



**ELINKAARIPÄÄSTÖJEN JA -KUSTANNUSTEN ARVIOINNIN  
TOIMINTAMALLIT**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2022

Vili Sihvola

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tero Tynjälä

Tutkijaopettaja Päivi Sikiö

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Vili Sihvola

### **Elinkaaripäästöjen ja -kustannusten arvioinnin toimintamallit**

Energiatekniikan Diplomityö

2022

68 sivua, 15 kuvaa, 4 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tero Tynjälä ja tutkijaopettaja Päivi Sikiö

Avainsanat: Elinkaariarviointi, Elinkaarikustannus, Projektin elinkaari

Nykyiset valtiolliset päästövähennystavoitteet ohjaavat sekä yksityisiä että julkisia toimijoita nostamaan tietoisuuttaan oman toimintansa sekä yhteistyökumppaneidensa toiminnasta aiheutuvista päästöistä. Lisäksi EU:n yhteiset päästövähennystavoitteet nostavat painetta kasvihuonekaasupäästöjen hinnan korotuksille. Samaan aikaan globaali taloustilanne on muuttunut yhä epävakammaksi, mikä aiheuttaa erityisesti yksityisen sektorin toimijoille kasvavan tarpeen tarkentaa hankkeiden taloudellisen kannattavuuden tarkastelua. Osittain näistä syistä johtuen elinkaaren aikaisten päästöjen ja kustannusten arvioinnin kysyntä kasvaa tulevaisuudessa. Toimeksiantaja AFRY Finland Oy:n Paikallispalvelut-liiketoimintayksikkö pyrkii kehittämään ja laajentamaan tarjoamiaan palveluita edellä mainituilla arvioinneilla.

Diplomityön tavoitteena oli tarkastella elinkaariarviointia ja elinkaarikustannusten arviointia sekä kehittää toimiva toimintamalli niiden arviointiin. Työn kirjallisuusosuudessa tutustuttiin projektin elinkaareen, kasvihuonekaasupäästöjen arviointiin, elinkaaren aikaisten päästöjen arviointiin sekä projektien kustannusten ja elinkaarikustannusten arviointiin. Tarkasteltu kirjallisuus painottui jossain määrin teollisuuden tarkasteluun.

Diplomityön tuloksena saatiin tavoitteiden mukaiset toimintamallit. Tavoitteiden lisäksi luotiin toimintamalli hiilijalanjälkiarvioinnille. Tuotetut toimintamallit pohjautuvat vahvasti tarkastellun kirjallisuuden tarjoamiin esimerkkeihin sekä AFRY Finland Oy:n sisäisiin tietoihin. Toimintamalleihin varaudutaan tekemään tulevaisuudessa tarkennuksia ja muutoksia, mikäli siihen ilmenee tarpeita. Tarkennus- ja muutostarpeita voi esiintyä esimerkiksi toimintamallien soveltamisessa teollisuuden ulkopuolelle. Myös tulevaisuuden epävarmuustekijät ja esimerkiksi standardien muutokset voivat aiheuttaa muutostarpeita luotuihin toimintamalleihin.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Vili Sihvola

### **Operational models for assessing life-cycle emissions and life-cycle costs**

Master's thesis

2022

68 pages, 15 figures, 4 tables and 1 appendix

Examiners: Associate Professor (Tenure Track) Tero Tynjälä and Associate Professor Päivi Sikiö

Keywords: Life-Cycle Assessment, Life-Cycle Cost, Project Life-Cycle

Current national goals to cut emission levels are guiding both companies and operators in the public sector to elevate their awareness of emissions caused by both their own actions and actions of their partners. In addition, European Union's common goals to cut emission levels are amplifying the pressure to increase the prices of emission permits. Meanwhile, global economy has turned increasingly volatile which causes an increasing need to specify the observation of cost-effectiveness in projects, especially in the private sector. Partly from these reasons, the future demand for assessing life-cycle emissions and life-cycle costs will most likely increase. AFRY Finland Ltd Local Services Business Unit wants to develop and expand the services they offer with the assessments mentioned previously.

The aim of this thesis was to examine life-cycle assessment and life-cycle cost assessment and to develop a functional operational model to assess them. Literature part of the thesis focused on examining a projects life-cycle and assessment of greenhouse gas emissions, life-cycle emissions, project costs and life-cycle costs. The examined literature was more or less focused on the industry.

As a result of the thesis, the operational models in line with the objectives where created. In addition, an operational model for assessing carbon footprint was created. Created operational models are strongly based on the examples offered by the examined literature and AFRY Finland Ltd.'s internal knowledge. Making changes and further specifications into these models in the future, if needed, will be prepared for. These needs may rise for example when the operational models are being used in other sectors than industry. Also, uncertainties of the future and for example changes in standards may cause a need to update these operational models.

## **ALKUSANAT**

Melkein kolmivuotinen työn ohella suoritettu maisteriohjelma alkaa vihdoinkin olla päätöksessään. Opintoni ajoittuivat osittain globaalin pandemian aikaan, ja sain tietää minulle tavallista arkea kutsuttavan karanteeniksi. Muutoinkin etänä toteutettavissa opinnoissa päästiin siis helpolla erikoisista ajoista. Toivottavasti lähestyvä valmistuminen kasvattaa vaapa-aikani määrää. Jos sitä vaikka ehtisi taas käymään kalassa. Kiitos vaimolleni jatko-opintojen aikaisesta tuesta.

Tämä diplomityö tehtiin AFRY Finland Oy:n paikallispalveluiden Jämsän toimistolle. Haluan kiittää aiheesta, ohjauksesta, tuesta ja tarkastamisesta Niko Lohkoa sekä päästöpuolen konsultaatiosta Kaisa Kämäräistä. Yliopistolta haluan kiittää työni tarkastajia Tero Tynjälää ja Päivi Sikiötä.

Jämsässä 22.5.2022

Vili Sihvola

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset

$C_n$	Nimelliskassavirta tarkasteluvuonna $n$	[€]
$EF$	Indeksisidonnaisuuden kerroin vuonna $n$	[-]
$E_i$	Indeksisidonnaisuuden arvo vuonna $i$	[-]
$X$	Arvonalenema	[-]
$T$	Tarkasteltavan ajanjakson pituus vuosina	[a]

### Lyhenteet

CAPEX	Capital Expenditure, pääomakustannukset
CO <sub>2</sub> -ekv	Hiilidioksidiekvivalentti
FC	Fixed Costs, kiinteät kustannukset
FCI	Fixed Capital Investment, peruspääoman sijoitus
GHG	Greenhouse Gas, kasvihuonekaasu
GWP	Global Warming Potential, ilmastonlämmityspotentiaali
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähkötekniikan komissio
ISBL	Inside battery limits, suoraan prosessiin liittyvät kustannukset
LCA	Life-Cycle Assesment, elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arviointi
LCC	Life-Cycle Cost, elinkaarikustannukset
LCCA	Life-Cycle Cost Assessment, elinkaarikustannusanalyysi
LCI	Life-Cycle Inventory, inventaarioanalyysi
LCIA	Life-Cycle Impact Assessment, vaikutusten arviointi

<i>MDT</i>	Keskimääräinen kunnossapitoaika	
<i>MTBF</i>	Keskimääräinen aika vikaantumisten välillä	
<i>MTBM</i>	Keskimääräinen aika kunnossapitotoimien välissä	
<i>MTBR</i>	Keskimääräinen toiminta-aika	
<i>MTTF</i>	Keskimääräinen aika korjaantumisen ja uuden vikaantumisen välillä	
<i>MTTR</i>	Keskimääräinen korjausaika	
<i>NPV</i>	Net Present Value, nettonykyarvo	[€]
<i>OPEX</i>	Operation Expenditure, käyttökustannukset	
<i>OSBL</i>	Outside battery limits; apuomintoihin liittyvät kustannukset	
<i>SYKE</i>	Suomen ympäristökeskus	
<i>VC</i>	Variable Costs, muuttuvat kustannukset	
<i>WBCSD</i>	World Business Council for Sustainable Development, maailman kestävän kehityksen yritysneuvosto	
<i>WRI</i>	World Resources Institute, maailman resurssi-instituutti	

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Symboliluettelo

1	Johdanto .....	9
1.1	Työn tausta .....	9
1.2	Tavoitteet .....	10
1.3	Työn rakenne ja rajaukset .....	11
2	Projektin elinkaari ja projektitoiminnot .....	12
2.1	Projektin elinkaari .....	12
2.2	Projektitoiminnot .....	13
3	Elinkaaren aikana tuotetut kasvihuonekaasupäästöt .....	15
3.1	Kasvihuonekaasut ja päästökertoimet .....	15
3.1.1	Kasvihuonekaasut ja niiden ilmastonlämmityspotentiaali .....	15
3.1.2	Materiaalien päästöluvut .....	16
3.2	Ympäristöjalan ja -kädenjälki .....	17
3.2.1	Ympäristöjalanjälki .....	17
3.2.2	Ympäristökädenjälki .....	17
3.3	Hiilijalanjälkiarvioinnin GHG-protokolla .....	18
3.4	Hiilijalanjälkiarvioinnin projektiprotokolla .....	20
3.4.1	Hiilijalanjälkiarvioinnin rajojen määrittely .....	21
3.4.2	Vertailutason menettelyn valinta .....	22
3.4.3	Vertailutason ratkaisuvaihtoehtojen tunnistaminen .....	23
3.4.4	Vertailutason päästöjen arviointi projektikohtaisesti tai standardiin perustuen .....	24
3.4.5	Päästöjen muutoksen laskenta ja monitorointi .....	24
3.4.6	Hiilijalanjälkiarvioinnin raportointi .....	25
3.5	Elinkaariarviointi (LCA) .....	26
3.5.1	Elinkaariarvioinnin laajuuden ja rajojen määrittely .....	27
3.5.2	Inventaarioanalyysi (LCI) .....	29

3.5.3	Vaikutusten arviointi (LCIA).....	30
3.5.4	Elinkaariarvioinnin tulosten tulkinta.....	31
3.5.5	Elinkaariarvioinnin raportointi.....	32
4	Elinkaaren aikana tuotetut kustannukset.....	33
4.1	Yleistä projektien kustannusarvioinnista.....	34
4.2	Investointikustannusten arviointi.....	37
4.3	Elinkaarikustannusten (LCC) arviointiprosessi.....	39
4.3.1	Elinkaarikustannusarvioinnin ongelman määrittely.....	41
4.3.2	Kustannuselementtien määrittely.....	42
4.3.3	Systeemin mallinnus.....	44
4.3.4	Elinkaarikustannusarvioinnin lähtötietojen kerääminen.....	48
4.3.5	Kustannusprofiilien kehittäminen.....	49
4.3.6	Elinkaarikustannusten arviointi.....	51
4.3.7	Elinkaarikustannusten optimointi.....	52
4.3.8	Elinkaarikustannusarvioinnin raportointi.....	52
5	Laskenta ja menetelmät.....	53
5.1	Päästölaskennan menetelmät.....	53
5.2	Kustannuslaskennan menetelmät.....	54
6	Toimintamallit.....	56
6.1	Päästöjen arvioinnin toimintamallit.....	56
6.2	Elinkaarikustannusten arvioinnin toimintamalli.....	58
7	Tulosten analyysi ja luotettavuus.....	60
8	Johtopäätökset ja yhteenveto.....	63
	Lähteet.....	65

## Liitteet

Liite 1. Yksinkertaisen rakennusprojektin elinkaariarvioinnin syöttötiedot.



# 1 Johdanto

Kestävyysohjelmien tunnistaminen ja ehkäiseminen on lisääntynyt ja parantunut erityisesti 2000-luvun aikana, varsinkin länsimaissa. Yhdeksi suurimmista kestävyysongelman alueista on todettu olevan ilmastonmuutos. Samaan aikaan globaali taloustilanne on muuttunut epävakammaksi ja erityisesti perinteiset teollisuudenalat ja yritykset joutuvat kiinnittämään enenevässä määrin huomioita toimintansa kestävyysnäkökulmiin. Nykyisessä talousjärjestelmässä kestävyysongelmien hoito ja ilmastonmuutoksen torjunta tapahtuvat toistaiseksi hyvin pitkälti talouden ohjaamina. Tulevaisuudessa teollisuushankkeissa kiinnitetään entistä enemmän huomiota pitkäaikaisvaikutuksiin, ja täten myös kyky arvioida toiminnasta aiheutuvia elinkaarikustannuksia ja -päästöjä on enenevässä määrin tärkeää. Lisäksi kuluttajien mielipiteillä ja mielikuvilla on teollisuuden toimijoiden toimintaan kasvava merkitys.

Suomen valtio on sitoutunut hiilineutraaliuuteen 2035 mennessä, jonka jälkeen Suomen on määrä olla hiilitaseeltaan negatiivinen. Euroopan unioni on sitoutunut hiilineutraaliuuteen 2050 vuoteen mennessä. Teollisuuden osuus Suomen ilmastopäästöistä vuonna 2019 oli noin 10 %, ollen 5,5 milj. t<sub>CO2-ekv</sub> ja laskien 5 prosenttia vuodesta 2018 (SVT 2019). Kyseinen osuus oli vuonna 2020 noin 11 %, ollen 5,2 milj. t<sub>CO2-ekv</sub> (SVT 2020). Vaikka teollisuuden osuus hiilidioksidipäästöistä on laskenut viime vuosina, niin yritysten rooli päästöjen vähentämisessä on tulevaisuudessakin huomattava. Teollisuusyrityksiltä vaaditaan siis yhä laajempaa tietoisuutta toimintansa aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä ja toiminnan optimoinnista vähäpäästöisempään suuntaan. Esimerkiksi päästökauppajärjestelmä ja päästöoikeuden mahdollinen hinnannousu ohjaavat yrityksiä suorasti myös taloudellisuuden näkökulmasta. Monella yrityksellä onkin strategiassa yhtenä tavoitteena ilmastovaikutusten vähentäminen, jolloin myös tarve arvioida toiminnan päästöjä on kasvussa.

## 1.1 Työn tausta

Perinteisesti teollisuusprojekteissa kustannusten arviointi on kattanut lähinnä projektin aikaiset kustannukset. Uuden rajatun kokonaisuuden rakentamisen ja käyttökuntoon

saattamisen kulut on tällöin huomioitu, mutta esimerkiksi elinkaaren muut vaiheet kuten varsinainen käyttöaika, purkutoimet ja jätteenkäsittely jätetään usein huomioimatta projektin alkuvaiheen kustannuslaskennassa. Kuitenkin esimerkiksi kemianteollisuuden elinkaarikustannuslaskennassa hankintakustannusten osuus kokonaiskustannuksista on tyypillisesti vain noin 20-40% (Kawauchi & Rausand 1999, 2). Tästä syystä kustannusten arvioinnin laajentaminen elinkaarimalliin tuo huomattavasti tarkemman tiedon toteutuksen absoluuttisista kustannuksista. Kustannusten arvioinnissa elinkaariajattelu on lisääntynyt kokonaisvaltaisuuden tärkeyden kasvaessa. Elinkaarikustannusten arvioinnissa hyödynnetään kansainvälisiä elinkaarikustannusarvioinnin (LCC) menetelmiä ja AFRY Finland Oy:n henkilöstön olemassa olevaa tietotaitoa.

AFRY-konsernin tavoitteena on lisätä kestävyysnäkökulmien huomiointia projekteissaan. Toiveena on myös tätä kautta lisätä asiakkaiden kiinnostusta toteutettavien hankkeiden päästöistä ja koko elinkaaren aikaisista vaikutuksista. Toiveena on myös pystyä toteuttamaan jatkossa projekteja entistä ympäristöystävällisemmin. Teollisuuden investointiprojekteissa kustannuslaskenta ja päästölaskenta tehdään tyypillisesti projektin alkuvaiheessa. Koska alkuvaiheen suunnittelussa tehtävillä ratkaisulla on merkittävä rooli lopputoteutukseen menevien asioiden ympäristövaikutuksiin, on kyseisessä vaiheessa saatava tieto avainasemassa lopputoteutuksen optimoinnin kannalta. Elinkaaripäästölaskennassa hyödynnetään AFRY Finland Oy:n olemassa olevia päästölaskentamenetelmiä. Hiilijalanjälkilaskenta perustuu kokonaisuudessaan World Resources Institute (WRI):n ja World Business Council for Sustainable Development (WBCSD):n kokoamaan GHG-protokollaan (Greenhouse Gas Protocol) eli kasvihuonekaasuprotokollaan ja elinkaariarviointi perustuu ISO standardeihin 14040 (2006), 14044 (2006), 14064 (2018), 14067 (2018) ja 14069 (2017).

## 1.2 Tavoitteet

Tämän diplomityön tavoitteena on kehittää AFRY Finland Oy:n paikallispalveluille tarkoituksen mukainen yhtenäinen toimintamalli elinkaari päästöjen ja -kustannusten arvioimiseksi. Toimintamallilla tullaan pääosin laajentamaan asiakasprojekteissa tarjottavien palvelujen kattavuutta. Elinkaarikustannusten arvioinnin lisääminen tarjottaviin

tuotteisiin lisää kustannuslaskentapalvelujen kattavuutta. Elinkaaripäästöjen arviointi on luonteeltaan AFRY Finland Oy:n paikallispalveluille uusi tuote.

### 1.3 Työn rakenne ja rajaukset

Työn teoriaosuus on käsitelty kappaleissa 2-4. Kappaleessa 2 käsitellään elinkaariajattelun pääpiirteitä. Kappaleessa 3 perehdytään hiilidioksidi- ja elinkaaripäästöjen arviointiin. Kappaleessa 4 käsitellään elinkaarikustannuksia ja niiden arviointia. Kappaleessa 5 esitellään käytettäviä metodeja päästöjen ja kustannusten arvioinnin toimintamallin luomiseksi. Kappaleessa 6 esitellään työn tulokset. Tuloksia analysoidaan kappaleessa 7. Johtopäätökset ja yhteenveto käsitellään kappaleessa 8. Työn keskiössä ovat päästöt ilmaan yksikössä  $t_{CO_2-ekv}$ . Työssä ei käsitellä yksityiskohtaisesti päästöjä veteen tai maaperään.

## 2 Projektin elinkaari ja projektitoiminnot

Elinkaariajattelua hyödynnetään esimerkiksi investointiprojektien suunnittelussa, kunnossapidon suunnittelussa ja omaisuuden hallinnassa. Elinkaariarviointia voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotteiden kehittämiseen ja parantamiseen, strategiseen suunnitteluun, poliittiseen päätöksentekoon sekä markkinointiin ja sen avulla voidaan myös parantaa suunnitteluprosessia ja helpottaa päätöksentekoon johtavaa arviointia suunnitteluratkaisujen välillä. (Cays 2021, 81-83; ISO 14040 2006, 24.) Projektissa elinkaaren aikaisten kustannusten ja päästöjen arvioinnissa tyypillisesti käytettävät vaiheet poikkeavat toisistaan, vaikka niissä onkin jonkun verran samankaltaisuuksia. Elinkaaren aikaisten päästöjen arviointia käsitellään kappaleessa 3 ja elinkaaren aikaisia kustannuksia käsitellään kappaleessa 4.

### 2.1 Projektin elinkaari

Projektin elinkaaren ymmärtäminen on avainasemassa projektien johtamisessa, erityisesti viime vuosikymmeninä yleistyneen projektijohtamistyylin kannalta. Tutkimuksissa viitataan, että teollisuusyritykset, jotka ovat menestyksekkäitä projektin johtamisessa, käyttävät yrityskohtaisia yksinkertaisia ja hyvin täsmennettyjä projektinjohtokehyksiä, jotka määrittelevät vaihekohtaisesti lähestymistavan kaikille projekteille kaikissa tapauksissa. (Labuschagne & Brent 2005, 161-163.)

Projektin elinkaaren tarkasteluun on olemassa monenlaisia toimintamalleja, jotka koostuvat eri vaiheista. Projektien suuresta vaihtelevuudesta johtuen elinkaarta ei voida määrittää tietynlaiseksi. Kuitenkin teoreettinen elinkaari koostuu seuraavista vaiheista: Konseptin kehitysvaihe, selvitykset, suunnittelu, toteutus, testaus, käyttöönotto ja sulkeminen. Labuschagne & Brent (2005) käyttävät tuotannollisen teollisuuden elinkaariajattelua käsittelevässä tutkimuksessaan kuvassa 1 esitettyä geneeristä projektin elinkaarimallia. (Labuschagne & Brent 2005, 161-163.)



Kuva 1 Projektin elinkaaren vaiheet (Labuschagne & Brent 2005)

Ensimmäisen vaiheen tavoitteena on arvioida olemassa olevat ehdotukset niiden taloudellisen, toiminnallisen ja teknisen toteutettavuuden sekä yrityksen strategian mukaan. Lisäksi ensimmäisessä vaiheessa on tarkastettava mahdolliset päällekkäisyydet ja yhteisvaikutukset muihin projekteihin nähden. Toisessa vaiheessa tunnistetaan ja määritellään paras mahdollinen ratkaisu vastaamaan liiketoiminnalliseen tarpeeseen. Kyseisen ratkaisun kaikki osa-alueet tulee arvioida vakavien epävarmuuksien ja riskien määrittelemiseksi. (Labuschagne & Brent 2005, 161-163.)

Kolmannessa vaiheessa valittu ratkaisu suunnitellaan ja kehitetään seuraavan vaiheen toteutusta varten. Neljännessä vaiheessa valittu ja kehitelty ratkaisu toteutetaan käytännössä, eli rakennetaan. Lisäksi rakennettua ratkaisua testataan toiminnallisessa ympäristössä käytännössä. Tässä vaiheessa on kehitettävä myös tarvittavat tukitoiminnot, ohjeistukset, liiketoimintaprosessit ja koulutukset. Testausvaiheen tavoitteena on saada ratkaisulle hyväksyntä ja arvioida sen suorituskykyä. (Labuschagne & Brent 2005, 161-163.)

Viidennessä vaiheessa projekti luovutetaan liiketoimintayksiköille ja vapautetaan toiminnalliseen ympäristöön, jolloin myös käyttötuki alkaa. Projektin elinkaaren viimeisessä vaiheessa toteutetaan mahdolliset jälkitoiminnot ja toteutettua projektia arvioidaan. Arviointi suoritetaan sopivan ajanjakson kuluttua edellisestä vaiheesta, esimerkiksi vuoden päästä. Arvioinnissa tarkastellaan tavoiteltujen hyötyjen toteutumista ja niiden liiketoiminnallisia vaikutuksia. Projektista opitut asiat tulisi käsitellä ja arkistoida tulevaisuuden hankkeita varten. (Labuschagne & Brent 2005, 161-163.)

## 2.2 Projektitoiminnot

Kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnin yhteydessä projektitoiminnolla tarkoitetaan tiettyä toimintaa tai interventiota, jolla pyritään vaikuttamaan kasvihuonekaasujen päästöihin, sidontaan tai varastointiin. Projektitoiminnolla voidaan tarkoittaa uuden järjestelmän

käyttöönottoa tai muutoksia olemassa olevaan tuotantoon, prosessiin, kulutukseen, palveluun, toimitukseen tai johtamisjärjestelmään. Useita projektitoimintoja sisältävä projekti arvioidaan kasvihuonekaasujen osalta kaikkien lopullisten vaikutusten summana. (WRI & WBCSD 2005, 5-11.)

Projektitoimintojen vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin voidaan jakaa primäärisiin ja sekundäärisiin vaikutuksiin. Primääriset vaikutukset ovat tarkoituksella aikaan saatuja haluttuja muutoksia kasvihuonekaasupäästöihin tai niiden sidontaan. Sekundääriset vaikutukset ovat tahattomia ja odottamattomia projektitoiminnoista aiheutuvia vaikutuksia. (WRI & WBCSD 2005, 5-11.)

### 3 Elinkaaren aikana tuotetut kasvihuonekaasupäästöt

Tässä kappaleessa käsitellään kasvihuonekaasupäästöjä ja niiden arviointia. Elinkaaripäästöjä arvioidaan ISO 14040 (2006) ja ISO 14044 (2006) -standardien mukaisella LCA-menetelmällä (Life-Cycle Assessment, Elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arviointi).

Valmistavan teollisuuden päästöistä suurin osa syntyy energiankulutuksesta. Teollisuus käyttää Suomessa tuotetusta energiasta yli puolet. Tulevaisuudessa kasvihuonekaasupäästöjä koskevat säädökset voivat vaikuttaa yritysten toiminnan kannattavuuteen huomattavasti. Merkittävät kasvihuonekaasupäästöt yrityksen arvoketjussa, eli ns. ”upstream”-päästöt voivat nostaa toiminnan kustannuksia. Sen sijaan ns. downstream-päästöt voivat tyypillisesti aiheuttaa esimerkiksi myynnin laskua. (WRI & WBCSD 2004, 11.)

#### 3.1 Kasvihuonekaasut ja päästökertoimet

##### 3.1.1 Kasvihuonekaasut ja niiden ilmastonlämmityspotentiaali

Ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasuista tärkeimmät ovat hiilidioksidi CO<sub>2</sub>, metaani CH<sub>4</sub>, dityppioksidi N<sub>2</sub>O, fluorihilivety (HFC), perfluorihilivety (PFC) ja rikkiheksafluoridi SF<sub>6</sub>. Kaasuille on annettu erilaisia kertoimia riippuen siitä, kuinka suuri niiden ilmastoa lämmittävä vaikutus on kilogrammaa kohti. Vaikutus ottaa huomioon kaasujen elinajan ilmakehässä niiden säteilyvaikutuksen lisäksi. Kaasujen ilmastonlämmityspotentiaalinen kertoimet ovat esitetty taulukossa 1. (EPA 2007.)

Taulukko 1 Yhdisteiden ilmastonlämmityspotentiaali GWP (Global Warming Potential) (EPA 2007)

Kasvihuonekaasu	Sadan vuoden GWP
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	25
N <sub>2</sub> O	298
SF <sub>6</sub>	22 800
NF <sub>3</sub>	17 200
CF <sub>4</sub>	7 390
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	12 200
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	8 830
c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	10 300
C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	8 860
C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	9 160
C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	9 300
C <sub>10</sub> F <sub>18</sub>	>7 500
HFC-23	14 800
HFC-32	675
HFC-41	92
HFC-125	3 500
HFC-134	1 100
HFC-134a	1 430
HFC-143	353
HFC-143a	4 470
HFC-152	53
HFC-152a	124
HFC-161	12
HFC-227ea	3 220
HFC-236cb	1 340
HFC-236ea	1 370
HFC-236fa	9 810
HFC-245ca	693
HFC-245fa	1 030
HFC-365mfc	794
HFC-43-10mee	1 640

Kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa eri kaasut suhteutetaan hiilidioksidiin. Päästöjä käsitellessä käytetäänkin useimmiten yksikköä CO<sub>2</sub>-ekv, eli hiilidioksidiekvivalentti. Jos ilmaan päästetään esimerkiksi 1 tonni metaania, on sen ilmastoa lämmittävä vaikutus sama kuin 25 tonnilla hiilidioksidia. (EPA 2007.)

### 3.1.2 Materiaalien päästöluvut

Eri materiaalien CO<sub>2</sub>-ekv päästöluvut on esitetty usealla kansainvälisellä verkkosivulla. Esimerkiksi Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) kehittämästä vapaassa käytössä olevasta rakentamisen päästötietokannasta voidaan hakea erilaisten materiaalien ympäristöindikaattoreita. Tietokannasta saadaan materiaaleille esimerkiksi seuraavat ympäristöindikaattorit:



- Tyypillinen määrä CO<sub>2</sub>-ekv päästöjä kilogrammaa kohti,
- konservatiivisen arvon kerroin,
- hiilikädenjälki hiilidioksidiekvivalenttina kilogrammaa kohti sekä
- materiaalin hukkerroin.

Sivusto on koonnut eri rakennusmateriaalien ympäristöindikaattorit tulossivuiksi. Sivuston tavoitteena on yhdenmukaistaa rakennusten elinkaaren aikaisten ilmastovaikutusten arviointia ja täten edistää vähähiilisempää rakentamista. (SYKE 2022.)

## 3.2 Ympäristöjalan ja -kädenjälki

### 3.2.1 Ympäristöjalanjälki

Ympäristöjalanjäljellä tarkoitetaan elinkaariarviointiperustaista mittaria, joka kuvaa tuotantojärjestelmän potentiaalisia negatiivisia ympäristövaikutuksia liittyen tiettyyn rajattuun ympäristöteemaan tai -vaikutukseen. Teemana tai vaikutuksena voi olla esimerkiksi hiilijalanjälki tai vesijalanjälki. Esimerkiksi tuotteen ympäristöjalanjälki huomioi kaikki k.o. teemaan kuuluvat päästöt koko tuotteen arvoketjun ajalta. (ISO 14067 2018.)

Hiilijalanjälki on kasvihuonekaasujen päästöjen ja poistojen summa, esimerkiksi tuotantojärjestelmässä. Hiilijalanjäljen laskennassa käytetään yksikkönä hiilidioksidiekvivalenttia ja se perustuu elinkaariarvioinnissa yksittäiseen vaikutusluokkaan, eli ilmastonmuutokseen. (ISO 14067 2018.) Hiilijalanjäljen arviointi kuuluu elinkaariarvioinnin vaikutusarviointi-vaiheeseen. Koska hiilijalanjälki on ympäristölle negatiivinen, pyritään toiminnan hiilijalanjälki minimoimaan. (VTT 2021, 8-11.)

### 3.2.2 Ympäristökädenjälki

Ympäristökädenjälki on sateenvarjokonsepti, joka sisältää lukuisia positiivisia ympäristövaikutuksia. Kädenjälki voi käsitellä esimerkiksi positiivisia vaikutuksia hiilijalanjälkeen, ilmanlaatuun, resurssienkulutukseen, vedenkulutukseen tai ravinteiden kulutukseen. Hiilikädenjälki on mittari, joka kuvaa toimien ilmastonmuutoksen lieventämispotentiaalia. Se kuvaa kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiä käyttäjätoiminnoissa käyttäjän vaihtaessa vertailutason ratkaisu tarjottuun ratkaisuun. Hiilikädenjäljellä viitataan ympäristön kannalta positiivisiin vaikutuksiin, joita esimerkiksi organisaatiot voivat saada aikaan. Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan siis aiheutettuja vähennyksiä muiden tahojen hiilijalanjälkeen. Positiivisen kokonaisvaikutuksensa takia hiilikädenjälki pyritään maksimoimaan. (VTT 2021, 8-11.)

Hiilikädenjälkeen vaikuttavat tekijät ovat tyypillisesti:

- Materiaalien tehokas käyttö ja uusiutuvien materiaalien suosiminen,
- energian tehokas käyttö ja uusiutuvan energian suosiminen,
- tuotteiden elinkaaren pidentäminen ja suorituskyvyn parantaminen sekä sivuvirtojen tehokas hyödyntäminen,
- jätteiden synnyn vähentäminen ja kierrätys, uudelleenkäyttö ja uudelleen valmistaminen ja
- hiilensidonta maankäytön avulla sekä sitomalla hiiltä tuotteisiin. (VTT 2021, 8-13.)

### 3.3 Hiilijalanjälkiarvioinnin GHG-protokolla

World Resources Institute (WRI) ja World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) ovat koonneet kansainvälisen viitekehyksen päästöjen laskemista varten. K.o. protokolla sisältää ohjeistuksen esimerkiksi projektien, tuotteiden, organisaatioiden ja kaupunkien päästölaskentaan ja raportointiin. GHG-protokollaan on koottu kattavat maailmanlaajuisesti standardisoidut kehykset kasvihuonekaasupäästöjen mittaamiseen ja hallintaan. Protokolla sisältää ohjeistuksen tuotteiden, organisaatioiden ja projektien tuottamien kasvihuonepäästöjen laskentaan. Kyseisiä viitekehyksiä voidaan käyttää sekä yksityisen että julkisen sektorin toiminnan, arvoketjujen ja lievennysten arviointiin. (WRI &

WBCSD 2022.) AFRY Finland Oy:n kasvihuonekaasupäästöjen arviointimallit tukeutuvat vahvasti GHG-protokollaan. GHG-protokollassa käsitellään toiminnan aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä.

Protokolla on jaettu osa-alueisiin päästöjä aiheuttavan toiminnan tyypin mukaan. Osa-alueet ovat Scope 1, Scope 2 ja Scope 3. Ensimmäinen scope käsittelee toiminnan suoria päästöjä, joita syntyy esimerkiksi yrityksen omista kiinteistöistä ja ajoneuvoista. Toinen scope käsittelee toiminnan aiheuttamia epäsuoria päästöjä, joita aiheutuu tyypillisesti ostetusta energiasta eri muodoissa. (WRI & WBCSD 2004, 25.)

Kolmas scope käsittelee scopen 2 ulkopuolisia epäsuoria päästöjä. Scope 3 on tyypillisesti kategoriallisesti kahta ensimmäistä scopea huomattavasti laajempi ja päästömääriltään pienin. Päästölähteiden laajuuden takia välilliset päästöt ovat tyypillisesti vaikein ja työläin osuus arvioida. Scopen 3 päästöt voidaan jakaa ns. upstream- ja downstream-päästöihin. Upstream-päästöjä ovat:

- Ostetut tuotteet ja palvelut,
- käyttöomaisuus,
- polttoaineiden tuotanto ja energian siirtohäviöt,
- kuljetukset ja jakelut,
- jätteet,
- liikematkustus,
- töihin matkustaminen ja
- itselle vuokrattu omaisuus.

Downstream-päästöillä tarkoitetaan:

- Tuotteiden kuljetukset ja jakelu,
- myytyjen tuotteiden prosessointi,
- myytyjen tuotteiden käyttö,
- myytyjen tuotteiden käytöstä poisto,
- ulos vuokrattu omaisuus,

- franchising ja
- sijoitukset. (WRI & WBCSD 2011, 5.)

### 3.4 Hiilijalanjälkiarvioinnin projektiprotokolla

World Resources Institute (WRI) ja World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) määrittelee protokollassaan The Greenhouse Gas Protocol kasvihuonekaasupäästöprojektin hiilijalanjälkiarviointiprosessin. Yleisesti kasvihuonekaasupäästöprojektilla tarkoitetaan projektia, jossa jonkun elementin tarkoitus on vähentää kasvihuonekaasupäästöjen määrää, sitoa hiiltä tai lisätä kasvihuonekaasujen sidontaa ilmastosta. Projektilaskennan protokolla tarjoaa tarkat periaatteet, konseptit ja keinot kasvihuonekaasupäästöjen raportointiin ja laskentaan, erityisesti päästövähennysprojekteissa. (WRI & WBCSD 2005, 5.)

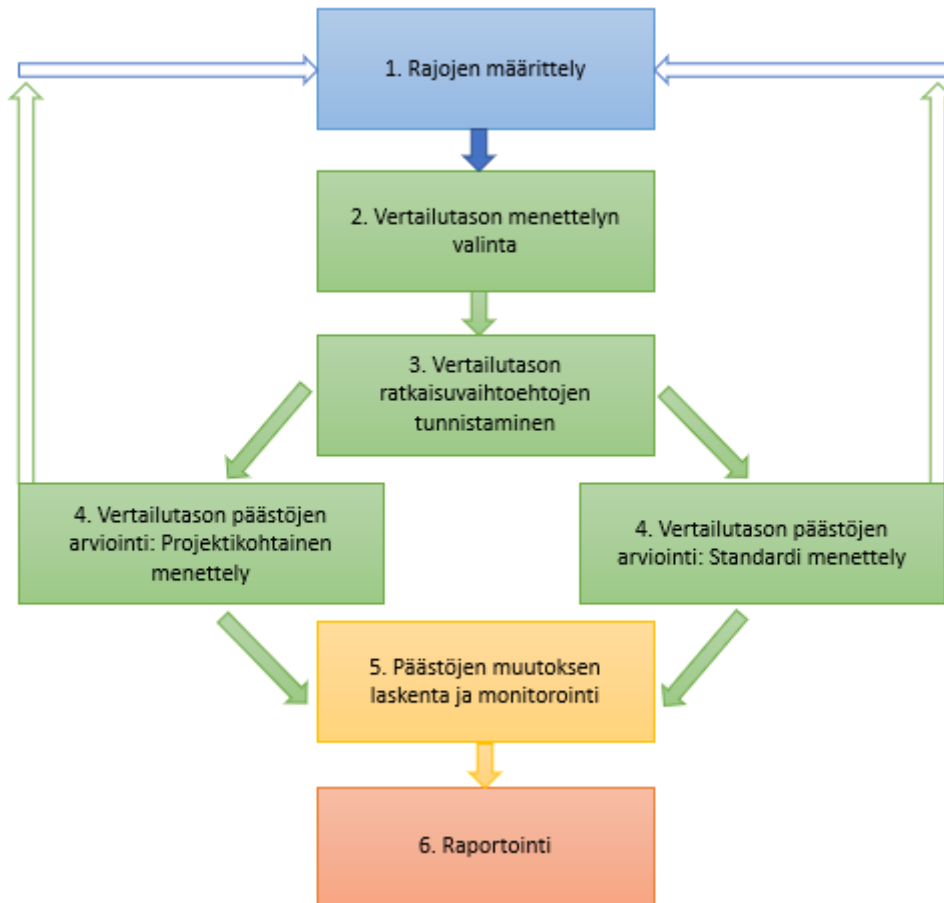
Projektilaskennassa eri toimintojen ja tapahtumien arvioimiseen käytetään termiä projektitoiminto. Projektitoiminnolla tarkoitetaan projektissa tapahtuvaa tiettyä toimintoa, jolla on vaikutusta kasvihuonekaasupäästöihin, niiden poistoihin tai sidontaan. Projektitoiminto voi sisältää uusien järjestelmien lisäksi esimerkiksi muokkauksia olemassa olevaan tuotantojärjestelmään, kulutukseen, palveluihin, hankintoihin tai johtamisjärjestelmiin. Jokaisen projektitoiminnon aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt arvioidaan erikseen. Koko projektin aiheuttamat muutokset kasvihuonekaasupäästöihin lasketaan kaikkien projektitoimintojen aiheuttamien muutosten summana. (WRI & WBCSD 2005, 11.)

Projektin hiilijalanjälkiarviointi voidaan jakaa kuuteen eri vaiheeseen, jotka ovat:

1. Rajojen määrittely,
2. vertailutason menettelyn valinta,
3. vertailutason ratkaisuvaihtoehtojen tunnistaminen,
4. vertailutason päästöjen arviointi projektikohtaisesti tai standardiin perustuen,
5. päästöjen muutoksen laskenta ja monitorointi sekä

## 6. raportointi. (WRI & WBCSD 2005, 27.)

Arviointiprosessin vaiheet 2-4 toteutetaan kaikille projektitoiminnoille. Lisäksi neljännestä vaiheesta voidaan joutua palaamaan ensimmäisen vaiheeseen, mikäli arvioinnin edetessä ilmenee tarvetta muokata määriteltyjä rajoja tai laajuutta. Kasvihuonekaasupäästöjen arviointiprosessin vaiheet on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2 Kasvihuonekaasupäästöjen arviointiprosessin vaiheet (WRI & WBCSD 2005, 27.)

Projektipohjaisessa hiilijalanjälkiarvioinnissa on monia epävarmuustekijöitä, kuten sekundääristen vaikutusten ja vertailutason ratkaisuvaihtoehtojen tunnistaminen, vertailutason päästöjen ennustaminen sekä kasvihuonekaasupäästöjen mittaus. Projektiprotokolla ei kuitenkaan sisällä tarkkoja vaatimuksia epävarmuuden tarkasteluun.

### 3.4.1 Hiilijalanjälkiarvioinnin rajojen määrittely

Projekteissa kasvihuonekaasupäästöihin vaikuttavat projektitoiminnot. Aiheutuvat päästöt voidaan jakaa upstream- ja downstream-päästöihin. Upstream päästöjen vaikutukset aiheutuvat kokonaisuudessaan syötteistä, kun taas downstream päästöjen vaikutukset aiheutuvat tuotetuista tuotteista. K.o. vaikutukset voidaankin tunnistaa siitä, aiheuttavatko projektin syötteet, tuotteet tai sivutuotteet primääristen vaikutusten ulkopuolisia muutoksia projektitoimintojen kasvihuonekaasupäästöihin. Sekundäärisiä vaikutuksia voivat olla esimerkiksi materiaalien ja tuotteiden prosessointi, energian hankinta, logistiikka tai jätteiden käsittely. (WRI & WBCSD 2005, 29-32.)

### 3.4.2 Vertailutason menettelyn valinta

Jokaiselle projektitoiminnoista aiheutuvalle primääriselle vaikutukselle valitaan vertailutason menettely arvioimaan vertailutason päästömääriä.

Standardin suoritusmenettelyn käyttö voi olla perusteltua kun:

1. Meneillään on riittävän samankaltaisia projekteja,
2. varmennetun tiedon saanti projektitoiminnoista on erityisen haastavaa tai
3. salassapitovelvoitteet estävät tietojen käytön.

Projektitoimintokohtaisen standardimenettelyn luomisessa on käytettävä riittävän samankaltaisia vertailutapauksia. Vertailuprojektit on oltava esimerkiksi maantieteellisesti ja lämpövyöhykkeellisesti samankaltaiset ja ajoituttava riittävän yhtäaikaaisesti. Projektikohtaisessa menettelyssä kaikki esteitä ja mahdollisia nettohyötyjä yhdistävät tiedot tulee raportoida. Joissain tapauksissa tämä voi tarkoittaa myös niiden tietojen raportoimista jotka haluttaisiin pitää salassa kuten taloudelliset yksityiskohdat. Tällaisissa tapauksissa standardimenettely voi osoittautua mielekkäimmäksi vaihtoehdoksi, koska siinä ei ole tarvetta kyseisten tietojen raportoinnille. (WRI & WBCSD 2005, 37.)

Projektikohtainen menettely on suositeltavaa silloin, kun vertailutason ratkaisuvaihtoehtojen määrä on rajallinen tai niiden päästömäärien tiedot ovat erityisen vaikeita hankkia. Projektikohtainen menettely vaatii vahvistettua tietoa kyseessä olevista teknologioista tai käytännöistä valitulta maantieteelliseltä alueelta ja säävyöhykkeeltä. Projektikohtainen

lähestymistapa tulee kyseeseen myös silloin, kun standardin suoritusmenettelyn luominen on liian vaikeaa vaadittujen tietojen olemassaolon, saannin tai käyttökelpoisuuden haasteista johtuen. (WRI & WBCSD 2005, 37.)

Vertailutason menettelyn valinnassa voidaan myös päätyä menettelytapojen yhdistelmään. Hyödyntäessä tapauskohtaisesti sekä standardimenettelyä että projektikohtaista menettelyä on kummatkin menettelyt suoritettava kokonaisuudessaan. Yhdistelmämenettelyssä voidaan esimerkiksi käyttää pääosin projektikohtaista menettelyä, mutta tunnistaa jonkin toteutusvaihtoehdon ominaisuudet käyttäen standardimenettelyä. Yhdistelmämenettely voi olla tarkoituksen mukainen esimerkiksi silloin, kun vertailutason skenaario voidaan kuvata yhdistelmänä vaihtoehtoisia teknologioita, johtamis- tai tuotantotapoja, tai toimitusjärjestelmiä. (WRI & WBCSD 2005, 37.)

#### 3.4.3 Vertailutason ratkaisuvaihtoehtojen tunnistaminen

Molemmat edellisessä kappaleessa esitetyt vertailutason menettelyt nojaavat vertailutason ratkaisuvaihtoehtojen tunnistamiseen. Vertailutason ratkaisuvaihtoehtoilla tarkoitetaan niitä vaihtoehtoisia teknologioita tai käytäntöjä määritellyn maantieteellisen alueen ja lämpövyöhykkeen sisällä, jotka voisivat tuottaa saman tuotteen tai palvelun kuin projektitoiminto. Ne voivat olla joko olemassa olevia tai potentiaalisia teknologioita ja käytäntöjä. (WRI & WBCSD 2005, 38-39.)

Jokaiselle projektitoiminnolle muodostetaan lista vertailutason ratkaisuvaihtoehtoista, joita tullaan käyttämään vertailutason menettelyissä kuvaamaan vaihtoehtoja projektitoiminnoille. Ratkaisuvaihtoehtojen tunnistamisen vaiheet ovat:

1. Projektitoiminnoissa tuotettujen tuotteiden ja palveluiden määrittely,
2. mahdollisten vertailutason ratkaisuvaihtoehtojen tunnistaminen
3. ratkaisuvaihtoehtojen tunnistamisessa käytettävän vertailukelpoisen maantieteellisen alueen ja lämpövyöhykkeen määrittely,
4. ratkaisuvaihtoehtojen tunnistamisessa käytettävien muiden kriteerien määrittely ja perusteleminen,

5. ratkaisuvaihtoehtojen lopullisen listan tunnistaminen ja
6. yleisen käytännön mukaisten ratkaisuvaihtoehtojen tunnistaminen projektikohtaisissa menettelytapauksissa. (WRI & WBCSD 2005, 39.)

#### 3.4.4 Vertailutason päästöjen arviointi projektikohtaisesti tai standardiin perustuen

Projektikohtainen menettely tuottaa arvion projektitoiminnon primäärisen vaikutuksen vertailutason päästömääristä. Arvio perustuu vertailutason skenaarion tunnistamiseen projektitoiminnon tarkkojen olosuhteiden perusteella. Vertailutason skenaario voidaan tunnistaa analysoimalla projektitoimintoa ja edellisessä kappaleessa määriteltyjä vertailutason ratkaisuvaihtoehtoja. Tämä vaihe voidaan jakaa kahteen osa-alueeseen, jotka ovat vertailutason skenaarion tunnistaminen ja siihen liittyvien päästömäärien arviointi. Vertailutason skenaariolla tarkoitetaan projektitoiminnon viitetapausta. (WRI & WBCSD 2005, 48-59.)

#### 3.4.5 Päästöjen muutoksen laskenta ja monitorointi

Tämä kappale käsittelee projektitoimintojen primääristen ja sekundääristen vaikutusten monitoroinnin ja laskennan vaatimuksia ja ohjeistuksia. Monitorointisuunnitelma sisältää:

- Kaikkien kasvihuonekaasupäästöjen monitorointi kaikista lähteistä sekä sidonnat primäärisistä vaikutuksista sekä merkittävistä sekundäärisistä vaikutuksista elinkaaripäästöarvioinnin valittujen rajojen sisällä,
- vertailutason päästöjen arviointiin liittyvien tietojen monitorointi ja
- tietopankkien kuvaaminen ja laadunvalvonnan sekä laaduntakuun mittarit. (WRI & WBCSD 2005, 72-73.)

Kasvihuonekaasupäästöjen lähteiden ja sidonnan monitorointi sisältää epävarmuuden huomioimisen jokaisen päästölähteen ja sidonnan kohdalla. Osiossa huomioidaan myös tietojen monitoroinnin aikaiset olosuhteet projektitoimintojen operoinnin osalta. Kaikki



mittaukset ja muut tiedonkeruutavat, mukaan lukien esimerkiksi oletukset ja vakiot tulee ottaa huomioon. (WRI & WBCSD 2005, 72-73.)

Kaikki vertailutason muuttujat sisältyvät monitorointisuunnitelmaan, sisältäen:

- Mitä tietoja monitoroidaan ja miten ne ovat yhteydessä vertailutason päästöarvioihin,
- kaikkien tietojen epävarmuuden,
- kaikki mittaukset tai muut käytettävät tiedot, mukaan lukien oletukset, vakiot, matemaattiset suhteet ja kaavat,
- tiedonkeruun tekniset tiedot,
- monitoroinnin taajuuden ja
- kaikki tietolähteet. (WRI & WBCSD 2005, 73.)

Monitorointisuunnitelmassa määritellään laadunvalvonnan ja laatutakuun mittaukset ja menetelmät. Seuraavat seikat tulee käydä ilmi kyseisestä suunnitelmasta:

- Nimetään vastuutoimijat ja -henkilöt tietojenkeruulle.
- Tietojen arkistointiaika.
- Tietojen siirto-, varastointi- ja varmuuskopiointimenetelmät ja strategiat menetetyin ja huonolaatuisten tietojen tunnistamiseen ja käsittelyyn.
- Kaikki laadunvarmennus ja laatutakuu mittaus-, laskenta- ja tietojenkeruumenetelmät. (WRI & WBCSD 2005, 73.)

#### 3.4.6 Hiilijalanjälkiarvioinnin raportointi

Raportissa on käsiteltävä riittävän kattavasti tietoja, jotta mahdollistetaan tutkimuksen läpinäkyvyys ja kolmannen osapuolen suorittama tarkastelu. Raportin sisällön vähimmäisvaatimukset ovat:

- Projektin kuvailu,
- arvioinnin rajat,

- vertailutason päästöt jokaiselle projektitoiminnolle ja primäärisille vaikutuksille,
- projektin arvioidut kasvihuonekaasupäästövähennykset,
- monitorointisuunnitelma ja
- jatkuva vuosittainen monitorointi ja laskentaraaportit. (WRI & WBCSD 2005, 80-82.)

Esitetyt ovat raportoinnin vähimmäisvaatimuksia ja niitä voidaan joutua laajentamaan tapauskohtaisesti. Kaikki raportointia tukeva kerätty tieto, oletukset, kriteerit, arvioinnit ja selitykset tulee säilyttää. (WRI & WBCSD 2005, 80-82.)

### 3.5 Elinkaariarviointi (LCA)

Elinkaariarviointi (LCA) on työkalu tuotteen tai prosessin elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten systemaattiseen arviointiin. Esimerkiksi tuotteen elinkaareissa huomioidaan sen vaiheet aina raaka-aineen hankinnasta käytöstäpoistoon ja kierrätykseen saakka. Elinkaariajattelun konsepti muotoutui pitkälti 1970- ja 1980-luvuilla. Sitä koskevat tutkimukset keskittyivät pitkälti elinkaaren aikana käytettyjen energiavirtojen ja materiaalien laskentaan sekä ympäristöön päästettyjen jätteiden arviointiin. Elinkaariarvioinnista säädetään standardissa ISO 14040. (Cabeza et al. 2014, 395.) Arvioinnissa tarkastellaan tuotantojärjestelmän syötteitä ja tuotoksia. Elinkaariarvioinnin perimmäisenä tarkoituksena on mahdollistaa ihmisen ympäristölle aiheuttamien vahinkojen arviointi, vähentäminen ja kääntäminen positiiviseksi. Arvioinnin johtopäätökset perustuvat lukuisiin oletuksiin. Johtopäätösten kannalta kriittiset oletukset koskevat olosuhteita, materiaaleja ja käyttömalleja. (Cays 2021, 81-82.)

Ympäristövaikutuksia arvioidessa käsitellään tyypillisesti potentiaalia aiheuttaa seuraavia primäärisiä haittavaikutuksia ympäristöön:

1. Luoda happosateita
2. Saastuttaa jokia ja meriä
3. Luoda savusumua
4. Ohentaa otsonikerrosta

5. Lämmittää ilmakehää, eli tuottaa CO<sub>2</sub> päästöjä.

Primääristen vaikutusten lisäksi tutkitaan potentiaalia aiheuttaa seuraavia sekundäärisiä häirtavaikutuksia:

6. Lisätä riskiä ihmisten terveydelle
7. Vähentää kaikkien lajien käytössä olevaa maapinta-alaa
8. Vähentää käyttökelpoisen veden määrää
9. Myrkyttää ympäristöä kemikaaleilla
10. Vähentää uusiutumattomien luonnonvarojen määrää. (Cays 2021, 81-82.)

Elinkaariarviointiselvityksen vaiheet ovat määritelty ISO standardeissa 14040 (2006) ja 14044 (2006). Selvitys koostuu tyypillisesti neljästä vaiheesta, jotka on esitetty kuvassa 3.



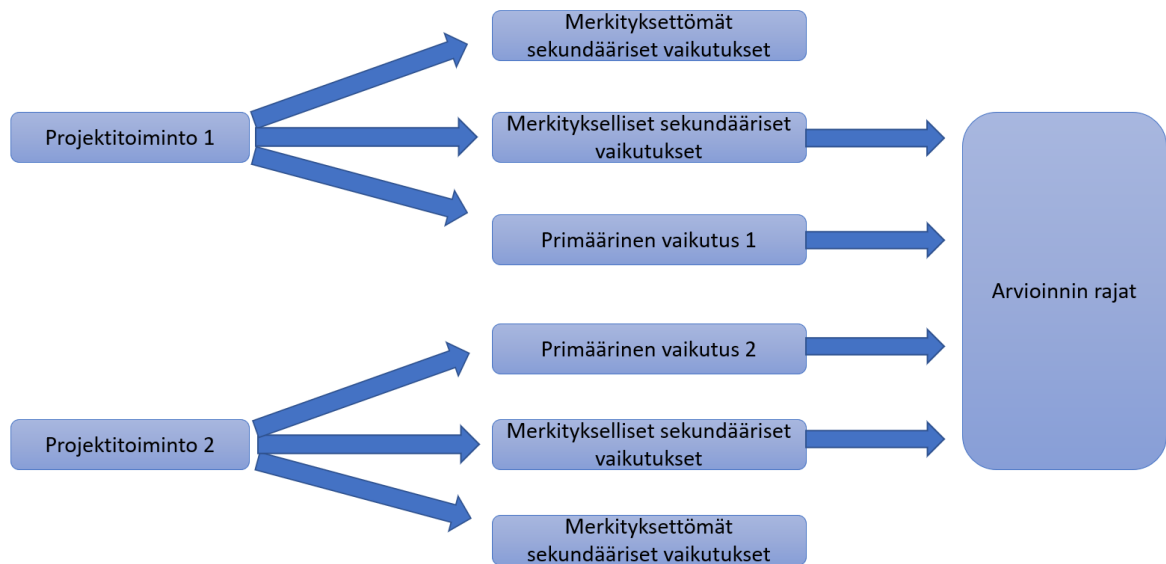
Kuva 3 Elinkaariarvioinnin vaiheet (ISO 14040 2006, 8.)

Kuvassa 3 esitetyt neljä vaihetta on kuvailtu tarkemmin kappaleissa 3.5.1-3.5.4. Elinkaariarvioinnin dokumenttien tarkoituksena on tuottaa päätelmä järjestelmän potentiaalisista ympäristövaikutuksista. ”Potentiaalisuudella” tarkoitetaan niitä tulevaisuuden vaikutuksia, jotka saattavat toteutua tai olla toteutumatta useista muuttujista riippumatta. Potentiaalisuudella tarkoitetaan myös tarkastellun kokonaisuuden todellisten päästöjen ja arvioitujen päästöjen kohtaamisen todennäköisyyttä. Johtopäätöksiä tehdessä oletetaan, että päästöihin vaikuttavat olosuhteet pysyvät vakioina. (Cays 2021, 81.)

### 3.5.1 Elinkaariarvioinnin laajuuden ja rajojen määrittely

Laajuuden ja rajojen määrittely on elinkaariarvioinnin ensimmäinen vaihe. Rajojen määrittelyssä huomioidaan kaikki laajuuden projektitoiminnot. Arvioinnissa käsitellään kaikki aiheutuvat primääriset vaikutukset sekä merkitykselliset sekundääriset vaikutukset.

Arvioinnin ulkopuolelle rajataan siis kaikki merkityksettömät sekundääriset vaikutukset. (Cays 2021, 83-86.) Rajojen määrittelyprosessi on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4 Rajojen ja laajuuden määrittely (WRI & WBCSD 2005, 29.)

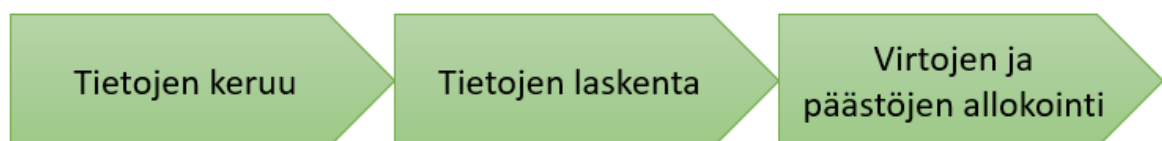
Laajuuden ja rajojen määrittelyvaihe on luonteeltaan elinkaari päästöarvioinnin miniatyyriprototyyppi, josta puuttuvat lopullisessa arvioinnissa käytettävät tarkat yksityiskohdat. Tämän vaiheen tarkoituksena on tunnistaa tutkimuksen tavoitteiden saavuttamisen kannalta tarkoituksenmukaiset ja välttämättömät muuttujat. Laajuuden ja rajojen määrittelyvaiheen tuloksena saadaan vahvasti perusteltu ja hyvin dokumentoitu ensimmäinen luonnos ehdotetun suunnitteluratkaisun ekologisista nettohaittavaikutuksista ja uusiutumispotentiaalista. Luonnos kuvailee kenelle tutkimus tehdään ja miten se toteutetaan. Kyseisessä vaiheessa määritellään tarve myöhemmälle yksityiskohtaisemmalle tietoinventaariolle sekä vaikutusarviointi-vaiheelle. Laajuuden määrittelyssä voidaan hyödyntää ns. toiminnallista yksikköä, joka on vakiintunut mitattava ja laskettava vertailuyksikkö useiden vaihtoehtojen vertailukelpoistamiseen. (Cays 2021, 83-86.)

Elinkaariarviointia toteutettaessa tulee määrittää tuotejärjestelmän fysikaaliset rajat, jotka määrittelevät mallinnettavaan järjestelmään sisällytettävät yksikköprosessit. Parhaimmillaan mallinnetun järjestelmän syötteet ja tuotteet tuotejärjestelmän rajoilla ovat perusvirtoja. Määriteltäessä järjestelmän rajoja tulee huomioida elinkaaren eri vaiheet, yksikköprosessit ja virrat. Useissa tapauksissa alunperin määriteltyjä rajoja on tarve tarkentaa arvioinnin edetessä. Järjestelmän rajoissa on huomioitava esimerkiksi:

- Raaka-aineiden hankinta,
- pääasiallisen prosessiketjun syötteen ja tuotokset,
- logistiikka,
- energian tuotanto ja käyttö,
- tuotteiden käyttö ja huolto,
- prosessijätteen ja tuotteiden käsittely ja hävittäminen,
- käytettyjen tuotteiden uudelleen hyödyntäminen (kuten kierrätys tai energian talteenotto),
- apumateriaalien valmistus,
- käyttöomaisuuden valmistus, huolto ja hävitys ja
- tukitoiminnot kuten valaistus ja lämmitys. (ISO 14040 2006, 32.)

### 3.5.2 Inventaarioanalyysi (LCI)

Elinkaariarvioinnin toisena vaiheena tehdään inventaarioanalyysi, jossa tarkastellaan elinkaaren kaikkia syötteitä ja poistoja. Tarvittavat tiedot kerätään mahdollisimman laajasti eri lähteistä. Puutteet tietojen saatavuudessa voivat johtaa vakaviin haasteisiin arvioinnin toteutuksen kannalta. ISO standardin 14040 (2006) mukaan inventaarion eri tasot sisältävät tietojen keruun, analysoinnin, validoinnin ja jaottelun toiminnallisten yksiköiden perusteella. Monimutkaisissa kokonaisuuksissa eri prosessit jaotellaan. Jaottelu tehdään esimerkiksi silloin, kun systeemikokonaisuuteen kuuluu monta eri tuotetta tai kierrätysjärjestelmää. (Khan & Ali 2020, 196.) ISO standardissa 14040 (2006) määritellyt inventaarioanalyysin vaiheet on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5 Inventaarioanalyysin (LCI) vaiheet (ISO 14040 2006, 32-34.)

Inventaarioanalyysivaiheeseen kuuluu tarvittavien tietojen keruu ja laskeminen sekä tietojen muuttaminen määrälliseen muotoon. Inventaarioanalyysin toteuttaminen on iteratiivinen prosessi. Tietoa kerätessä ja järjestelmään perehdyttäessä voidaan tunnistaa uusia tietovaatimuksia tai -rajoituksia, jotka vaativat menettelytapojen muuttamista. Joissain tapauksissa voidaan joutua määrittelemään jopa tavoitteet uudestaan. (ISO 14040 2006, 32.)

Jokaista yksikköprosessia koskevat tiedot voidaan luokitella erilaisiin syötteisiin, tuotoksiin, päästöihin ja muihin ympäristönäkökulmiin. Syötteitä ovat esimerkiksi energia, raaka-aineet, apusyötteet ja fysikaaliset syötteet. Primääristen tuotteiden lisäksi tuotantojärjestelmässä voi syntyä rinnakkaistuotteita ja jätteitä sekä päästöjä ilmaan, veteen ja maaperään. Tietojen keruu saattaa vaatia paljon resursseja. Tietojen keruussa tehtävät rajaukset on huomioitava soveltamisalassa ja raportoinnissa. (ISO 14040 2006, 32-34.)

Tietojen keräämisen jälkeen on muodostettava menettelytapoja tietojen varmentamiseksi sekä suhteuttamiseksi yksikköprosesseihin ja toiminnallisen yksikön vertailuvirtaan. Inventaariotulokset muodostetaan järjestelmän jokaisesta yksikköprosessista ja toiminnallisesta yksiköstä. Useimmiten teollisuusprosessien syötteet ja tuotteet ovat moninaisia. Raaka-aineina käytetään usein esimerkiksi kierrätettäviä välivalmisteita tai hylättyjä tuotteita. Tästä syystä virrat ja päästöt tulisi eritellä selkeästi. (ISO 14040 2006, 32-34.)

### 3.5.3 Vaikutusten arviointi (LCIA)

Standardin ISO 14040 (2006) mukaan elinkaariarvioinnin vaikutusarviointia käytetään sen tarkastelemiseen, onko tuotantojärjestelmän ympäristövaikutus positiivinen vai negatiivinen. Vaikutusarviointivaiheen tarkoitus on arvioida potentiaalisten ympäristövaikutusten merkittävyyttä edellisessä vaiheessa suoritetun inventaarioanalyysin tulosten pohjalta ja se toimii lähdetietona elinkaariarvioinnin viimeiselle vaiheelle. Tässä vaiheessa pyritään ymmärtämään aiheutuvia ympäristövaikutuksia yhdistelemällä inventaariotietoja tiettyihin ympäristövaikutusluokkiin ja ympäristöluokkaindikaattoreihin. Joissain tapauksissa vaikutusarviointivaiheessa voi olla tarpeellista arvioida sitä, onko elinkaariselvityksen tavoitteet saavutettu. Jos tavoitteita ei voida saavuttaa, on päätettävä tavoitteiden ja soveltamisalan muuttamisesta. Vaikutusarviointivaihe voidaan tyypillisesti

jakaa kolmeen osa-alueeseen, jotka ovat luokittelu, luonnehdinta ja painotus. ISO 14040 (2006) standardin mukainen jaottelu on esitetty kuvassa 6. (ISO 14040 2006, 36.)



Kuva 6 Vaikutusarvioinnin vaiheet (ISO 14040 2006, 36.)

Vaikutusarvioinnin käsittelemät ympäristövaikutukset on määritelty tavoitteissa ja soveltamisalassa, joten useimmiten kaikkia tarkasteltavan tuotejärjestelmän ympäristövaikutuksia ei huomioida. Vaikutusarviointi ei aina kykene osoittamaan eroja vaikutusluokkien ja vastaavien indikaattoritulosten välillä, mikä saattaa johtua esimerkiksi toimintatapojen tai menetelmien puutteista elinkaariarvioinnin aikaisemmissa vaiheissa. Vaikutusarvioinnin tuloksissa voi esiintyä epävarmuutta myös paikkaan ja aikaan liittyvien ulottuvuuksien puutteiden takia. (Khan & Ali 2020, 197; ISO 14040 2006, 34-35; Muthu 2021, 18.)

#### 3.5.4 Elinkaariarvioinnin tulosten tulkinta

Elinkaariarvioinnin viimeisenä vaiheena tarkastellaan ja tulkitaan tuloksia. Tavoitteena on analysoida tuloksia, muodostaa johtopäätökset, keskustella rajoitteista ja tarjota suosituksia perustuen elinkaariarvioinnin edeltäviin vaiheisiin. Tulkintavaiheen tulisi tuottaa sellaisia tavoitteiden ja soveltamisalan mukaisia tuloksia, joiden perusteella voidaan muodostaa

johtopäätöksiä, selvittää rajauksia ja esittää suosituksia. Tulkinnan on tarkoitus kuvastaa sitä, että arvioinnin tulokset perustuvat suhteelliseen lähestymistapaan ja että ne eivät kerro todellisia toteutuvia vaikutuksia. Tulkintavaiheeseen voidaan sisällyttää soveltamisalan katselmointi ja päivitys sekä kerätyn tiedon luonteen ja laadun uudelleen arviointi. Tulosten tulkinnan havaintojen on tarkoitus olla arviointiosan tulosten mukaisia. (Khan & Ali 2020, 196-197 ; ISO 14040 2006, 38.)

### 3.5.5 Elinkaariarvioinnin raportointi

Elinkaariarvioinnin viimeisenä vaiheena raportoidaan saadut tulokset. Raportissa tulee käsitellä kaikkia selvityksen eri vaiheita. Raportissa esitetään saadut tulokset ja johtopäätökset kolmannelle osapuolelle soveltuvin osin sisältäen käytetyt tiedot, menetelmät, oletukset ja rajoitukset. Raportin tulisi sisältää:

- Suhde inventaarioanalyysin tuloksiin,
- kuvaus lähtötietojen laadusta,
- suojeltavat vaikutusluokan loppupisteet,
- vaikutusluokkien valinta,
- karakterisointimallit,
- ympäristömekanismit ja
- indikaattoritulosprofiilin. (ISO 14040 2006, 38-40.)

Raportin tulisi myös käsitellä tulosten suhteellisuutta ja niiden riittämättömyyttä todellisten toteutuvien vaikutusten ennustamiseen vaikutusluokan loppupisteissä. Jos tarkoituksena on hyödyntää tuloksia julkisesti esiteltävissä vertailuväitteissä, tulee raporttiin sisällyttää myös muut ISO 14044 (2006) standardissa esitetyt vaatimukset. Tällöin vaaditaan myös täydellistä läpinäkyvyyttä arvovalintojen, perustelujen ja asiantuntija-arvioiden suhteen. (ISO 14040 2006, 38-40.)



## 4 Elinkaaren aikana tuotetut kustannukset

Elinkaarikustannuslaskennassa tarkastellaan tuotteen organisaatiolle maksamaa hintaa hankintahetkestä käytöstäpoistoon asti. Erityisesti paljon energiaa kuluttavien laitteiden käyttökustannukset voivat olla huomattavasti niiden hankintahintaa suurempia. Julkisessa jaossa on valmiita malleja elinkaarikustannuslaskentaan. Esimerkiksi suomalainen Motiva tarjoaa yksinkertaisia laskentamalleja elinkaarikustannuksille. Motivan laskentamallit on suunniteltu sovellettaviksi tuotteiden ja tarjousten arvioinnissa ja vertailussa, sekä hankinnan suunnittelussa ja tarvekartoituksessa. (Motiva 2018).

Tutkijat Kawauchi & Rausand (1999) kuvaavat tutkimuksessaan öljy- ja kemianteollisuuden hyödyntämää arviointimenetelmää. Elinkaarikustannusanalyysi on kokoava termi, jolla voidaan tarkoittaa monenlaisia analyysejä, esimerkiksi luotettavuus-käytettävyyss-kunnossapidettävyyss-analyysiä, talousanalyysiä ja riskianalyysiä. Arvioitua elinkaarikustannusta voidaan hyödyntää päätöksenteossa liittyen esimerkiksi hankintoihin, optimointiin, kunnossapidon aikataulutukseen tai uudistusten suunnitteluun. Analyysiä voidaan hyödyntää esimerkiksi seuraaviin:

- Vaihtoehtoisten ratkaisujen arviointi ja vertailu,
- taloudellisen kannattavuuden arviointi projekteissa ja tuotteissa,
- kustannusajureiden ja kustannustehokkaiden parannusten tunnistaminen,
- tuotannon, operoinnin, testauksen, tarkastusten ja kunnossapidon vaihtoehtoisten strategioiden arviointi ja vertailu,
- ikääntyvien toimitilojen vaihtamisen, kunnostuksen tai hävityksen erilaisten lähestymistapojen arviointi ja vertailu,
- tuotekehitykseen käytettävien varojen optimaalinen allokointi,
- varmennustestien ja niiden vaihtokauppojen tuotevakuutusstandardien arviointi ja
- pitkän aikavälin taloudellisuussuunnittelu. (Kawauchi & Rausand 1999, 1.)

#### 4.1 Yleistä projektien kustannusarvioinnista

Maailmanlaajuisesti projekteissa pyritään jaottelemaan kustannuskokonaisuudet eri lajeihin ja määrittelemään prosessille rajat. Rajojen sisäpuolisia osuuksia kuvaa ISBL (inside battery limits) ja ulkopuolisia osuuksia kuvaa OSBL (outside battery limits). Perinteisesti ISBL on ajateltu kuvaavan pääprosessia, jossa varsinainen tuote syntyy. Se sisältääkin yhden tai useamman maantieteellisen rajan, jotka voivat olla joko kuvitteellisia tai fyysisiä. Rajat pitävät sisällään tarkasti rajatut suunnitellut, rakennusvaiheessa olevat tai rakennetut tietyt osat laitoksesta, jotka koostuvat toisiinsa kytkeytyvistä laitteista tai tiloista. OSBL sen sijaan sisältää varsinaista tuotantoprosessia tukevan prosessiin liittymättömän infrastruktuurin. (Gauche & Kinney 2006, 1-3.)

Projektien kustannukset jaetaan tyypillisesti prosessiin liittyviin (ISBL) ja aputoimintoihin liittyviin (OSBL) kustannuksiin. Aputoiminnot ovat tyypiltään prosessia tukevia.

Suoraan prosessiin liittyviin kustannuksiin kuuluvat esimerkiksi:

- Laitteet,
- putkistot,
- teräsrakenteet,
- instrumentointi,
- sähköistys ja
- laitteistoihin liittyvät rakennustyöt.

Aputoimintoihin liittyvät kustannukset:

- Käyttöhyödykkeet,
- varastot,
- toimistot,
- laboratoriot ja
- sosiaalitalat.

Projektissa syntyy kustannuksia myös esimerkiksi insinööriyöstä, kuten suunnittelusta, asennuksista, käytöstä ja kunnossapidosta. (Junqueira et al. 2020, 8; Gauche & Kinney 2006, 1-3; van Vliet et al. 2009, 857.)

Yksi menetelmä kustannusten arviointiin on prosenttiperusteinen arviointi, jossa voidaan hyödyntää esimerkiksi peruspääoman sijoituksen määrää (FCI, Fixed Capital Investment). Junqueira et al (2020) jaottelee ja arvioi etyylibentseenin tuotantolaitoksen kustannukset taulukoissa 2 ja 3 esitetyillä tavoilla.

Taulukko 2 Etyylibentseenituotantolaitoksen kulut (Junqueira et al. 2020, 8.)

Laitoksen kulut		
	Parametri	Arvo
ISBL	Prosessilaitteet	Laskettu
	Irtotavarat (putkistot, instrumentit yms.)	25 % x FCI
OSBL	Varastot, valaistus, jätteenkäsittely yms.	40 % x ISBL
Muut	Maankäyttö	1 % x FCI
Laitoksen perustaminen	Rakennustyöt (Tiet, rakennukset, ojat yms.)	5 % x FCI
	Kenttäkustannukset (Henkilöstöravintolat, ylityöt yms.)	
Sekalaiset	Asiamiespalkkiot, tullit yms.	5 % x FCI
Suunnittelu ja insinööriyö	Selvitykset, tarkastukset yms.	7 % x FCI
Yleiset	Satunnaiset	7 % x FCI
	Käyttöpääoma	5 % x FCI
Sijaintikerroin	Brasilia	1,14

Taulukossa 2 on esitetty laitoksen kulut kategorioittain. Kulukategoriat ovat ISBL, OSBL, muut kulut, laitoksen perustamisen kulut, sekalaiset kulut, suunnittelukulut ja yleiset kulut. Lisäksi kuluissa huomioidaan laitoksen sijanti maakohtaisella kertoimella. Kulukategorioille on arvioitu tietyt prosenttiosuudet, jonka ne kattavat kokonaispääoman (FCI) suuruudesta.

Taulukko 3 Etyylibentseenituotantolaitoksen yleiset käyttökustannukset (Junqueira et al. 2020, 8.)

Yleiset käyttökustannukset		
	Parametri	Arvo
Kiinteät kustannukset (FC)	Kunnossapito	5 % x FCI
	Juoksevat kustannukset	5 % työstä
	Vakuutukset, lisenssit ja tekijänpalkkiot	2 % x FCI
Muuttuvat kustannukset (VC)	Henkilökohtaiset suojavälineet, siivoustarvikkeet, kartat ja lisätarvikkeet yms.	1 % kunnossapidosta
Muut	Tutkimus ja kehitys	1 % tuloista
	Myynti ja markkinointi	2 % x (FC + VC)
	HR, kirjanpito, rahoitustoimi yms.	35 % työstä

Taulukossa 3 on esitetty etyylibentseenin tuotantolaitoksen yleiset käyttökustannukset kategorioittain ja niiden suuruusluokka. Käyttökustannukset jakautuvat kiinteisiin, muuttuviin ja muihin kustannuksiin. Kiinteät kustannukset koostuvat kunnossapidosta, juoksevista kustannuksista, vakuutuksista, lisensseistä ja tekijänpalkkioista. Muuttuvat kustannukset koostuvat suojavälineistä ja muista tarvikkeista. Kategoriaan muut

kustannukset kuuluu yrityksen muita kustannuksia, esimerkiksi tutkimus ja kehitystyö, myynti ja markkinointi, henkilöstöhallinto, kirjanpito sekä rahoitustoimi. (Junqueira et al. 2020, 8.)

Teollisuusprojekteissa arvioitujen kustannusten ylitys on hyvin tavallista. Kustannusarviot muuttuvat progressiivisesti tarkemmiksi projektin elinkaaren edetessä. Projektien toteutus päätöstä tehdessä luotavat kustannusarviot ovat sekä projektin kannalta erityisen merkityksellisiä että herkimpiä epätarkkuuksille. Tästä syystä virheellisiin tietoihin perustuvista päätöksenteon lähtökohdista aiheutuvat negatiiviset jälkivaikutukset voivat olla sekä kustannusten että aikataulun kannalta erittäin vakavia. Kustannusarvioiden ylitysten tärkeimmät syyt ovat:

- Alhaiset alustavien kustannusten arviot,
- odottamattomat tekniset vaikeudet,
- laajuuden määrittelyn puutteellisuus,
- erittelyiden muutokset ja
- ulkoiset tekijät. (Venkataraman & Pinto 2010, 45-46.)

Alhaiset alustavat kustannusarviot johtuvat useimmiten toteutettavien toimintojen suuruusluokan ja monimutkaisuuden aliarvioinnista. Usein esimerkiksi projektitoimintojen vaikutus arvioidaan eristettynä ympäröivistä järjestelmistä, eikä vaikutuksia ympäröiviin järjestelmiin huomioida. Projektin myös odotetaan onnistuvan suunnitellulla optimaalisella tavalla, eikä ongelmia arvioida nousevan esiin. Alustavat kustannusarviot voidaan myös alimitoitaa tarkoituksella. Tarkoituksellinen ala-mitointi saatetaan tehdä esimerkiksi toteutushyväksynnän saamiseksi projektille tai lopullisten toteutuvien kulujen minimoimiseksi. Toinen aiheuttaja on virheellinen mielikuva siitä, että jos alustavat kustannukset arvioidaan pieniksi, niin toteutuvat lopulliset kustannukset pysyvät pieninä. (Venkataraman & Pinto 2010, 46.)

Odottamattomat tekniset haasteet ovat toinen tärkeä kustannusylityksien aiheuttaja. Tekniset vaikeudet johtuvat usein alustavien suunnitelmien huonosta laadusta. Kuitenkin esimerkiksi testausvaiheessa saattaa ilmetä asioita, joita ei olisi ollut mahdollista arvioida projektin alkuvaiheessa. Tarkoituksenmukaisen kustannusarvion tulisikin huomioida jossain määrin

myös tekniset ongelmat, käynnistysviivästyksset ja muut tekniset riskit. (Venkataraman & Pinto 2010, 46-47.)

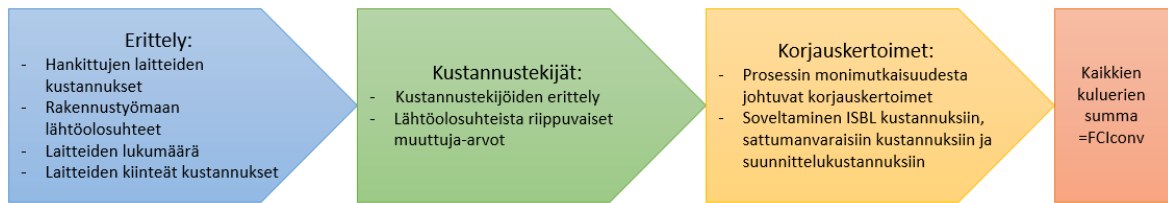
Puutteellisella laajuudenmäärittelyllä toteutettavista projekteista tulee päämäärättömiä, yksityiskohdattomia ja tarkoituksettomia. Tällöin myös projektin kustannusten arvioiminen on hyvin pitkälti turhaa. Tyypillisesti esimerkiksi yksityis- ja julkisrahoitteisissa tutkimuksissa saatetaan jumiutua tekemään tutkimusta tutkimuksen vuoksi ja laajempi näkökulma sekä varsinaiset tavoitteet saatetaan unohtaa. (Venkataraman & Pinto 2010, 47.)

Laajuusmuutokset ovat usein pääasiallisin syy kustannusarvioiden ylitykselle ja ne saattavat tehdä alkuvaiheen kustannusarvioinnista merkityksetöntä. Erittelymuutoksia voi syntyä projektiorganisaatiossa sisäisesti, mutta usein niiden syyt ovat ulkoisia. Ulkoisia erittelymuutoksia voi aiheutua useista eri tekijöistä projektin kehittyessä, esimerkiksi markkinan dynaamisista muutoksista, hiljattain ilmenneistä vaatimuksista tai uusista lainsäädäntömuutoksista. Erittelymuutokset aiheuttavat tarpeen päivittää kustannusarvioita. (Venkataraman & Pinto 2010, 47-48.)

Ulkoiset tekijät kuten inflaatio, korkotasot, ympäristöongelmat ja valuuttakurssit voivat myös vaikuttaa projektin kustannuksiin varsinkin silloin, kun teknisten haasteiden takia projektin aikataulu pitkittyy suunnitellusta. Esimerkiksi monikansallisissa julkisen sektorin projekteissa aikataulu voi venyä merkittävästi politiikasta johtuen. Projektin aloitusvaiheessa tehtyyn kustannusarvioon liittyvien epätarkkuuksien vaikutus on kaikkein merkittävin niissä projekteissa, joissa kannattavuus ei ole erityisen vahvalla pohjalla. (Venkataraman & Pinto 2010, 48.)

## 4.2 Investointikustannusten arviointi

Tuotantolaitoksen investointikustannusten arvioinnissa laitoksen tyyppi ja ensisijainen tuotantokonsepti sekä mahdolliset aikaisemmin toteutetut vastaavat projektit vaikuttavat mahdollisiin käytettäviin arviointimenetelmiin. Yleisesti investointikustannuksia arvioidessa pyritään selvittämään kaikkien kuluerien summa (FCI). Kuvassa 7 on esitetty perinteisen laitossuunnittelun kuluerien laskentaprosessi. (Bramsiepe et al. 2017, 396.)



Kuva 7 Kuluerien laskentaprosessi perinteisessä laitossuunnittelussa (Bramsiepe et al. 2017, 397.)

Osa kehitetyistä arviointimenetelmistä sopii juuri perinteisten tuotantolaitosten investointikustannusten arviointiin, kun taas osaa voidaan hyödyntää modulaaristen laitosten kustannusarvioinnissa. Yksityiskohtaiset kustannustiedot ovat tyypillisesti käytettävissä vasta perussuunnittelun loppuvaiheessa, jonka takia yksityiskohtaisia lopullisiin kustannuksiin perustuvia menetelmiä voidaan hyödyntää vasta myöhäisessä vaiheessa suunnitteluprosessia, siinä missä yksinkertaisia muuttujamenetelmiä voidaan hyödyntää jo varhaisessa vaiheessa. Bramsiepe et al. (2017) on kehittänyt oman laskentamenetelmän, jolla voidaan arvioida sekä perinteisen, että modulaarisen tuotantolaitoksen investointikustannusten suuruutta. Menetelmä perustuu perinteistä laskentaprosessien ja modulaaristen prosessien yhdistelemiseen. (Bramsiepe et al. 2017, 396.)

Yksinkertainen tapa investoinnin suuruusluokan arvioimiseksi on verrata uuden tuotantolaitoksen kapasiteettia aikaisemmin toteutettuihin riittävällä tavalla vastaaviin laitoksiin. Tällä tavalla toteutetulla arviolla tarkkuus on tyypillisesti  $\pm 30\text{-}50\%$ . Vastaavien laitosten toteutuneisiin kustannuksiin vertaaminen vaatii kuitenkin tietoja, jotka saattavat olla osittain salaisia. Tämän menetelmän tarkkuutta voidaan parantaa jakamalla tuotantolaitos pienempiin tuotantoyksiköihin. Joka tapauksessa tämä menetelmä edellyttää vertailukohteilta riittävää vastaavuutta. (Bramsiepe et al. 2017, 396.)

Vertailumenetelmää monipuolisemman, mutta silti yksinkertaisen tavan tuottaa suuruusluokka-arvio on esitellyt Lang (1948). Tässä menetelmässä esimerkiksi laitteiden hankintahinta kerrotaan kiinteällä kertoimella, joka riippuu rakennettavan laitoksen tyypistä. Kustannusarviota varten tarvitaan tällä menetelmällä melko vähän lähtötietoja. Esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä valmistetulle vahvistamattomalle jatkuvasti operoidulle sekoitettavalle reaktorisäiliölle lähtötiedoksi tarvitaan vain sen tilavuus. Tällä menetelmällä tarkkuus on tyypillisesti  $\pm 30\text{-}50\%$ . (Bramsiepe et al. 2017, 396.)

Langin menetelmän lisäksi on kehitetty myös muita kertoimiin perustuvia arviointimenetelmiä, esimerkiksi Chilton, Peters ja Timmerhausin tai Millerin (Couper

2003) toimesta. Kyseisillä menetelmillä päästään Langin (1948) menetelmää tarkempaan lopputulokseen. Näissäkin menetelmissä asetetaan kertoimia tärkeimpiin kustannuselementteihin, esimerkiksi laitteiden hankintakustannuksiin mahdollistaen kyseisistä kustannuselementeistä aiheutuvien kustannusten tarkempi arviointi. Kyseisissä menetelmissä käytettävät muuttujat määritellään useiden toteutettujen investointiprojektien perusteella. Tällaisilla muuttujamenetelmillä kustannusarvion tarkkuudeksi voidaan saada  $\pm 20-30\%$ . (Bramsiepe et al. 2017, 396.)

Vielä yksityiskohtaisempia metodeita investointikustannusten arvioinnille ovat historialliset talonsisäiset tietokannat sekä esimerkiksi Hirsch & Glazierin tai Guthrien (Couper 2003) esittelemät kustannusarviomenetelmät. Kyseiset menetelmät perustuvat moduuleihin, joissa moduulit ovat yksittäisiä laitteita, joihin lisätään sarja lisämaksumuuttujia tarkkojen kustannuslähteiden huomioimiseksi. Lisäämällä moduulikustannus kaikkien laitteiden hintaan, voidaan määrittää kokonaisuuden, esimerkiksi koko tuotantolaitoksen, kokonaishinta. Tämäntyyppinen menetelmä mahdollistaa alkuvaiheen kustannusarvion saantitarkkuudeksi  $\pm 20\%$ . (Bramsiepe et al. 2017, 396.)

Hady et al. (2009) on kehittänyt modulaarisen menetelmän investointikustannusten arviointiin. Hänen menetelmässään käsitellään yhdeksää arviointimenetelmää, jotka perustuvat arvioituun modulaariseen monimutkaisuusasteeseen sekä projektin vaiheeseen. Hänen lähestymistavassaan modulaarinen monimutkaisuusaste esitetään moduulille määriteltyjen rajojen perusteella. Tässä menetelmässä kustannusten arviointi voidaan toteuttaa joustavasti prosessilaitekohtaiselta tasolta aina kokonaisen tuotantolaitoksen tasolle asti. Ehdotetut arviointimenetelmät perustuvat muunneltuihin kapasiteetti- ja muuttujamenetelmiin. Tässä menetelmässä ei voida käsitellä lisämaksukertoimia, ennen kuin edeltäviin projekteihin liittyvät tiedot ovat käytettävissä. Vertailukelpoisten talon sisäisten projektikustannustietojen hyödyntäminen vaatii kuitenkin tässä yhteydessä historiallisia tietoja nimenomaan modulaaristen vertailulaitosten rakentamisesta. Yksityiskohtaisten kustannustietojen lisäksi tarvitaan tarkka laitekohtainen erittely, jotta kustannukset voidaan arvioida. (Bramsiepe et al. 2017, 396-397.)

#### 4.3 Elinkaarikustannusten (LCC) arviointiprosessi

Täsmällisen ja laadukkaan elinkaarikustannusarvioin luomisessa vaaditaan laaja-alaista tietotaitoa, esimerkiksi insinööri-, finanssi ja kirjanpito-, kustannuslaskenta-, tilastollisesta analyysistä-, luotettavuus- ja kunnossapidosta, sekä logistiikasta ja urakoinnista. Tästä syystä elinkaarikustannusarviointiprosessiin tulisi osallistua laaja-alaisesti eri ammattilaisia, mieluiten edellä mainituista aihealueista. Riittävän laajan ja asiantuntevan ryhmän löytäminen ja muodostaminen aiheuttaa selvän haasteen projektin ja kustannusarvioinnin hallinnoinnille. Projektiryhmän vetäjällä tulisi olla asiantuntemusta esimerkiksi todennäköisysteoriasta, luotettavuusinsinööriyöstä, laadunhallinnasta, systeemi-insinööriyöstä, operaatioiden tutkimuksesta, data-analytiikasta, datankeruusta ja tuotantomenetelmistä. (Elmakis & Lisnianski 2006, 7-8.)

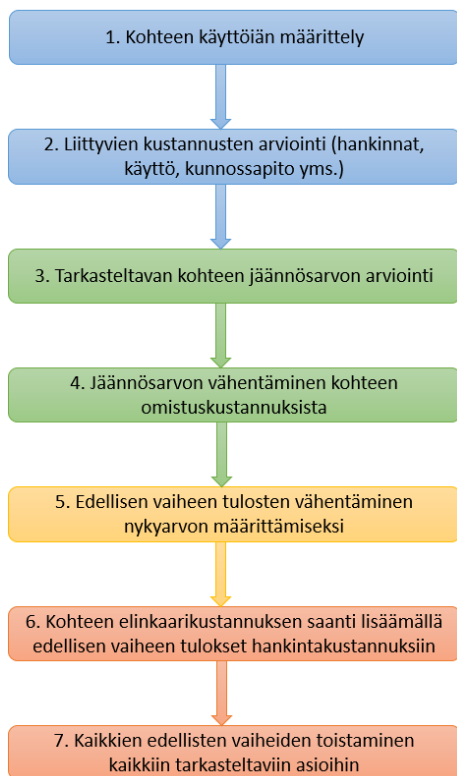
Elinkaarikustannusten arviointiin on olemassa erilaisia toimintamalleja. Tutkijat Kawauchi & Rausand (1999, 10.) kiteyttivät toimintamallin kuuteen eri perusprosessiin:

- Ongelman määrittely,
- kustannuselementtien määrittely,
- systeemin mallinnus,
- tiedonkeruu,
- kustannusprofiilien kehitys,
- arviointi ja
- tulosten raportointi.

Edellä mainitut perusprosessit voidaan jakaa edelleen aliprosesseihin seuraavissa kappaleissa esitetyillä tavoilla. Kuudennesta vaiheesta, eli arvioinnista, voidaan tarvittaessa palata takaisin ongelman määrittelyyn. (Kawauchi & Rausand 1999, 10.)

Tutkijat Elmakis & Lisnianski (2006) määrittelevät tarkasteltavan kohteen elinkaarikustannusten arvioinnin toimintamallin kuvassa 8 esitetyllä tavalla.





Kuva 8 Elinkaarikustannuslaskentaprosessin vaiheet (Elmakis & Lisnianski 2006, 7).

Tyypillisesti kuvassa 8 esitetyn toimintamallin toinen vaihe, liittyvien kustannusten arviointi, vaatii kaikkein eniten aikaa ja resursseja. Esimerkiksi käyttö- ja tukitoimintojen kustannusten arvioiminen vaatii erilaisten mallien kehittämistä ja analysointia. (Elmakis & Lisnianski 2006, 7-8.)

#### 4.3.1 Elinkaarikustannusarvioinnin ongelman määrittely

Tutkijoiden Kawauchi & Rausand (1999) mukaisen elinkaarikustannusprosessin ensimmäisessä vaiheessa määritellään laajuus ja arviointikriteerit sekä kehitetään toimintafilosofia. Ongelmat ja tarkasteltu laajuus tulee määritellä selkeästi, jotta arviointiprosessin seuraavat vaiheet on mahdollista suorittaa riittävällä tarkkuudella. Tässä yhteydessä laajuudella tarkoitetaan osa-alueita, kuten esimerkiksi mallinnettavia ohjelman vaiheita, laitteita ja toimintoja. Laajuuden tarkka määrittely on välttämätöntä seuraavassa kappaleessa esitettyjen kustannuselementtien määrittelyn kannalta. On myös tärkeää määritellä ja dokumentoida tarkasti kaikki tehdyt oletukset. (Kawauchi & Rausand 1999, 12-13.)

Ongelman määrittelyn toisena vaiheena määritellään arviointikriteerit (kohtuuhintaisuus, systeemin tehokkuus ja hyväksyttävä riskitaso). Elinkaarikustannusarvioinnin alkuvaiheessa on syytä määrittellä käytettävät arviointikriteerit, vaikka varsinainen arviointivaihe suoritetaankin vasta prosessin loppuvaiheessa. Kannattavuustarkastelun (kustannustehokkuustarkastelu) kriteerien tulisi huomioida kokonaiskustannusten lisäksi systeemin toiminta ja tehokkuus. Tehokkuus voi sisältää esim. systeemin ominaisuuksia kuten tuotantokapasiteetin, tuotteen laadun, käytettävyyden tai turvallisuuden tekijöitä. Myös säädökset, standardit, toimintatavat ja projektin ohjeet voivat vaikuttaa systeemin tehokkuuteen monissa tapauksissa. (Kawauchi & Rausand 1999, 12-13.)

Ongelman määrittelyn viimeisenä vaiheena on kehitettävä systeemin käyttöfilosofia, jolla tarkoitetaan käytännöllisiä vaatimuksia ja kunnossapitostrategioita yms. Käyttöfilosofia onkin vahvasti riippuvainen laitoksen tavasta toteuttaa toimintaansa. (Kawauchi & Rausand 1999, 12-13.)

#### 4.3.2 Kustannuselementtien määrittely

Kustannuselementtien määrittelyssä on tärkeää huomioida kaikki kustannuskohteet, jotka vaikuttavat merkittävästi koko systeemin elinkaarikustannuksiin. On suositeltavaa määrittellä kustannuselementit systemaattisesti, jotta merkittäviä kustannuselementtejä ei jäisi huomiotta. Kansainvälisen standardin (IEC 60300-3-3 1996) mukaan kustannuselementtien määrittelyä varten on suositeltavaa kehittää kustannuserittelyrakenne.

Kustannuselementtien määrittelyn toisena vaiheena määritellään kustannuskategoriat. Kaikkiin elinkaarikustannusanalyysiin sopivaa kustannuselementtijaottelua ei ole toistaiseksi pystytty kehittämään, koska elementit vaihtelevat hyvin vahvasti tapauksesta riippuen. Kustannuselementtien määrittely onkin tehtävä erikseen jokaista elinkaarikustannusanalyysiä varten. Yleisesti usein esiintyviä kustannuselementtejä kuitenkin ovat esimerkiksi hankinta- ja omistuskustannukset (IEC 60300-3-3 1996). Samoista elementeistä käytetään myös nimityksiä pääomakustannukset (CAPEX) ja operointikustannukset (OPEX). Edellä mainittujen lisäksi yleisenä elementtinä voidaan pitää tuotannonlykkäskustannuksia, jotka voidaan määrittää tuotantojärjestelmän suorituskyvyn

aleneman ja tuotettavan tuotteen arvon mukaan. Tuotannonlykkäyskustannukset voivat olla elinkaarikustannusten kannalta merkittäviä etenkin, jos tuotteen hinta on korkea tai jos suorituskyky pienenee huomattavasti. Erityisesti öljyn-, kaasun- ja sähköntuotantolaitoksilla on tavallista sitoa sopimukset tiettyyn tuotantomäärään tietyssä ajassa. Tällöin toteutuneen tuotantomäärän jäädessä sovittua pienemmäksi, veloitetaan tuotantolaitokselta sakkomaksu. (Kawauchi & Rausand 1999, 13-15.)

Esimerkki öljy- ja kemianteollisuudessa käytettävästä kustannusrakenne-erittelystä:

1. Hankintakustannukset (CAPEX)
  - a. Laitteiden hankinta
  - b. Asennuskustannukset
  - c. Rakennuskustannukset
  - d. Välittömät varaosakustannukset
  - e. Uudelleeninvestointikustannukset
  - f. Suunnittelu- ja hallintokustannukset
2. Omistus(operointi)kustannukset (OPEX)
  - a. Työtunnit
    - i. Korjauskunnossapito
    - ii. Ennakoiva kunnossapito
    - iii. Huollot
  - b. Varaosat
    - i. Korjauskunnossapito
    - ii. Ennakoiva kunnossapito
    - iii. Huollot
  - c. Logistiikka
  - d. Energiankulutus

e. Vakuutukset

### 3. Tappiokustannukset

a. Tuotannon lykkäytymisen kustannukset

b. Vahinkokustannukset

c. Takuu/vakuus -kustannukset

d. Julkisuuskuvatappiot. (Kawauchi & Rausand 1999, 13-15.)

#### 4.3.3 Systeemin mallinnus

Kustannuselementtien laskemista varten on tehtävä systeemin mallinnus. Mallinnuksella tarkoitetaan tässä yhteydessä yhteyksien löytämistä kustannuselementtien ja tiedossa olevien muuttujien välillä. Kustannuselementtien arviointia varten voidaan hyödyntää olemassa olevia malleja, mikäli ne ovat tarkoituksenmukaisia. Muussa tapauksessa mallit täytyy luoda erikseen. Systeemin mallinnuksessa tulee ottaa huomioon useita näkökulmia, kuten:

- Käytettävyys,
- kunnossapito ja tarkastukset,
- logistiikka,
- tuotannon säännöllisyys,
- riskit,
- inhimillinen virhe ja
- teollinen ekologia. (Kawauchi & Rausand 1999, 16-29.)

Tyypillisesti edellä mainituista näkökulmista tärkeimpiä ovat käytettävyys ja kunnossapito, koska ne vaikuttavat usein hyvin vahvasti operointikustannuksiin ja tukitoimintokustannuksiin kuuluviin kustannuselementteihin. Systeemin suunnitteluvaiheessa voidaan vaikuttaa suuresti käytettävyyteen ja kunnossapidettävyyteen. Tästäkin syystä kyseiset parametrit on otettava huomioon systeemin mallinnusta tehdessä. (Kawauchi & Rausand 1999, 16-29.)

Käytettävyydellä tarkoitetaan tässä yhteydessä tuotantojärjestelmän toiminnallista tuotantoaikaa suhteessa koko tarkastelu-aikaan. Tuotantoaika saadaan vähentämällä kalenteriajasta alasajot ja seisakit sekä muut hävikkiajat. Tällaista käytettävyyden määrittelyä varten on oltava melko tarkasti tiedossa tuotantolaitoksen operointidataa. Tuotantofasilitteettien käytettävyys vaikuttaa suoraan tuotannonlykkäskustannuksiin. (Kawauchi & Rausand 1999, 16-29.)

Käytettävyys voidaan laskea esimerkiksi seuraavalla yhtälöllä

$$\text{Käytettävyys} = \frac{MTTF}{MTTF+MTTR} = \frac{MTTF}{MTBF} \quad (1)$$

jossa:

*MTTF* on keskimääräinen aika korjaantumisen ja uuden vikaantumisen välillä

*MTTR* on keskimääräinen korjausaika

*MTBF* on keskimääräinen aika vikaantumisten välillä. (Kawauchi & Rausand 1999, 16-29.)

Kunnossapidon ja tarkastusten taajuus vaikuttaa huomattavasti sekä käytettävyyteen että käyttökustannuksiin. Elinkaarikustannusarvioinnissa kunnossapidosta ja tarkastuksista aiheutuvat kustannukset vaikuttavat eniten operointikustannuksiin (OPEX). Kunnossapitotoimet voidaan luokitella korjaavaan kunnossapitoon ja ennakoivaan kunnossapitoon.

Kunnossapidettävyyttä voidaan mitata yhdistelemällä seuraavia muuttujia:

1. Keskimääräinen aika kunnossapitotoimien välissä (MTBM) mukaan lukien sekä ennakoivan että korjaavan kunnossapidon.
2. Keskimääräinen toiminta-aika (MTBR)
3. Keskimääräinen kunnossapitoaika (MDT)
4. Parantumisaika (TAT), tai huolto-, korjaus- ja korvaustöiden vaatima aika
5. Kunnossapitotöiden työtunnit suhteessa systeemin tai tuotannon toiminta-aikaan

6. Kunnossapitotöiden kustannukset suhteessa systeemin tai tuotannon toiminta-aikaan. (Kawauchi & Rausand 1999, 16-29.)

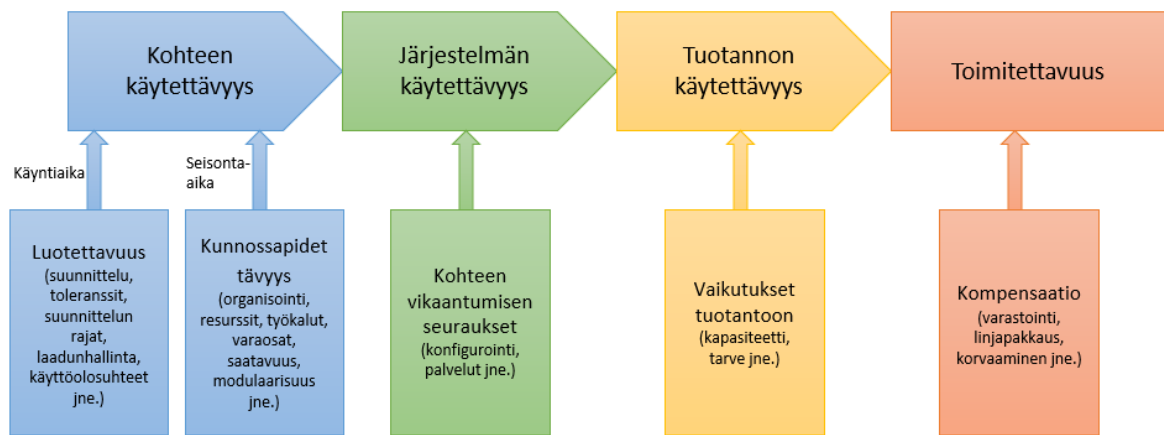
Koska kunnossapitotöiden ja tarkastusten taajuus ja laatu vaikuttavat huomattavasti OPEX kustannuksiin, on niiden tehokkuuden parantamista tutkittu ja standardisoitu.

Tuotantolaitoksen logistiikan kustannuselementit voivat vaihdella tapauskohtaisesti hyvinkin paljon. Yksi erittelymalli logistiikan kustannuselementeistä on:

- Kunnossapitohenkilökunta
- koulutus ja tuki
- varusteet
- tukilaitteet
- tietokoneressit
- pakkaus, käsittely, varastointi ja kuljetukset
- kunnossapitotilat ja
- tekninen data ja tietojärjestelmät. (Kawauchi & Rausand 1999, 16-29.)

Tuotannon säännöllisyydellä tarkoitetaan sen kykyä mukautua kysyntään, kuljetuksiin tai suorituskykyyn. Tuotannon säännöllisyyttä kuvaamaan voidaan määrittää useita mittareita. Säännöllisyysanalyysissä käytettävät mittarit tuleekin määrittellä tapauskohtaisesti. (Kawauchi & Rausand 1999, 16-29.)

Kuvio 9 kuvaa kohteen käytettävyyden, tuotannon käytettävyyden ja toimitettavuuden suhteita.



Kuva 9 Tuotannon säännöllisyyden mallintaminen (NORSOK Z-016) (Kawauchi & Rausand 1999, 24.)

Systemin käytettävyydellä tarkoitetaan toteutuvaa tuotantoaika suhteessa operointiaikaan. Tuotannon käytettävyyden määrittelyyn yksinkertaisin tapa on laskea toteutuneen tuotannon ja suunnitellun tuotannon suhde. Edellä mainitun lisäksi voidaan kuitenkin huomioida myös puskurivarastot ja muut varajärjestelmät, joita hyödynnetään tuotantokatkosten aikana. Tästä syystä säännöllisyyttä on syytä mitata mieluummin muuttujan ”toimitettavuus” avulla. Toimitettavuudella kuvataan toteutuvia toimituksia suhteessa suunniteltuihin toimituksiin tarkasteluajan sisällä. Toimitettavuustarkastelussa huomioidaan kompensointielementit, kuten omat puskurivarastot ja täydennykset muilta tuottajilta. (Kawauchi & Rausand 1999, 16-29.)

Elinkaarikustannuslaskennassa on myös otettava huomioon riskien vaikutus. IEC-60300-3-3 (1996) suosittelee vastuukustannusten ja takuukustannusten huomioimista elinkaarikustannusanalyysissä. Joissain tapauksissa elinkaarikustannusanalyysissä voidaan huomioida myös onnettomuuksien aikaiset häviökustannukset. Riski lasketaan yleensä kertomalla aiheutuvat vaikutukset tapahtuman arvioidulla todennäköisyydellä. Aiheutuvat vaikutukset lasketaan onnettomuudesta aiheutuvien arvioitujen vahinkojen perusteella. Tuotantolaitoksella esimerkiksi inhimillinen virhe voi aiheuttaa onnettomuuksia, eikä useimmissa tapauksissa sen vaikutusta voida sulkea pois. (Kawauchi & Rausand 1999, 16-29.)

Kasvava huoli ihmisen aiheuttamista globaaleista ympäristöongelmista on korostanut tarvetta joustaville ongelmanratkaisukeinoille. US-EPA (1997) määrittelee ekologisen riskin arvioinnin seuraavasti: Arviointiprosessi, jossa tarkastellaan kasveille, eläimille tai maaperälle aiheutuvien haitallisten vaikutusten todennäköisyyttä. Prosessi sisältää

ongelmanmuodostuksen, ilmenevyyden luonnehtimisen, ekologisten vaikutusten määrittelyn ja riskinmäärittelyn”. Ekologisen riskin arviointiin on kehitetty menetelmiä ja suosituksia. Menetelmiä on kehitetty esimerkiksi US-EPA:n (1997) toimesta ympäristöongelmiin liittyvän taloudellisuusanalyysin suorittamiseen. (Kawauchi & Rausand 1999, 16-29.)

#### 4.3.4 Elinkaarikustannusarvioinnin lähtötietojen kerääminen

Syöttötietojen tarkkuus on elinkaarikustannusarvioinnin luotettavuuden kannalta äärimmäisen tärkeä asia. Tietojen keruussa on välttämätöntä tunnistaa syöttödatan vaatimukset ja käyttää luotettavia lähteitä. Jos sopivaa tarkkaa dataa on saatavissa kustannuselementtien laskemiseksi, jokainen kustannuselementti voidaan laskea hyödyntämällä suoraan kerättyä dataa. Jos taas sopivaa tarkkaa dataa ei ole saatavissa, voidaan kustannuselementtien arviointi perustaa asiantuntijan harkinnan varaan. (Kawauchi & Rausand 1999, 30-31.)

Elinkaarikustannusarviointiin vaaditaan laajasti erilaista dataa, esimerkiksi luotettavuusdataa, kunnossapidettävyydataa, operointidataa ja kustannusdataa. Tyypillisesti luotettavuusdataa on helppo löytää, kun taas operointi- ja kustannusdata on usein salassa pidettyä. Standardit IEC 60300-3-2 (2004) ja ISO 14224 (2016) käsittelevät luotettavuus- ja kunnossapidettävyydataa. Operointi- ja kustannusdata on usein säilötty tuotantolaitoksen sisäisiin tietokantoihin. Kun varsinaista dataa ei ole saatavilla, täytyy kyseinen data arvioida. Datan ennustamiseen voidaan käyttää erilaisia arviointimalleja. Erityisesti kustannusdatan arviointiin voidaan käyttää esimerkiksi satunnaisia, parametrisiä tai analogisia malleja. (Kawauchi & Rausand 1999, 30-31.)

Satunnaiset mallit ottavat huomioon tapahtumien sattumanvaraisuuden ja pohjautuvat erikoistuneisiin tilastollisiin tekniikoihin. Parametriset tekniikat perustuvat tilastollisiin analyysihin ja historialliseen dataan ja johtaa useimmiten kustannusarvioon tai kustannustekijäsuhteeseen. Analogiset tekniikat muodostavat suhteen uuden ja vanhan datan välille. Vanhaan dataa muokataan asiantuntijan harkinnan mukaan kuvastamaan sen tunnusmerkkejä. (Kawauchi & Rausand 1999, 30-31.)

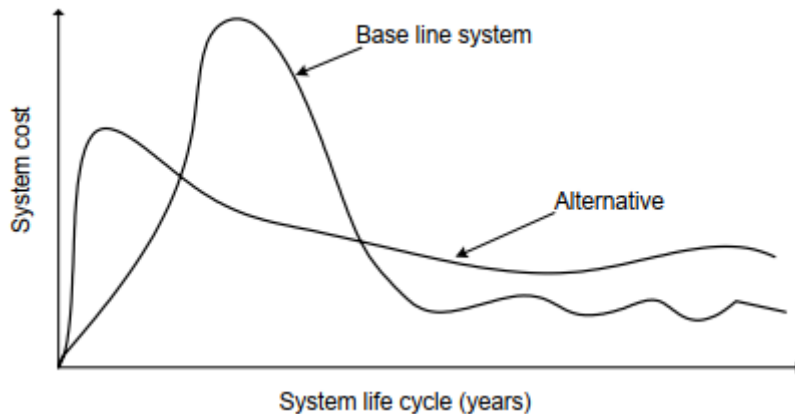


Luotettavuusdatan ennustamiseen on myös olemassa erilaisia malleja, esimerkiksi Bayesian luotettavuusteoriaan perustuva malli, joka derivoi arvioidun tiedon tiedetystä tiedosta. Arvioidun ja varsinaisen luotettavuusdatan ja välisiä eroja on arvioitu useissa eri tutkimuksissa. Tulokset nostavat esiin kuusi merkittävintä eroavaisuutta, jotka on syytä ottaa huomioon:

- Datan tarkkuus,
- tekniikoiden ennustaminen,
- ympäristölliset tekijät,
- valmistusprosessit,
- suunnittelulliset tekijät ja
- lyhyen aikavälin johtamiseen liittyvät tekijät. (Kawauchi & Rausand 1999, 30-31.)

#### 4.3.5 Kustannusprofiilien kehittäminen

Yksi elinkaarikustannusanalyysin päätavoitteista on pitkän aikajänteen taloussuunnitteluun kuuluva kohtuuhintaisuusanalyysi, jonka avaintekijänä on elinkaaren aikainen kustannusprofiili. Kuvassa 10 on esitettyä esimerkki kustannusprofiilista. Kustannusprofiilin piirtäminen on oleellinen osa elinkaarikustannusarviointia. Jokaisen suunnittelutapauksen kustannusprofiilia tulee verrata yleiseen vertailutasoon. Suunnitteluratkaisua muokattaessa tai investointia suunniteltaessa on suositeltavaa tarkastella myös talousanalyysiä.



Kuva 10 Kustannusprofiiliesimerkki (Kawauchi & Rausand 1999, 32.)

Kustannusprofiilien kehittämistä varten syöttödatasta ajetaan kustannusmalli. Malli voidaan muodostaa yksinkertaisesti manuaalisesti laskemalla tai hienostuneemmilla IT työkaluilla. Markkinoilla olevat elinkaarikustannuslaskennan työkalut voidaan jakaa tehokkuusanalyysityökaluihin ja kustannusanalyysityökaluihin.

Inflaation, verotuksen, arvonmuutosten ja valuuttakurssien vaikutus on huomioitava kustannusprofiileissa. Edellä mainittujen tulevaisuuden ennustaminen on kuitenkin hankalaa, mistä syystä kustannusprofiileissa voidaan käyttää kyseisten arvojen kohdalla vakioita. Rahan arvon muutos voidaan huomioida nettonykyarvolla (NPV), joka voidaan laskea yhtälöllä:

$$NPV = \sum_{n=0}^T C_n \times (1 + X)^{-n} \quad (2)$$

Jossa

$NPV$  on nettonykyarvo

$C_n$  on nimelliskassavirta tarkasteluvuonna

$n$  on tietty tarkasteluvuosi elinkaarikustannusarvioinnin ajanjaksossa;

$X$  on arvonalenema

$T$  on tarkasteltavan ajanjakson pituus vuosina.

Indeksisidonnaisuus ottaa huomioon yleisen hintatason kehityksen. Indeksisidonnaisuus voidaan laskea yhtälöllä:

$$EF = (1 + E_1) \times (1 + E_2) \times (1 + E_3) \times \dots \times (1 + E_n) \quad (3)$$

Jossa

$EF$  on indeksisidonnaisuuden arvo vuonna  $n$

$E_i$  on indeksisidonnaisuuden arvo vuonna  $i$

(Kawauchi & Rausand 1999, 32-33.)

#### 4.3.6 Elinkaarikustannusten arviointi

Arviointivaihetta varten on valittava vertailutason lisäksi kaikkein tarkoituksenmukaisin järjestelmäkonfiguraatio. Syöttödatan epävarmuutta tulee arvioida elinkaarikustannusten arviointivaiheessa. Tällöin suoritetaan herkkyystarkastelu ja muodostetaan epävarmuusanalyysi. (Kawauchi & Rausand 1999, 34-35.)

Herkkyystarkastelulla arvioidaan syöttödatan muutosten vaikutusta elinkaarikustannusarvioinnin lopputulokseen. Muuttamalla syöttödatan arvoja tiettyjen rajojen sisällä vaikutusten arvioimiseksi voidaan tunnistaa suurimmat kustannustekijät ja niiden vaikutukset kokonaiskustannuksiin. (Kawauchi & Rausand 1999, 34-35.)

Epävarmuusanalyysillä pyritään tarkastelemaan mahdollista arvion vaihteluväliä ja sen vaikutusta päätöksentekoon. Epävarmuusanalyysin tuottamat kuvaajat helpottavatkin päätöksentekoa. Epävarmuuden lähteet voidaan luokitella kolmeen pääkategoriaan, jotka ovat tunnuslukuepävarmuus, mallinnusepävarmuus ja tietojensaannin epävarmuus. (Kawauchi & Rausand 1999, 34-35.)

Yksi elinkaarikustannusanalyysin tavoitteista on tunnistaa ne kustannustekijät, joilla on suuri vaikutus elinkaarikustannuksiin ja löytää kustannustehokkaita parannuksia. Kustannustekijöiden tunnistamisen jälkeen on tärkeää tunnistaa syy-seuraussuhteet korkeiden kustannusten takana. Syy voi olla esimerkiksi toistuva vika laitteistossa tai suuri hyödykkeen kulutus apujärjestelmässä. Muuttamalla systeemin suunnitelmia kustannustekijöiden mukaisesti voidaan saada laskettua systeemin elinkaarikustannuksia huomattavasti. (Kawauchi & Rausand 1999, 34-35.)

#### 4.3.7 Elinkaarikustannusten optimointi

Elinkaarikustannusanalyysissä suoritetaan optimointiprosessi jokaiselle toteutusvaihtoehdolle. Optimointi voidaan toteuttaa iteratiivisten elinkaarikustannusarviointiprosessien kautta. Optimointi tarkoittaa käytännössä niiden parametrien etsimistä, joilla koko systeemin elinkaarikustannus on kaikkein pienin. Lisäksi optimointi voidaan suorittaa yksittäisille elinkaarikustannusprosessin osille, kuten suunnittelulle, kunnossapidolle tai varaosille. Optimointiprosessin suorittamisen metodeita on erilaisia. Klassinen optimointimetodi on tarkastella käyrän  $y=f(x)$  jyrkkyyttä. (Kawauchi & Rausand 1999, 36.)

#### 4.3.8 Elinkaarikustannusarvioinnin raportointi

Arviointivaiheen jälkeen tulokset raportoidaan parhaimman vaihtoehdon mukaisesti. Arvioinnin osana suoritetaan herkkyystarkastelu, jolla pyritään tunnistamaan ne yksittäiset kustannustekijät, joiden muutoksella on kaikkein suurin vaikutus elinkaarikustannukseen. Kansainvälisen standardin IEC 60300-3-3 (1996) mukaisesti tulosten dokumentointi eli raportointi on välttämätön osa elinkaarikustannusarviointia. K.o. standardin mukaan raportin tulee sisältää seuraavat kuusi elementtiä:

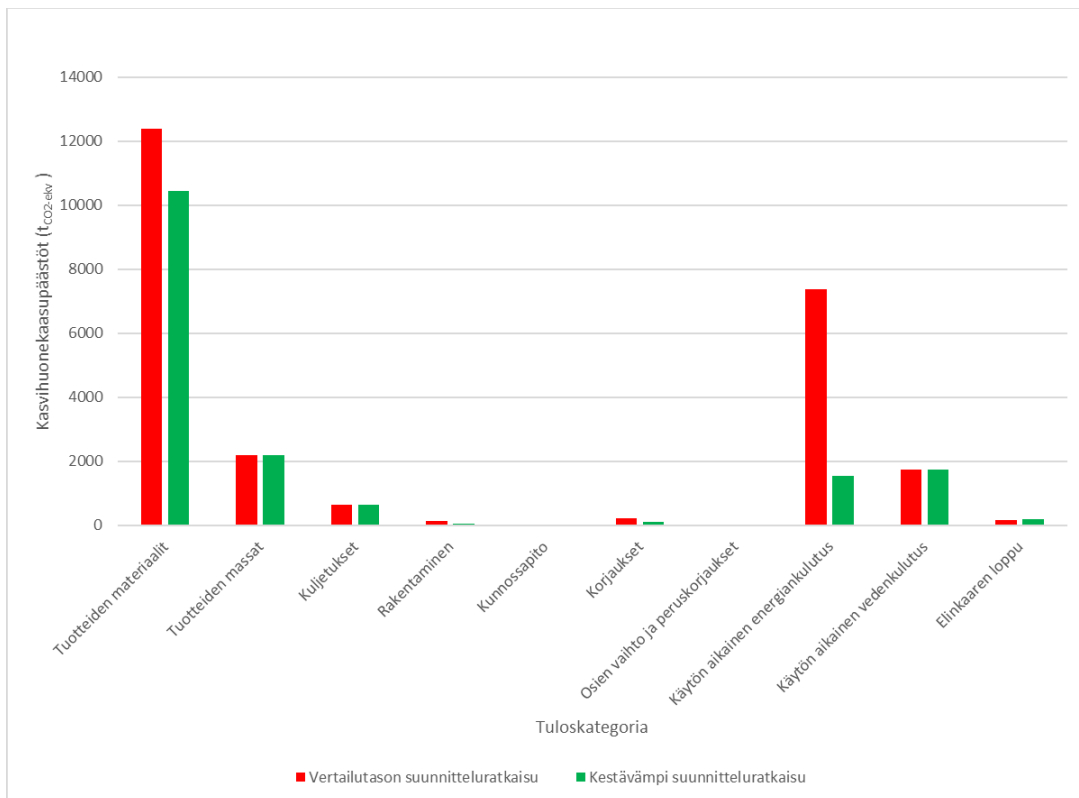
1. Toimeenpaneva yhteenveto,
2. laajuus ja tarkoitus,
3. elinkaarikustannusmallin kuvaus,
4. elinkaarikustannusmallin analyysi,
5. pohdinta,
6. johtopäätökset ja suositukset. (Kawauchi & Rausand 1999, 37.)

## 5 Laskenta ja menetelmät

### 5.1 Päästölaskennan menetelmät

Päästölaskennan toimintamallit jakautuvat elinkaariarviointiin ja hiilijalanjätkilaskentaan. Työkaluina käytettiin MS Office -ohjelmistoja Excel ja PowerPoint. Elinkaariarvioinnin varsinainen laskentaosuus voidaan tyypillisesti toteuttaa siihen käyttöön suunnitellulla valmiilla kaupallisella laskentaohjelmalla. Varsinaisen elinkaariarvioinnin työkaluna testattiin opiskelijaversiota ohjelmistosta One Click LCA. Muita tähän tarkoitukseen suunniteltuja kaupallisia ohjelmia ovat esimerkiksi GABI ja CIMA Professional.

Elinkaaripäästöjen tarkastelun havainnollistamiseksi luotiin yksinkertainen esimerkki rakennusprojektin elinkaaripäästöistä One Click LCA -ohjelmistolla. Esimerkkitarkastelussa testattiin kyseisen ohjelmiston käyttöä ja eri suunnitteluratkaisujen vertailua. Tarkastelussa määriteltiin kohteen käyttöiäksi 50 vuotta. Ohjelmistoon syötetyt tarkemmat lähtötiedot on esitetty liitteessä 1. Tarkastelun tulosvertailu on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11 Yksinkertainen esimerkki rakennusprojektin elinkaaripäästöjen arvioinnista

Kuvasta 11 ilmenee, että kyseisessä esimerkkitarkastelussa käytön aikana kulutettavan energian lähteen valinnalla saadaan suurin vaikutus elinkaaripäästöihin. Kyseisellä uusiutuvilla energiantuotantotavoilla tuotetun sähkön valinnalla keskiverto verkkosähkön sijaan kohteen energiankulutuksen ilmastovaikutukset saatiin putoamaan viidennekseen vertailutasosta. Kestävemmän suunnitteluratkaisun energiankulutuksen elinkaaripäästö syntyy kaukolämmöstä. Toiseksi suurin vaikutus kohteen elinkaaripäästöihin syntyi rakennusvaiheen materiaalivalinnoilla. Materiaaleissa suurin vaikutus syntyi betonista.

## 5.2 Kustannuslaskennan menetelmät

Työkaluina käytettiin MS Office -ohjelmistoja Excel ja PowerPoint. Elinkaarikustannuslaskentaan kehitettyjä julkisia, esimerkiksi Motivan (2018), laskentatyökaluja ei voitu suoraan hyödyntää elinkaarikustannustarkastelussa. Syynä tähän rajoitteeseen oli esimerkiksi niiden yksinkertaisuus.

Elinkaarikustannuslaskennassa arvonalenema ja inflaatio mitätöivät usein toisensa. Kyseisten muuttujien keskinäinen suhde määrittelee, ovatko ne merkittäviä muuttujia elinkaarikustannuksen kannalta. Inflaation vaikutus ilman arvonalenemaa voi sen sijaan olla erittäin merkittävä muuttuja elinkaarikustannuksen kannalta. Inflaation vaikutus jätetään elinkaarikustannusarvioinneissa joskus huomioimatta, koska sen vaikutus on tyypillisesti sama kaikille kustannuksille. (Eisenberger & Remer 1977.)

Elinkaarikustannusanalyysi voidaan tehdä joko valuutan vakioarvolle tai sen nykyarvolle. Vakioarvoisessa tarkastellussa ei huomioida inflaatiota. Nykyarvoisessa tarkastelussa huomioidaan inflaation lisäksi myös arvonalenemat ja hintaeskallaatio. Inflaatio ja yleinen rahan arvon muutos voidaan huomioida kappaleessa 4.3.5 esitetyillä yhtälöillä 2 ja 3. Nykyarvon määrittäminen sisältyy esimerkiksi kappaleessa 4.3 esitetyn yksittäisen komponentin elinkaarikustannusarvioinnin toimintamalliin.

Projektissa aikataulumuutos aiheuttaa useimmiten myös kustannusmuutoksen. Projektin keston pitkittyminen alkuperäisestä aikataulusta voi aiheuttaa projektin kannalta erittäin huomattavia kustannuksia esimerkiksi juoksevien kustannusten ja inflaation takia. Tästä syystä aikataulumuutos voi aiheuttaa projektille vastaavia kustannuksia kuin esimerkiksi merkittävä laajuusmuutos.

## 6 Toimintamallit

Toimintamallien luonnissa hyödynnettiin AFRY:n sisäisiä lähteitä ja tietotaitoa. Toimintamalleihin valittiin luvuissa 3 ja 4 esitetyt kirjallisuudesta peräisin olevat vaiheet. Kirjallisuuteen perustuviin toimintamalleihin lisättiin joitakin tarkennuksia ja elementtejä. Raportoidun lisäksi toimintamallien vaiheille luotiin sisäisiä yksityiskohtaisempia ohjeita, joita ei esitetä tässä työssä. Toimintamallit esitettiin vuokaavioina.

Luvussa 2.1 kuvatussa projektin elinkaareissa elinkaarikustannusten ja elinkaaripäästöjen arviointiprosessit sijoittuvat tyypillisesti kolmeen ensimmäiseen vaiheeseen, eli alustavien selvitysten, toteutusselvitysten ja kehittämisen vaiheisiin. Myöhäisin mahdollinen projektin vaihe mahdollistaa tarkimman mahdollisen arvioinnin. Kuitenkin arvioinneille saattaa olla tarvetta jo varhain, jotta niitä voidaan käyttää päätöksenteossa jo ennen varsinaista toteutusvaihetta.

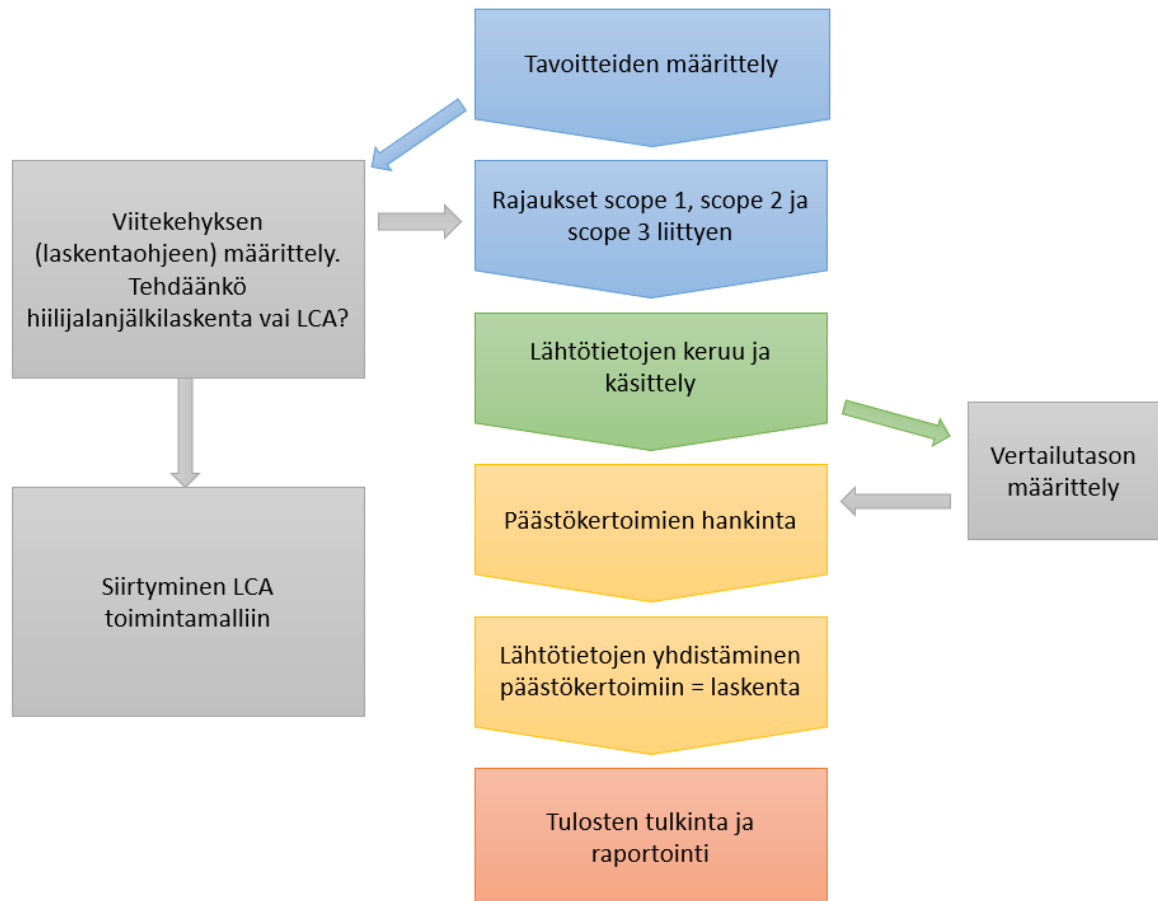
### 6.1 Päästöjen arvioinnin toimintamallit

Standardien ISO 14040 (2006) ja ISO 14044 (2006) mukaisen elinkaariarvioinnin toimintamallin lisäksi luotiin toimintamalli GHG-protokollaa myötäilevälle hiilijalanjälkilaskennalle. Yksinkertaiselle hiilijalanjälkilaskennalle todettiin olevan toistaiseksi enemmän kysyntää kuin laajalle elinkaariarvioinnille. AFRY Finland Oy:ssä on myös huomattu, että esimerkiksi teollisuusasiakkailla laajan elinkaariarvioinnin suorittamisen kynnyskysymykseksi voi muodostua vaatimus kolmannen osapuolen kriittisestä arvioinnista. Tässä haasteena voi olla esimerkiksi lähtötietojen salassapidettävyyteen liittyvät kysymykset. Kolmannen osapuolen kriittinen arviointiosuus on kuitenkin vaatimus elinkaariarvioinnin julkisen vertailukelpoisuuden verifiointiseksi. Toinen suuri rajoite kokonaisen elinkaariarvioinnin toteutukselle on usein hinta, sillä hiilijalanjälkiarviointi voidaan toteuttaa huomattavasti pienemmällä työtuntimäärällä kuin elinkaariarviointi.

Päästöjen arviointiprosessin määrittelemiseksi luotiin kaksi toimintamallia, joista toisella arvioidaan hiilijalanjälkeä ja toisella elinkaaripäästöjä. Kuvassa 12 on esitetty



hiilijalanjälkiarviointiprosessin toimintamalli, jossa voidaan laajuuden määrittelyvaiheessa vaihtaa sujuvasti elinkaariarvioinnin toimintamalliin.

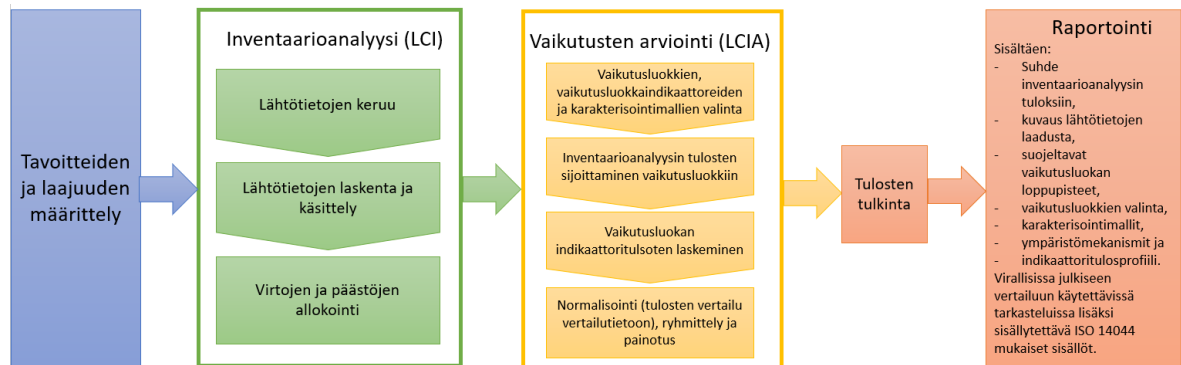


Kuva 12 Hiilijalanjäljen arviointiprosessi

Kuvan 12 toimintamallissa ensimmäisenä vaiheena on tavoitteiden määrittely, jossa määritellään myös tarkastelun viitekehys. Viitekehys määräytyy sen mukaan, aiotaanko tarkastella tuotteen, organisaation vai projektin hiilijalanjälkeä tai toteuttaa laaja elinkaariarviointi. Päästöjä tuottavilla tahoilla ei välttämättä ole erityisen tarkkaa käsitystä erilaisista päästöarviointien laajuuksista ja usein vasta arviointiprosessin laajuuden muotoutuessa selviää, tullaanko arvioinnissa tarkastelemaan hiilijalanjälkeä vai elinkaari-päästöjä. Useissa tapauksissa siis elinkaariarviointi (LCA) muuttuu laajuuden määrittelyn vaiheessa suppeammaksi, vain hiilidioksidipäästöjä koskevaksi arvioinniksi.

Kuvassa 13 on esitetty elinkaariarvioinnin toimintamalli, jossa ensimmäinen vaihe on tavoitteiden ja laajuuden määrittely. Toinen vaihe on inventaarioanalyysi (LCI), johon kuuluu tiedonkeruu, -laskenta ja -käsittely sekä virtojen ja päästöjen allokointi. Kolmantena vaiheena on vaikutusten arviointi (LCIA), sisältäen vaikutusluokkien käsittelyn sekä

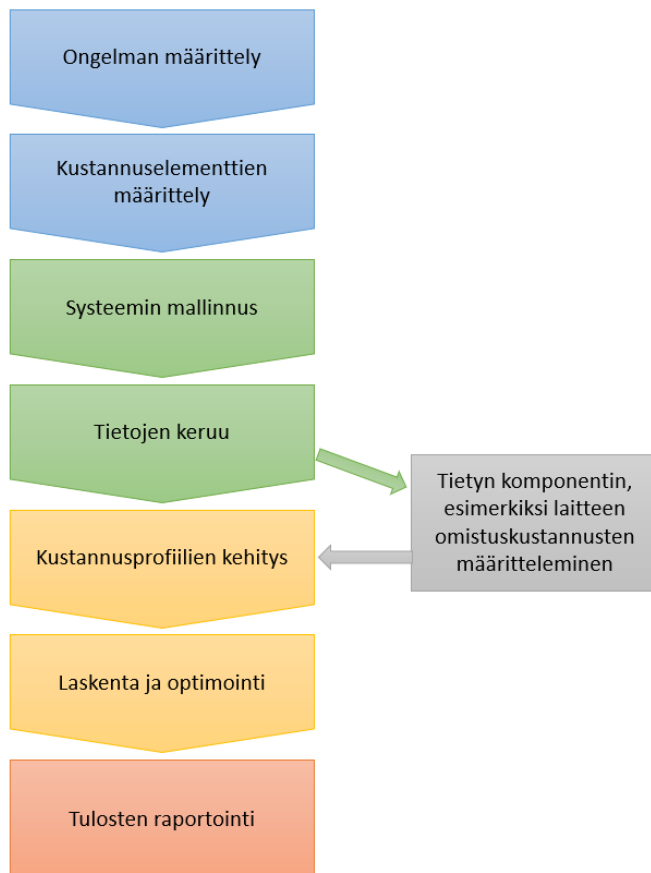
vertailun vertailutasoon. Sekä hiilijalanjälkiarvioinnissa että elinkaaripäästöjen arvioinnissa pyritään määrittelemään vertailutaso, johon saatuja ratkaisuvaihtoehtojen tuloksia verrataan. Joissain tapauksissa tarkoituksenmukaista vertailutasoa ei välttämättä voida määrittää. Tällöin vertailutason määrittelyn tarve arvioidaan tapauskohtaisesti. Viimeisinä vaiheina toimintamallissa on tulosten tulkinta ja raportointi.



Kuva 13 Elinkaariarvioinnin (LCA) toimintamalli

## 6.2 Elinkaarikustannusten arvioinnin toimintamalli

Elinkaarikustannusten arvioinnin toimintamallin vaiheet mukailevat kirjallisuusosuudessa kappaleessa 4.3 kuvattuja vaiheita. Toimintamalli on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14 Elinkaarikustannusten arvioinnin toimintamalli

Elinkaarikustannusten arviointiprosessin ensimmäinen vaihe on ongelman määrittely. Toisena vaiheena tehdään kustannuselementtien määrittely, jonka jälkeen suoritetaan systeemin mallinnus. Neljäntenä vaiheena on tietojen keruu. Tietojen keruun jälkeen tulee määrittellä kustannusten suuruus kustannuksia aiheuttavien komponenttien mukaan. Esimerkiksi teollisuuden investointiprojektissa eri laitteiden elinkaarikustannukset on määriteltävä usein erikseen, varsinkin hankinta ja operointikustannusten osalta. Tietyn komponentin yksinkertainen elinkaarikustannusten arvioinnin toimintamalli on esitetty kirjallisuusosuudessa kuvassa 8 kappaleessa 4.3. Seuraavaksi kehitetään kustannusprofiilit. Kustannusprofiilien kehittämisen jälkeen tehdään varsinainen laskenta ja optimointi. Viimeisenä vaiheena raportoidaan tulokset.

## 7 Tulosten analyysi ja luotettavuus

Elinkaarikustannusten havainnollistamiseksi luotiin esimerkki tuotantolaitoksen projektin kustannuselementtieroittelystä, jonka yhteydessä tarkasteltiin myös eri kustannuselementtien herkkyyttä. Herkkyysanalyysillä pyritään tunnistamaan lopputulokseen eniten vaikuttavat muuttujat ja löytämään järjestelmästä potentiaalisimmat kehityskohteet. Tässä työssä herkkyysanalyysissä tarkasteltiin eri kustannuselementtien muutoksen vaikutusta elinkaarikustannukseen  $\pm 30\%$  muutoksella.

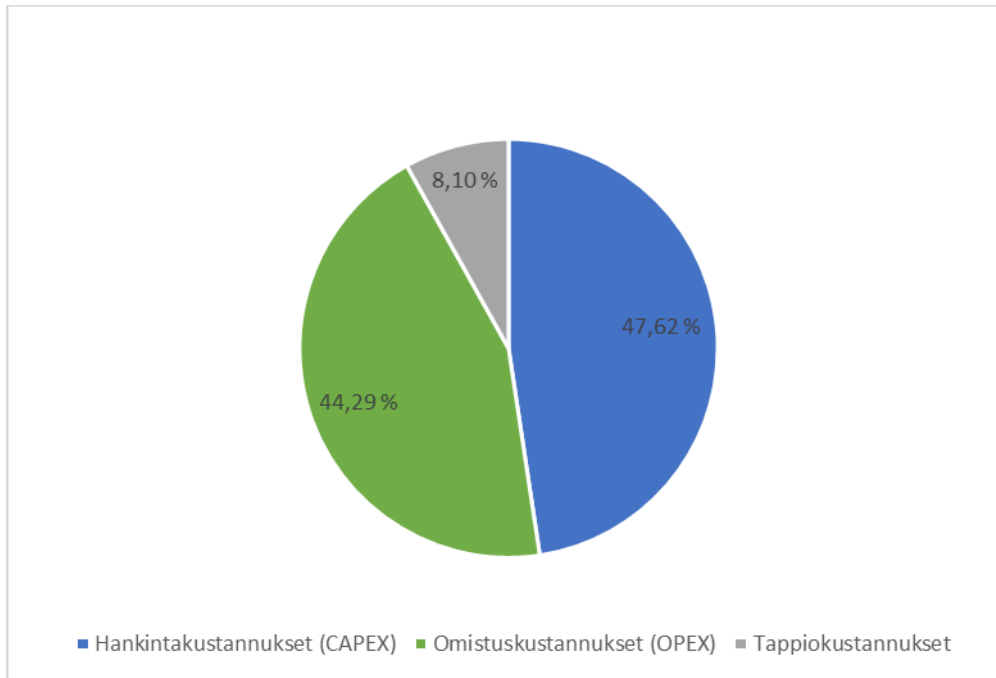
Taulukossa 4 on esitetty esimerkki tuotantolaitoksen projektin elinkaaren aikaisten kustannusten erittelystä. Kustannuselementtien osuus elinkaarikustannuksesta pohjautuu soveltuvin osin Junqueira et al. (2020) esittämään laitoksen kustannusjakaumaan. Kustannusjakauma on tästä huolimatta esimerkki, eikä se perustu kokonaisuudessaan mihinkään tiettyyn laitokseen.

Taulukko 4 Elinkaarikustannuselementtien vaikutuksen herkkyydestaulukko

Kustannuselementti	Kustannus M€	Osuus elinkaarikustannuksesta (%)	Herkkyys $\pm 30\%$ (%)
<b>1. Hankintakustannukset (CAPEX)</b>			
Laitteiden hankinta	2,5	11,90 %	$\pm 3,57$
Asennuskustannukset	2,4	11,43 %	$\pm 3,43$
Rakennuskustannukset	0,6	2,86 %	$\pm 0,86$
Välittömät varaosakustannukset	0,5	2,38 %	$\pm 0,71$
Uudelleeninvestointikustannukset	0,3	1,43 %	$\pm 0,43$
Suunnittelu- ja hallintokustannukset	0,7	3,33 %	$\pm 1,0$
Satunnaiset ja muut kustannukset	3	14,29 %	$\pm 4,29$
<b>2. Omistus(operointi)kustannukset (OPEX)</b>			
Työtunnit	1	4,76 %	$\pm 1,43$
Varaosat	0,5	2,38 %	$\pm 0,71$
Korjaava kunnossapito	0,3	1,43 %	$\pm 0,43$
Ennakoiva kunnossapito	0,3	1,43 %	$\pm 0,43$
Huollot	1	4,76 %	$\pm 1,43$
Logistiikka	1	4,76 %	$\pm 1,43$
Energiankulutus	5	23,81 %	$\pm 7,14$
Vakuutukset	0,2	0,95 %	$\pm 0,29$
<b>3. Tuotantotappiokustannukset</b>			
Tuotannon lykkäytymisen kustannukset	1	4,76 %	$\pm 1,43$
Vahinkokustannukset	0,5	2,38 %	$\pm 0,71$
Takuu/vakuus -kustannukset	0,2	0,95 %	$\pm 0,29$
<b>Yhteensä</b>			
1. Hankintakustannukset (CAPEX)	10	47,62 %	$\pm 14,29$
2. Omistus(operointi)kustannukset (OPEX)	9,3	44,29 %	$\pm 13,29$
3. Tuotantotappiokustannukset	1,7	8,10 %	$\pm 2,43$

Kyseisessä kuvitteellisessä investointiprojektissa elinkaarikustannukset jakautuvat hankinta-, omistus- ja tappiokustannuksiin. Käytettyjen kirjallisuuslähteiden tarjoamien kustannuselementtien lisäksi erittelyyn lisättiin hankintavaiheen satunnaiset kustannukset.

Satunnaisten kustannusten kustannusvarauksen lisäksi se sisältää esimerkiksi käyttöpääoman kustannuksia ja OSBL -kustannuksia. Erittelyssä ei ole huomioitu esimerkiksi tuotantojärjestelmän raaka-aine- ja hyödykevirtoja. Kyseisten virtojen huomioiminen voi kuitenkin olla joissain tapauksissa tarkoituksenmukaista.



Kuva 15 Kustannuskategorioiden osuus esimerkkiprojektin elinkaarikustannuksista

Kuvassa 15 on esitetty taulukon 4 tulokset ympyrädiagrammina. Elinkaarikustannus jakautui esimerkkiprojektissa kustannuskategorioksi siten, että hankintakustannukset olivat noin 47,62 %, käyttökustannukset noin 44,29 % ja tappiokustannukset noin 8,1 % elinkaarikustannuksesta.

Toimintamallien määrittelyssä yhdisteltiin teoriaosuudessa esitettyjä toimintamalleja sekä AFRY Finland Oy:n sisäisiä tietoja. Toimintamallien perustana käytetty kirjallisuus painottuu teollisuuden tarkasteluun. Tästä syystä toimintamallien soveltaminen teollisuuden ulkopuolella saattaa tuoda esiin erilaisia täsmennys- tai muutostarpeita. Esimerkiksi elinkaarikustannusten arvioinnissa tarkasteltiin vahvasti alakohtaista öljy- ja kemianteollisuuden kustannusjakaumaerittelyä. On huomiotava, että muiden alojen toiminnan kustannusten erittely voi olla tapauskohtaisesti hyvin erilainen.

Puutteet kerättävien lähtötietojen laadussa tai saatavuudessa luovat huomattavan epävarmuustekijän tuloksien luotettavuuteen sekä päästöjen että kustannusten arvioinnissa. On myös huomiotava, että elinkaari- ja päästöjen arvioinnissa tarkastellaan aina potentiaalisia

ympäristövaikutuksia, eivätkä sen tulokset ole tarkkoja ennusteita toiminnan tulevista todellisista vaikutuksista. Toimintamalleissa voidaan myös pitää epävarmuustekijänä tiettyjä poliittisia vaikutuksia. Esimerkiksi standardeihin perustuvissa toimintamalleissa voi ilmetä päivitystarpeita tulevaisuudessa, mikäli standardeihin julkaistaan päivityksiä. Lisäksi esimerkiksi eri kasvihuonekaasujen potentiaaliseen ilmastonlämmityskertoimeen voi tulla tulevaisuudessa päivityksiä, joista päästöarvioijan on oltava tietoinen.

Globaali taloustilanne ja maailman poliittiset ratkaisut aiheuttavat myös niin suurta epävarmuutta erityisesti tuotantolaitosten tulevaisuuden kannalta, että tässä työssä tarkasteltujen arviointien herkkyystarkastelun muutoksen prosentuaalista kokoa saattaa olla mielekäästä kasvattaa esitetystä 30 prosentista esimerkiksi 50 prosenttiin.

## 8 Johtopäätökset ja yhteenveto

Diplomityön tavoitteena oli tarkastella elinkaariarvioinnin ja elinkaarikustannusten arviointia sekä kehittää toimiva toimintamalli niiden arviointiin. Työssä tarkasteltiin projektin elinkaarta, kasvihuonekaasupäästöjen arviointia, elinkaaren aikaisten päästöjen arviointia sekä projektien kustannusten ja elinkaarikustannusten arviointia.

Projektin elinkaarella tarkasteltiin sen vaiheita aina alustavista selvityksistä jälkitoteutukseen ja arviointiin asti. Lisäksi määriteltiin projektitoiminto, jota käytetään päästöjen arvioinnissa. Kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa tarkasteltiin ympäristöjalan- ja -kädenjälkiä, päästökertoimia sekä GHG-protokollan mukaista hiilijalanjäljen arviointia. Elinkaaren aikaisten päästöjen arviointia tarkasteltiin standardeihin ISO 14040 (2006) ja ISO 14044 (2006) pohjautuen. Elinkaaren aikaisten kustannusten arvioinnissa käsiteltiin yleisesti projektien kustannusarviointia, investointikustannusten arviointia ja elinkaarikustannusarviointiprosessin vaiheita.

Teoriaosuudessa päädyttiin tarkastelemaan hiilijalanjälkiarviointia laajuussyistä lähinnä projekti-viitekehysten puitteissa. Kyseiseen viitekehykseen päädyttiin, koska sen koettiin suurella todennäköisyydellä kattavan suurimman osan ensisijassa toteutettavista hiilijalanjälkiarvioinneista.

Tarkastelussa päädyttiin siihen, että päästöjen ja kustannusten arviointiprosessista ei voida luoda yhtä sellaista riittävän tarkkaa toimintamallia joka soveltuisi molempien arviointiin, sillä se olisi ollut liian epätarkka käytettäväksi. Tästä syystä molemmille arviointikohteille luotiin oma toimintamalli. Tutkimuksen tavoitteiden lisäksi varsinaisen elinkaaritarkasteluiden lisäksi luotiin toimintamalli hiilidioksidipäästöjen arviointia varten. Hiilijalanjälkiarvioinnin ollessa pakollinen osa elinkaariarviointia, mutta myös oma potentiaalinen tuotteensa, päädyttiin kehittämään myös sen arviointivalmiuksia perehtymisen ja toimintamallin muodossa.

Tässä työssä luotuja toimintamalleja, menetelmiä ja aineistoja tullaan päivittämään tulevaisuudessa tarpeen mukaan. Jokaisessa arviointiprojektissa tullaan myös tarkastelemaan mahdolliset muutostarpeet tapauskohtaisesti laadun takaamiseksi.

Globaaleista ympäristöongelmista jo pitkään suurimman huomion ovat saaneet ilmastomuutos ja kasvihuonekaasupäästöt. Tästä syystä myös tehtävät päästöarviointit

ovat tyypillisesti painottuneet hiilijalanjälkiarviointeihin. Ympäristöasioiden huomiointi on kuitenkin edelleen lisääntymässä ja tarkentumassa ja myös tarve kattaville elinkaariarvioinneille tulee lisääntymään.

Diplomityön kirjallisuusosuudessa käsitellyt aihealueet muodostivat vahvan perustan toimintamallien muodostamiseen ja työn soveltavaa osaa varten. Kirjallisuuslähteissä mainitut, tutkimuksissa havaitut haasteet vastasivat AFRY Finland Oy:ssä havaittuja toteutuksellisia haasteita. Esimerkiksi haasteet lähtötietojen hankinnassa on todettu olevan yksi suurimmista epävarmuustekijöistä. Kirjallisuuskatsauksessa huomattiin, että tarkasteltujen päästöjen ja kustannusten arviointiin on kehitetty sekä yksikertaisia että monimutkaisia toimintamalleja.

Tulevaisuudessa toiminnan aiheuttamien päästöjen ja kustannusten kokonaisvaltaisen arvioinnin tärkeyden ja kysynnän ennakoidaan kasvavan. Kehittääkseen valmiutta vastata tähän kysyntään AFRY Finland Oy:n paikallispalvelut liiketoimintayksikkö halusi tarkastella kyseisten vaikutusten arviointia ja kehittää alustavat toimintamallit näiden tarkasteluun.

Diplomityössä ei käsitelty laajuussyistä tarkemmin elinkaariarviointiin kuuluvia päästöjä veteen tai maaperän. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa tulisi tarkastella kyseisiä päästömuotoja, niiden ollessa oleellinen osa elinkaariarviointia. Lisäksi arviointiprosesseissa tarvittavia erilaisia laskentapohjia tulisi kehittää, jotta tarkastellut uudet suunnittelupalvelut muotoutuisivat mahdollisimman tarkoituksenmukaisiksi.



## Lähteet

Bramsiepe, C., Franzen, M., Schembecker, G., Seifert, T. & Sievers, S. 2017. Fixed Capital Investment Estimation for Modular Production Plants. *Chemical engineering science* 158 (2017): 395–410.

Cabeza, L., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G. & Castell, A. 2014. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 29, 2014, Pages 394-416, ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>.

Cays, J. 2021. *An Environmental Life Cycle Approach to Design*. New Jersey Institute of Technology. ISBN 978-3-030-63802-3. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-63802-3>

Couper, James R. 2003. *Process Engineering Economics*. CRC Press/Taylor & Francis LLC, Boca Raton.

Eisenberger, I. & Remer, D. S. 1977. The Role of Interest and inflation Rates In Life-Cycle Cost Analysis. DSN Progress Report 42-43. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.5.2022]. Saatavissa myös PDF-muodossa: [https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress\\_report2/42-43/43L.PDF](https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report2/42-43/43L.PDF)

EPA 2007. GHG Emission Factors Hub. Center for Corporate Climate Leadership. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.3.2022]. Saatavissa: <https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub>

Elmakis, D. & Lisnianski, A. 2006. Life cycle cost analysis: Actual problem in industrial management. *Journal of business economics and management*. [Online] 7 (1), 5–8.

Gauche, R. & Kinney, C. L. 2006. What's in ISBL, OSBL, and The Factors? *AACE International transactions*. ES141-ES145.

IEC 60300-3-2. 2004. Collection of dependability data from the field. International Electrotechnical Commission.

IEC 60300-3-3. 1996. Life cycle costing. International Electrotechnical Commission.

- Junqueira, P. G. et al. 2020. Environ-economic analysis of conceptual intensification alternatives applied to the ethylbenzene production. *Computers & chemical engineering*. [Online] 136106783–.
- Kawauchi, Y. & Rausand, M. 1999. Life Cycle Cost (LCC) Analysis in Oil and Chemical Process Industries. Article in ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/228594034\\_Life\\_Cycle\\_Cost\\_LCC\\_Analysis\\_in\\_Oil\\_and\\_Chemical\\_Process\\_Industries](https://www.researchgate.net/publication/228594034_Life_Cycle_Cost_LCC_Analysis_in_Oil_and_Chemical_Process_Industries)
- Khan, M. W. & Ali, Y. 2020. Sustainable construction: Lessons learned from life cycle assessment (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA). *Construction innovation*. [Online] 20 (2), 191–207.
- Labuschagne, C. & Brent, A. C. 2005. Sustainable Project Life Cycle Management: the need to integrate life cycles in the manufacturing sector. *International journal of project management*. [Online] 23 (2), 159–168.
- Lang, H.J. 1948. Simplified approach to preliminary cost estimates. *Chem. Eng.*, 112-113.
- Motiva. 2018. Elinkaarikustannuslaskenta - LCC (Life Cycle Costing). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.2.2022]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kestavat\\_julkiset\\_hankinnat/tietopankki/elinkaarikustannuslaskenta\\_lcc\\_\(life\\_cycle\\_costing\)](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/elinkaarikustannuslaskenta_lcc_(life_cycle_costing))
- Muthu, S. S. 2021. LCA based carbon footprint assessment. 1st ed. 2021. [Online]. Gateway East, Singapore: Springer.
- SFS-EN ISO 14040. 2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Suomen standardoimisliitto SFS.
- SFS-EN ISO 14044:2006/A2:2020. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. Suomen standardoimisliitto SFS.
- SFS-EN ISO 14064. 2018. Kasvihuonekaasut Osa 1: Määrittelyt ja opastus kasvihuonekaasujen päästöjen ja poistojen laskennasta ja raportoinnista organisaatiotasolla. Suomen standardoimisliitto SFS.
- SFS-EN ISO 14067. 2018. Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista koskevat vaatimukset ja ohjeet. Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 14224. 2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries. Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.

SVT 2019. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2019. Suomen virallinen tilasto. Helsinki: Tilastokeskus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.11.2021]. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/khki/2019/khki\\_2019\\_2020-05-28\\_kat\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/khki/2019/khki_2019_2020-05-28_kat_001_fi.html)

SVT 2020. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020. Suomen virallinen tilasto. Helsinki: Tilastokeskus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.11.2021]. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/khki/2020/khki\\_2020\\_2021-05-21\\_kat\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-05-21_kat_001_fi.html)

SYKE 2022. Rakentamisen päästötietokanta. Suomen ympäristökeskus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.3.2022]. Saatavissa: <https://co2data.fi/>

van Vliet, O. P. . et al. 2009. Fischer–Tropsch diesel production in a well-to-wheel perspective: A carbon, energy flow and cost analysis. *Energy conversion and management*. [Online] 50 (4), 855–876.

Venkataraman, R. R. & Pinto, J. K. 2010. *Cost and Value Management in Projects*. 1. Aufl. Somerset: Wiley.

WRI & WBCSD 2004. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.2.2022]. Saatavissa: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>

WRI & WBCSD 2005. *The Greenhouse Gas Protocol for Project Accounting*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.2.2022]. Saatavissa: <https://ghgprotocol.org/standards/project-protocol>

WRI & WBCSD 2011. *The Greenhouse Gas Protocol: Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.2.2022]. Saatavissa: <https://ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard>

WRI & WBCSD 2022. About us. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.2.2022]. Saatavissa: <https://ghgprotocol.org/about-us>

Liite 1: Yksinkertaisen rakennusprojektin elinkaariarvioinnin syöttötiedot

	Vertailutason suunnitteluratkaisu	Kestävämpi suunnitteluratkaisu
<b>Maanrakennus ja massojen kuljetus</b>		
Betoni (50 t m2)	Yleinen	Yleinen
Teräspylväät (100 m)	Yleinen S355SJ	Yleinen S355SJ
Soramurskeen kuljetus muualle (10 t m3)	50-50 % kostea tilavuus	50-50 % kostea tilavuus
<b>Rakennusmateriaalit</b>		
Valmisbetoni C25/30 (1 t m3)	Tavallinen valmisbetoni	Vihreä, suuri sekoitepitoisuus
Kivivillaeristelevy (2 t m2)	Yleinen	Yleinen
Betoni C28/35 (25 t m3)	Yleinen	10-25% vaihtoehtoisia sidosaineita
Rakenneteräs (3 500 t kg)	Yleinen, 0% kierrätetty	Yleinen, 90% kierrätetty
Vesiohenteinen ulkomaali (500kg)	Yleinen	Yleinen
<b>Rakentamisprosessi</b>		
Rakennustyömaan vaikutukset (5 t m2)	Pohjoismaat keskiarvo	Pohjoismaat keskiarvo
Rakennusvaiheen sähkönkäyttö (100 MWh)	Keskiverto verkkosähkö, Suomi	Vihreä sähkö, Suomi
Rakennusvaiheen vedenkulutus (10 tm3)	Vesijohtovesi, puhdas ja jätevesi	Vesijohtovesi, puhdas ja jätevesi
Betonijäte (10 tkg)	Kierrätykseen	Kierrätykseen
<b>Käyttövaihe</b>		
Ylläpidon dieselinkulutus (1 t l)	Diesel	Biodiesel
Korjauksen betoninkulutus (300 m3)	Tavallinen C28/35	Tavallinen C28/35
Korjauksen rakenneteräkset (45 t kg)		Yleinen, 90% kierrätetty
Käytönaikainen kaukolämmön kulutus (100 MWh/vuosi)	Kaukolämpö, Suomen keskiarvo	Kaukolämpö, Suomen keskiarvo
Käytönaikainen verkkosähkön kulutus (600 MWh/vuosi)	Keskiverto verkkosähkö, Suomi	Vihreä sähkö, Suomi
Käytönaikainen vedenkulutus (50 t m3/vuosi)	Vesijohtovesi, puhdas ja jätevesi	Vesijohtovesi, puhdas ja jätevesi