

Vili Kuusisto

ALUMIINITÖLKIN ELINKAARIARVIOINTI KÄYTTÄEN SOLIDWORKS SUSTAINABILITY -TYÖKALUA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Vili Kuusisto: Alumiinitölkkin elinkaariarviointi käyttäen SolidWorks Sustainability -työkalua
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2024

Yksi keskeinen haaste kestävän kehityksen tiellä on ilmastonmuutoksen kiihtyminen, joka johtuu kasvihuonekaasujen päästöistä. Maailmanlaajuisesti on tunnistettu tarve vähentää hiilidioksidipäästöjä merkittävästi rajoittaaksemme maapallon keskilämpötilan nousun kahteen celsiusasteeseen. Ekologinen suunnittelu ja elinkaariarviointi ovat nousseet tärkeiksi käytännöiksi ympäristöystävällisen tuotekehityksen toteuttamisessa. CAD-mallinnusohjelmat, kuten SolidWorks, tarjoavat virtaviivaistettuja työkaluja ympäristövaikutusten arvioimiseen ja kestävän suunnittelun tukemiseen. Tämä tutkimus pyrkii syventämään ymmärrystä kestävän kehityksen periaatteista ja niiden käytännön soveltamisesta SolidWorks Sustainability -työkalun avulla. Työkalun käytön kautta pyritään arvioimaan sen tehokkuutta ympäristöystävällisen suunnittelun tukena ja antamaan käytännön näkökulman kestävän kehityksen haasteisiin.

Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa aihealueeseen perehdyttiin monipuolisesti luotettavista lähteistä. Tutkimus pitää sisällään myös kokeellisen osuuden, jossa alumiinitölkkin elinkaariarviointi suoritettiin SolidWorks Sustainability työkalulla. Tutkimuksessa Sustainability -työkalulla tehdyn elinkaariarvioinnin tuloksia on vertailtu laajempiin 330 millilitran alumiinitölkeistä tehtyihin elinkaariarviointeihin. Tuotteeksi valikoitui alumiinitölkki, koska se on yksinkertainen tuote, jonka elinkaari on helposti mukailtavissa yksinkertaistetulla elinkaariarviointityökalulla. Vertailtavana kohteena tutkimuksessa olivat Metal Packaging European, Sphera Solutionsin ja PE Americasin tekemät elinkaariarvioinnit. Tutkimuksessa käytetyt lähtöarvot mukailevat vertailukohteiden lähtöarvoja ja täten pyritään luomaan mahdollisimman tarkan pohjan elinkaariarviointiin. Sustainability -työkalulla muodostettiin kaksi elinkaariarviota, joista toinen pyrkii mukailemaan Euroopassa valmistetun tölkin elinkaarta ja toinen puolestaan Pohjois-Amerikassa valmistetun tölkin elinkaarta. Alueiksi valittiin Eurooppa ja Pohjois-Amerikka, koska näissä molemmissa on huomattavasti erilainen kierätyskulttuuri, jonka oletettiin vaikuttavan huomattavasti tölkin elinkaareen. Molemmista alueista on myös paljon elinkaariarviointiin vaikuttavaa dataa saatavilla, joten niistä tehdyt laajat elinkaariarvioinnit ovat paikkansapitäviä ja täten hyviä vertailukohteita Sustainability -työkalulla tehtyyn elinkaariarviointiin.

Elinkaariarvioinnin tuloksia sekä arviointiprosessia tarkastellaan työssä kriittisesti. Työssä tuodaan esiin työkalun epävarmuuksia ja ehdotetaan, kuinka prosessia ja työkalua voitaisiin parantaa. Toteutettu elinkaariarviointi mukailee odotettua paremmin laajoja vertailukohteiksi valittuja elinkaariarvioita. Nämä tulokset pitää kuitenkin sisällään paljon kompromisseja ja epävarmuuksia, jotka vaikuttavat saatuihin arvoihin. Vaikka saadut tulokset vaikuttavat järkeville ja tarkoilta, se ei vielä tarkoita sitä, että työkalu olisi käyttökelpoinen kyseiseen tarkoitukseen. Työkalu on ollut käytettävissä jo vuodesta 2009 asti ja täten on oikeutettua odottaa paljon valmiimpaa työkalua. Työkalussa on paljon kehityskohteita, joiden toteuttaminen ei luulisi olevan DassaultSystèmesille haaste, sillä samanlaisia toimintoja on käytössä SolidWorksin ohjelmistossa.

SolidWorks Sustainability -työkalu soveltuu parhaiten tuotekehittäjän apuna suuntaa antavana työkaluna. Työkalu ei ole tarpeeksi tarkka, että siihen voitaisiin luottaa elinkaariarviointia tehdessä. Toisaalta tällaisia virtaviivaistettuja työkaluja ei ole myöskään tarkoitettu virallisten elinkaariarviointien korvaajiksi vaan pikemminkin matalakynnykselliseksi apuvälineeksi tuotekehittäjälle. SolidWorks Sustainability -työkalu soveltuu siis sille tarkoitettuun vaatimattomaan tehtävään, mutta sillä olisi paljon potentiaalia ekologiseen suunnitteluun yhä enemmän nojaavassa maailmassa.

Avainsanat: SolidWorks Sustainability, Ekologinen suunnittelu, elinkaariarviointi, elinkaari-analyysi, LCA.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Vili Kuusisto: Life cycle assessment of an aluminum can using SolidWorks Sustainability tool
Batchelor's thesis
Tampere University
Mechanical engineering
May 2024

One key challenge on the path to sustainable development is the acceleration of climate change, resulting from greenhouse gas emissions. There is a recognized global need to significantly reduce carbon dioxide emissions to limit the Earth's average temperature rise to two degrees Celsius. Ecological design and life cycle assessment have become important practices in implementing environmentally friendly product development. CAD modeling programs, such as SolidWorks, offer streamlined tools for evaluating environmental impacts and supporting sustainable design. This study aims to deepen understanding of the principles of sustainable development and their practical application using the SolidWorks Sustainability tool. Through the tool's usage, I seek to assess its effectiveness in supporting environmentally friendly design and provide a practical perspective on the challenges of sustainable development.

The study was conducted as a literature review, extensively exploring the subject area from reliable sources. It also includes an experimental component, where the life cycle assessment of an aluminum can was performed using the SolidWorks Sustainability tool. The results of the Sustainability tool's life cycle assessment are compared with broader life cycle assessments of 330-milliliter aluminum cans conducted by Metal Packaging Europe, Sphera Solutions, and PE Americas. The input values used in the study align with those of the comparison assessments, aiming to create the most accurate basis for life cycle assessment. Two life cycle assessments were conducted using the Sustainability tool, one aiming to replicate the life cycle of a can manufactured in Europe and the other of a can manufactured in North America. Europe and North America were chosen as regions due to significantly different recycling cultures, which were expected to have a considerable impact on the can's life cycle. Both regions also have ample data available for life cycle assessment, making their extensive assessments reliable and thus good comparison points for the Sustainability tool's life cycle assessment.

The results of the life cycle assessment and the assessment process are critically examined in the study. The uncertainties of the tool are highlighted, and suggestions are made on how to improve the process and the tool itself. While the conducted life cycle assessment better aligns with the expected outcomes of the selected extensive comparison life cycle assessments, these results still entail many compromises and uncertainties that affect the obtained values. Although the results seem reasonable and accurate, it does not necessarily mean that the tool is suitable for the intended purpose. The tool has been available since 2009, and therefore, it is reasonable to expect a more mature tool. There are many areas for improvement in the tool, which should not pose a challenge for Dassault Systèmes, as similar functions are available in the SolidWorks software.

The SolidWorks Sustainability tool is best suited as a directional tool for product developers. It is not precise enough to rely on for life cycle assessment. On the other hand, such streamlined tools are not intended to replace official life cycle assessments but rather to serve as low-threshold aids for product developers. Thus, the SolidWorks Sustainability tool is suitable for its intended modest task, but it has the potential to contribute significantly to ecological design in an increasingly environmentally conscious world.

Keywords: SolidWorks Sustainability, eco-design, life cycle assessment, life cycle analysis, LCA.

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

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KESTÄVÄ SUUNNITTELU.....	2
2.1 Päästöjen vähentäminen	2
2.2 Kasvihuonekaasupäästöjen mittaaminen ja raportointi	2
2.3 Ekologinen suunnittelu.....	3
2.4 Elinkaariarviointi	4
3. SOLIDWORKS SUSTAINABILITY	6
3.1 SolidWorks Sustainability käyttöliittymä	6
3.2 Käyttöliittymän tuloksien esitystapa	8
4. ALUMIINITÖLKIN HIILIJALANJÄLKI.....	11
4.1 Tölkkin elinkaariarviointi SolidWorks Sustainabilityllä	11
4.2 Tölkkin elinkaariarvioinnin vertailu	15
5. SOLIDWORKS SUSTAINABILITY -TYÖKALUN RAJOITTEET	17
5.1 Materiaalivalinta.....	17
5.2 Aluevalinnat.....	17
5.3 Valmistusmenetelmä	18
5.4 Pintakäsittely	19
5.5 Työkalun toimintavirheet.....	20
5.6 Elinkaariarvioinnin suorittajan epävarmuus.....	20
5.7 Ajankohtaisuus	21
6. YHTEENVETO.....	22
6.1 Elinkaariarvioinnin tulokset	22
6.2 Jatkotutkimusehdotukset	25
LÄHTEET	26

1. JOHDANTO

Kestävä kehitys on noussut keskeiseksi teemaksi maailmanlaajuisesti ja sen merkitys korostuu entisestään, kun tavoitellaan tasapainoa taloudellisen kasvun, sosiaalisen hyvinvoinnin ja ympäristön säilyttämisen välillä. Yksi keskeinen haaste kestävä kehityksen tiellä on ilmastomuutoksen kiihtyminen, joka johtuu kasvihuonekaasujen päästöistä. Maailmanlaajuisesti on tunnistettu tarve vähentää hiilidioksidipäästöjä merkittävästi rajoittaaksemme maapallon keskilämpötilan nousun kahteen celsiusasteeseen (Greenhouse Gas Protocol 2011). Tämä tavoite edellyttää konkreettisia toimia yrityksiltä ja organisaatioilta, jotka ovat entistä enemmän kiinnittäneet huomiota kasvihuonekaasupäästöihin arvoketuissaan ja tuoteprofileissaan (Greenhouse Gas Protocol 2011).

Lisäksi ekologinen suunnittelu ja elinkaariarviointi ovat nousseet tärkeiksi käytännöiksi ympäristöystävällisen tuotekehityksen toteuttamisessa (Baldowska-Witos et al. 2022). Tässä kontekstissa CAD-mallinnusohjelmat, kuten SolidWorks, tarjoavat työkaluja ympäristövaikutusten arvioimiseen ja kestävä suunnittelun tukemiseen (Dassault Systèmes 2022). Tämän tutkimuksen pääkohteena on SolidWorks Sustainability -työkalun käyttö ja sen tehokkuus ympäristövaikutusten arvioinnissa.

Työssä tarkastellaan myös konkreettista esimerkkiä: alumiinitölkin hiilijalanjäljen analysointia. Alumiinitölkki on laajalti käytetty tuote, ja sen valmistuksella on merkittävä vaikutus hiilidioksidipäästöihin. Tutkimalla tarkemmin tällaisen tuotteen elinkaaren ympäristövaikutuksia voimme saada arvokasta tietoa kestävä kehityksen edistämiseksi.

Tutkimus pyrkii syventämään ymmärrystä kestävä kehityksen periaatteista ja niiden käytännön soveltamisesta CAD-mallinnusohjelmien avulla. SolidWorks Sustainability -työkalun käytön kautta pyritään arvioimaan sen tehokkuutta ympäristöystävällisen suunnittelun tukena ja antamaan käytännön näkökulman kestävä kehityksen haasteisiin.

Tutkimuksessa pyritään vastaamaan tutkimuskysymyksiin:

- Kuinka suorittaa tuotteen elinkaariarviointi käyttäen SolidWorks Sustainability -työkalua?
- Voiko SolidWorks Sustainability työkalulla suorittaa alumiinitölkin elinkaariarvioinnin luotettavasti?
- Mitä epävarmuuksia liittyy elinkaariarviointiin Sustainability -työkalulla?

2. KESTÄVÄ SUUNNITTELU

Kestävän kehityksen (engl. sustainable development) määritelmä on saanut alkunsa vuodelta 1987 ympäristö- ja kehityskomission ehdottamana (Popa & Popa 2017). Kestävä kehitys on taloudellisen kehityksen muoto, joka täyttää nykyisten sukupolvien tarpeet tinkimättä tulevien sukupolvien kyvystä täyttää omat tarpeensa (United Nations 1987). Yksi kestävän kehityksen suurista haasteista on löytää tapoja edistää ympäristöystävällisiä toimintoja ja estää niitä jotka aiheuttavat vahinkoa ympäristölle (Popa & Popa 2017).

2.1 Päästöjen vähentäminen

Ilmastonmuutosta kiihdyttävien kasvihuonekaasujen (engl. greenhouse gas, GHG) päästöt ja niiden vaikutukset ympäri maailmaa kasvavat (Greenhouse Gas Protocol 2011). Teollisuusala oli vastuussa 33 %:sta maailmanlaajuisista ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä vuonna 2014 (Rissman et al. 2020). Ilmastotutkijoiden mukaan maailmanlaajuisia hiilidioksidipäästöjä on leikattava jopa 85 % pois vuoden 2000 tasosta vuoteen 2050 mennessä, jotta maapallon keskilämpötilan nousu saadaan rajoitettua 2 °C:seen (Greenhouse Gas Protocol 2011). Keskilämpötilan nousun rajoittaminen 2°C:seen on myös asetettu tavoitteeksi Pariisin ilmastosopimuksessa vuonna 2015 (Rissman et al. 2020). Lämpötilan nousu tämän yläpuolelle tuottaa yhä enemmän ennakoimattomia ja vaarallisia vaikutuksia ihmisille ja ekosysteemeille (Kiritani 2006), minkä seurauksena tarve ihmisten aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistöimien nopeuttamiselle on yhä kiireellisempi (Greenhouse Gas Protocol 2011). Shellin Sky Scenario -ennustus ennustaa teollisuuden hiilidioksidipäästöjen jatkuvaa kasvua 2030-luvulle asti, minkä jälkeen päästöt vähenisivät hiilidioksidin talteenotto- ja vetyteknologian käyttöönoton ansiosta (Rissman et al. 2020).

2.2 Kasvihuonekaasupäästöjen mittaaminen ja raportointi

Keskeinen tarve hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi on käytännöllinen ja merkityksellinen mittapuu kasvihuonekaasutulosten arviointiin ja viestimiseen (Wu et al. 2015). Viime aikoihin asti yritykset ovat keskittyneet omien toimintojensa päästöihin, mutta nykyään yhä useammat yritykset ymmärtävät tarpeen ottaa huomioon myös kasvihuonekaasupäästöt arvoketjunsä ja tuoteprofiilinsä elinkaareissa kattavasti hallitakseen kasvihuonekaasuihin liittyviä riskejä ja mahdollisuuksia (Greenhouse Gas Protocol 2011). Yritysten tueksi on luotu vuonna 2013 ISO 14067 -standardi, joka tarjoaa ensimmäistä

kertaa vaiheittaisen oppaan ja standardoidun mallin hiilijalanjäljen viestimiseksi. Tarjoamalla tarkkoja vaatimuksia elinkaariarviointimenetelmässä standardi selventää kasvihuonekaasujen arviointia valittaessa järjestelmärajoja ja simuloitaessa käyttö- ja elinkaaren loppuvaiheita tuotteiden hiilijalanjäljen määrittämisessä. (Wu et al. 2015)

Greenhouse Gas Protocol (2011) määrittelee viisi kirjanpitoperiaatetta kasvihuonekaasujen kirjanpidon ja raportoinnin tueksi. Niiden soveltaminen varmistaa, että tuotetietokanta muodostaa oikean kuvan sen kasvihuonepäästöistä ja niiden poistoista. Nämä kirjanpitoperiaatteet ovat relevanssi (Relevance), kattavuus (Completeness), johdonmukaisuus (Consistency), läpinäkyvyys (Transparency) ja tarkkuus (Accuracy). Tässä tekstissä pyrin hyödyntämään näitä kirjanpitoperiaatteita tehdessäni elinkaariarviointia SolidWorks Sustainability -ohjelman avulla.

2.3 Ekologinen suunnittelu

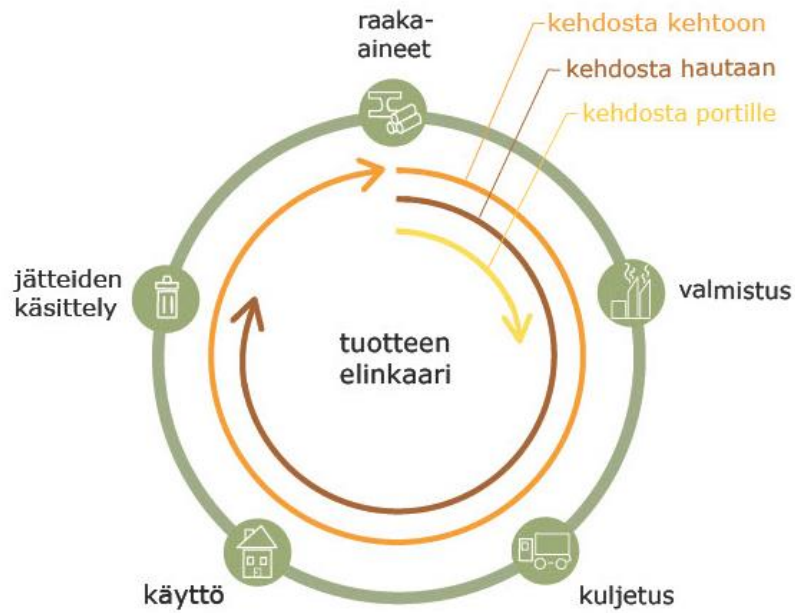
Ekologisella suunnittelulla (engl. eco-design) tarkoitetaan ennakoivaa tuotekehityksen lähestymistapaa, jolla integroidaan ympäristönäkökohdat tuotteen varhaisiin kehitysvaiheisiin, tavoitteena parantaa tuotteiden ympäristösuorituskykyä (Hauschild et al. 2018, s. 545). Täten se kuuluisi ymmärtää perinteisen suunnittelun täydennyksenä erillisen menettelyn sijaan (Baldowska-Witos et al. 2022). Valtaosa ympäristövaikutuksista päätetään jo tuotteen varhaisissa tuotekehityksen vaiheissa, sillä tuotteen kehityksen aikana päätetään materiaaleista, teknologioista ja tuotteen elinkaaresta. On arvioitu, että noin 80 % tuotteen ympäristövaikutuksista määräytyy tuotteen kehitysprosessin varhaisvaiheissa. Tuotekehittäjällä on siten suuri vaikutus tuotteen elinkaareen ja siten myös myöhemmin ilmeneviin ympäristövaikutuksiin ja tuotteiden ympäristösuorituskykyyn. (Hauschild et al. 2018, s. 546)

Viimeisen parin vuosikymmenen aikana on kehitetty useita lähestymistapoja ja metodologioita tuotantoyritysten tukemiseksi ekosuunnittelun integroinnissa tuotekehitysprosessihinsa. Tällä hetkellä on olemassa yli 150 ekosuunnittelun menetelmää tai työkalua ja niiden määrä jatkaa kasvamistaan. Näillä menetelmillä ja työkaluilla on erilaisia tavoitteita, kuten arvioida ympäristövaikutuksia, paljastaa mahdollisia kompromisseja tai helpottaa valintaa eri näkökohtien välillä. Työkaluja sovelletaan yleensä tuotekehitysprosessin varhaisvaiheissa, joista suurimmat parannusmahdollisuudet löytyvät. (Hauschild et al. 2018, s. 548) Myöhemmin tässä tekstissä tarkastellaan yhtä ekosuunnittelun työkalua, SolidWorks Sustainabilityä ja arvioidaan, kuinka tarkaksi se osoittautuu.

2.4 Elinkaariarviointi

Yksi suosituimmista ekologisen suunnittelun työkaluista on elinkaariarviointi (engl. life cycle assessment, LCA) (Hauschild et al. 2018, s. 553; Baldowska-Witos et al. 2022). Elinkaariarviointi määritellään standardissa ISO 14040, joka kuvaa elinkaariarvioinnin oikean käytön sekä suorittamisen vähimmäisvaatimukset (Popa & Popa 2017; Hauschild et al. 2018, s. 553). Elinkaariarviointi pyrkii saavuttamaan seuraavat tavoitteet: merkittävien syötteiden koostaminen järjestelmästä, potentiaalisten ympäristövaikutusten arviointi, jotka liittyvät näihin syötteisiin, ja tulosten ja vaikutusvaiheiden tulkinta suhteessa tutkimuksen tavoitteisiin. Elinkaariarvioinnin kolme pääkomponenttia ovat näytön analysointi, vaikutusten arviointi ja mahdollisten parannusten arvioiminen. (Popa & Popa 2017) Elinkaariarviointi sisältää kaikki peräkkäiset vaiheet tuotteen elinkaaresta, alkaen raaka-aineiden louhinnasta tuotteen valmistuksen, jakelun ja käytön ympäristövaikutuksiin, aina loppukäsittelyyn saakka (Hauschild et al. 2018, s. 553).

Tuotteen elinkaarta arvioitaessa useimmiten huomioon otetaan tuotteen koko elinkaari (Quist 2024). Tätä rajausta kutsutaan nimellä *cradle-to-grave* (Wu et al. 2015) eli kehdosta hautaan. Tuotteen elinkaari koostuu viidestä vaiheesta: raaka-aineiden hankinta, valmistus ja käsittely, kuljetus, käyttö ja vähittäismyynti sekä jätteiden käsittely (Quist 2024). Nämä vaiheet sekä erilaiset elinkaarirajaukset on esitetty kuvassa 1. Vaikka yleisimmin käytetty rajaus on kehdosta hautaan, tässä työssä tarkastellaan rajausta kehdosta kehtoon, sillä alumiinitölkkin elinkaaresta merkittävä ero useisiin muihin tuotteisiin on sen suuri kierrätettävyys sekä kierrätetyn materiaalin hyödyntäminen uusien tölkkien valmistuksessa.



Kuva 1. Havainnekuva tuotteen elinkaaresta ja sen osa-alueista, mukaillen lähteestä Quist (2024)

Teollisuudessa elinkaariarviointimenetelmien käyttö on paljastanut tarpeen yksinkertaistamiselle tuotekehityksessä ja siksi monimutkaisten täysimittaisten menetelmien pohjalta on johdettu virtaviivaistettuja elinkaariarviointimenetelmiä (Hauschild et al. 2018, s. 556). Hauschildin et al. (2018, 556) mukaan nämä virtaviivaistetut elinkaariarviointimenetelmät ovat kehittyneet vuosien varrella tehokkaaksi tavaksi arvioida tuotteen, prosessin tai palvelun elinkaaren ympäristöominaisuuksia. Tässä työssä tarkasteluun otettu SolidWorks Sustainability on hyvinkin yksinkertaistettu elinkaariarvioinnin työkalu.

3. SOLIDWORKS SUSTAINABILITY

Dassault Systèmesin SolidWorks -ohjelmisto tarjoaa kaksi vaihtoehtoa mallin ympäristövaikutusten arviointiin, SolidWorks Sustainability- ja SolidWorks SustainabilityXpress -työkalut (Dassault Systèmes 2022). Nämä ovat olleet käytettävissä jo vuodesta 2009 (Baldowska-Witos et al. 2022). Muutkin CAD-mallinnusta tarjoavat ohjelmistot ovat tuoneet samankaltaisia työkaluja valikoimaansa, esimerkiksi Siemens NX julkaisi *Sustainability impact analysis* työkalun vuonna 2023 (Tyler 2023).

Tässä työssä käytetään SolidWorks Sustainability -työkalua, sillä se sisältyy Tampereen Yliopistolla käytössä olevaan SolidWorks premium -lisenssiin. SolidWorks Sustainability -työkalu eroaa SustainabilityXpressistä siten, että se pystyy käsittelemään erillisten osien lisäksi myös kokoonpanoja (Dassault Systèmes 2022). Tämän lisäksi se antaa myös enemmän mahdollisuuksia muokata työkalun parametreja. Työkalu käyttää elinkaaritietokantaa (engl. lifecycle database), jonka on luonut itsenäinen organisaatio PE International (Baldowska-Witos et al. 2022). Ohjelman päätyökalu ekologiselle suunnittelulle on ympäristövaikutusikkuna, joka on jaettu neljään pääkategoriaan: hiilijalanjälki, kokonaisenergiankulutus, ilman happamoituminen sekä veden rehevöityminen. Jokainen näistä ottaa huomioon viisi vaikutusaluetta: materiaali, tuotanto, käyttö, kuljetus ja käytöstä poisto kuluttajankäytön jälkeen. (Baldowska-Witos et al. 2022; Dassault Systèmes 2022)

3.1 SolidWorks Sustainability käyttöliittymä

SolidWorks Sustainability käyttöliittymä avautuu oletuksena SolidWorks ohjelman oikeassa reunassa sijaitsevaan työkaluvalikkoon. Käyttöliittymän alkunäkymä esitetään kuvassa 2. Sustainability-työkalun parametrisointi tapahtuu tuotteen elinkaarta mukailevassa järjestyksessä.

The screenshot displays the SolidWorks Sustainability tool interface, divided into several sections:

- Material:**
 - Class: Aluminium Alloys
 - Name: 356.0-T6 Permanent Mold cast (SS)
 - Recycled content: 70 % (with a 'Use Trade Mix' button)
 - Weight: 12.94 gm
 - Buttons: 'Find Similar' and 'Set Material'
- Manufacturing:**
 - Region: North America (with a world map icon)
 - Built to last: 1.00 Year
 - Process: Sheetmetal
 - Energy consumption: 0.00 kWh/gm (Total electricity: 0.01 kWh)
 - 2.91 BTU/gm (Total natural gas: 37.66 BTU)
 - 0.43 %
 - No Paint (Surface Area: 61430.24 mm²)
- Use:**
 - Region: North America (with a world map icon)
- Transportation:**
 - 2575 km
- End of Life:**
 - 33.00 %
 - 13.00 %
 - 54.00 %

Kuva 2. SolidWorks Sustainability -työkalun käyttöliittymä

Ensimmäisenä käyttöliittymässä on materiaalin valinta. ”Class” kohdasta valitaan jokin materiaalin pääluokasta, kuten teräs tai muovi. Alle avautuvasta ”name”-valikosta tulee täsmentää materiaali. ”Find Similar” -painikkeesta järjestelmä avaa listan samanlaisia aineominaisuuksia omaavista materiaaleista, jonka avulla voit vertailla materiaalivaihtoehtoja tai valita ympäristöystävällisemmän sekä halvemman vaihtoehdon. Työkalu näyttää kierrätetyn materiaalin prosenttiosuuden materiaalivalinnan perusteella. Osuus on myös muokattavissa, mikäli käyttäjällä on tarkempia arvoja käytetystä materiaalista ja mikäli tietokanta tukee kyseisen materiaalin laajan skaalan kierrätysasteita. Jos tietokannassa ei ole mitään näistä tiedoista saatavilla, kierrätetyn sisällön osuus on 0 % (Dassault Systèmes 2022). Työkalu laskee myös kappaleen painon automaattisesti käytetyn materiaalin tiheyden avulla.

Valmistuspaikan valinnan voi suorittaa valitsemalla alueen (region) alasvetovalikosta, tai klikkaamalla kartalta haluttua aluetta. Vaihtoehtoina työkalu antaa suurimpia talousalueita kuten Eurooppa tai Aasia. Valmistuspaikan valinta vaikuttaa tuotteen kuljetukseen liittyviin päästöihin. Valmistusprosessi (manufacturing process) valitaan niin ikään alasvetovalikosta. Valintavaihtoehtojen saatavuuteen vaikuttaa valittu materiaaliluokka (Dassault Systèmes 2022). Työkalu listaa valinnan mukaan oletusarvot, kuinka paljon valmistuksessa käytetään sähköä (electricity usage), maakaasua (natural gas usage) ja mikä

on valmistuksesta aiheutuva ylijäämä, eli romuna poistetun materiaalin määrä (scrap rate). Nämä parametrit ovat muokattavissa, mikäli käyttäjältä löytyy tarkempia arvoja valmistusprosessista (Dassault Systèmes 2022). Käyttöikä (built to last) määritetään numeerisen arvona. Tällä tarkoitetaan aikaa, kuinka kauan tuote kestää käytössä. Pinnan käsittely vaihtoehtoja on neljä: ei maalia (no paint), vesiohenteinen maali (water-based paint), liuotinohenteinen maali (solvent-based paint) tai jauhemaalaus (powder coated). Työkalu määrittää pinta-alan avulla käytettävän maalin määrän ja sen ympäristövaikutukset (Dassault Systèmes 2022).

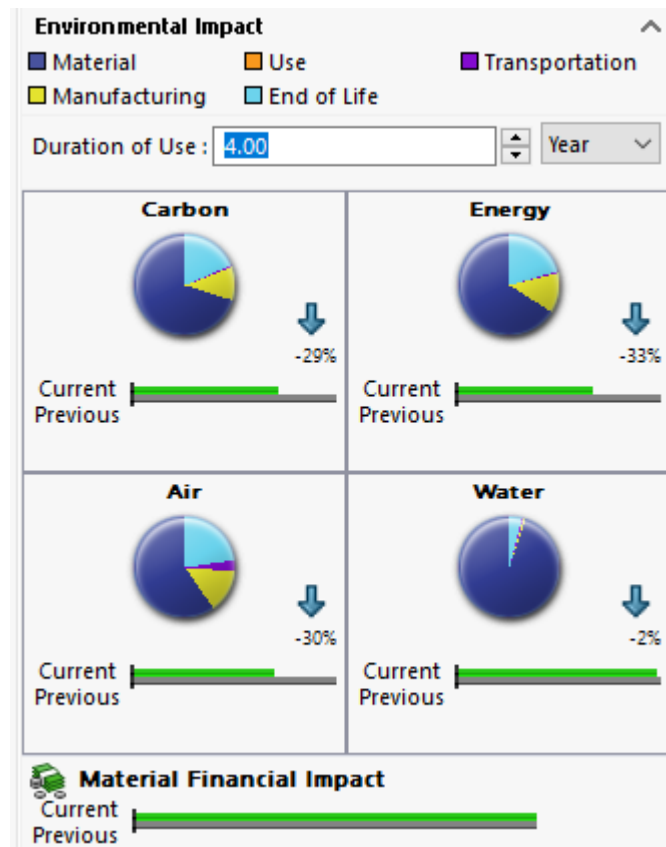
Käyttöpaikka määritetään samalla tavalla kuin valmistuspaikka. Käyttöpaikalla tarkoitetaan aluetta, jonne tuote kuljetetaan ja jossa sitä käytetään. Käyttöpaikan aluevaihtoehdot ovat samat kuin valmistuspaikan aluevaihtoehdot.

Tuotteen kuljetuksen (transportation) aiheuttamat päästöt määräytyvät edellä valittujen valmistuspaikan, sekä käyttöpaikan perusteella. Paikkatietojen avulla työkalu näyttää oletuskuljetustavan ja kuljetun matkan valmistuspaikasta käyttöpaikalle. Mahdolliset kuljetustavat ovat juna-, laiva-, rekka- tai lentokuljetus. Kuljetun matkan arvoja voidaan muokata mieluisaksi, kun käyttäjä tietää esimerkiksi, mihin maahan tuote viedään. Pelkkien maanosien tarkkuudella arvio jää todella epämääräiseksi.

Käytöstä poisto (end of life) eli jätteiden käsittely määritellään kolmella eri parametrilla. Nämä parametrit ovat kierrätetyn (recycled) materiaalin osuus, energiaksi poltetun (incinerated) materiaalin osuus, sekä kaatopaikalle (landfill) joutuvan materiaalin osuus. Näiden arvot ilmoitetaan prosenttiyksikköinä. Työkalun antamat oletusarvot perustuvat kappaleen materiaaliin kohdistetuista tietokannan datasta (Dassault Systèmes 2022). Mikäli prosentiosuuksia muutetaan manuaalisesti, ohjelma muuttaa loputkin arvot siten, että yhteistulos täsmää

3.2 Käyttöliittymän tuloksien esitystapa

Ympäristövaikutusnäkyvä (kuva 3) tarjoaa käyttäjälleen reaaliaikaista palautetta kappaleen ympäristövaikutuksista. SolidWorks Sustainability mahdollistaa käyttäjän valita joko CML- tai TRACI-ympäristövaikutusarviomenetelmän laskemaan ympäristöindikaattorit. CML perustuu Euroopan alueellisiin olosuhteisiin ja on täten yleisimmin käytetty ympäristöindikaattorien joukko elinkaariarvioinnissa Pohjois-Amerikan ulkopuolella (Thomas & Thankappan 2018; Dassault Systèmes 2022). TRACI puolestaan perustuu Yhdysvaltojen alueellisiin olosuhteisiin, joten sitä voidaan käyttää tarkasti mallintamaan Pohjois-Amerikan elinkaariarviointitutkimuksia (Bare 2002; Thomas & Thankappan 2018; Dassault Systèmes 2022).



Kuva 3. SolidWorks Sustainability -käyttöliittymä havainnollistaa ympäristövaikutukset visuaalisesti sekä reaaliaikaisesti

Työkalulle tulee antaa vielä viimeinen parametri, käyttöaika (duration of use), joka määritellään numeerisena arvona, esimerkiksi vuosina. Tätä arvoa käytetään valmistusosion käyttöiän kanssa tarkempien tulosten laskemiseksi (Dassault Systèmes 2022).

Vaikutusparametrit eli materiaali, valmistus, kuljetus, käyttö sekä käytöstä poisto kuvataan neljässä eri ympäristövaikutusmittarissa ympyrädiagrammeiksi. Huomionarvoista on, että käyttö-parametri on saatavilla vain arvioidessa kokoonpanoja (Dassault Systèmes 2022). Ympyrädiagrammit näyttävät kunkin vaikutusparametrin prosentuaalisen vaikutuksen kyseiseen ympäristövaikutusmittariin. Nämä neljä ympäristövaikutusmittaria ovat:

1. Hiilijalanjälki, joka kertoo tuotteen kokonaisvaikutuksen ilmaston lämpenemiseen. Ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttina lukuna ($kg CO_2 eq$).
2. Ilman happamoituminen, joka kertoo tuotteen vaikutuksen ilmanlaatuun. Ilmoitetaan rikkidioksidiekvivalenttina lukuna ($kg SO_2 eq$) tai moolivetyekvivalenttina lukuna ($mol H^+ eq$).
3. Käytetty uusiutumaton kokonaisenergia, eli tuotteeseen käytetyt sähköenergiat sekä fossiiliset polttoaineet. Ilmoitetaan megajouleina (MJ).

4. Vesien rehevöityminen. Päästöt lisäävät liiallisten ravinteiden määrää vedessä. Ravinteiden suuri määrä lisää kasvien määrää ja aiheuttaa vesistöissä happikatoa. Ilmoitetaan fosfaattiekvivalenttina lukuna ($kg PO_4 eq$) tai typpekvivalenttina lukuna ($kg N eq$).

Ympyrädiagrammien tarkoitus on havainnollistaa suunnittelun aikana työkalun käyttäjän valintojen vaikutus reaaliaikaisesti.

Ympäristövaikutusmittareihin on myös liitetty pylväsdiagrammi, joka näyttää kunkin käyttäjän tekemän muutoksen vaikutuksen suhteessa aiempaan tilanteeseen. Tästä työkalun käyttäjä näkee helposti vaikuttaako hänen tekemänsä muutokset positiivisesti vai negatiivisesti. Työkalu sisältää myös pylväsdiagrammin materiaalin taloudelliselle vaikutukselle. Taloudellinen vaikutus määräytyy suoraan valitun materiaalin hinnan perusteella. Taloudellisiin vaikutuksiin tässä työssä ei kuitenkaan perehdytä.

4. ALUMIINITÖLKIN HIILIJALANJÄLKI

Alumiini on neljänneksi suurin kasvihuonekaasu aiheuttava materiaali vuonna 2014 tehdyn tutkimuksen mukaan, aiheuttaen 1109 hiilidioksidiekvivalenttitonnia ($Mt CO_2 eq$) kasvihuonekaasuja vuoden aikana (Rissman et al. 2020). Maailmanlaajuisesti alumiinitölkkejä valmistetaan vuosittain noin 280 miljardia kappaletta. Näin valtavan tölkin määrän valmistamisessa vapautuu paljon hiilidioksidia. On arvioitu, että tölkkien ja muiden alumiinituotteiden valmistamisessa syntyy noin 2 % kaikista ihmisten aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä. (Wood 2022) Voidaan siis olettaa, että jo pieni askel alumiinitölkkien päästöjen vähentämisessä on merkittävä tällaisessa massatuotteessa. Jo vain 5 % parempi kierrätysaste takaisi keskimäärin 6 % vähennyksen tölkin ilmastonmuutosvaikutuksessa (Metal Packaging Europe 2019). Alumiininen juomatölkki on tuote, jota on tutkittu paljon ja täten sopeutuu hyvin elinkaariarvioinnin kohteeksi sillä dataa on saatavilla useasta luotettavasta lähteestä.



Kuva 4. Tarkasteltavana oleva 3D-malli alumiinitölkistä.

Kuvassa 4 on SolidWorksillä mallinnettu 3D-malli, jota käytetään tutkimuksessa tehdyssä elinkaariarvioinnissa. Yksi merkittävimmistä tekijöistä alumiinitölkin valmistuksen hiilijalanjälkeen on sen paksuus, sillä pienellä paksuuden muutoksella tarvittavan materiaalin määrä moninkertaistuu. Seuraavassa alaluvussa on kerrottu, kuinka elinkaariarviointi on suoritettu.

4.1 Tölkin elinkaariarviointi SolidWorks Sustainabilityllä

Alumiinitölkkejä voidaan valmistaa kaksi- tai kolmeosaisina (Can Manufacturers Institute n.d.). Kaksiosaisessa tölkipakissa on kannen lisäksi vain tölkin ”kuppi”, joten sitä on helpompi

yksinkertaistaa elinkaariarviointia tehdessä ja täten tässä työssä arvioitava tölkki oletetaan olevan valmistettu kaksiosaisena. Tölkkin valmistusprosessi etenee yksinkertaisesti siten, että suuri alumiinikello syötetään leimaus- ja vedostuspainikkeeseen, joka leikkaa ulos satoja kuppeja minuutissa. Kuppi työnnetään sarjaan renkaita, jotka silittävät tölkköjä täydelliseen pituuteen ja muodostavat pohjan kupolin. Tölkkipohja ja kupoli viimeistellään vielä leikkaustyökalulla. Seuraavaksi tölkki siirtyy pintakäsittelyyn. Valmistusprosessi pitää myös sisällään useita pienempiä vaiheita, kuten peseminen ja uunissa kuivaaminen. (Can Manufacturers Institute n.d.)

Taulukko 1. *Alumiinitölkkin elinkaariarvioinnin lähtöarvot*

	SolidWorks Sustainability	SolidWorks Sustainability	Metal Packaging Europe	Sphera Solutions	PE Americas
Alue	Eurooppa	Pohjois-Amerikka	Eurooppa	Pohjois-Amerikka	Pohjois-Amerikka
Paino (g)	12,20	12,94	12,20	12,99	13,34
Kierrätetty materiaali (%)	40	70	40	73	67,8
Kierrätykseen menevä materiaali (%)	73,00	51,00	72,90	50,4	51,6

Taulukossa 1 on lueteltu SolidWorks Sustainabilityllä tehdyn elinkaariarvioinnin lähtöarvot: alue, paino, kierrätetty materiaali sekä kierrätykseen menevä materiaali, jotka mukautuvat lähteissä käytettyjä arvoja. Euroopan analyysin lähtöarvot pohjautuvat Metal Packaging European (2019) tekemän analyysin lähtöarvoihin, kun taas Amerikan lähtöarvoina on käytetty Sphera Solutionsin (2021) ja PE Americasin (2010) tekemien elinkaarianalyysien keskiarvoa. Pienet erot lähtöarvoissa ja niiden vertailukohteissa johtuvat Sustainability-työkalun yksikkötarkkuuksista.

Taulukkoon 2 on koottu kaikki SolidWorks Sustainabilityyn syötetyt parametrit pitäen sisällään myös taulukon 1 lähtöarvot. Taulukon 1 arvot pois lukien, taulukon 2 arvot ovat työkalun antamat oletusarvot valinnoille.

Taulukko 2. *Kaikki SolidWorks Sustainability -työkaluun syötetyt parametrit.*

	Alumiinitölkki Eurooppa	Alumiinitölkki Pohjois-Amerikka
Materiaali	356.0-T6 (kierrätetty osuus 40 %)	356.0-T6 (kierrätetty osuus 70 %)
Paino	12,20 g	12,94 g
Valmistuspaikka	Eurooppa	Pohjois-Amerikka
Valmistusprosessi	Ohutlevy	Ohutlevy
Suunniteltu kestoikä	1 vuosi	1 vuosi
Pintakäsittely	Ei pintakäsittelyä	Ei pintakäsittelyä
Käyttöpaikka	Eurooppa	Pohjois-Amerikka
Kuljetusmatka	1931 km	2575 km
Käytöstä poisto	73 % kierrätys 24 % jätteenpoltto 3 % kaatopaikka	51 % kierrätys 24 % jätteenpoltto 25 % kaatopaikka

Elinkaariarvioinnissa on materiaalina käytetty SolidWorksin kirjaston alumiiniseosta 356.0-T6. Materiaalin valintaan vaikutti mahdollisuus säätää kierrätetyn materiaalin osuutta elinkaariarviointia tehdessä. Lisäksi materiaali on ominaisuuksiltaan SolidWorksin tietokannan mukaan lähes samanlainen kuin tölkeissä käytetty Al 3004.

Tölkki on mallinnettu mukailemaan 330 millilitran alumiinista juomatölkkiä mitoitukseltaan. Vertailukohteiden painon lähelle pääsyä varten tölkin painoa on säädetty muokkaamalla tölkin paksuutta. Eurooppaa mukailevan tölkin paksuus on 0,12 millimetriä, jolloin tölkin painoksi saatiin tasan 12,20 grammaa. Pohjois-Amerikkaa mukailevassa analyysissä käytetyn tölkin paksuus on 0,13 millimetriä, jolloin tölkin painoksi saatiin 12,94 grammaa.

Elinkaariarvioissa oletetaan, ettei tölkkiä viedä muihin maanosiin, vaan sen käyttöpaikka on sama kuin valmistuspaikkakin. Tällöin työkalu antaa oletuksena teitse kuljetuksen matkan, joka on Euroopan tapauksessa 1931 kilometriä ja Pohjois-Amerikan tapauksessa 2575 kilometriä. En nähnyt tarpeelliseksi muuttaa kuljetusmatkaa, sillä työssä ei keskitytä minkään tietyn alueen tehtaaseen tai sen toimitusalueeseen. Kuvista 5 ja 6 huomataan, että kuljetuksen osuus päästöissä jää suhteellisen pieneksi.

Tölkin pinnankäsittelyksi valittiin ei maalia- vaihtoehto. Vaikka alumiinitölkkeihin lisätään etiketti, liuotepohjaisen maalin valitseminen olisi nostanut jokaista ympäristövaikutus kategorialla noin kymmenenkertaiseksi. Syytä näin suurelle nousulle ei selvinnyt, joten ratkaisuna oli jättää pinnankäsittely pois. Vaikka maalaus jätettiin tässä tapauksessa huomioimatta, on syytä huomata, että tämä ei ole oikea menettelytapa, koska pinnankäsittely on tärkeä osa tuotteiden ympäristövaikutuksista.

SolidWorks Sustainability -työkalulla tehdyn elinkaariarvioinnin raportin tulokset ovat esitetty Euroopan osalta kuvassa 5 ja Pohjois-Amerikan osalta kuvassa 6. Kuvien yläreunasta löytyy tarkasteltavan kappaleen fyysisiä ominaisuuksia, kuten paino sekä käytetty materiaali. Kuvien ympyrädiagrammit näyttävät kunkin vaikutusparametrin vaikutuksen jokaiseen neljään ympäristövaikutusmittariin, jotka esiteltiin luvussa 3. Kuvista 5 ja 6 nähdään, että tölkin suurimmat päästöt aiheutuvat materiaalista.

Carbon Footprint



0.104 kg CO₂e

Total Energy Consumed



1.2 MJ

Air Acidification



5.0E-4 kg SO₂e

Water Eutrophication



2.1E-5 kg PO₄e

Kuva 5. Euroopassa valmistetun tölkin ympäristövaikutukset käyttäen CML metodologiaa.

Carbon Footprint0.076 kg CO₂e

Material:	0.060 kg CO ₂ e
Manufacturing:	0.010 kg CO ₂ e
Transportation:	1.6E-3 kg CO ₂ e
End of Life:	4.1E-3 kg CO ₂ e

Total Energy Consumed

0.909 MJ

Material:	0.727 MJ
Manufacturing:	0.154 MJ
Transportation:	0.024 MJ
End of Life:	3.7E-3 MJ

Air Acidification0.016 mol H⁺ e

Material:	0.013 mol H ⁺ e
Manufacturing:	2.6E-3 mol H ⁺ e
Transportation:	5.5E-4 mol H ⁺ e
End of Life:	2.5E-4 mol H ⁺ e

Water Eutrophication

6.3E-6 kg N e

Material:	4.5E-6 kg N e
Manufacturing:	9.7E-7 kg N e
Transportation:	5.7E-7 kg N e
End of Life:	2.6E-7 kg N e

Kuva 6. Pohjois-Amerikassa valmistetun tölkin ympäristövaikutukset käyttäen TRACI metodologiaa.

Elinkaariarvioinnissa käytetyt muut parametrit ovat SolidWorksin antamia oletusarvoja ja nämä löytyvät taulukosta 2. Kuvien tulokset perustuvat yhden tölkin elinkaarianalysiin, mutta seuraavassa kappaleessa tulokset on kerrottu tuhannella vastaamaan lähteissä käytettyä tapaa ilmoittaa tölkin elinkaarianalysin tulokset.

4.2 Tölkin elinkaariarvioinnin vertailu

Tässä kappaleessa vertaillaan SolidWorks Sustainability -ohjelmalla tehdyn elinkaariarvioinnin tuloksia Metal Packaging European (2019), Sphera Solutionsin (2021) ja PE Americasin (2010) toteuttamiin elinkaariarviointeihin. Nämä tulokset ovat esitettyinä taulukossa 3.

Taulukko 3. Elinkaariarviointien tulokset tuhatta tölkkiä kohden.

	SolidWorks Sustainability	SolidWorks Sustainability	Metal Packaging Europe	Sphera Solutions	PE Americas
Alue	Eurooppa	Pohjois-Amerikka	Eurooppa	Pohjois-Amerikka	Pohjois-Amerikka
Hiilijalanjälki (<i>kg CO₂ eq</i>)	104,00	76,00	77,21	96,8	113,8
Ilman happamoituminen (<i>kg SO₂ eq</i>)	0,500	0,500	0,317	0,319	0,532
Kokonaisenergia, uusiutumaton (<i>MJ</i>)	1200	909	-	1210	1374
Vesien rehevöityminen (<i>kg PO₄ eq</i>)	0,021	0,015	0,086	0,024	1,561

Koska kuvassa 6 on elinkaarianalyysi suoritettu käyttäen TRACI metodologiaa, sen ilman happamoituminen ja vesien rehevöityminen on ilmoitettu käyttäen eri yksiköjä kuin CML metodologiassa. Jotta tuloksien vertailu on selkeämpää, on taulukkoon 2 muunnettu kaikki tulokset CML:n käyttämiin arvoihin. Ilman happamoitumisen yksikkö *mol H⁺ eq* on muutettu arvoon *kg SO₂ eq* jakamalla alkuperäinen arvo arvolla 32 (Heijungs 1994). Vesien rehevöitymisen yksikkö *kg N eq* on muutettu yksikköön *kg PO₄ eq* jakamalla alkuperäinen arvo arvolla 0.42 (GHK n.d.) Sama laskentatoimi on myös suoritettu lähteissä oleviin lukuihin, mikäli ne ovat sisältäneet eri yksiköitä.

5. SOLIDWORKS SUSTAINABILITY -TYÖKALUN RAJOITTEET

SolidWorks Sustainabilityä käyttäessä esiintyi lukuisia ongelmatilanteita, jotka aiheuttavat epävarmuutta elinkaariarvioinnin tuloksissa. Koska SolidWorks Sustainabilityn kaltaisia työkaluja käyttävät usein tuotesuunnittelijat, joilla ei ole ammatillista erikoistumista elinkaariarvioinnista, nämä epävarmuudet heijastuvat helposti arvioinnin tuloksiin.

5.1 Materiaalivalinta

Materiaalin valinta vaikuttaa fyysisten ominaisuuksien lisäksi myös siihen, kuinka paljon käytetystä materiaalista on kierrätetty. Kierrätetyn materiaalin määrä vaikuttaa suuresti tuotteen hiilijalanjälkeen elinkaariarviointia suorittaessa. Dassault Systèmesin (2022) mukaan materiaalia valittaessa voidaan määrittää itse sen kierrätysaste, mutta tämä pätee vain pieneen osaan materiaalivalikoimasta, sillä dataa tämän tiedon käyttämiseen löytyy rajoitetusti tietokannasta. Esimerkiksi alumiinitölkissä käytetyn alumiiniseoksen Al 3004 kierrätysasteeksi on kirjattu 0 %, vaikka Euroopassa tämä kyseinen arvo on 40 % (Metal Packaging Europe 2019) ja puolestaan Amerikassa 67.8% (PE Americas 2010). Näin suuri ero aiheuttaa paljon epävarmuutta elinkaariarviointia tehtäessä. Täten on tärkeää löytää materiaali, joka vastaa ominaisuuksiltaan kyseistä materiaalia, mutta jonka kierrätysastetta on mahdollista muuttaa.

5.2 Aluevalinnat

Kuten edellisessä luvussa jo huomattiin, aluevalinnat ovat jaettu suurimpiin talousalueisiin, esimerkiksi Eurooppa on yksi näistä vaihtoehdoista. Tämä kuitenkin on erittäin epätarkka tapa elinkaariarviointia tehdessä. Esimerkiksi Euroopan sisäpuolella valmistusmahdollisuudet voivat vaihdella todella paljon. Kuitenkin uskon, että isoin ongelma tulee kuljetusetäisyyksissä, sillä esimerkiksi kuljetusmatka Euroopasta Aasiaan muuttuu huomattavasti riippuen siitä mistä Euroopan maasta kuljetus aloitetaan ja minne Aasian maahan se päättyy. Riippuen kuljetustavasta, kuljetuksesta aiheutuneet päästöt ovat merkittäviä tuotteiden aiheuttamien kokonaispäästöjen mittakaavassa. Sustainability -työkaluun on tätä varten lisätty mahdollisuus säätää itse kuljetusmatkoja, mutta tätä mahdollisuutta ei kuitenkaan ole Sustainability Xpress -työkalussa (Dassault Systèmes 2022). Valmistuspaikat ovat nähtävissä kuvassa 7. Tummemmalla sinisellä maalattu alue kuvaa valittua aluetta ja harmaat ovat alueita, joita ei voida valita.



Kuva 7. Valmistuspaikan sekä käyttöpaikan valintaan mahdolliset alueet

Toisaalta Sustainability -ohjelma on vajaa myös sen puolesta, että aluevalinnoista puuttuu useampi alue, kuten Afrikka. Afrikka on kasvavassa määrin merkittävä nykypäiväisessä teollisuudessa (Signé 2018), eikä mielestäni SolidWorksin kaltaiset suuret resurssit omaavat ohjelmistot saisi sivuuttaa sen potentiaalia. Aluevaihtoehtojen vajavaisuus voi johtua heikosta datan saatavuudesta näillä alueilla ja uskon, että siihen dataa tulee saataville kasvavassa määrin.

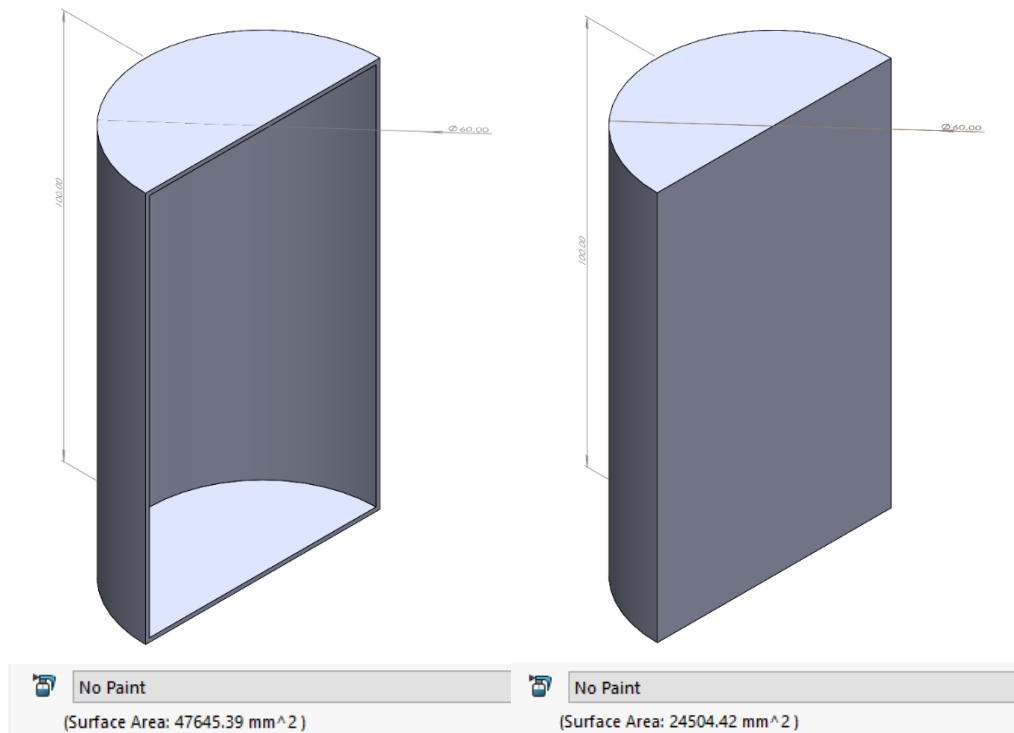
5.3 Valmistusmenetelmä

Valmistusmenetelmiä on todella paljon ja niiden kaikkien sisällyttäminen yhteen työkaluun olisi todella vaikeaa ja työlästä. Tämän takia SolidWorks on rajannut saatavuuden yleisimpiin menetelmiin. Kuten luvussa 3 on käyty läpi, työkalu antaa valmistusmenetelmän valittaessa tietokannasta löytyvät alkuarvot sähkön ja maakaasun kulutukselle sekä valmistuksesta aiheutuvan ylijäämän määrän. Ymmärrettävästi SolidWorks joutuu tekemään tässä kompromisseja. Arvoihin tulee vaikuttamaan paljon esimerkiksi työstökone, jolloin esimerkiksi energian kulutus on uudemmissa koneissa pienempi. Sustainability työkalussa näitä arvoja pystytään muuttamaan, mikäli tiedossa on tarkempia arvoja valmistusprosessin kulutuksesta. Arvojen muuttaminen on erinomainen tapa vähentää elinkaariarvioinnin epävarmuutta, mutta harvoin vielä suunnittelupöydällä tämänkaltaiset tiedot ovat saatavilla.

Elinkaariarvioinnissa esiintyy epävarmuuksia, vaikka työkalun käyttäjällä olisi tiedossa tarkka määrä energian ja maakaasun kulutuksesta. Oikeaoppisesti esimerkiksi tuotannossa käytetyn sähkön hiilijalanjälki tulisi näkyä myös lopputuotteen hiilijalanjäljessä. Uusiutuvan energian hiilijalanjälki on huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi ydinvoimalla tuotetun energian määrä (United Nations n.d.).

5.4 Pintakäsittely

Tuotteen pintakäsittelyllä on iso vaikutus hiilijalanjälkeen varsinkin, jos tuotteen pinta-ala on suuri. Vaikka alumiinitölkki on suhteellisen pieni tuote, sen pinta-ala on merkittävän suuri, sillä tölkki on ontto sisältä. SolidWorks Sustainability -työkalu antaa käyttäjälleen neljä vaihtoehtoa pintakäsittelylle, jotka ovat ei maalia, vesiohenteinen maali, liuotinhohteinen maali ja jauhemaalaus. Tölkin pinnalle painatetaan etiketti asiakkaan haluamalla kuviolla ja lisätään kerros lakkaa, joka kuivatetaan tölkin pinnalle (Can Manufacturers Institute n.d.). Epävarmuutta koituu myös sisäpinnan pinnoituksesta. Alumiinitölkien sisäpinnalle ruiskutetaan kerros suojaavaa pinnoitetta, kuten epoksia, jotta alumiiniseos ei reagoisi hiilihapollisen sisällön kanssa (Can Manufacturers Institute n.d.). SolidWorks Sustainability -työkalu ei takaa mahdollisuutta valita useampaa erilaista pintakäsittelyvaihtoehtoa. Työkalun pintakäsittely vaihtoehdot ovat myös erittäin rajoittuneet, sillä useat tuotteet viimeistellään esimerkiksi hiomalla ja kiillottamalla. Työkalu antaa siis vaihtoehtoja vain maalin valitsemiseen.



Kuva 8. SolidWorksillä tehdyt havainnekappaleet. Sylinterin muotoiset kappaleet ovat leikattu Section View -komennolla.

Kuten kuvasta 8 nähdään, SolidWorks laskee käsiteltäväksi pinnaksi myös ontton ja suljetun kappaleen sisäpinta-alan. Tämä voi olla joissakin sovelluksissa hyvä asia, mutta

toisissa se voi koitua ongelmaksi. Mielestäni työkalussa tulisi pystyä valitsemaan, käsitelläänkö sisäpintaa vai ei. Kaikista käytännöllisin tapa olisi lisätä valitsin, jolla voisi klikata käsiteltävät pinnat.

Olisi myös hyödyllistä, jos työkalulla pystyisi vaikuttamaan maalikerroksen määrään tai paksuuteen. Luvussa 4 kerrottiin pintakäsittelyn nostavan tölkin ympäristövaikutukset kymmenkertaisiksi. Se voi johtua siitä, että työkalu olettaa tölkillä paksun pinnoituksen. Alumiinitölkki on vain noin 0,12 millimetriä paksu. Teollisuudessa käytetyt maalikerrokset voivat olla jopa 0.2 millimetriä paksuja. Ei siis olisi ihme, että ympäristövaikutukset moninkertaistuisivat, jos alumiinitölkillä maalattaisiin tällainen pinta.

5.5 Työkalun toimintavirheet

Usean kerran tämän työn elinkaariarviointia tehdessä SolidWorks Sustainability -työkalu ei antanut odotettuja tuloksia. Käytin työkaluun tutustuessa lähestymistapana testimielisiä kokeiluja, joissa tavoitteena oli saada selville, kuinka työkalua käytetään ja kuinka paljon erilaiset valinnat vaikuttavat lopputulokseen. Tämän testailun lopputuloksena kuvan 4 ympäristövaikutusnäkyvään saattoi tulla näkyville ”negligible”-teksti. Tämä tarkoittaa, että tuotteen päästöt olisivat mitättömän pienet. Kyseinen ongelmatilanne ei näyttänyt poistuvan, vaikka arviointiin lisäsi päästöjä huomattavasti suurempia tekijöitä. Ongelmatilanteen sain poistettua sulkemalla SolidWorksin kokonaan ilman tallentamista. Uudelleen avauksen jälkeen työkalu tuntui toimivan normaalisti, kunnes uusi toimintavirhe esiintyi.

SolidWorks Sustainabilityn keskeisimpänä tavoitteena on luoda tuotesuunnittelijalle ympäristö, jossa hän voi suunnitellaan testata tuotteen ympäristövaikutuksia. Jos tällainen testaaminen aiheuttaa ongelmatilanteen ohjelmiston toiminnassa, ei työkalun käyttö ole kovin tehokasta.

5.6 Elinkaariarvioinnin suorittajan epävarmuus

Elinkaariarviointi on itsessään yksityiskohtainen ja erittäin erikoistunut lähestymistapa, joka kuuluu vahvalle tieteellisen tiedon alueelle (Hauschild et al. 2018, s. 553–554). Vaikka SolidWorks Sustainability on hyvin helppo työkalu käyttäjälle, voi sen käyttämisessä tulla tekijäkohtaisia ongelmia. Mielestäni suurimmalla todennäköisyydellä ongelmaksi koituu kokemattoman tekijän puutteellinen kriittisyys arviointituloksia kohtaan. Esimerkiksi Sustainabilityn ajautuessa ongelmatilaan (luku 5.5) arvioinnin tekijä voi ajatella kehittäneensä tuotteen, jonka ympäristövaikutukset ovat merkittävästi pienet,

vaikka asia ei näin ole. Haasteena on aina varmistaa oikea taso elinkaariarvioinnin tietämystä tuotekehittäjällä ja kompensoida elinkaariarvioinnin tietämyksen puutetta käyttämällä siihen tarkoitettuja työkaluja (Hauschild et al. 2018, s. 554).

5.7 Ajankohtaisuus

Ajankohtaisuudella tässä kontekstissa tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin elinkaariarviointi heijastaa nykytilannetta ja tulevaisuuden skenaarioita. Alumiinitölkin elinkaari on lyhyt verrattuna esimerkiksi laivan rakenteellisiin osiin, joiden käyttöikä voi olla jopa 40 vuotta. Alumiinitölkin lyhyt elinkaari aiheuttaa siis vain vähän epävarmuutta elinkaariarvioinnissa, joka on elinkaariarvioinnin kannalta positiivinen asia. Myös tulevaisuuden teknologiset kehitykset tuovat epävarmuutta elinkaariarviointiin varsinkin, jos tietokantoja tai arviointityökalu ei pidetä aktiivisesti ajan tasalla. SolidWorks Sustainability on julkaistu 2009 joten ilman päivityksiä se olisi liki käyttökelvoton.

Teknologian kehittymisestä konkreettinen esimerkki on 330 millilitran alumiinitölkin hiilijalanjäljen kehittyminen vuosien 2006 ja 2016 välillä. Metal Packaging European (2019) mukaan tämän kymmenen vuoden ajanjakson aikana alumiinitölkin vaikutus ilmastonmuutokseen on vähentynyt 33 prosenttia. Tähän lukuun on vaikuttanut alumiinin valmistuksen tehokkuus, vähennys sähkön ja lämmönkulutuksessa (johtuen tölkin valmistusprosessin tehokkuudesta sekä tölkin painon vähentymisestä), sekä tölkin kierrätysasteen kasvu 50 prosentista liki 73 prosenttiin (Metal Packaging Europe 2019).

6. YHTEENVETO

Elinkaariarviointiin liittyy aina paljon haasteita ja epävarmuuksia, joita arviointia tehdessä koitetaan minimoida erilaisilla toimintamenetelmillä. Kun nämä epävarmuudet kasvavat liian isoiksi, on arviointi käyttökelvoton. Yleisesti haasteita elinkaariarvioinnissa muodostaa arvioinnin laajuus. Elinkaariarviointimenetelmät ovat yleisesti erittäin analyyttisiä työkaluja ja täten niiden käyttäminen vaatii ammattitaitoa (Hauschild et al. 2018, s. 553).

Jotta elinkaariarviointi voidaan suorittaa osana tuotekehitystä, on hyödyllistä käyttää SolidWorks Sustainabilityn kaltaista suoraviivaistettua elinkaariarviointityökalua. Virtaviivaistettujen menetelmien, kuten SolidWorks Sustainabilityn kanssa epävarmuuksien poistaminen ei ole aina mahdollista. Tämä aiheutuu siitä, että menetelmien prosessit on tehty tarkoituksella mahdollisimman yksinkertaiseksi, jotta jokainen tuotekehittäjä pystyy implementoimaan niitä suunnittelussa. Alumiinitölkkin elinkaarta tutkittaessa epävarmuuksia esiintyi esimerkiksi materiaalin valinnassa, aluevalinnoissa, valmistusprosesseissa ja jälkiprosessoinnissa, kuten pinnankäsittelyssä.

6.1 Elinkaariarvioinnin tulokset

Tässä luvussa käydään läpi elinkaariarvioinnin tulokset käyttäen apuna prosentuaalisia eroja. Tuloksien prosentuaalinen tarkastelu auttaa hahmottamaan, kuinka merkittäviä erot elinkaariarvioinnin tuloksissa ovat. Taulukosta 4 nähdään prosentuaaliset erot SolidWorks Sustainability -työkalulla tehdyn elinkaariarvioinnin sekä lähteistä poimittujen elinkaariarviointien keskiarvojen välillä.

Taulukko 4. *Elinkaariarvioinnin vertailu prosenttiyksiköillä*

	Metal Packaging Europe	SolidWorks Sustainability	Sphera Solutions ja PE Americas (keskiarvo)	SolidWorks Sustainability
Alue	Eurooppa	Eurooppa	Pohjois-Amerikka	Pohjois-Amerikka
Hiilijalanjälki (<i>kg CO₂ eq</i>)	77,21	+35 % (104,00)	105,3	-28 % (76,00)
Ilman happamoituminen (<i>kg SO₂ eq</i>)	0,317	+58 % (0,500)	0,425	+18 % (0,500)
Kokonaisenergia, uusiutumaton (<i>MJ</i>)	1292*	-7 % (1200)	1292	-30 % (909)
Vesien rehevöityminen (<i>kg PO₄ eq</i>)	0,086	-76 % (0,021)	0,792	-98 % (0,015)

Hiilijalanjälki

Taulukon 4 tuloksien mukaan hiilijalanjälki on Euroopassa 35 % suurempi kuin vertailuarvo 77,21 *kg CO₂ eq* ja Pohjois-Amerikassa tulos jää 28 % pienemmäksi vertailuarvosta 105,3 *kg CO₂ eq*. Kuvista 5 ja 6 nähdään, että suurin osa hiilijalanjäljestä muodostuu materiaalista. Yhden tölkin materiaalista aiheutuva hiilijalanjälki on Euroopassa 0,092 *kg CO₂ eq* ja Pohjois-Amerikassa 0,060 *kg CO₂ eq*. Noin kolmasosan ero näissä tuloksissa johtaa siihen, että Pohjois-Amerikasta saatu tulos on pienempi kuin Euroopan. Lähteistä saaduissa vertailuarvoissa tämä on päinvastoin, joka ei osoita tuloksen luotettavuutta. Ero saadussa tuloksessa johtuu materiaalisista käytetyistä kierrätysasteista.

Ilman happamoituminen

SolidWorks Sustainability -työkalulla suoritettua arvioinnissa ilman happamoitumisen arvoksi yksikkömuunnosten jälkeen saatiin sama arvo sekä Euroopalle että Pohjois-Amerikalle eli 0,500 *kg SO₂ eq* tuhatta tölkkiä kohden. Vaikka lopputulos on sama, se ei tarkoita, että arviointi näiltä kohdilta on identtinen. Pohjois-Amerikassa valmistus vaikuttaa ilman happamoitumiseen huomattavasti enemmän kuin Euroopassa (kuva 6), mutta se kompensoituu Euroopan suurien materiaali päästöjen takia (kuva 5). Ilman happamoituminen on Euroopassa 58 % suurempi kuin vertailuarvo 0,317 *kg SO₂ eq* ja Pohjois-Amerikassa tulos on 18 % suurempi kuin vertailuarvo 0,425 *kg SO₂ eq*. Vaikka prosentuaali-

sesti ero vaikuttaa suurelta, tulokset kuitenkin mukailevat suuruusluokkaa hyvin. Voidaan siis todeta ilman happamoitumisen arviointi onnistuneeksi. Erot voisivat olla selitettävissä SolidWorks Sustainabilityn rajoitteiden aiheuttamilla epävarmuuksilla.

Uusiutumattoman energian kulutus

Energiaa kuluu lähes jokaisen tuotteen jokaisessa elinkaaren vaiheessa. Alumiinin valmistus ja kuljetus, tölkin valmistaminen ja jälkikäsitteily sekä kuljettaminen kuluttavat energiaa. Osa energiasta on uusiutumaton energia, kuten maakaasu ja osa voi olla uusiutuvaa energiaa, kuten sähkö, joka on tuotettu tuulivoimalla. Jos tuote olisi esimerkiksi sähkölaite, tulisi sen elinkaarta arvioidessa ottaa huomioon käytössä kulutettu energianmäärä. Tölkin käytöstä aiheutuvaa energian kulutusta on esimerkiksi jääkaappiin käytetty sähkö, mikäli tölkkiä säilytetään kylmässä. Tämä on kuitenkin erittäin vaikeasti arvioitavissa, eikä sitä ole otettu huomioon tässä tutkimuksessa.

Uusiutumattoman energian määrää on Euroopan tuloksissa vertailtu Pohjois-Amerikan keskiarvoon, sillä eurooppalaisessa lähteessä tätä tulosta ei ollut ilmoitettu. Tulos on vain 7 % pienempi kuin vertailuarvo 1292 MJ. Pohjois-Amerikassa tulos on puolestaan 30 % pienempi.

Vesistön rehevöityminen

Vesistön rehevöitymisen arvot ovat todella paljon pienempiä kuin vertailuarvot. Arvo jää Euroopan tuloksessa 76 % vertailuarvon 0,086 kg PO₄ eq alle. Pohjois-Amerikassa tulos jää jopa 98 % pienemmäksi kuin vertailuarvo 0,792 kg PO₄ eq. Vaikka muidenkin vaikutusmittareiden arvot eroavat paljon, on vesien rehevöitymisen arvo omaa luokkaansa. Sustainabilitylla saatu Euroopan lukuarvo on 0,0210 kg PO₄ eq ja Pohjois-Amerikan 0,0150 kg PO₄ eq. Suurin osa näistä arvoista aiheutuu kuvien 5 ja 6 mukaan materiaalista. On siis selitettävissä, että Pohjois-Amerikassa tämä arvo on huomattavasti pienempi, sillä kierrätetyn materiaalin osuus on suuri 70 %. Euroopassa kierrätetyn materiaalin osuus on 40 %.

Taulukoista 3 ja 4 nähdään, että Euroopan vertailuarvo 0,086 kg PO₄ eq on noin kymmenkertaisesti pienempi kuin Pohjois-Amerikan vertailuarvo 0,792 kg PO₄ eq. Pohjois-Amerikan suuren vertailuarvon selittää PE Americasin kyseenalainen tulos 1,561 kg PO₄ eq, joka nostaa huomattavasti vertailuarvoa. Jos jättää PE Americasin saaman tuloksen huomioimatta, on SolidWorks Sustainabilitylla saadun Pohjois-Amerikan arvo vain 37 % pienempi kuin Spheran vertailuarvo 0,0237 kg PO₄ eq. Tämä kuulostaa paljon järkevämmältä tulokselta.

Tutkimuksesta voidaan todeta, että SolidWorks Sustainability -työkalu soveltuu parhaiten tuotekehittäjän apuna suuntaa antavana työkaluna. Työkalu ei ole tarpeeksi tarkka, jotta siihen voitaisiin luottaa elinkaariarviointia tehdessä. Toisaalta tällaisia virtaviivaistettuja työkaluja ei ole myöskään tarkoitettu perinteisten elinkaariarviointi menetelmien korvaajiksi vaan pikemminkin matalakynnykselliseksi apuvälineeksi tuotekehittäjälle. SolidWorks Sustainability -työkalulla olisi kuitenkin potentiaalia ekologiseen suunnitteluun yhä enemmän nojaavassa maailmassa.

6.2 Jatkotutkimusehdotukset

Jotta SolidWorks Sustainability -työkalu voidaan todeta luotettavaksi, tulisi sitä tarkastella useammalla eri tuotteella. Jatkotutkimusideaksi ehdotan työkalun tarkastelua jollakin teollisuuden kokoonpanolla, joka sisältää merkittävästi alumiinitölkkiä painavampia komponentteja. Kokoonpanon olisi hyvä sisältää myös eri materiaaleista valmistettuja tuotteita tutkimuksen monipuolistamiseksi. Nämä kehitysideoit voisivat kumota paljon työkalulla suoritettujen elinkaariarviointiin liittyviä epävarmuuksia, sillä painavampi tuote minimoisi esimerkiksi tuotteen pinnankäsittelystä aiheutuvat epävarmuudet. Alumiinitölkkin valmistusprosessi pitää sisällään paljon eri vaiheita, jotka aiheuttavat vaikeuksia elinkaariarvioinnissa. Monimutkainen valmistusprosessi johtaa kompromisseihin, jotka ei ole ideaalisia elinkaariarviointia tehdessä. Täten jatkotutkimuksissa olisi järkevää käyttää yksinkertaisesti valmistettuja tuotteen komponenttia, kuten sorvattua tai koneistettua osaa.

LÄHTEET

- Baldowska-Witos, P., Macko, M., Łączny, D., Kruszelnicka, W. & Lewandowski, J. (2022) Computer-aided Eco-design Grinding Machines using Software SolidWorks Sustainability. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 357 02022.
- Bare, J.C. (2002) Traci. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 6 (3–4), pp. 49–78.
- Can Manufacturers Institute (n.d.) How Cans Are Made. Can Manufacturers Institute. Saatavissa (Viitattu 5.3.2024.): <https://www.cancentral.com/can-stats/how-cans-are-made/>.
- Dassault Systèmes (2022) SOLIDWORKS Sustainability 2022. Saatavilla (viitattu 27.1.2024): https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/sld-works/c_solidworks_sustainability_pro.htm?id=59a1f3badb4042318c0afca3a307390e#Pg0.
- GHK (n.d.) Annex 5 environmental impacts analysed and characterisation factors.
- Greenhouse Gas Protocol (2011) Product Life Cycle Accounting Reporting Standard.
- Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K. & Olsen, S.I. (2018) *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer International Publishing.
- Heijungs, R. (1994) Life cycle impact assessment – a brief survey with some ideas on radiation. Centre for Environmental Science, Leiden University.
- Kiritani, K. (2006) Predicting Impacts of Global Warming on Population Dynamics and Distribution of Arthropods in Japan. *Population Ecology*, Vol. 48 (1), pp. 5–12.
- Metal Packaging Europe (2019) Life Cycle Assessment of Aluminium Beverage Cans in Europe. Metal Packaging Europe.
- United Nations (1987) Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Development and International Co-operation: Environment, Oslo, Norway.
- PE Americas (2010) Life Cycle Impact Assessment of Aluminum Beverage Cans. PE Americas.
- Popa, L.I. & Popa, V.N. (2017) Products eco-sustainability analysis using CAD Solid-Works software. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 112, 06002.
- Quist, Z. (2024) Life Cycle Assessment (LCA) - Everything you need to know. *Ecochain*. Saatavilla (viitattu 1.3.2024): <https://ecochain.com/blog/life-cycle-assessment-lca-guide/>.
- Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow, W.R., Zhou, N., Elliott, N., Dell, R., Heeren, N., Huckestein, B., Cresko, J., Miller, S.A., Roy, J., Fennell, P., Cremmins, B., Koch Blank, T., Hone, D., Williams, E.D., De La Rue Du Can, S., Sisson, B., Williams, M., Katzenberger, J., Burtraw, D., Sethi, G., Ping, H., Danielson, D., Lu, H., Lorber, T., Dinkel, J. & Helseth, J. (2020) Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation

drivers through 2070. *Applied Energy*, Vol. 266, 114848.

Signé, L. (2018). The Potential of Manufacturing and Industrialization in Africa. Africa Growth Initiative.

Sphera Solutions (2021) Life Cycle Assesment of North American Aluminum Cans.

Tyler, J. (2023) Introducing NX Sustainability Impact Analysis - NX Design. Saatavilla (viitattu 28.1.2024): <https://blogs.sw.siemens.com/nx-design/announcing-nx-cad-sustainability-impact-analysis-for-product-design/>.

United Nations (n.d.) Renewable Energy – Powering a Safer Future. United Nations. Saatavilla (Viitattu 6.3.2024.): <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>.

Wood, J. (2022) How to Make Aluminum Drinks Cans Greener. Spectra. Saatavilla (viitattu 8.2.2024): <https://spectra.mhi.com/how-to-make-aluminum-drinks-cans-greener>.

Wu, P., Xia, B. & Wang, X. (2015) The Contribution of ISO 14067 to the Evolution of Global Greenhouse Gas Standards—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47: pp. 142–150.