s. 1094 2023, DOI: 10.3390/met13061094.
- [78] European Union, "Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC (Text with EEA relevance)", *Official Journal of the European Union*, L234/48, 2023. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/1805/oj>
- [79] A. Ala-Heikkilä, Elogrid-virtausohjainten hiilijalanjälki: case M/S Viking Cinderella, *Turku AMK*, 2024. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2024121134793>

- [80] SFS Suomen Standardit ry, "SFS-EN ISO 14083:2023, Greenhouse gases. Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations", Helsinki, 2023, 254 s.
- [81] Google Maps, [Viitattu: 12.2.2025] Saatavissa: https://www.google.com/maps/@61.0088354,24.4812127,13z?entry=tту&g_ep=Ego-yMDI1MDMyNS4xIKXMDSoASAFQAw%3D%3D
- [82] SEA-DISTANCES.ORG, "Ports Distances", [Viitattu: 12.2.2025]. Saatavissa: <https://sea-distances.org/>
- [83] European Union, "Directive (EU) 2016/802 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 relating to a reduction in the sulphur content of certain liquid fuels (codification)", *Official Journal of the European Union*, L132/58, 2016. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/dir/2016/802/oj>
- [84] IMO, "MEPC.305(73), Amendments to MARPOL Annex VI, Prohibition on the carriage of non-compliant fuel oil for combustion purposes for propulsion or operation on board a ship", 2018. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx>
- [85] T. Turunen, Director, Business Development, Industry, Elomatic Oy, Jyväskylä, 2025.
- [86] Ship & Bunker, "Rotterdam Bunker Prices", [Viitattu: 23.1.2025]. Saatavissa: <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam>
- [87] Väylävirasto, "Henkilöliikenne", *Väylävirasto*, 2020. Saatavissa: <https://vayla.fi/vaylista/liikennejarjestelma/henkiloliikenne>
- [88] Moottorijoneuvokanta [verkkojulkaisu]. Viiteajankohta: 2025. ISSN=1798-856X. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: <https://stat.fi/julkaisu/cm10kulpe8nbj07w0fh2g6kbp>
- [89] Traficom, "Liikennekäytössä olevat henkilöautot - käyttövoimat ja päästöt", 2023, [Viitattu: 10.3.2025]. Saatavissa: <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikennekaytossa-olevat-henkiloautot-kayttovoimat-ja-paastot>
- [90] SSAB, "Hot Rolled steel plates, S-P-01918, version 1.2", 2020. Saatavissa: <https://www.ssab.com/en/download-center#sort=%40customorder%20descending>
- [91] SSAB Europe Oy, "Custom case – CO2 emissions payback in 3 months", 2019. Saatavissa: <https://www.ssab.com/en-us/brands-and-products/strenx/customer-cases/2019/ecoupgraded-timber-trailer>
- [92] H. Leppänen, Ympäristö- ja turvallisuusjohtaja, SSAB Europe Oy, Raahe, 2025.
- [93] SSAB Europe Oy, "How to understand an EPD – Sustainability and Product management", 2025. Saatavissa: <https://www.ssab.com/en/download-center#sort=%40customorder%20descending>
- [94] K. Ahvonen, Product manager, Color Coated products, SSAB Europe Oy, Hämeenlinna, 2025.
- [95] Energian hankinta ja kulutus [verkkojulkaisu]. Viiteajankohta: 2022. ISSN=1799-795X. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 27.3.2025]. Saatavissa: <https://stat.fi/julkaisu/cl8mxi4xx1wo10cvzn321a0ss>
- [96] Kuluttajahintaindeksi [verkkojulkaisu]. Viiteajankohta: 2024. ISSN=1796-3524. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 27.3.2025]. Saatavissa: <https://stat.fi/julkaisu/clmyvf4y6nvr00aunmpq4lw51>
- [97] E. A. Bouman, E. Lindstad, A. I. Rialland, ja A. H. Strømman, "State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 52, s. 408–421, 2017, DOI: 10.1016/j.trd.2017.03.022.
- [98] A. Tsvetkova, M. Hellström, H. Schwartz, R. Rabetino, ja H. Syed, "A transition towards clean propulsion in shipping: The role of PESTLE drivers and implications for policy", *Marine Policy*, Vol. 161, s. 106002, 2024, DOI: 10.1016/j.marpol.2023.106002
- [99] H. Schwartz, "Reducing Emissions Profitably: A study concerning preconditions of business ecosystem change in shipping", *Åbo Akademi - Åbo Akademi University*, 2024. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-12-4425-4>.
- [100] H. Schwartz, M. Gustafsson, J. Spohr, "Emission abatement in shipping – is it possible to reduce carbon dioxide emissions profitably?", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 254, s. 120069, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120069.
- [101] IMO, "MEPC.377(80), 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships", 2023. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx>

- [102] J. Kim, B.K. Sovacool, M. Bazilian, S. Griffiths, J. Lee, M. Yang ja J. Lee, "Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options", *Energy Research & Social Science*, Vol. 89, s. 102565, 2022, DOI: 10.1016/j.erss.2022.102565.
- [103] A. Bhaskar, M. Assadi ja H. Nikpey Somehsaraei, "Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen", *Energies (Basel)*, Vol. 13, No. 3, s. 758, 2020, DOI: 10.3390/en13030758.
- [104] J. C. Kelly, J. L. Sullivan, A. Burnham, ja A. Elgowainy, "Impacts of Vehicle Weight Reduction via Material Substitution on Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions", *Environmental science & technology*, Vol. 49, No. 20, s. 12535–12542, 2015, DOI: 10.1021/acs.est.5b03192.
- [105] H.-J. Kim, C. McMillan, G. A. Keoleian, ja S. J. Skerlos, "Greenhouse Gas Emissions Payback for Lightweighted Vehicles Using Aluminum and High-Strength Steel", *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 14, No. 6, s. 929–946, 2010, DOI: 10.1111/j.1530-9290.2010.00283.x.