

KONETEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

**SILLANKORJAUksen HIILIJALANJÄLKI: TYÖVaiHEEN JA –
MATERIAALIN YKSIKÖPÄÄSTÖN ARVIOINNIN KEHYS**

Lassi Päckilä

KANDIDAATINTYÖ

2015

Ohjaaja: Yliopisto-opettaja Matti Kangaspuoskari

TIIVISTELMÄ

Sillankorjauksen hiilijalanjälki: työvaiheen ja –materiaalin yksikköpäästön arvioinnin kehys

Lassi Päckilä

Oulun yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2015, 42 s.

Työn ohjaaja: Yliopisto-opettaja Matti Kangaspuoskari

Tämä työ tutkii sillankorjauksen eri työvaiheiden ja –materiaalien hiilijalanjäljen laskentaa. Se toteutettiin Helsingin kaupungin rakennusviraston toimeksiannosta. Hiilijalanjäljen laskentaan käytetään yleisesti elinkaariarviointimenetelmää. Työn teoriaosuus tutkii elinkaariarvioinnin metodologiaa ja tutkimusosuus soveltaa sitä sillankorjauksen työvaiheisiin ja –materiaaleihin.

Elinkaariarviointi on monimutkainen metodi ja tavoitteena tässä työssä on määrittää kehys, jota voidaan hyödyntää sillankorjauksen työvaiheiden ja –materiaalien inventaarianalyysin laadinnassa.

Asiasanat: Elinkaariarviointi, osittainen elinkaariarviointi, hiilijalanjälki, sillankorjaus

ABSTRACT

Carbon footprint of bridge repair: a framework for assessing operation unit emission

Lassi Pääkkilä

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2015, 42 p.

Supervisor: University Teacher Matti Kangaspuoskari

This thesis studies carbon footprinting of bridge repair operations and materials. It was implemented as an assignment of the Public Works Department of the City of Helsinki. Life Cycle Assessment is the established method of carbon footprinting. The theoretical part of this thesis studies the methodology of Life Cycle Assessment and the research part applies the studied methodology for bridge repair operations and materials.

Life Cycle Assessment is a complicated method and the aim of this study is to determine a framework for Inventory Analysis of bridge repair operations and materials.

Keywords: Life Cycle Assessment, partial Life Cycle Assessment, carbon footprint, carbon footprinting, bridge repair

ALKUSANAT

Korjaussuunnittelija käyttää työssään sillan korjaustyön määränimikkeistöä luodessaan määräluetteloa projektille. Helsingin kaupungin rakennusviraston aloitteesta pyrin tässä kandidaatintyössä luomaan kehyksen sillankorjauksen määränimikkeistön työvaiheiden ja –materiaalien hiilijalanjäljen määrittämiseksi niin, että lopulta korjaussuunnittelijan on helppo laskea suuntaa-antava hiilijalanjälki korjausprojektille määräluettelon ja määränimikkeistön yksikköpäästöjen pohjalta.

Helsingin kaupungin linjauksissa mainitaan yhtenä tärkeänä tavoitteena selvittää ja käyttöönottaa keinot kaupungin kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi Euroopan unionin tavoitteiden mukaisesti. Sillat ovat välttämätön osa infrastruktuuria ja rakennusteollisuuden ollessa yksi merkittävimmistä ilmastomuutoksen kiihdyttäjistä, tukee sillanrakentamisen ilmastotehokkuus osaltaan Helsingin kaupungin ja Euroopan unionin ilmastopoliittista linjaa.

Kandidaatintyön toimeksiantaja on Helsingin kaupungin rakennusviraston katu- ja puisto-osaston ylläpitotoimisto. Toimeksiantajan puolesta ohjaajana toimi projektipäällikkö Eero Sihvonen ja Oulun yliopiston puolesta yliopisto-opettaja Matti Kangaspuoskari. Haluan kiittää Helsingin rakennusviraston katu- ja puisto-osaston ylläpitotoimiston työyhteisöä kannustuksesta sekä projektipäällikkö Eero Sihvosta opastuksesta. Lisäksi haluan kiittää Oulun yliopiston teknillisen tiedekunnan opintotoimistoa tuesta kandidaatin tutkielman alkuvaiheessa. Kiitän myös Helsingin kaupungin rakennusvirastoa rahoituksesta ja mahdollisuudesta tutustua ilmastomuutokseen, hiilijalanjälkeen ja elinkaariarviointiin.

Sapporo, Japani, 25.10.2015

Lassi Päckilä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO.....	5
MERKINNÄT JA LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	7
1.1 Keskeisimmät käsitteet.....	8
2 Elinkaariarviointi LCA.....	12
2.1 Elinkaariarviointiselvityksen rakenne	14
2.1.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely	16
2.1.2 Inventaarioanalyysi LCI	22
2.1.3 Vaikutusarviointi LCIA	24
2.1.4 Tulosten tulkinta ja raportointi	27
3 TYÖVAIHEEN YKSIKKÖPÄÄSTÖ	31
3.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely.....	31
3.1.1 Tutkittava tuotejärjestelmä ja sen toiminnallinen yksikkö	32
3.1.2 Järjestelmän rajat	32
3.1.3 Tietoa ja tiedon laatua koskevat vaatimukset	34
3.1.4 Tiedon ajallinen raja.....	34
3.1.5 Allokointi	35
3.1.6 Päästöt, poistumat ja oletukset.....	35
3.2 Inventaarioanalyysi	35
3.3 Esimerkki työvaiheen päästön arvioinnista.....	37
4 YHTEENVETO	40
5 LÄHDELUETTELO.....	41

MERKINNÄT JA LYHENTEET

A pinta-ala

l pituus

M massa

P teho

V tilavuus

CO₂e Hiilidioksidiekvivalentti

GHG Greenhouse gas, kasvihuonekaasu

GWP Global Warming Potential

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, Kansainvälinen ilmastopaneeli

LCA Life Cycle Assessment, elinkaariarviointi

LCI Life Cycle Inventory, inventaarioanalyysi

LCIA Life Cycle Impact Assessment, vaikutusarviointi

1 JOHDANTO

Ihmisen toiminta on kasvattanut maapallon ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksia merkittävästi 1750-luvulta lähtien ja tällä hetkellä esimerkiksi hiilidioksidi- ja metaanikaasun pitoisuudet ylittävät luonnollisen vaihtelun rajat merkittävästi (IPCC 2007). IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change, Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli) mukaan on erittäin todennäköistä, että hiilidioksidipitoisuuksien kasvu johtuu pääasiassa fossiilisten polttoaineiden käytöstä, metaanikaasupitoisuuksien kasvu fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja maataloudesta ja typpioksiduulin pitoisuuksien kasvu pääasiassa maataloudesta. Nämä kaasut aiheuttavat kasvihuoneilmiötä, joka on luonnollinen ilmiö maapallon ilmakehässä. Kasvihuoneilmiössä maan ilmakehä toimii kuin kasvihuoneen lasikatto, päästää auringon säteilyä maan pinnalle, mutta ei päästä kaikkea maanpinnan heijastamaa lämpösäteilyä takaisin avaruuteen. Kasvihuonekaasut absorboivat valtaosan maanpinnan lämpösäteilyä ja säteilevät sen takaisin maanpinnalle (Hotakainen 2008). Ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien lisääntyessä maapallon kasvihuoneilmiö voimistuu ja ilmaston keskilämpötila kasvaa alituisesti. Tällä on merkittäviä, jopa katastrofaalisia vaikutuksia ympäristöömme. (IPCC 2007; Hotakainen 2008).

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisellä hillitään kasvihuoneilmiötä, ja hiilijalanjäljen laskenta on tärkeä työkalu vähentämisen tiellä. Rakennusteollisuus on merkittävä fossiilisten polttoaineiden ja luonnonvarojen kuluttaja, joten optimoinnilla saavutetaan paljon hyötyä. Sillanrakentamisen ympäristövaikutusten arvioinnista tehtiin vasta pohjoismaiden liikennevirastojen rahoittama tutkimus ”ETSI”. Tutkimus tarjosi Excel-pohjaisen työkalun ympäristövaikutusten arviointiin. Kuitenkaan sillan elinkaaren ylläpitovaiheen arviointiin ei ole olemassa työkalua tai yhtenäistä menetelmää, joten Helsingin kaupungin rakennusviraston aloitteesta tutkin tässä työssä sillankorjaustoimenpiteiden ja –materiaalien hiilijalanjäljen laskentaa. Oikea-aikaisella, asianmukaisella ja tehokkaalla, etenkin ilmastotehokkaalla sillankorjauksella varmistetaan sillan käyttöpotentiaalın maksimaalinen hyödyntäminen ja ympäristöystävällisyys.

Hiilijalanjäljen laskennan kehukseen hyödynnän ISO/TS 14067:fi (2013) mukaista elinkaariarviointimenetelmää. Työn teoriaosuudessa tutustun kirjallisuustutkimuksen keinoin elinkaariarviointimenetelmään, sen periaatteisiin ja metodologiaan. Kirjallisuustutkimuksen avulla sovellan elinkaariarviointimenetelmää sillankorjaustoimenpiteiden ja –materiaalien hiilijalanjäljen laskentaan työn kokeellisessa osassa. Työn tavoitteena on siis olla sillankorjaustoimenpiteiden ja –materiaalien laskentatavan kehys korjaussuunnittelijalle. Kehyksen avulla määritetään hiilijalanjäljen ominaisarvo sillan korjaustyön määränimikkeistön työvaiheille ja materiaaleille.

1.1 Keskeisimmät käsitteet

Ilmastonmuutoksella tarkoitetaan mitä tahansa pitkäaikaista (tavallisesti vuosikymmeniä tai pidempään kestävä) muutosta maapallon ilmastossa, joka voidaan havaita muutoksena keskiarvoon tai muutoin muutoksena ilmaston ominaisuuksissa. IPCC (2007) määrittelee muutoksen voivan johtua luonnollisesta vaihtelusta tai ihmisen toiminnan vaikutuksesta. UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change, Yhdistyneiden Kansakuntien ilmastonmuutospaneeli) määrittelee muutoksen johtuvan suoraan tai epäsuorasti ihmisen toiminnan vaikutuksesta (IPCC 2007).

Kasvihuoneilmiossa ilmakehä toimii samoin kuten kasvihuoneen lasikatto. Ilmakehän kasvihuonekaasut absorboivat maanpinnan heijastamaa infrapunasäteilyä itseensä ja säteilevät sitä takaisin ilmakehän alakerrokseen. Ilmiön ansiosta ilmakehän alakerroksien lämpötila on huomattavasti yläkerroksien lämpötilaa korkeampi. (Hotakainen 2008).

Kasvihuonekaasut pidättävät ja säteilevät tiettyyn aallonpituusalueeseen kuuluvaa infrapunasäteilyä, jota maapallon pinta, ilmakehä ja pilvet säteilevät. Kasvihuonekaasuja esiintyy luontaisesti ilmakehässä, mutta niitä syntyy paljon myös ihmisen toiminnan seurauksena. (ISO/TS 2013). Merkittävimpiä kasvihuonekaasuja ovat vesihöyry, hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4), typpioksiduuli (N_2O), CFC-yhdisteet, typenoksidit ja troposfäärissä esiintyvä otsoni (Hotakainen 2008).

Kasvihuonekaasupäästöt ovat ilmakehään vapautuvia kasvihuonekaasun massoja (ISO/TS 2013).

Kasvihuonekaasupoistumat ovat ilmakehästä poistuvia kasvihuonekaasun massoja (ISO/TS 2013).

Hiilijalanjälki määritellään ISO/TS 14067:fi (2013) standardissa tuotejärjestelmän kasvihuonekaasupäästöjen ja –poistumien summaksi. Se ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttina ja perustuu elinkaariarviointimenetelmään. Sen ainoa vaikutusluokka on ilmastonmuutos.

Hiilidioksidiekvivalentti on kasvihuonekaasun säteilypakotteen yksikkö, jolla sitä verrataan hiilidioksidin säteilypakotteeseen (ISO/TS 2013).

Kasvihuonekaasun massa muutetaan hiilidioksidiekvivalentiksi **ilmaston lämmityspotentiaalin (Global Warming Potential, GWP)** avulla. Jokaiselle kasvihuonekaasulle on oma ilmaston lämmityspotentiaali –karakterisointikerroin, joka määräytyy sen hetkisen ilmakehän tilan, kasvihuonekaasun säteilypakotteen ja sen ilmakehässä säilymisen ajan keskiarvon mukaan (ISO/TS 2013; Pandey *et al.* 2010). IPCC julkaisee säännöllisin väliajoin katsauksia ilmastonmuutokseen. Hiilidioksidin karakterisointikerroin on yksi (ISO/TS 2013).

Tuotejärjestelmällä tarkoitetaan sarjaa yksikköprosesseja, joissa on perusvirtoja ja tuotevirtoja ja jotka toteuttavat määrättyjä toimintoja. Tuotejärjestelmä kuvaa tuotteen elinkaarta. (SFS-EN ISO 2006a).

Järjestelmän rajat ovat rajapinnat, jotka erottavat tuotejärjestelmän ympäristöstä ja muista tuotejärjestelmistä (SFS-ISO 2002).

Perusvirta on tuotejärjestelmään ympäristöstä tuleva virta, jota ihminen ei ole vielä jalostanut, tai tuotejärjestelmästä poistuva virta, jota ihminen ei enää käsittele (SFS-ISO 2002). Esimerkiksi tuotejärjestelmään voi tulla raakaöljyä tai malmia maaperästä, auringon säteilyä, tuulta tai vaikkapa veden potentiaalienergiaa. Tuotejärjestelmästä voi

lähteä esimerkiksi päästöjä ilmaan, veteen tai maaperään ja säteilyä. (SFS-EN ISO 2006a).

Syöte on yksikköprosessiin tuleva tuote-, materiaali- tai energiavirta (SFS-EN ISO 2006a). Sillankorjauksessa syötevirtoja ovat esimerkiksi betoni, betoniteräs, piikkaustyö, betonointi, sähkö, paineilma jne.

Tuotos on yksikköprosessista poistuva tuote-, materiaali- tai energiavirta. Tuotteet ja materiaalit voivat olla raaka-aineita, välivalmisteita, rinnakkaistuotteita ja päästöjä. (SFS-EN ISO 2006a).

Tuotevirta on tuotejärjestelmästä pois tai siihen virtaava tuote, jonka tuotejärjestelmä, muu tuotejärjestelmä, yhteiskunta tai esimerkiksi henkilö voi hyödyntää. Tuote on siis mikä tahansa palvelu tai tavara (SFS-EN ISO 2006a). Sillankorjauksen tuotevirta on silta tai vaikkapa kierrätysmateriaalit, joita korjausprosessissa syntyy.

Välivalmistevirrat ovat yksikköprosessin syötteitä tai tuotoksia, jotka tarvitsevat vielä lisäprosessointia. Tällaisia ovat esimerkiksi perusmateriaalit, kuten sementti, ja osakokoonpanot. Välivalmistevirrat virtaavat yksikköprosessien välillä. (SFS-EN ISO 2006a; SFS-ISO 2002).

Vertailuvirta on tuotejärjestelmän prosesseissa tarvittavien tuotosten määrä, joka vaaditaan täyttämään toiminnallisen yksikön ilmaisema toiminto (SFS-ISO 2002).

Toiminnallinen yksikkö on elinkaariarviointiselvityksessä käytettävä referenssiyksikkö, joka ilmoittaa tuotejärjestelmän määrällisen suorituskyvyn (SFS-ISO 2002).

Allokointi on tuotejärjestelmän syöte- tai tuotevirtojen jakoa tutkittavan tuotejärjestelmän ja jonkin muun tuotejärjestelmän tai tuotejärjestelmien välillä. Esimerkiksi monissa kemiallisissa prosesseissa syntyy useita eri lopputuotteita, joista vain yksi tuotevirta on syötevirta tutkittavaan tuotejärjestelmään. Tällöin voi olla vaikeaa selvittää kyseisen lopputuotteen aiheuttaman hiilijalanjäljen osuus kemiallisen prosessin kokonaishiilijalanjäljestä. (Finnveden *et al.* 2009; SFS-EN ISO 2006a).

Primaaritieto on laskettu arvo, joka on saatu suoraan mittaamalla tai suoraan mitattuihin arvoihin perustuvalla laskennalla. Primaaritiedon ei tarvitse olla peräisin tutkittavasta tuotejärjestelmästä: riittää, että se on peräisin vastaavasta tuotejärjestelmästä. (ISO/TS 2013).

Sekundaaritieto on saatu jostain muusta lähteestä kuin primaaritieto, esimerkiksi tietokannoista tai muista teoksista (ISO/TS 2013).

Paikkakohtainen tieto on primaaritietoa, joka on saatu juuri kyseessä olevasta tuotejärjestelmästä (ISO/TS 2013).

2 ELINKAARIARVIOINTI LCA

ISO/TS 14067:fi (2013) on standardi, joka määrittelee tuotteiden hiilijalanjäljen laskentaa ja viestintää koskevat ohjeet ja vaatimukset. Standardin mukainen hiilijalanjätkiselvitys tehdään elinkaariarviointiperiaatteella. Jokaisella tuotteella, siis millä tahansa tavaramalla tai palvelulla, ajatellaan olevan elinkaari. Elinkaarella tarkoitetaan kaikkia tuotteen ”elämän” vaiheita alkaen suunnittelusta ja kehittämisestä jatkuen suunnitelman konkretisoitumiseen esimerkiksi materiaalien louhintana ja valmistuksena sekä tuotteen valmistuksena, jatkuen tuotteen käyttö- ja ylläpitovaiheeseen ja päättyen lopulta tuotteen end-of-life –vaiheeseen, johon voivat sisältyä vaikkapa jätteiden keruu ja lajittelu, kierrätys ja loppusijoitus (Rebitzer *et al.* 2004). Elinkaaren eri vaiheilla on erilaisia potentiaalisia vaikutuksia ympäristöön, esimerkiksi päästöjä ilmakehään ja maahan, poistumia ilmakehästä ja maasta, maankäytön muutoksia, päästöjä vesistöön, säteilyä, luonnonvarojen käytöstä johtuvia tulevaisuuden luonnonvarojen käytön muutoksia jne. (Finnveden *et al.* 2009). Monia näistä on hankala arvioida. Elinkaariarviointi (LCA, Life Cycle Assessment) pyrkii koostamaan nämä ympäristövaikutukset ja luonnonvarojen käytön, sekä arvioimaan niiden kokonaisvaikutuksia ja paikkansapitävyyttä (SFS-EN ISO 2006a).

Elinkaarinäkökulma on tärkeä ja käytännöllinen ominaisuus ympäristöarvioinnissa, sillä sen laajuus ja kokonaisvaltaisuus auttaa välttämään päästöjen ja ongelmien siirtymistä (Finnveden *et al.* 2009). Esimerkiksi eliminoimalla ympäristöongelma, voidaan aiheuttaa sosiaalisia ongelmia tai taloudellisia ongelmia – jopa toisenlaisia ympäristöongelmia. Päästöt voivat siirtyä elinkaaren vaiheiden välillä. Kun otetaan huomioon kaikki elinkaaren vaiheet, nähdään siirtymien mahdollisuus. Myös päällekkäisyyksiä vältetään ottamalla huomioon kaikki elinkaaren vaiheet samassa arvioinnissa.

Elinkaariarviointi ei kuitenkaan suoraan ennusta todellisia ympäristö- tai terveysvaikutuksia, sillä ympäristövaikutukset ilmaistaan suhteessa vertailuyksikköön. Arvioinnissa käytetään monenlaisia yksinkertaistuksia, ja vaikkakin niiden merkittävyys pyritään minimoimaan, on epävarmuus luontaista ympäristövaikutusten mallintamiselle (SFS-EN ISO 2006a). Vaikutusarviointi (LCIA, Life Cycle Impact Assessment) on

monimutkaisimpia ja työläimpiä vaiheita elinkaariarvioinnissa, mutta jos sen soveltamisessa onnistutaan hyvin, antaa elinkaariarviointi luotettavaa ja kattavaa tietoa tuotejärjestelmän vaikutuksista luonnonvara- ja ympäristökysymyksiin (Du *et al.* 2012; SFS-EN ISO 2006a).

Ensimmäiset elinkaariajatteluun pohjautuvat tutkimukset tehtiin 1960-luvun loppupuolella yhtäaikaisesti Yhdysvalloissa ja Euroopassa. Yhdysvalloissa vuonna 1969 The Coca Cola Company rahoitti tutkimuksen, jossa tarkoituksena oli mallintaa virvoitusjuomapakkauksen elinkaari. Tutkimuksen suoritti Midwest Research Institute. Tätä ennen oli tehty ns. energia-analyyskejä, joissa mallinnettiin tuotteen elinkaaren energiankulutusta, mutta virvoitusjuomapakkaus-tutkimuksessa otettiin huomioon tuotteen raaka-aineiden käyttö, syntyvät jätteet ja päästöt ympäristöön. 1984 sveitsiläinen viranomaisen the Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA) julkaisi tutkimuksen, jossa listattiin elinkaariarviointiin tarvittava data ja esiteltiin ensimmäinen vaikutusarviointimalli. (Jensen AA *et al.* 1998; Guinée JB *et al.* 2011). Tätä ennen, ja osittain tämän jälkeenkin, ei ollut yleisesti hyväksytyä raamia elinkaariarviointiin ja niitä tehtiinkin mitä erilaisimmilla metodeilla, eivätkä ne täten olleet vertailtavissa.

Elinkaariarviointi sai kuitenkin huomiota ja arviointeja suoritettiin, vaikka niiden luotettavuus ei ollut parasta laatua. 1990-luvulta lähtien on järjestetty paljon paneeleja ja foorumeja elinkaariarvioinnin kehittämiseksi ja tieteellisissä julkaisuissakin termi ”LCA” alkoi näkyä. SETAC, the Society of Environmental Toxicology and Chemistry, koordinoi elinkaariarvioinnin käytäntöjen kehitystä ja the International Organization for Standardization julkaisi ensimmäiset standardit elinkaariarvioinnin suorittamiseksi (Guinée *et al.* 2011). Tällä hetkellä standardeja on kaksi kappaletta, ”ISO 14040: Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet.” sekä ”ISO 14044 Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja.”. Standardit tarjoavat elinkaariarvioinnille yhteisen ohjeistuksen ja rakenteen, mutta ne eivät määrittele käytännön metodologioita. Siksi tälläkään hetkellä ei olla täydellisen yksimielisiä, miten elinkaariarviointia tulisi soveltaa kaikissa sen osa-alueissa, mutta kehitystä tapahtuu ja keskustelua käydään jatkuvasti (Finnveden *et al.* 2009; Guinée *et al.* 2011; Rebitzer *et al.* 2004).

2.1 Elinkaariarviointiselvityksen rakenne

Elinkaariarviointiselvitys tehdään elinkaariperiaatteella, eli siinä otetaan siis huomioon kaikki tuotteen elinkaaren vaiheet raaka-aineiden hankinnasta käytöstä poistamiseen. On mahdollista määrittää tuotejärjestelmälle osittainen hiilijalanjälki, esimerkiksi pelkästään käyttövaiheesta. Osittaisen hiilijalanjäljen viestimistä on rajoitettu ISO/TS 14067:fi, SFS-EN ISO (2006a) ja SFS-EN ISO (2006b) standardeissa ja voidaankin sanoa, että osittaisia arvioita käytetään lähinnä operatiivisiin tarkoituksiin, esimerkiksi tuotteiden ja käytäntöjen tehostamiseen.

Elinkaariarviointin metodit ja tarkoitukset ovat eriytyneet kahteen eri kategoriaan. Molemmista on käytetty erilaisia nimiä ja käytän tässä Rebitzerin *et al.* (2004) ja Finnvedenin *et al.* (2009) käyttämiä termejä. Ensimmäinen kategoria on ”consequential LCA”, jonka suomennan muotoon syy-seuraus-elinkaariarviointi. Tällaisen elinkaariarviointiselvityksen tavoite on kuvata, millaisia muutoksia ympäristövaikutuksissa tapahtuu, kun tuotejärjestelmässä (yksikköprosesseissa, syötteissä ja tuotteissa) tehdään muutoksia (Rebitzer *et al.* 2004; Finnveden *et al.* 2009). Toinen kategoria on nimeltään ”attribitional LCA”, joka on perinteisempi elinkaariarviointin muoto. Se voitaisiin suomentaa muotoon piirre-elinkaariarviointi. Piirre-elinkaariarviointin tarkoitus on kuvata tuotejärjestelmän ympäristövaikutuksiltaan merkitykselliset syöte- ja tuotevirrat (Rebitzer *et al.* 2004; Finnveden *et al.* 2009). Valinta syy-seuraus-elinkaariarviointin ja piirre-elinkaariarviointin välillä vaikuttaa tapaan, jolla tuotejärjestelmä tulisi rajata. Syy-seuraus-elinkaariarviointiin sisällytetään ne yksikköprosessit, syötteet ja tuotteet, joihin tuotejärjestelmän muutoksilla ajatellaan olevan vaikutusta. Piirre-elinkaariarviointiin sisällytetään kaikki yksikköprosessit, syötteet ja tuotteet, joilla ajatellaan olevan merkitystä ympäristövaikutusten kannalta. (Rebitzer *et al.* 2004).

Elinkaariarviointin on tieteellinen metodi, joten kun tehdään päätöksiä elinkaariarviointiselvityksen sisällä, ne tehdään painottaen luonnontieteisiin. Jos ei ole olemassa luonnontieteellistä perustaa, käytetään muita tieteellisiä lähestymistapoja, kuten yhteiskuntatiedettä ja kauppatiedettä. Jos tämäkään ei ole mahdollista, käytetään menettelyjä, jotka pohjaavat asiaankuuluviin yleisiin sopimuksiin. Viimeisenä, jos

mikään edellisistä menetelmistä ei ole mahdollinen, voidaan päätökset perustaa arvovalintoihin, mutta ne on perusteltava ja selitettävä selvityksessä. (ISO/TS 2013). Elinkaariarviointiselvityksen on oltava johdonmukainen, eli tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyä on noudatettava samalla tavalla koko selvityksessä. Tarkoitus on myös pyrkiä käyttämään samoja menettelytapoja, standardeja ja opastuksia kuin aikaisemmissa tutkimuksissa samassa tuoteryhmässä, jotta tutkimukset olisivat vertailukelpoisia. Kuten aiemmin kerrottua, elinkaariarviointi on tieteellinen metodi, joten elinkaariarviointiselvityksessä noudatetaan tieteellisen tekstin sääntöjä: kaikki asiaankuuluvat seikat, oletukset, arviot jne. otetaan huomioon ja dokumentoidaan, menetelmiin ja tietolähteisiin viitataan asiaankuuluvalla tavalla ja kaikki tieto esitetään mahdollisimman ymmärrettävästi ja siten, että se on mahdollisimman tarkkaa, avointa ja asiaankuuluvaa. (ISO/TS 2013).

Olisi myös tärkeää arvioida tiedon epävarmuutta kaikissa elinkaariarvioinnin vaiheissa. Arviointiin on monenlaisia erilaisia keinoja, kuten herkkyysanalyysijä ja tiedon kriittistä arviointia. Epävarmuuden hallintaan voidaan käyttää Finnvedenin *et al.* (2009) mukaan tieteellistä, sosiaalista tai tilastotieteellistä keinoa. Tieteellisessä tavassa tehdään lisää taustatutkimusta eli hankitaan parempaa dataa tai mallinnetaan prosesseja paremmin. Tämä voi kuitenkin olla liian aikaa vievää ympäristökysymysten usein akuutin luonteen takia. Toinen keino on sosiaalinen tapa käsitellä ongelmaa, eli keskustella epävarmuudesta sidosryhmien kanssa ja koettaa löytää yhteisymmärryksellinen kompromissi. Tämä kompromissi saattaa kuitenkin olla konfliktissa tieteellisen lähestymistavan ja tavoitteiden ja soveltamisalan kanssa. Tilastotieteellisiä keinoilla arvioidaan epävarmuutta matematiikan keinoin.

ISO/TS 14067:fi (2013) standardin mukaan tuotejärjestelmän hiilijalanjalan laskemisessa käytetään tuoteryhmäsääntöjä, jos sellaiset ovat saatavilla. Tuotejärjestelmä on sarja yksikköprosesseja, jossa on perusvirtoja ja tuotevirtoja ja joka suorittaa toiminnon tai useita. ISO standardeissa (ISO/TS 2013; SFS-EN ISO 2006a; SFS-EN ISO 2006b; SFS ISO 2002) virtaa, jota ihminen ei ole aiemmin jalostanut, kutsutaan perusvirraksi. Tuotevirta taas on tuotejärjestelmästä pois tai siihen virtaava materiaali-, energia- tai muu virta, jonka muu tuotejärjestelmä, yhteiskunta tai esimerkiksi henkilö voi hyödyntää (SFS-EN ISO 2006a). ISO/TS 14067:fi (2013)

standardissa on annettu vaatimuksia tuotejärjestelmäsäännöille. Säännöissä on oltava vähintään

- ohjeistus hiilijalanjäljestä viestimisen sisällöstä,
- tietoa siitä, mitkä elinkaaren vaiheet säännöt kattavat,
- tuoteryhmän määrittely ja kuvaus,
- hiilijalanjäljen tavoitteen ja soveltamisalan määrittely, johon kuuluvat toiminnallinen yksikkö, järjestelmän rajat, tiedon kuvaus, syötteiden ja tuotosten sisällyttämiskriteerit ja lähtötiedon laatuvaatimukset, joita ovat kattavuus, paikkakohtainen tietosisältö, tarkkuus, täydellisyys, edustavuus, johdonmukaisuus, toistettavuus, lähteet, epävarmuus ja yksiköt,
- elinkaari-inventaarioanalyysi, johon sisältyy tiedon keruu, laskemismenetelmät sekä virtojen ja päästöjen allokointi,
- sekä voimassaoloaika.

Tavoitteen ja soveltamisalan määrittelystä lisää kohdassa 2.1.1. Tuoteryhmäsäännöissä voi olla myös ohjeistusta tuotteen käyttövaiheen hiilijalanjäljen selvitykseen tai tuotteen käyttöprofiilin sekä tietoa tuotteen käytöstä poistamisvaiheesta (ISO/TS 2013).

ISO/TS 14067:fi (2013) standardin mukaiseen hiilijalanjälkiselvitykseen kuuluu neljä elinkaariarvioinnin vaihetta: tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, elinkaari-inventaarioanalyysi, vaikutusarviointi ja tulosten tulkinta. Kaikkia näitä käydään seuraavaksi läpi yksityiskohtaisesti.

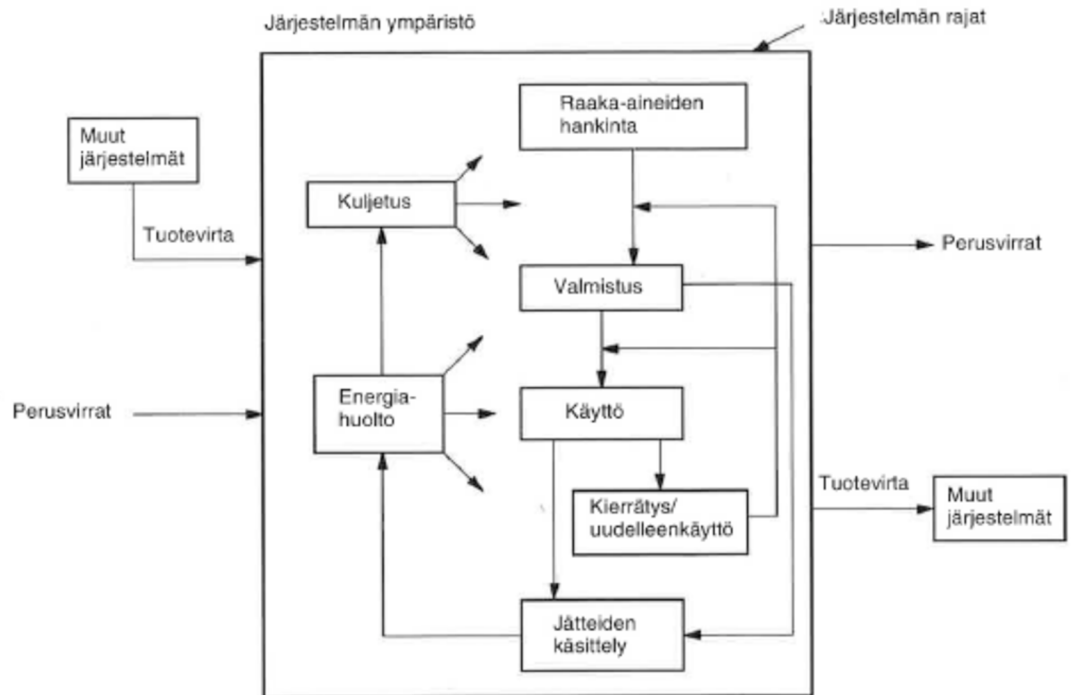
2.1.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely on elinkaariarviointiselvityksen ensimmäinen vaihe, ja samalla ehkäpä tärkein. Siinä määritetään järjestelmän rajat ja yksityiskohtaisuuden taso. Nämä riippuvat elinkaariarvioinnin käyttötarkoituksesta, ja

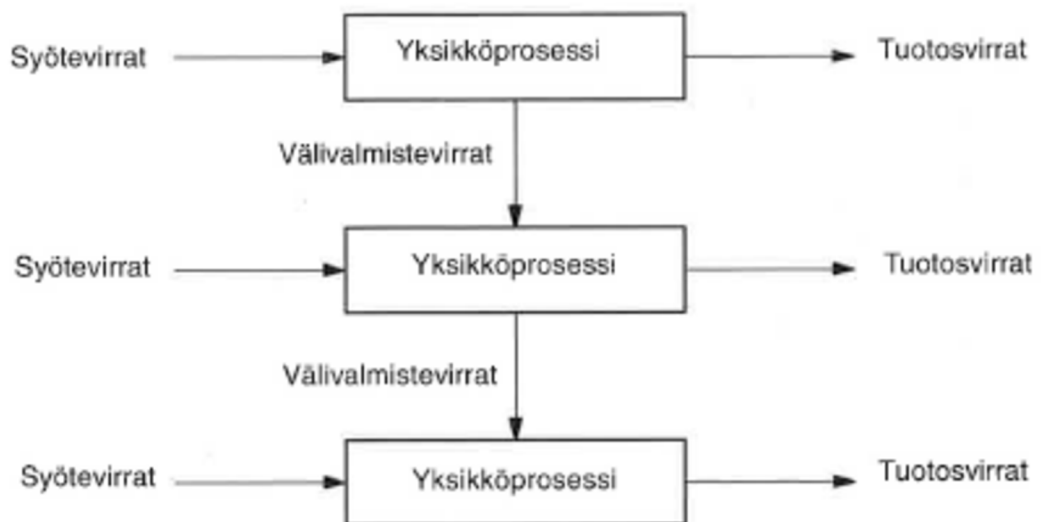
siten myös rajoittavat valmiin selvityksen käyttömahdollisuuksia. (Du *et al.* 2012; SFS-EN ISO 2006a). Ensimmäisenä tulisi päättää, mihin tarkoitukseen elinkaariarviointiselvitystä on tarkoitus hyödyntää, kenelle selvityksen tuloksista on tarkoitus viestiä ja onko tuloksia tarkoitus käyttää julkisesti, esimerkiksi vertailuväitteissä (SFS-EN ISO 2006a). Jos elinkaariarviointiselvityksen on tarkoitus olla julkisesti saatavilla, tulee siihen sisällyttää tuotteen elinkaaren kaikki vaiheet, edellyttäen kuitenkin, että tietoa on saatavilla, että laskeminen on teknisesti mahdollista (perustellut skenaariot voidaan mallintaa) ja että vaiheet ovat laskennan kannalta merkityksellisiä. Osittaisen hiilijalanjäljen viestiminen voi olla julkista myös, jos laskentaa tehdään erityisesti jostain tietyistä elinkaaren vaiheista. Sisäisiä tarkoituksia varten voidaan laskea osittaisia hiilijalanjälkiä. (ISO/TS 2013).

Tuotejärjestelmä ja sen toiminnot tarjoavat elinkaariselvityksen laajimmat rajat (SFS-EN ISO 2006a). Tuotejärjestelmän rajojen määrittelyssä rajataan, mitkä yksikköprosessit kuuluvat tuotejärjestelmään ja mitkä jäävät sen ulkopuolelle. Parhaimmassa tapauksessa tuotejärjestelmän rajat pitävät sisäpuolellaan tuote- ja syötevirrat niin, että ne ovat perusvirtoja, jolloin voidaan määrittää kaikki päästöt, joita perusvirtojen jalostamisessa syntyy (Finnveden *et al.* 2009; SFS-EN ISO 2006a). Tällöin laskennassa ei tarvitse käyttää geneeristä informaatiota. Laskennan tarkkuus ja luotettavuus ovat siis huipussaan.

Hyvä työkalu tuotejärjestelmän ymmärtämiseen on prosessikulkukaaviointi. Tuotejärjestelmä voidaan kuvata kokonaan, ja yksikköprosessit erikseen. Yksikköprosessit kuvataan siis alustavasti niin, että määritetään prosessin alku, prosessin aikana tehtävä prosessointi ja toiminta sekä prosessin loppu. Prosessin alkuun merkitään vastaanotettavat raaka-aineet tai välivalmisteet ja loppuun syntyvien välivalmisteiden ja lopputuotteiden määränpää. (SFS-EN ISO 2006b).



Kuva 1. Tuotejärjestelmän kuvaaminen prosessinkulkukaavion avulla helpottaa tuotejärjestelmän ymmärtämistä ja rajaamista (SFS-EN ISO 2006a).



Kuva 2. Yksikköprosessien ja niiden suhteiden kuvaaminen prosessikulkukaavion avulla (SFS-EN ISO 2006a).

ISO standardin (2006a) mukaan tuotejärjestelmän rajoja vedettäessä on hyvä huomioida, ettei voimavaroja kannata tuhllata sellaisten syötteiden ja tuotteiden

tutkailemiseen, joiden merkitys kokonaispäästön kannalta on pieni tai olematon. Tämä voi kuitenkin olla hankalaa, sillä syötteiden merkityksen arviointi vaatii vahvaa kokemusta elinkaariarvioinnista ja tietoa arvioitavasta tuotejärjestelmästä. Toisaalta myös, jos jonkin yksikköprosessin data on tiedossa, ei ole syytä jättää sitä kokonaisarvioinnista pois, vaikka sen painoarvo olisikin lähes olematon kokonaisarvioinnin kannalta (Finnveden *et al.* 2009). Tästä syystä elinkaariarvioinnissa sovelletaan iteratiivista eli pilkkovaa lähestymistapaa (ISO/TS 2013). Inventaarioanalyysi aloitetaan siis helposti löydettävissä olevasta datasta ja ymmärryksen tuotejärjestelmästä syventyessä saatetaan havaita uusia osia yksikköprosesseissa, jotka otetaan huomioon, kunnes on päästy vaadittuun tarkkuuteen (Finnveden *et al.* 2009; SFS-EN ISO 2006a). ISO standardit (2013; 2006a; 2006b) eivät myöskään vedä rajaa merkittävän ja merkityksettömän tiedon välille. Niiden mukaan jos käytettävissä on validit tuoteryhmäsäännöt, tulee niissä olla määritelty tämä raja. Jos taas tuoteryhmäsääntöjä ei ole käytettävissä, tulee merkitsevyyssynnys perustella. Perusteluihin kuuluu arviointi rajauskriteerien vaikutuksesta selvityksen tuloksen.

Järjestelmän rajoja määriteltäessä on tehtävä arviointi, mitkä yksikköprosessit katsotaan merkittäviksi, mitkä siis tulee arvioida tarkasti, ja mitkä yksikköprosessit voidaan arvioida sekundaaritiedon pohjalta, koska niiden ei katsota olevan niin merkittäviä tai primaaritieto on vaikeasti tai ei ollenkaan saatavilla. Samalla arvioidaan mitkä yksikköprosessit voidaan yhdistää. (ISO/TS 2013). Rajauskriteerit ja niiden perustana olevat oletukset tulee kuvailla: niitä voivat olla esimerkiksi massa, energia ja merkittävyys ympäristön kannalta. Pelkästään massaa käytettäessä saatetaan jättää huomiotta tärkeitä syötteitä. (SFS-EN ISO 2006b). Prosessien ollessa hiilijalanjätkiselvityksen suorittavan organisaation taloudellisessa tai toiminnallisessa hallinnassa, tulisi primaaria, paikkakohtaista tietoa kerätä. Paikkakohtaisen tiedon ollessa saavuttamattomissa tai sen keräämisen ollessa epäkäytännöllistä, voidaan käyttää muita kuin paikkakohtaisia sekundaari- ja primaaritietoja. Primaaritiedolla tarkoitetaan laskettua arvoa, joka on saatu suoralla mittauksella tai suoriin mittauksiin perustuvalla laskennalla kyseisestä tai vastaavasta tuotejärjestelmästä. Paikkakohtaisuudella tarkoitetaan juuri kyseessä olevan tuotejärjestelmästä saatua tietoa. Sekundaaritieto on jostain muusta lähteestä kuin suorasta mittauksesta tai

suoraan mittaukseen perustuvasta laskennasta. (ISO/TS 2013). Näitä ovat esimerkiksi tietokannat.

Tiedon laatua tulisi rajata määrällisesti ja laadullisesti ainakin seuraavista näkökulmista: tiedon ajallinen, maantieteellinen ja teknologinen kattavuus sekä tarkkuus eli lähtötiedon lukuarvojen vaihtelu (esim. varianssi). Kerätyn tiedon epävarmuutta, selvityksen johdonmukaisuutta ja toistettavuutta on myös arvioitava. Epävarmuutta voidaan arvioida esimerkiksi asetettujen pyöristyssääntöjen ja –välien pohjalta (ISO/TS 2013). Nämä arviot ja rajaukset on pakollista tuoda esille, jos selvitystä käytetään julkisen vertailuväitteen laatimisessa. (ISO/TS 2013; SFS-EN ISO 2006b).

Tuotejärjestelmän tehtävää mitataan toiminnallisella yksiköllä (Rebitzer *et al.* 2004) ja hiilijalanjäljen laskemisen tulokset dokumentoidaan selvitysraporttiin hiilidioksidiekvivalentin massana toiminnallista yksikkö kohden (ISO/TS 2013). Toiminnallinen yksikkö tulee määrittää tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaiheessa. SFS-EN ISO 14044 (2006) standardissa sanotaan: ”Toiminnallinen yksikkö ilmaisee tuotteen tunnistetut toiminnot (suorituskykyä kuvaavat ominaisuudet) määrällisessä muodossa”. Sellaisen tuotejärjestelmän toiminnallisen yksikön määrittäminen voi olla hankalaa, jolla on kaksi tai useampia toimintoja. Jos tuotejärjestelmän lisätoimintoja ei oteta huomioon toiminnallisten yksikköjen vertailussa, tulee poisjättäminen selittää ja dokumentoida (SFS-EN ISO 2006b).

Toiminnallista yksikköä käytetään ensisijaisesti tuotejärjestelmien vertailemiseen. Toiminnallinen yksikkö tuleekin määrittää niin, että voidaan vertailla tuotejärjestelmiä haluttujen ominaisuuksien pohjalta (Rebitzer *et al.* 2004). Eri materiaalista valmistetuilla tuotteilla voi olla erilaisia fyysisiä ominaisuuksia, kuten kulutuskestävyys tai vaikkapa veden tai ilman läpäisykyky. Tuotetta tutkitaan kuitenkin sen määritetyn toiminnon suorittamiskyvyn kannalta (Rebitzer *et al.* 2004). Tuotejärjestelmälle täytyy myös määrittää vertailuvirta, eli halutun toiminnon suorittamiseen tarvittava tuotteiden määrä (SFS-EN ISO 2006a). Jos tuotejärjestelmälle on määritetty toiminnallinen yksikkö tuoteryhmäsäännöissä, käytetään sitä. Hiilijalanjälki voidaan kuitenkin ilmoittaa itse valitun tuoteyksikön perusteella, kunhan tuoteyksikön ja toiminnallisen yksikön välinen suhde dokumentoidaan ja selitetään. (ISO/TS 2013).

Hiilijalanjäljen soveltamisalan määrittelyyn kuuluvat allokointimenettelytapojen dokumentointi. Allokoinnilla tarkoitetaan muiden tuotejärjestelmien kanssa yhteisten yksikköprosessien päästöjen jakoa tuotteiden kesken (ISO/TS 2013). ISO standardien (ISO/TS 2013, SFS-EN ISO 2006a) mukaan allokointia tulee välttää, jos se on mahdollista. Yksikköprosessi voidaan jakaa alaprosesseihin, jos mahdollista tai tuotejärjestelmää voidaan laajentaa kattamaan rinnakkaisiin tuotejärjestelmiin liittyvät toiminnot. Jos allokointia ei kuitenkaan voida välttää, tehdään se elinkaariarvioinnin periaatteiden mukaisesti, eli ensisijaisena ositusmenetelmänä käytetään syötteiden ja tuotteiden fysikaalisia suhteita. Jos tämä ei ole yksinomaisena menetelmänä mahdollista, käytetään muita syötteiden ja tuotteiden välisiä suhteita, esimerkiksi taloudellista arviota. (ISO/TS 2013; Rebitzer *et al.* 2004).

Vaikutusluokkien ajatellaan olevan ympäristöongelmia, joihin tuotejärjestelmä vaikuttaa. Soveltamisalan määrittelyssä määritellään elinkaariarviointiselvityksen vaikutusluokat ja vaikutusarvioinnissa käytettävät menetelmät (SFS-EN ISO 2006a). Vaikutusarvioinnissa tuotejärjestelmän päästöt ja muut vaikutukset jaetaan sen mukaan, miten ne vaikuttavat ympäristöongelmiin (Finnveden *et al.* 2009). Suojelemista vaativiksi alueiksi ovat vakiintuneet Finnvedenin *et al.* (2009) mukaan ihmisten terveys, luonnollinen ympäristö, luonnonvarat sekä myös rakennettu ympäristö jossain määrin.

Käyttövaiheen ja käytöstä poistamisvaiheen tapahtumat ja päästöt eivät ole välttämättä selviä elinkaariarvioinnin tekohetkellä, sillä nämä saattavat olla kaukanakin tulevaisuudessa. Tästä syystä näistä tehdyt olettamukset on kirjattava soveltamisalan määrittämiseen (SFS-EN ISO 2006a,b; ISO/TS 2013). Käyttöprofiilin tulisi kuitenkin heijastaa tuotteen todellista käyttötapaa ja sen tulisi perustua julkaistuun tekniseen tietoon (ISO/TS 2013). Tuoteryhmäsäännöissä saattaa olla ohjeita käyttövaiheen ja käytöstä poistamisvaiheen mallintamiseen. Allokointimenettelyjä käytetään myös uudelleenkäyttö- ja kierrätysongelmia ratkaistaessa (ISO/TS 2013). Käyttö- ja käytöstä poistamisvaiheen kasvihuonekaasupäästöt sisällytetään elinkaariarviointiin ilman ajoituksen aiheuttamia vaikutuksia, jos ne tapahtuvat yli kymmenen vuoden kuluttua tuotteen käyttöönotosta (ISO/TS 2013).

Tietyt tuoteluokat vaativat erityistä tarkastelua. Tällaisia ovat esimerkiksi fossiilisen ja eloperäisen hiilen, sähkön, maankäytön muutoksen, maaperän hiilivaraston muutoksen, tuotteisiin varastoituvan hiilen, karjan, lannan ja maa-aineksen päästöjen sekä lentokoneiden kasvihuonekaasupäästöjen käsittely (ISO/TS 2013). Näitä käsitellään seuraavalla tavalla. Fossiilinen ja eloperäinen hiili tulisi ottaa huomioon elinkaariarvioinnissa erikseen. Jos lentoteitse tapahtuvasta kuljetuksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt ovat merkittäviä, on ne dokumentoitava erikseen. Maankäytön muutoksesta aiheutuvat päästöt ja poistumat dokumentoidaan myös erikseen selvitysraporttiin, paikkakohtaiset tiedot läpinäkyvästi erikseen. Maankäytön muutoksen dokumentointiin hyödynnetään kansainvälisesti tunnistettuja menetelmiä. Tällainen on esimerkiksi IPCC:n julkaisema kasvihuonekaasujen inventaariota koskeva ohjeistus ”IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”. Samasta ohjeistuksesta löytyvät linjaukset maaperän hiilivaraston muutoksesta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen sekä karjan, lannan ja maa-aineksen päästöjen dokumentointiin. Tuotteisiin varastoituvan hiili dokumentoidaan myös erikseen, mutta sitä ei sisällytetä hiilijalanjälkeen. (ISO/TS 2013).

Elinkaariarviointiselvityksen rajoituksia on arvioitava soveltamisalan määrittelyvaiheessa. Rajoituksia voi tulla esimerkiksi toiminnallisen yksikön valinnasta, järjestelmän rajoista tai allokointisäännöistä. Nämä kun eivät ole yksiselitteisiä menetelmiä ja saattavat perustua arvovalintoihin. (ISO/TS 2013). Elinkaariarviointiselvitykselle voidaan tehdä kriittinen arviointi. Kriittisen arvioinnin tarve ja tyyppi ilmoitetaan soveltamisalan määrittelyvaiheessa. Kriittisessä arvioinnissa tutkitaan elinkaariarvioinnin menetelmien yhdenmukaisuutta ISO standardien kanssa, niiden tieteellistä ja teknistä pätevyyttä, käytetyn tiedon ja johtopäätösten soveltuvuutta ja järkevyyttä sekä raportin läpinäkyvyyttä. Vertailuväitteissä käytettävän elinkaariarviointiselvityksen kriittisen arvioinnin suorittaa ulkopuolisten sidosryhmien muodostama paneeli. (SFS/EN ISO 2006b).

2.1.2 Inventaarioanalyysi LCI

Kun tavoitteet ja soveltamisala on määritelty, siirrytään inventaarioanalyysivaiheeseen. Inventaarioanalyysin tulee täyttää soveltamisalan määrittelyssä asetetut vaatimukset.

Inventaarioanalyysissä selvitetään tuotejärjestelmän syötevirrat, tuotevirrat ja välivalmistevirrat. Informaation kerääminen virroista on usein työläin vaihe elinkaariarviointiselvityksessä (Rebitzer *et al.* 2004). Tuotejärjestelmä jaetaan mahdollisimman pieniin yksikköprosesseihin, ja kuten edellä mainittua, optimaalisinta olisi, jos yksikköprosessien syötteet ja tuotteet olisivat perusvirtoja. Kun tarkastellaan perusvirtojen jalostusta alusta alkaen, voidaan määrittää päästöt kaikkein tarkimmin. Yksikköprosessien kuvaukset tulee myös sisällyttää inventaarioanalyysiin. Kuvaukseen voi kuulua prosessinkulkukaaviot mallinnettavista yksikköprosesseista ja niiden välisistä suhteista, virtojen luetteleminen, käytettyjen yksikköjen luettelon laatiminen, tiedonkeruun ja laskentamenetelmien kuvaaminen ja ohjeiden antaminen erikoistapauksia varten. Tärkeimpiä tietoja ovat energiasyötteet, raaka-aine- ja muut syötteet, tuotteet, rinnakkaistuotteet ja jäte, päästöt ilmaan, veteen ja maaperään sekä muut ympäristönäkökohdat kuten maankäytön muutos. (SFS-EN ISO 2006b).

Tuotejärjestelmän pilkkomisvaiheessa hankaluudeksi voi osoittautua tekijän vähäinen tuntemus tuotejärjestelmästä, tai päinvastoin, tekijän vähäinen tuntemus elinkaariarvioinnista, tai pahimmillaan vähäinen tuntemus molemmista. Elinkaariarviointi on, vaikkakin tehokas työkalu, myös monimutkainen prosessi. Tuotejärjestelmien yksikköprosessien syötteiden ja tuotteiden mittaaminen voi olla myös ongelmallista, ja se tulee tehdä samalla tavalla kaikille yksikköprosesseille, jotta tieto olisi luotettavaa (Rebitzer *et al.* 2004). Tiedon puute tuottaa siis ongelman; jos yksikköprosesseille ei ole tarvittavia mittaustietoja saatavilla, tiedon luotettavuus kärsii. Usein elinkaariarviointiselvitystyö vaatii kommunikointia muiden organisaatioiden kanssa syötteiden, tuotteiden ja välivalmisteiden päästöjen selvittämiseksi. Tämä lisää työtä ja saattaa aiheuttaa ongelmia, sillä monet organisaatiot pitävät tuotteidensa valmistustietoja arkaluontoisina, eivätkä välttämättä ole valmiita luovuttamaan niitä käyttöön.

Prosessien yksinkertaistaminen voi olla myös järkevää monissa tapauksissa. Monet tuotejärjestelmät ovat hyvin monimutkaisia kokonaisuuksia ja inventaarioanalyysin tekeminen yksityiskohtaisesti voi olla liian aikaa ja resursseja vaativaa. Yksinkertaistamiseen ei kuitenkaan ole mitään yksiselitteistä käytäntöä. Rebitzerin *et al.* (2004) mukaan on järkevämpää rajata prosesseja prosessien ja elinkaaren vaiheiden

sisäisesti, kuin jättää pois kokonaisia prosesseja tai elinkaaren vaiheita. Inventaarioanalyysi on iteratiivinen prosessi. Sitä tehtäessä saatetaan löytää uusia yksikköprosessien osia tai yksikköprosesseja, jotka ovat merkittäviä ja tulee ottaa huomioon. Toisaalta saatetaan huomata, että jotkut yksikköprosessit tai niiden osat eivät ole niin merkittäviä kuin aluksi on luultu. On tärkeää arvioida prosessien merkittävyyttä ja arvioinnin epävarmuutta tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaiheessa.

Nämä ongelmat voidaan mahdollisesti ohittaa käyttämällä geneeristä, tietokannoista löytyvää tietoa tuotteiden ja välivalmisteiden päästöistä. Käytettävissä on useita kaupallisia ja yleishyödyllisten organisaatioiden tuottamia tietokantoja tavallisimmin käytettyjen tuotteiden erilaisia maantieteellisiä alueita kattavista valmistus- ja päästötiedoista. Monien tietokantojen tiedoissa on otettu huomioon luonnonvarojen käyttö, jäte ja materiaalin tuotannon päästöt (Rebitzer *et al.* 2004). Jos elinkaariarvioinnissa käytetään tietoja tällaisista lähteistä, tulee niihin asianmukaisesti viitata (SFS-EN ISO 14044). Elinkaariarviointia varten on kehitetty myös erilaisia sovelluksia, joiden avulla arviointi on melko vaivatonta, tosin tuloksetkin ovat yleisluontoisia. Tietokantojen ongelmana on tiedon yleisluontoisuus, ne siis tarjoavat keskiarvoista tietoa tuotannosta. Tällainen tieto ei sovellu, jos tarkoitus on tutkia päätösten vaikutusta tuotejärjestelmän päästöihin syy-seurauselinkaariarvioinnilla (Finnveden *et al.* 2009). Tiedon täytyy tällöin olla tarkempaa. Jos taas on tarkoitus tunnistaa tuotejärjestelmän merkitykselliset syöte- ja tuotevirrat piirrelinkaariarvioinnilla, geneerisen tiedon käyttö on mahdollista. Tiedon tulee kuitenkin tällöin olla samanlaista kaikille yksikköprosesseille, jotta syötteiden ja tuotteiden suhteet ovat luotettavia (Finnveden *et al.* 2009). Kun yksikköprosesseille on määritetty sisäiset virrat, määrätään yksikköprosessin oma virta ja yksikköprosessien virrat suhteutetaan vertailuvirtaan.

2.1.3 Vaikutusarviointi LCIA

Vaikutusarviointivaiheessa arvioidaan inventaarioanalyysissä saatujen tuloksien potentiaalisia ympäristövaikutuksia ja niiden merkittävyyttä. Elinkaariarviointiselvitys tutkii monia tuotejärjestelmän ympäristövaikutuksia, ei pelkästään hiilijalanjälkeä. ISO

standardin (SFS-EN ISO 2006b) mukaan ei ole olemassa tieteellistä perustaa elinkaariarvioinnin tulosten muuntamiseen yhdeksi yleiseksi numeroksi tai tulokseksi.

Ensimmäinen vaihe on vaikutusarvioinnissa on vaikutusluokkien, vaikutusluokkaindikaattoreiden ja karakterisointimallien valinta. Vaikutusarvioinnissa olisi käytettävä kansainvälisesti hyväksytyjä vaikutusluokkia, vaikutusluokkaindikaattoreita ja karakterisointimalleja (SFS-EN ISO 2006b). Esimerkiksi IPCC tarkkailee ja muuttaa ilmaston lämmityspotentiaalien arvoja, joten laskennassa olisi käytettävä viimeisimpiä arvoja. Tavoitteen ja soveltamisalan määrittelyvaiheessa eritellään ympäristökysymykset, joita vaikutusarviointi käsittelee. Vaikutusluokat valitaan valittujen ympäristökysymysten mukaan, vaikutusluokkien tulee siis kuvastaa tutkittavaan tuotejärjestelmään liitettyjä ympäristökysymyksiä. Ympäristömekanismi on vaikutusluokassa toimiva fysikaalisten, biologisten ja kemiallisten prosessien muodostama järjestelmä. Vaikutusluokkaindikaattori on vaikutusluokkaa edustava määrällinen mittari. Karakterisointimalli esittää ympäristömekanismia kuvaamalla inventaarioanalyysin tulosten ja vaikutusluokkaindikaattorin välistä yhteyttä. Karakterisointimalli antaa karakterisointikertoimet, jotka kertovat tästä yhteydestä. Karakterisointimallin tulee soveltua tavoitteeseen ja soveltamisalaan, ja sen soveltuvuus niiden kannalta tulee kuvailla. (SFS-EN ISO 2006b).

Vaikutusarvioinnin seuraava vaihe on inventaarioanalyysin tulosten sijoittaminen vaikutusluokkiin. Ympäristömekanismi liittää inventaarioanalyysin tulokset vaikutusluokkaindikaattoriin ja toimii karakterisointimallin pohjana (SFS-EN ISO 2006b). Inventaarioanalyysin erilaisilla tuloksilla eli erilaisilla päästöillä on erilaisia ympäristövaikutuksia. Toiset päästöt saattavat vaikuttaa useaan eri vaikutusluokkaan ja tämä tulisi tunnistaa. Ympäristömekanismit, jolla päästöt liittyvät vaikutusluokkiin, tulee kuvailla (SFS-EN ISO 2006b). Lopulta inventaarioanalyysin tulokset vaikuttavat ympäristömekanismien keinoilla vaikutusluokan loppupisteisiin, eli suojelemista vaativiin alueisiin kuten luonnolliseen ympäristöön, ihmisen terveyteen, luonnonvaroihin ja rakennettuun ympäristöön (Finnveden *et al.* 2009; SFS-EN ISO 2006b).

Otetaan esimerkiksi ilmaston lämpeneminen. Elinkaariarviointiselvityksen inventaarioanalyysin tuloksilla on potentiaalisia vaikutuksia ilmaston lämpenemiseen. Ilmaston lämpeneminen on siis vaikutusluokka, jota tutkitaan. Ilmaston lämpenemisen vaikutukset ovat ympäristökysymys. Inventaarioanalyysin tulokset ovat kasvihuonekaasujen määrä toiminnallista yksikköä kohti ja karakterisointimallina käytetään Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC) sata vuotta kattavaa vertailumallia, jonka vaikutusluokkaindikaattori on infrapunasäteilypakote (W/m^2). Karakterisointikerroin on ilmaston sadan vuoden lämpenemispotentiaali (GWP_{100}), joka ilmaistaan yksikkönä hiilidioksidiekvivalenttikilogrammaa kaasukilogrammaa kohti. Siis jos substanssin GWP_{100} on yksi, yhden substanssikilogramman ilmaston lämpenemispotentiaali vastaa yhden hiilidioksidikilogramman ilmaston lämpenemispotentiaalia sadan vuoden ajanjaksolla. Kullekin kasvihuonekaasulle IPCC määrää oman karakterisointikertoimen, joka määräytyy kasvihuonekaasun infrapunasäteilypakotteesta, sen keskimääräisestä säilymisestä ilmakehässä ja ilmakehän tämänhetkisestä tilasta. Lopulta saadaan vaikutusluokan indikaattoritulos eli kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia toiminnallista yksikköä kohti. (SFS-EN ISO 2006b).

Vaikutusarvioinnissa voidaan sisällyttää vielä muutamia vapaaehtoisia työvaiheita. Voidaan esimerkiksi laskea vaikutusluokan indikaattoritulosten suhteellinen suuruus vertailutietoon nähden eli normalisoida tulokset. Sen tavoitteena on ymmärtää indikaattoritulosten suuruutta tuotejärjestelmätasolla. Tuloksia voidaan verrata myös asukaslukuun tietyllä alueella, mahdolliseen vaihtoehtoiseen tuotejärjestelmään tai vaikkapa alueen kokonaissyötteisiin ja –tuotoksiin. Siitä voi olla hyötyä myös tarkistettaessa epäjohdonmukaisuuksia. Vaikutusluokat voidaan myös ryhmitellä, esimerkiksi niiden ominaisuuksien, alueellisten mittakaavojen tai arvollisen tärkeyden mukaan. Tärkeysjärjestys voidaan vielä painottaa, eli kertoa vaikutusluokkien indikaattorituloksia valituilla painotuskertoimilla. Painotus on myös arvovalintoihin perustuva metodi, jolla ei ole tieteellistä perustaa, ja jota tehtäessä on oltava varovainen. Arvovalinnat ja päätökset ovat työn tilaajan vastuulla. (SFS-EN ISO 2006b). Alkuperäiset indikaattoritulokset ja lähtötiedot on hyvä jättää näkyville, jotta painotettuja tuloksia voidaan arvioida. Painotusta ei ISO standardin (SFS-EN ISO 2006b) mukaan saa tehdä, jos elinkaariarviointiselvityksen on tarkoitus olla julkinen ja

vertailukelpoinen. Tulosten herkkyys ja epävarmuus tulee myös analysoida, jos selvityksiä on tarkoitus käyttää julkisissa vertailuväitteissä.

2.1.4 Tulosten tulkinta ja raportointi

Tulosten tulkinta on elinkaariarvioinnin viimeinen, inventaarioanalyysi- ja vaikutusarviointivaiheiden merkittävät asiat yhteen kokoava vaihe. Merkittäviä asioita voivat olla esimerkiksi merkittävät inventaariotiedot eli syötteet ja tuotokset, merkittävät vaikutusluokat sekä kahteen edelliseen merkittävästi vaikuttavat elinkaaren vaiheet tai prosessiryhmät kuten kuljetus, energiantuotanto jne. Tulosten tulkintaan vaaditaan myös tietoa elinkaariarvioinnin aiemmista vaiheista. Inventaarioanalyysin ja vaikutusarvioinnin löydökset tulee koota ja järjestää lähtötietojen laatu-tiedon kanssa. Metodologiset valinnat, arvovalinnat ja kriittisen arvioinnin tulokset sisällytetään. ISO standardin (ISO/TS 2013) mukaan myös erilaisten elinkaariarvioinnin sidosryhmien roolit ja vastuut tulee käydä ilmi tulosten tulkinnasta. Nämä riippuvat elinkaariarviointiselvityksen tavoitteiden ja soveltamisalan määrittämästä käyttötarkoituksesta.

Tulosten tulkinnassa myös arvioidaan elinkaariarviointiselvityksen täydellisyyttä, herkkyyttä ja johdonmukaisuutta elinkaariarvioinnin tavoitteiden ja soveltamisalan perusteella. Tutkitaan siis, täyttääkö selvitys tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyssä asetetut vaatimukset. Täydellisyyden tarkistuksessa koetetaan varmistua siitä, että kaikki tarvittava tieto on käytössä, jotta on päästy elinkaariarviointiselvityksen vaadittuun tarkkuuteen. Johdonmukaisuuden tarkistuksessa pyritään havaitsemaan ristiriidat esimerkiksi vertailtavien tuotejärjestelmien elinkaariarvioinnin välillä tai jonkin tuotejärjestelmän elinkaaren sisällä. (ISO/TS 2013).

Painoarvoanalyysillä tutkitaan, mitkä tekijät ovat eniten vaikuttaneet vaikutusluokkien indikaattorituloksiin. Sen jälkeen näitä tekijöitä tutkitaan epävarmuusanalyysillä ja herkkyysanalyysillä. Epävarmuusanalyysissä tutkitaan tietojen ja oletusten epävarmuuksia, ja niiden vaikutusta tulosten luotettavuuteen kvantitatiivisin tai kvalitatiivisin menetelmin noudattaen pyörityssääntöjä ja -välejä (ISO/TS 2013). Herkkyysanalyysissä tutkitaan, miten tulokset muuttuvat, kun lähtötietoja muutetaan tai menetelmätekniikkoja vaihdetaan (SFS-EN ISO 2006b). Näitä analyysejä olisi hyvä

tehdä jo inventaarioanalyysi- ja vaikutusarviointivaiheissa, sillä tulosten tulkintavaiheessa tehdyt analyysit voivat johtaa inventaarioanalyysin tarkistamiseen ja siten vaikutusarviointivaiheen tarkistamiseen. Tämä tuottaa paljon ylimääräistä työtä. Inventaarioanalyysin tuloksia tulisi muutenkin aina perustella esimerkiksi todennäköisyysjakaumiin tai arvoalueisiin perustuvalla analyysillä, sillä sen tuloksissa on aina epävarmuutta (SFS-EN ISO 2006b). Mahdolliset inventaario- ja vaikutusarviointivaiheessa tehdyt analyysit tulee sisällyttää tulosten tulkintavaiheessa tehtyihin tarkistuksiin (ISO/TS 2013).

Tulosten tulkinnan viimeisessä osuudessa tehdään johtopäätöksiä, rajoituksia ja suosituksia aiotulle kohderyhmälle elinkaariarviointiselvityksen tulosten perusteella (ISO/TS 2013). Kun on varmistettu elinkaariarviointiselvityksen laadusta ja tavoitteiden ja soveltamisalan mukaisuudesta, on siitä laadittava raportti. ISO standardit (SFS-EN ISO 2006a; SFS-EN ISO 2006b; ISO/TS 2013) ovat asettaneet erinäisiä vaatimuksia raportin sisällölle, joita on käyty läpi tässä työssä elinkaariarviointiselvityksen vaiheiden kuvauksissa. Raporttiin sisällytetään kaikki elinkaariarviointiselvityksen vaiheet, eli tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi LCI, vaikutusarviointi LCIA sekä tulosten tulkinta. Raportoinnin tulee olla puolueetonta, riittävän yksityiskohtaista ja läpinäkyvää, sekä sellaista, että sitä voidaan hyödyntää tavoitteiden ja soveltamisalan mukaisesti. Jos elinkaariarviointiselvityksestä on tarkoitus raportoida kolmannelle osapuolelle, eli jollekin muulle kuin tilaajalle tai tekijälle ja elinkaariarviointiselvitys sisältää luottamuksellista tietoa, jota ei voida sisällyttää kolmannen osapuolen raporttiin, täytyy tälle kolmannelle osapuolelle laatia erillinen raportti. ISO standardissa (SFS-EN ISO 2006b) on annettu vaatimukset raportin sisältöön.

(ISO/TS 2013) vaatimukset on täytetty. Raportoinnissa toteutetaan samoja periaatteita kuin elinkaariarviointiselvityksessä muutoinkin: tulokset ja johtopäätökset esitetään puolueettomasti, avoimesti ja yksityiskohtaisesti jne. Raportin tyyppi ja muoto määritetään myös tavoitteiden ja soveltamisalan määrittämävaiheessa. Valitut allokointimenetelmät, merkittäviä syötteitä koskeva herkkyystarkistus ja huomioon otetut kasvihuonekaasut dokumentoidaan selkeästi ja yksityiskohtaisesti. Raporttiin sisällytetään myös arviointi vaihtoehtoisten käyttö- ja käytöstä poistamisskenaarioiden

vaikutus lopullisiin tuloksiin (ISO/TS 2013). Seuraavaksi kerrotaan ohjeet hiilijalanjätkiraportointiin ja kasvihuonekaasujen dokumentointiin ISO standardin (ISO/TS 2013) mukaisesti:

- Kasvihuonekaasut, jotka sisällytetään **erikseen** hiilijalanjäljen selvitysraporttiin:

- 1) kasvihuonekaasupäästöt ja –poistumat yhdistettyinä asianmukaisiin elinkaaren vaiheisiin sisältäen elinkaaren vaiheen absoluuttiset ja suhteelliset vaikutukset,
- 2) fossiilisen hiilen lähteistä ja nieluista peräisin olevat kasvihuonekaasupäästöt ja –poistumat,
- 3) eloperäisen hiilen lähteistä ja nieluista peräisin olevat kasvihuonekaasupäästöt ja –poistumat,
- 4) merkittävät suorasta maankäytön muutoksesta johtuvat kasvihuonekaasupäästöt sekä
- 5) merkittävät lentoteitse tapahtuvasta kuljetuksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt.

- Kasvihuonekaasut, jotka sisällytetään **erikseen**, jos ne on laskettu:

- 1) hiilen varastoituminen tuotteen käyttövaiheessa tai käytöstä poistamisvaiheessa,
- 2) epäsuoran maankäytön muutoksen seurauksena syntyvät kasvihuonekaasupäästöt ja –poistumat sekä
- 3) maaperän hiilen muutos.

- Selvitysraporttiin **on sisällytettävä** myös seuraavat kohdat:

- 1) toiminnallinen yksikkö ja vertailuvirta,

- 2) järjestelmän rajat, johon kuuluvat syötteiden ja tuotosten tyyppi perusvirtoina ja päätöksentekokriteerit, joissa otetaan huomioon yksikköprosessien tärkeys johtopäätösten suhteen,
- 3) rajauskriteerit ja rajaukset ja tietoon liittyvä ajanjakso (jos määritelty),
- 4) tiedon kuvaus eli tietoja koskevat päätökset (primaari/sekundaari, paikkakohtaisuus), yksittäisten tietojen yksityiskohdat ja tiedon laadun arviointi,
- 5) käyttövaihetta ja käytöstä poistamisvaihetta koskevat oletukset sekä sähkön käsittely sekä
- 6) tulosten tulkinnan tulokset, johtopäätökset ja rajoitukset sekä arvovalinnat ja niiden perustelut.

ISO standardin (ISO/TS 2013) mukaan olisi myös harkittava seuraavien kohtien lisäystä raporttiin, mutta mielestäni ne ovat niin tärkeää informaatiota ja osaltaan ristiriidassa edellisten ohjeistusten kanssa, että ne tulee sisällyttää:

- 1) soveltamisala ja soveltamisalan mahdollinen modifiointi ja sitä koskevat perustelut ja rajoitukset,
- 2) elinkaaren vaiheiden kuvaus sekä valitun käyttöprofiilin ja käytöstä poistamisskenaarion kuvaus,
- 3) merkittävien yksikköprosessien kuvaukset sekä
- 4) ajanjakso, jota hiilijalanjälki edustaa.

3 TYÖVAIHEEN YKSIKKÖPÄÄSTÖ

Hiilijalanjäljen laskemista koskevat säännöt on määritelty standardissa ISO/TS 14067 ”Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista ja viestimistä koskevat vaatimukset ja ohjeet”.

Standardin mukaan laskennassa on otettava huomioon kaikki kasvihuonekaasupäästöt ja -poistumat, jotka vaikuttavat merkittävästi tutkittavan tuotejärjestelmän hiilijalanjälkeen. Jotta informaatio olisi vertailukelpoista, valitaan menetelmät, standardit ja opastavat asiakirjat, jotka on jo aiemmin tunnustettu ja otettu käyttöön tuoteryhmän sisällä. Tässä tapauksessa käytetään The International EPD System: in laatimaa ”*Product Category Rules according to ISO 14025:2006: Bridges and elevated highways*” – tuoteryhmäsääntöjä. Tuoteryhmäsäännöt ovat voimassa 20. Joulukuuta 2016 saakka. Tuoteryhmäsääntöjen mukaan osaprojektien ja osaprojektien osien huomioonottamisessa käytetään niin sanottua yhden prosentin sääntöä: laskennassa on otettava huomioon vähintään 99 prosenttia tuote- materiaali- ja energiavirrasta. Ainoa keino tämän tarkastamiseen on herkkyysanalyysin ja tuoteryhmäasiantuntijan konsultaation kombinaatio.

Kaikki asiaankuuluvat seikat otetaan huomioon ja tieto esitetään avoimesti, kattavasti ja ymmärrettävästi: ilmoitetaan siis kaikki oletukset, arviot ja lähteet selkeästi ja selitetään ne. Kaksinkertaista laskentaa tulee myös välttää, ja kyseessä olevassa tapauksessa tämä onkin tärkeää, sillä hiilijalanjälki lasketaan osittaisista hiilijalanjäljistä, joissa ei saa olla aukkoja tai päällekkäisyyksiä.

3.1 Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely

Projektin tavoitteena on määrittää sillankorjaamisen erilaisille työsuorituksille ja materiaaleille yksikkökohtaiset keskimääräiset päästöarvot, joiden avulla suunnittelijan on helppo laskea korjausprojektin potentiaalinen vaikutus ilmaston lämpenemiseen hiilidioksidi-ekvivalenttina. Korjaussuunnittelija käyttää määrälaskentaa taulukkotiedostoa, jossa on lueteltu työsuoritukset, niiden litterat ja yksiköt. Tarkoituksena on siis määrittää pelkästään osaprosessille, eli sillankorjausprojektille

hiilijalanjälki, eikä koko sillalle sen elinkaaren ajaksi. Hiilijalanjätkiselvityksen tavoitteena on olla tukena Helsingin kaupungin päätöksenteossa sillankorjausprojekteja suunniteltaessa. Vaikutusarviointia ei ole tässä tapauksessa merkityksellistä tehdä, sillä työn tavoitteena on tutkia korjauksen kannattavuutta ilmastotehokkuuden kannalta - korjaus tai uuden rakentaminen siis joka tapauksessa on tehtävä.

3.1.1 Tutkittava tuotejärjestelmä ja sen toiminnallinen yksikkö

Tutkittava tuotejärjestelmä on sillat ja korotetut maantiet. Tuotejärjestelmä on rajoitettu luokittelussa UN CPC 53221. Se sisältää puiset, betoniset ja muista materiaaleista tehdyt sillat ja maasillat, jotka on tarkoitettu kaikenlaiselle maakuljetukselle ja jalankulkijoille sekä korotetut maantiet moottoriajoneuvoliikenteelle. Erityisesti tutkittava tuote on kuitenkin sillankorjaus.

Tuoteryhmäsäännöissä on määritelty tuotejärjestelmän määrällisen suorituskyvyn referenssiyksikkö eli toiminnallinen yksikkö. Silloille ja korotetuille maanteille se on **yksi metri infrastruktuuria viitaten yhteen vuoteen käyttöikä**. Tässä tapauksessa laskemme virtojen avulla hiilidioksidiekvivalenttipäästön työsuorituksen määrällistä yksikköä (m³, m², m, kpl...) kohti, josta suunnittelijan voi laskea työsuoritusten ja korjausprojektin hiilidioksidiekvivalenttipäästöt, kun määrät ovat tiedossa. Tästä voidaan siis laskea projektikohtainen ympäristökuormitus sidottuna toiminnalliseen yksikköön, kun tiedetään infrastruktuurin koko ja käyttöikä.

3.1.2 Järjestelmän rajat

Tämä hiilijalanjäljen arviointi ei ole tarkoitettu julkisesti saataville. Tarkoituksena on kuitenkin määrittää hiilijalanjälki, joka sisältää sillankorjauksen kaikki elinkaaren vaiheet. Tuoteryhmäsäännöissä määrätään, että kaikki prosessit, jotka tarvitaan infrastruktuurin rakentamiseen, operointiin ja ylläpitoon tulee sisällyttää laskentaan. Tässä tapauksessa keskitymme korjaukseen. Tuoteryhmäsääntöjen mukaan sillan tai korotetun maantien käyttöä tai käytöstä poistoa ei oteta huomioon laskennassa. Seuraavia ei myöskään ajatella kuuluvaksi tuotejärjestelmään: tuotantovälineiden valmistus; henkilöstön toiminta; ”telakkavaiheen” infrastruktuuri ja laitteet (rakennustelineet, trukit, nosturit, liikuteltavat työpajat, muotit jne.); seisakkeiden,

tarkastuspisteiden, bussipysäkkien, liikennemerkkien, valaistuksen ja kameroiden valmistus; raaka-aineiden ja apulaitteiden pakkausmateriaali ja pakkaaminen; lastaus ja purku.

Tuoteryhmäsääntöjen mukaan laskennassa on otettava huomioon kaikki käytettävät materiaalit, tuotteet ja puolivalmisteet, kaikki niiden tuottamiseen käytetty energia sekä näiden kuljetukset työmaalle. Huomioon on otettava myös kaikki prosessit ja tuotteet, joita tarvitaan rakentamiseen ja korjaamiseen tai jotka syntyvät niissä: sähköntuotanto, höyry ja kuumuus, polttoaineet, veden käyttö, jätevesi, kiinteä jäte, hylkytavara sekä päästöt ilmaan, veteen ja maahan.

Merkittävän osan hiilijalanjäljestä todennäköisesti muodostavat raskaat työkoneet ja korjausmateriaalit. Näiden päästöt määritetään mahdollisimman tarkasti. Puu materiaalina on sillankorjausprojekteissa melko vähän käytetty, lähinnä muottitöissä ja telinerakenteissa. Sen vaikutusta päästöihin emme tiedä, joten pyrimme määrittämään senkin mahdollisimman tarkasti. Kevyet työkoneet eivät todennäköisesti vaikuta merkittävästi päästöihin, mutta määritämme silti mahdollisimman tarkasti niidenkin vaikutuksen. Käsityötä ei oteta mukaan laskentaan. Hiilen varastoitumista tuotejärjestelmään ei oteta huomioon. Sillankorjauksessa maankäytön muutosta ei useissa tapauksissa tapahdu merkittävästi ja sitä ei oteta huomioon. Jos maankäytön muutos katsotaan merkittäväksi, otetaan se huomioon kansainvälisten standardien mukaisesti.

Rakennusviraston organisaation tilaajatyypin luoteen sekä projektien kertaluontoisuuden ja erilaisuuden johdosta paikkakohtaisen primaaritiedon kerääminen on vaikeaa, jopa mahdotonta. Joillekin syötevirroille sen määrittäminen voi olla mahdollista ja se pyritään ottamaan huomioon ainakin sekundaaritiedon rinnalla. Muutoin käytetään mahdollisuuksien mukaan suomalaisten viranomaisten määrittämiä päästöarvoja. Jos tämä ei ole mahdollista, käytetään kansainvälisten viranomaisten määrittämiä päästöarvoja. Käytettyjen päästöarvojen lähteet perustellaan ja ilmoitetaan selvästi inventaarioanalyysiselvityksessä.

Rajaussääntönä on yhden prosentin sääntö, eli hiilijalanjäljen selvitysraportissa ja kriittisessä arvioinnissa on otettava huomioon vähintään 99 % energiasta, massasta ja virtojen kokonaisvaltaisesta merkittävyydestä (PCR:23 2013).

3.1.3 Tietoa ja tiedon laatua koskevat vaatimukset

Käytetään mahdollisimman tuoretta tietoa. Korjaustöiden ohjeistuksena ja laatuvaatimuksina käytetään Liikenneviraston Siltojen korjausohjeet (SILKO) – tietokantaa. Sekundaari-informaation suositeltavat lähteet on määritelty tuoteryhmäsäännöissä. Työkoneiden ja kuljetusten aiheuttamaa päästöä arvioidaan VTT:n ylläpitämän LIPASTO - liikenteen päästöt – tietokannan avulla. LIPASTO – tietokanta tutkii suomalaisen auto- ja työkonekannan koontia ja ylläpitää näille keskimääräisiä päästötietoja. Materiaalien yksikköpäästöt on määritelty tapauskohtaisesti hiilijalanjäljen selvitysraportissa.

Tietoarvojen vaihtelevuus ja epävarmuus ilmenee erityisesti työsuoritteissa. Työsaavutukset ovat arvioita ja vaihtelevat tapauskohtaisesti. Erilaisten työkoneiden tehot ovat myös arvioita. Arviointi on tehty työkonevalmistajien julkisten tietojen perusteella. Päästökertoimet ovat geneerisiä, siispä ne eivät edusta paikallista todellisuutta, vaan ovat kansainvälisiä, eurooppalaisia tai paikallisia keskiarvoja.

Tutkimusmenetelmä on johdonmukainen, joskin selvitys on suuntaa-antava, sillä lähteet eivät ole primaarisia. Kuten jo mainittua, virrasta pyritään ottamaan huomioon vähintään 99 prosenttia. Käyttämällä samoja lähteitä, riippumattoman tutkijan on mahdollista toistaa raportoidut tulokset suurella laajuudella. Epävarmuuden tähän tuo työkoneiden tehojen ja työsaavutusten arvioinnit.

3.1.4 Tiedon ajallinen rajaus

Ajanjakso, jolle hiilijalanjälki lasketaan, on yksi vuosi. Kaikki käyttöiän, huoltovälien, korjausvälien jne. oletukset tulee kirjata laskelmaan. Kaikkien yksikköprosessien päästöt jaetaan viitteellisellä käyttöiällä, tässä tapauksessa korjauksen antamalla viitteellisen käyttöiän lisäyksellä. Laskennassa tulee myös korostaa rakentamisen, tässä

tapauksessa korjauksen päästöt toiminnallista yksikköä kohti, vaikka nämä päästöt sijoittuvat ajallisesti lyhyelle välille käyttöikänsä verrattuna.

3.1.5 Allokointi

Valitun allokointimenetelmän tulee olla mahdollisimman validi koko tuotejärjestelmälle. Tuotejärjestelmän rajojen laajennus ei tule kysymykseen allokointimenetelmänä. Tapauksessa, jossa prosessissa syntyy sivutuotteita, prosessin syötteet ja tuotteet tulee jakaa niin, että ne kuvastavat syntyvien tuotteiden fyysisiä suhteita. Jos fyysisiä suhteita yksin ei voida hyödyntää allokoinnissa, tulee käyttää muita tuotteiden välisiä suhteita, esimerkiksi taloudellisia.

3.1.6 Päästöt, poistumat ja oletukset

Maankäytön pysyvä muutos tulee ilmoittaa elinkaari-inventaarioanalyysissä. Liikennejärjestelyjen vaikutus ja liikenteen sujuvuuden huonontuminen tulee myös arvioida. Oletuksia on lueteltu korjaustöiden inventaarioanalyysiselvityksessä. Käsitöitä ei oteta huomioon laskennassa. Hiilen varastoitumista rakenteisiin ei oteta huomioon, sillä se on vaikeasti määriteltävissä ja sen oletetaan olevan merkityksetöntä kokonaispäästöjen kannalta. Kaikki päästöt pyritään ilmoittamaan CO₂-ekvivalenttina. Mikäli tämä ei ole mahdollista, ilmoitetaan ne CO₂-päästöinä. Sen arvioidaan pitävän sisällään 95-99 % kokonaispäästöistä.

3.2 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysissä kerätään tuotteen elinkaaren syöte- ja tuotosvirtojen informaatiot samaan pakettiin ja yhdistellään niitä päästötietojen kanssa niin, että saadaan

Sillankorjausprojektin laatuvaatimuksina toimivat Liikenneviraston tarjoamat Siltojen korjausohjeet (SILKO) (2011). Laatuvaatimuksista selviää pääosin eri työvaiheiden ja prosessien kuvaukset, mutta niissä tapauksissa, kun tiedot ovat puutteellisia, tulisi inventaarioanalyysiselvityksessä käyttää mahdollisimman todenmukaista tietoa ja perustella tämän tiedon käyttö läpinäkyvästi (ISO/TS 2013).

Inventaarioselvitystä tehdessäni huomasin, että yksi puutteellisista tiedoista on usein likimääräinen työsaavutus, eli työskentelynopeus eri työvaiheissa. Työkoneiden päästöjä laskettaessa tämä on kriittinen tieto, sillä sen muutos vaikuttaa työn keston, siis työkoneen käyttöaikaan ja siten suoraan päästöihin. Helsingin kaupungin rakennusviraston rakennuttajaluonteen takia usein todenmukaiset, toteutuneisiin projekteihin perustuvat tiedot työsuorituksista, käytettävistä työkoneista ja niiden päästöistä sekä materiaaleista ovat saavuttamattomissa. Jos mahdollista, tulisi tehdä yhteistyötä projektit toimeenpanevien urakoitsijoiden kanssa mahdollisimman primaarien tietojen saavuttamiseksi.

Työn päästössä otetaan huomioon kaikki työkoneet. Tarvittavia lähtötietoja ovat työsaavutus, käytettävä työkone, työkoneen keskimääräinen teho ja – kuormitusaste ja työkoneen yksikköpäästö.

Kuormitusasteen ja yksikköpäästön määrittämiseen käytetään pääsääntöisesti Liikenneviraston LIPASTO liikenteen päästöt –tietokantaa. Työkoneen keskimääräinen teho selviää työkonevalmistajan työkonekohtaisista tiedoista. Jos todellisen käytettävän työkoneen malli, merkki jne. eivät ole tiedossa, tutkitaan ja vertaillaan tunnettujen työkonevalmistajien mallistoja, joiden pohjalta tehdään arvio työkoneen keskimääräisestä tehosta. LIPASTO –tietokannasta löytyy myös joidenkin, lähinnä raskaiden työkoneiden keskimääräisiä tehoja.

Materiaalien päästöjä arvioitaessa tarvittavia tietoja ovat materiaalin valmistuksen päästöt. Rakennusviraston tilaajaluonteen takia primääritieto ei useinkaan ole saatavilla. Kuitenkin materiaalien aiheuttaessa todennäköisesti merkittävän osan päästöistä, tulisi niiden vaikutus arvioida mahdollisimman tarkasti, esimerkiksi paikallisten materiaalinvalmistajien tarjoamien informaatioiden pohjalta. Esimerkiksi betonituotteiden ja betonilaatujen erilainen koostumus tulisi ottaa huomioon, sillä sementti on merkittävä päästöjen aiheuttaja ja betoni yksi tärkeimmistä sillanrakennuksen ja –korjauksen materiaaleista. Myös asfalttilaatujen päästöjen erilaisuus tulisi arvioida. Joissakin tapauksissa on käytetty tietokannoista kerättyä informaatiota materiaalien päästöistä. Joka tapauksessa informaation lähde tulee perustella ja sen epävarmuutta on hyvä arvioida. Esimerkiksi University of Bath

ylläpitää ICE – Inventory of Carbon and Energy –tietokantaa, johon on kerätty monien eri rakennusmateriaalien tietoja ja päästöjä.

Kierrätyksen päästöjä arvioidaan erikseen inventaarioanalyysissä eli niitä ei siis sisällytetä materiaalien tai työvaiheiden päästöihin. Kierrätyksen päästöä arvioitaessa tarvittavia tietoja ovat kierrätettävän materiaalin määrä, kierrätysaste, kierrätyksen päästöt ja mahdollinen uudelleenkäyttöaste. Materiaalien kuljetusta arvioidaan myös erikseen inventaarioanalyysissä. Tämä on tapauskohtaista, joten se tulisi tehdä jokaiselle projektille erikseen. Materiaalien kuljetus aiheuttaa todennäköisesti merkittävän osan korjauksen päästöistä. Työnaikaisia liikennejärjestelyjä ja liikennehaittaa tulisi myös arvioida erikseen.

Tuloksien epävarmuutta tulisi arvioida koko inventaarioanalyysiprosessin ajan. Lopuksi voidaan tehdä erilaisia herkkyysanalyyskejä epävarmuuden määrittämiseksi. Myös sillankorjauksen ammattilaisen arviointi kannattaa suorittaa. Arvioinnissa sillankorjauksen ammattilaisen apu on hyödyllistä varmasti etenkin työvaiheiden etenemisen oikeellisuuden tarkastamisessa.

3.3 Esimerkki työvaiheen päästön arvioinnista

Otetaan esimerkiksi työvaiheen päästön arvioinnista inventaarioanalyysissä kohta ”1109 Kannen yläpinnan suihkupuhdistus”. Päästöä arvioidaan nelikohtaisesti, jolloin todellisen projektin suihkupuhdistuksen päästö voidaan arvioida, kun suihkupuhdistettavan pinnan pinta-ala on tiedossa. Päästöä on arvioitu seuraavasti:

1109 Kannen yläpinnan suihkupuhdistus [m²]

Suihkupuhalluslaitteiden toimintaperiaatteita on muutamaa tyyppiä: hiekkapuhallus, vesihiekkapuhallus, soodapuhdistus, märkäsoodapuhdistus ja sinkopuhdistus.

Hiekkapuhalluksen työsaavutus vaihtelee välillä 25–75 m²/h eli neliökohtainen ajankäyttö on 0,04-0,0133 h/m². Käyttöön tarvittava ilmanpaine 0,6-0,8 MPa saadaan aikaan kevyellä kompressorilla; arvioidaan siis päästöjä siirrettävälle dieselkäyttöiselle

kompressorille määritettyjen päästöarvojen avulla. Tällainen paine saadaan aikaan noin 10 kW kompressorilla, ja keskimääräisen kuormitusasteen ollessa 0,60, todellinen tehonkäyttö on 6 kWh. Neliökohtainen energiankulutus vaihtelee välillä 0,08—0,24 kW/m². Yksikköpäästön ollessa 809 gCO_{2e}/kWh, neliökohtainen yksikköpäästö on 0,065—0,194 kgCO_{2e}/m², keskimäärin 0,129 kgCO_{2e}/m². Hiekkapuhallin kuluttaa keskimäärin 100 kg hiekkaa tunnissa eli 1,3–7,0 kg/m². Hiekan keskimääräinen yksikköpäästö on 0,0051 kgCO_{2e}/kg (Inventory of Carbon and Energy (ICE), University of Bath v2.0). Siispä hiekan neliökohtainen päästö on 0,0066-0,0357 kgCO_{2e}/m². Yhdistetty päästö vaihtelee välillä 0,072-0,223 kgCO_{2e}/m², siis keskimäärin 0,148 kgCO_{2e}/m².

Vesihiekkapuhallus on huomattavasti tehottomampaa kuin tavallinen hiekkapuhallus, mutta sitä käytettäessä vältytään haitalliselta pölyltä. Sen työsaavutus on 5-10 m²/h, 0,1-0,2 h/m². Tarvittava vedenpaine on 10–20 MPa ja tällaisiin lukemiin päästään vesipumpulla, jonka teho on noin 20 kW. Käytetään muiden dieselkäyttöisten siirrettävien työkoneiden päästöarvoja: keskimääräinen kuormitusaste on 0,50, jolloin todellinen tehonkäyttö on 10 kWh. Neliökohtainen energiankulutus vaihtelee välillä 1-2 kW/m². Kun yksikköpäästökseen on arvioitu 844 gCO_{2e}/kWh, vaihtelee neliökohtainen päästö välillä 0,844—1,688 kgCO_{2e}/m², eli keskimäärin 1,266kg/m² CO₂-ekv. Vesihiekkapuhallin kuluttaa keskimäärin 100 kg hiekkaa tunnissa eli 10–20 kg/m². Hiekan keskimääräinen yksikköpäästö on 0,0051 kg/kg CO₂-ekv, siispä hiekan neliökohtainen kulutus on 0,051-0,102 kg/m² CO₂-ekv. Yhdistetty päästö vaihtelee välillä 0,895–1,790 kg/m² CO₂-ekv. ja on keskimäärin 1,343 kg/m² CO₂-ekv.

Soodapuhdistuksessa pintaan ammutaan paineilman avulla ruokasoodajauhetta, joka räjähtää iskeytyessään pintaan. Märkäversiossa paineilmaan lisätään vettä. Arvioitu työsaavutus on 5-10 m²/h eli 0,1-0,2 h/m². Soodapuhdistimet toimivat paineilmalla alle 1,0 MPa paineella. Käytetään siis dieselkäyttöisen kompressorin päästöarvoja. Tällainen paine saadaan aikaan kompressorilla, jonka teho on 10kW. Keskimääräinen kuormitusaste on 0,60. Todellinen tehonkäyttö on 6 kWh. Neliökohtainen tehonkäyttö vaihtelee välillä 0,6-1,2 kW/m². Yksikköpäästön ollessa 809 gCO_{2e}/kWh neliökohtainen päästö on 0,485–0,971 kgCO_{2e}/m² ja on keskimäärin 0,728 kgCO_{2e}/m². Puhdistukseen käytettävän soodan yksikköpäästöä ei ollut saatavilla, joten sen vaikutusta ei arvioida.

Sinkopuhdistuksessa lattiaan ammutaan kovasta materiaalista valmistettuja kuulia. Tähän tarkoitukseen soveltuvat teräskuulat. Menetelmä ei pölyä ja kuulien uudelleenkäyttöaste on parempi kuin hiekan tai soodan. Sinkopuhdistimen työsaavutus on 40–90 m²/h eli 0,011–0,025 h/m². Tällaisen laite käyttää verkkovirtaa ja tarvitsee sitä keskimäärin 45 kW. Käytetään dieselgeneraattorille määriteltyjä päästöarvoja. Keskimääräinen kuormitusaste on 0,50, joten todellinen tehonkäyttö on 22,5 kWh. Neliökohtainen tehonkäyttö on siis 0,248–0,563 kW/m². Yksikköpäästön ollessa 849 gCO_{2e}/kWh, neliökohtainen päästö vaihtelee välillä 0,201–0,478 kgCO_{2e}/m² ja keskimäärin 0,340 kgCO_{2e}/m².

Taulukko 1. Kannen yläpinnan suihkupuhdistusmenetelmien yksikköpäästöt taulukoituna

Menetelmä	Yksikkö	Päästö
Raskas hydraulinen puristin	kgCO _{2e} /m ³	27,14
Hydraulinen piikkausvasara	kgCO _{2e} /m ³	30,75
Kevyt hydraulinen puristin	kgCO _{2e} /m ³	30,75
Käsiikäyttöinen piikkauslaitteisto	kgCO _{2e} /m ³	148,60
Timanttisahaus	kgCO _{2e} /m	1,54

4 YHTEENVETO

Elinkaariarviointi on monimutkainen ja resurssisyöppö metodi, mutta sen kokonaisvaltaisuus tekee siitä laadukkaan työkalun hiilijalanjäljen arvioinnissa. Sillankorjauksen hiilijalanjälki koostuu monista erilaisista työvaiheista, materiaaleista, välivalmisteista ja tuotteista, joille kaikille tulisi määrittää oma ominaispäästö. Jokainen korjausprojekti on uniikki, josta syystä tarkan hiilijalanjäljen arviointi on työlästä. Valmiilla työvaiheiden inventaarioanalyysillä sen arviointi on helpompaa.

Vaikka elinkaariarviointi on standardoitu menetelmä, on sen suorittamisessa vielä useita epävarmoja osa-alueita. Standardit tarjoavatkin lähinnä vaatimuksia elinkaariarviointiin sisällytettävistä seikoista, mutta ei anna yleistä menetelmää näiden seikkojen määrittämiseksi. Tämä jääkin elinkaariarvointiselvityksen tekijän kontolle. Yhteisten toimintatapojen saavuttamiseksi tehdään kuitenkin kokoajan työtä monien kansainvälisten tahojen toimesta.

Tutustuin työtä varten elinkaariarvioinnin ja hiilijalanjäljen määrittämisen standardeihin ja useisiin tutkimuksiin aiheesta. Tuloksena on tämä teorialtutkimus elinkaariarvioinnista ja arviointimalli sillankorjauksen työvaiheille ja –materiaaleille. Moni asia jäi yksityiskohtaisesti tutkimatta ja aiheesta olisi saanut helposti diplomityön verran tutkimusmateriaalia, ja luulen, että se silloinkin olisi jäänyt osin vajavaiseksi ohjeistukseltaan. Kuitenkin työ kertoo pääpiirteet elinkaariarvioinnista ja toivoakseni tarjoaa työni jatkajalle hyvän pohjan työn tekoon.

5 LÄHDELUETTELO

Du G *et al.* (2012) Life cycle assessment framework for railway bridges: literature survey and critical issues. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance* 10(3): 277-294.

Finnveden G *et al.* (2009) Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* 91(1): 1-21.

Guinée JB *et al.* (2011) Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science and Technology* 45: 90-96.

Hotakainen, Markus (toim.) *Muutamme ilmastoa*. PDF-julkaisu. WS Bookwell Oy, Porvoo 2008.

IPCC Intergovernmental panel on climate change (2007) *Climate change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm. [21.07.2015]

ISO/TS 14067:fi (2013) *Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista ja viestimistä koskevat vaatimukset ja ohjeet*. Suomen Standardisoimisliitto SFS: 103.

Jensen AA *et al.* (1998) *Life Cycle Assessment (LCA) – A guide to approaches, experiences and information sources*. Environmental Issue Report no 6. European Environment Agency: 119.

Liikennevirasto (2011) *Siltojen korjausohjeet (SILKO)*. http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/urakoitsijat_suunnittelijat/vaylanpidon_ohjeet/sillat/korjausohjeet/SILKO#.VcnRjLf0CfY. [11.08.2015]

Pandey D *et al.* (2010) Carbon footprint: current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment* 178(1-4): 135-160.

PCR:23 (2013) Product Category Rules according to ISO 14025:2006 Product group UN CPC 53221 (Bridges and elevated highways). *The International EPD System*: 20.

Rebitzer G *et al.* (2004) Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications. *Environment International* 30(5): 701-720.

SFS-EN ISO 14040 (2006) Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Suomen Standardisoimisliitto SFS: 48.

SFS-EN ISO 14044 (2006) Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. Suomen Standardisoimisliitto SFS: 96.

SFS-ISO 14050 (2002) Ympäristöasioiden hallinta. Sanasto. Suomen Standardisoimisliitto SFS: 30.

VTT (2013) LIPASTO liikenteen päästöt. <http://lipasto.vtt.fi/index.htm>. [17.08.2015]