

Sanna Kiviharju, Sanna Mikkola

**CMT- JA LASERHITSAUSPINNOITTEIDEN
ELINKAARIANALYYSI**

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Tuotantotalouden koulutusohjelma
Marraskuu 2017**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Marraskuu 2017	Tekijä/tekijät Sanna Kiviharju, Sanna Mikkola
Koulutusohjelma Tuotantotalouden koulutusohjelma		
Työn nimi CMT- JA LASERHITSAUSPINNOTTEIDEN ELINKAARIANALYYSI		
Työn ohjaaja Ilkka Rasehorn	Sivumäärä 54	
Työelämäohjaaja Ilkka Rasehorn		
<p>Tämä opinnäytetyö oli osa Centria-ammattikorkeakoulussa käynnissä ollutta hanketta CMT-business opportunies from coating and additive manufacturing. Työssä tarkastelimme metallien pinnoittamista CMT-hitsausmenetelmällä, eli Cold Metal Transferring, ja laserhitsausmenetelmällä. Vertailimme näitä kahta menetelmää tekemällä niistä elinkaarianalyysin. Vertailu tehtiin SimaPro-elinkaariohjelmistoa apuna käyttäen.</p> <p>Työssä käytiin myös lyhyesti läpi CMT- ja laserhitsauspinnoitusmenetelmät ja suojakaasujen ominaisuudet ja vaikutukset hitsaustulokseen. Lisäksi työssä käsiteltiin standardoitu elinkaarianalyysi kaikkine vaiheineen.</p>		
Asiasanat Allokointi, CMT, elinkaarianalyysi, laserpinnoitus, SimaPro, suojakaasu.		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date November 2017	Author/s Sanna Kiviharju, Sanna Mikkola
Degree programme Industrial Management		
Name of thesis Life Cycle Analysis of the coating created by cold metal transfer and laser cladding processes		
Instructor Ilkka Rasehorn	Pages 54	
Supervisor Ilkka Rasehorn		
<p>This thesis compares the environmental effects of two welding processes used for metal coating through life cycle analysis. The two welding methods are cold metal transfer and the laser cladding process. The initial assumption was, that the cold metal transfer welding process is superior to the laser cladding process in terms of environmental effects due to its considerably lower energy consumption. However, the closer investigation revealed that the material consumption of the welding methods is environmentally more critical than their energy consumption.</p> <p>In this thesis, both welding methods are briefly introduced. In addition, the shield gases related closely to the considered methods are presented as well as a standardized life cycle analysis. Finally, the life cycle analysis of the two considered welding methods is performed using the SimaPro analysis tool.</p>		

Key words cold metal transfer, laser cladding process, life cycle analysis
--

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

AM	additive manufacturing, materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä
CMT	cold metal transfer, kylmäkaarihitsausmenetelmä
CMT Twin	CMT-kaksoishitsausprosessi
Duplex	ruostumaton teräslaji
GaBi	elinkaarianalyysiin käytettävä ohjelmisto
Inconel 625	nikkeliseos
ISO	International Standardization for Organization, kansainvälinen standardisoimisjärjestö
LCA	life cycle analysis, elinkaarianalyysi
LCI	life cycle inventory, elinkaari-inventaarioanalyysi
LCIA	life cycle inventory analysis, elinkaarivaikutusarviointi
MIG / MAG	metal inert gas/metal active gas, kaasukaarihitsausmenetelmä
SFS	Suomen standardisoimisliitto
SimaPro	elinkaarianalyysiin käytettävä ohjelmisto
TIG	tungsten inert gas, kaasukaarihitsausmenetelmä
Umberto NXT	elinkaarianalyysiin käytettävä ohjelmisto

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO.....	1
2 METALLIEN PINNOITTAMINEN.....	3
3 CMT	5
3.1 CMT-hitsausprosessin kulku.....	5
3.2 CMT Twin.....	8
4 LASERPINNOITUS	11
4.1 Laserpinnoitus dynaamisella jauheensyöttö menetelmällä.....	11
4.2 Koaksaalinen pinnoituspää menetelmä.....	11
4.3 Laserpinnoituksen käyttö ja hyödyt	12
5. SUOJAKAASUT.....	13
5.1 Suojakaasun tehtävät.....	13
5.2 Suojakaasujen komponenttien vaikutukset	13
5.2.1 Argon (Ar).....	13
5.2.2 Hiilidioksidi (CO₂) ja happi (O₂)	14
5.2.3 Helium (He).....	14
5.2.4 Vety (H₂).....	14
5.2.5 Typpi (N₂).....	14
5.2.6 Typpimonoksidi (NO)	15
5.3 Suojakaasun valinnan taloudellinen merkitys	15
6 ELINKAARIARVIOINTI	16
6.1 Elinkaariarvioinnin (LCA) yleinen kuvaus	19
6.2 Elinkaariarvioinnin keskeiset piirteet	20
6.3 Tuotejärjestelmä.....	21
7 ELINKAARIARVIOINNIN VAIHEET	24
7.1 Elinkaariarvioinnin tavoitteet ja soveltamisalan määrittely (Vaihe 1)	24
7.2 Inventaarioanalyysi (Vaihe 2)	28
7.2.1 Tietojen kerääminen.....	30

7.2.2 Tietojen laskenta	32
7.2.3 Tietojen varmistaminen.....	32
7.2.4 Tietojen suhteuttaminen yksikköprosessiin ja toiminnalliseen yksikköön..	32
7.2.5 Järjestelmän rajojen tarkentaminen.....	33
7.2.6 Allokointi	33
7.3 Vaikutusarviointi (Vaihe 3).....	36
7.3.1 Vaikutusluokkien,niiden indikaattoreiden ja karakterisointimallien valinta .	36
7.4 Tulosten tulkinta (Vaihe 4).....	41
8 CMT- JA LASERHITSAUSPINNOITTAMISEN ELINKAARIANALYYSI	45
9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	51
LÄHTEET	52

1 JOHDANTO

Metallien käytöstä on muodostunut noidankehä. Kehä on lähtenyt kehittymään vuosikymmenten ajan raaka-aineiden lisääntyneenä kasvuna. Tämän kasvun myötä metallisten raaka-aineiden kirjo on laajentunut huomattavasti ja niiden joukkoon on tullut myös ihmisten tekemiä yhdisteitä. Metallien käytön kasvavaan tarpeeseen on haastavaa vastata johtuen raaka-aineiden rajallisista resursseista sekä tuottajamaiden maantieteellisistä sijainneista, unohtamatta lainsäädäntöä ja määräyksiä. Kierrätys vastaa osaltaan tämän noidankehän haasteisiin ja metalliteollisuus on hyödyntänyt metallien uusiokäyttöä jo pitkään. Metallien uusiokäytön tekee haastavaksi juuri metallien kirjo ja ihmisten tekemät yhdisteet, joiden vuoksi metallien erottelu on monimutkaista ja mahdollisesti kustannustehotonta.

Tässä työssä olemme tutkineet CMT-, eli cold metal transfer, ja laserhitsauspinnoitteiden elinkaarianalyysiä. Elinkaarianalyysiä voidaan käyttää tuotteen tai komponentin valmistukseen ja käyttöön liittyvien ympäristövaikutusten ymmärtämiseen ja käsittelyyn. Tuotteen ympäristönäkökulmat ja potentiaaliset ympäristövaikutukset käsitellään elinkaariarvioinnissa kattaen tuotteen koko elinkaaren aina raaka-aineiden uuttamisesta jätteiden loppusijoitukseen. Tässä työssä olemme keskittyneet CMT- ja laserhitsausprosessien elinkaarianalyysiin.

Tuotteiden ja komponenttien korjauksella ja kunnostuksella on tärkeä rooli kehän vaikutusten hillitsemisessä. Hitsauspinnoittaminen on yksi työkalu metallisten tuotteiden korjaukseen ja kunnostukseen. Hitsauspinnoittamisessa metallisen kappaleen pintaan tuodaan sulattamalla metallista lisäainetta, joka on koostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan erilaista materiaalia kuin perusmateriaali. Pinnoitteen ensisijainen tehtävä on parantaa pinnan kulumisen- tai korroosi-onkestävyyttä. Hyvälaatuisella hitsauspinnoittamisella voidaan metallisten komponenttien tai tuotteiden elinikää kasvattaa moninkertaisesti. Pinnoite on myös mahdollista tehdä uudelleen, kun pinnoite on kulunut loppuun. Näin saadaan uutta vastaava tuote tai komponentti murto-osalla uuden tuotteen tai komponentin resursseista, mikä omalta osaltaan auttaa keventämään ympäristökuormia.

CMT-hitsausmenetelmä soveltuu hitsauspinnoittamiseen. CMT-menetelmä on mullistanut erilaisten metallien hitsauksen, sillä CMT-hitsauksella saavutetaan parempi hitsauspisaran esteetikka kontrolloidulla metallinjuotolla ja matalla tulolämmöllä. CMT-prosessissa pinnoitemateri-

aalina voidaan käyttää esimerkiksi hyvin korroosiota kestäviä materiaaleja. CMT-hitsausmenetelmää voidaan käyttää perinteisen liittämisen ja pinnoittamisen ohella materiaalia lisäävänä menetelmänä. Tulevaisuuden näkymissä myös metallisia varaosia voitaisiin valmistaa suoraan paikan päällä materiaalia lisäävillä valmistusmenetelmillä, jolloin välttyttäisiin varaosien varastoimiselta sekä varaosien lähettämiseltä toiselle puolelle maailmaa. Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät vastaavat osaltaan myös kehän haasteisiin, sillä näitä menetelmiä hyödynnettäessä metallisen työstöjätteen määrä vähenee.

Laserpinnoitus on myös eräänlainen hitsauspinnoitusmenetelmä. Laserpinnoitus tarkoittaa sulakäsittelyä, jossa lasersäde on sulattanut perusaineen pintaa niin, että siihen voidaan pneumaattisesti tai painovoiman avulla syöttää lisäainetta. Laserpinnoittamisen selkeä etu muihin menetelmiin verrattuna on se, että pinnoitteen muodostamiseen käytetty lisäaine voidaan räätälöidä aina tarpeen ja tilanteen mukaan. Tällaisella tuotteen tai komponentin käyttöolosuhteisiin kustomoidulla pinnoitteella on oma tärkeä roolinsa kehän reunalla.

2 METALLIEN PINNOITTAMINEN

Metalleja pinnoitetaan niiden ominaisuuksien monipuolistamiseksi. Pinnoittamisella voidaan saavuttaa lukuisia lisäominaisuuksia perusmetalliin: sen ulkonäköä voidaan muuttaa, sen käyttöikä voidaan lisätä, voidaan säästää perusmetallin määrässä, rakennetta voidaan keventää tai voidaan saavuttaa sellaisia teknisiä ominaisuuksia, joita ei muutoin voisi saada aikaan. (Tunturi & Tunturi 1999, 8)

Pinnoittamisen taustalla voi olla perusmetallin korroosionesto eli suojaaminen ympäristön syövyttäviltä vaikutuksilta, tuotteen ulkonäön (värisävy, kiilto, himmeys, varoitusvärit tms.) säilyttäminen tai tiettyjen fysikaalisten erityisominaisuuksien aikaansaaminen. Näitä fysikaalisia erityisominaisuuksia ovat pintakovuuden lisääminen (kromaus, nitraus), kulutuksen ja repeilyn kesto (voiteluominaisuudet), juotosominaisuuksien parantaminen (tinaus), pintakerroksen sähkön- ja lämmönjohtavuuden parantaminen, tartuntakerroksen aikaansaaminen (fosfatoiointi), materiaalien tekeminen tiettyyn prosessiin tai käsittelyyn sopivaksi tai hygieenisiksi (elintarviketeollisuus), korjaus-, huolto- ja kunnossapitokysymysten vuoksi, taloudellisuuden vuoksi (hinta, saatavuus), tilapäissuojan aikaansaamiseksi sekä erikoistekniikan tarpeet (elektronikan piiritekniikka). (Tunturi ym. 1999, 8)

Pinnoitteen jalousaste voi olla jalompi tai epäjalompi perusmateriaaliin nähden ja niiden sähkökemiallinen jalousaste sanelee pinnoitetun rakenteen käyttäytymisen korroosiorasituksessa. Pinnoite suojaa perusmateriaalia korroosiorasituksilta siihen asti, kunnes siihen tulee joko valmistusvaiheessa tai käytön aikana niin syviä naarmuja tai huokosia, että perusmateriaali tulee esiin. (Tunturi ym. 1999, 8)

Energia- ja prosessiteollisuuden komponenteissa sekä kaivannaisteollisuuden laitteissa käytetään laajasti erilaisia hitsauspinnoitteita. Hitsauspinnoitusprosessissa kappaleen pintaan sulatetaan koostumukseltaan ja ominaisuuksiltaan erilaista metallista lisäainetta. Tämän prosessin funktio on parantaa pinnan kulumisen- ja korroosionkestävyyttä. Tyypillisesti hitsauspinnoittamiseen käytettäviä seoksia ovat ruostumattomat teräkset, nikkeli- ja kobolttiseokset sekä kovia karbideja sisältävät seokset. Komponenttien elinikää voidaan kasvattaa moninkertaisesti oikealla materiaalivalinnalla ja hyvälaatuisella hitsauspinnoitteella. Toisaalta pinnoite voidaan tehdä uudelleen, kun pinnoite on kulunut loppuun. Näin saavutetaan taloudellisia ja ympäris-

töedullisia vaihtoehtoja uusien komponenttien käytön sijaan. (Näkki 2017.) Teollisuuden tuottamista kasvihuonekaasuista 30% tulee materiaalin käsittelystä eli luonnon raaka-aineiden tai romutavaran muuttamisesta materiaaliraaka-aineiksi, jotka sitten jatkojalostetaan lopulliseksi tuotteeksi. Täten valmiiden tuotteiden korjaus ja kunnostus, ja siten metallien pinnoittaminen, ovat tärkeässä roolissa ympäristökuormien keventämisessä. (Leino, Pekkarinen & Soukka 2016.)

Hyvin ankarissa korroosio-olosuhteissa pinnoitteilla on rajallinen korroosionkestävyys. Tyypillisesti pinnoite vaurioituu käyttökelvottomaksi joko kulumalla tai korroosion vaikutuksesta. Näistä kahdesta korroosio dominoi pinnoitteiden vaurioitumistapauksia, vain pieni osa kuluu käyttökelvottomaksi. Pinnoitteen antama suoja korroosiota vastaan riippuu pääsääntöisesti kahdesta seikasta: pinnoitemateriaalin luontainen korroosionkestävyys ja pinnoitusmenetelmän tuottamista ominaisuuksista, joihin lukeutuvat pinnoitteen huokoisuus, halkeamat ja kiinnipysyvyys alustassa. Kovakromausta on käytetty hyvin erilaisissa korroosioympäristöissä ja sillä on todettu olevan hyvä korroosionkestävyys. Kuitenkin hyvin ankarassa ilmastollisessa korroosiorasituksessa, kuten suolavedessä, kovakromattu pinnoite ei ole kestävä. Tämä johtuu siitä, että kovakromipinnoite ei ole tiivis ja korrodoiva väliaine pääsee etenemään perusmateriaaliin. Lisäksi kovakromauksessa käytetään kuudenarvoista kromia, jolla on haitallisia terveys- ja ympäristövaikutuksia. Kovakromauksen sijaan pinnoittamiseen voitaisiin käyttää laserpinnoitusta tai CMT-prosessilla toteutettua pinnoitusta hyvin ankariin ilmastollisiin korroosio-olosuhteisiin. Näillä menetelmillä pinnoitemateriaalina voitaisiin käyttää hyvin korroosiota kestäviä materiaaleja, kuten nikkelseos Inconel 625 ja Duplex. Tosin nämä materiaalit ovat kalliita. (Näkki 2010.)

3 CMT

Hitsaamisella tarkoitetaan yleensä metallien liittämistä toisiinsa, vaikka muoviakin voi hitsata. Hitsauksessa osat liitetään yhteen käyttäen lämpöä ja/tai puristusta siten, että osat muodostavat pysyvän liitoksen. Metallien hitsauksessa tyypillisin lämmönlähde on valokaari, mutta lasersäde soveltuu hyvin myös tähän tarkoitukseen. Liittämisen lisäksi hitsausta voidaan käyttää perusmateriaalin pinnoittamiseen, jolloin voidaan vaikuttaa alkuperäisen materiaalin ominaisuuksiin kuten kulumisen- tai korroosionkestävyyteen. Liitoshitsauksen ja pinnoitushitsauksen välinen ero on siinä, että liitoshitsauksessa pyritään sulattamaan runsaasti liitettävien kappaleiden liitospintoja, kun taas pinnoittamisessa pyritään sulattamaan pinnoitettavan alustan perusmateriaalia mahdollisimman vähän. (Näkki 2017.)

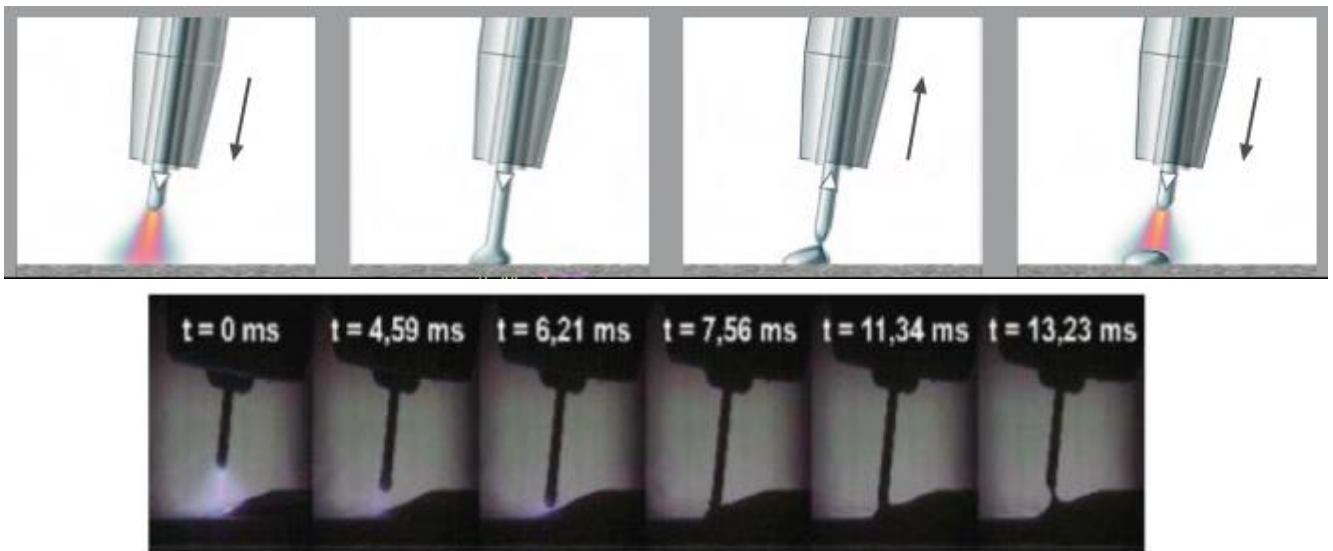
CMT on hitsausmenetelmä, jonka Fronius kehitti vuonna 2004. Fronius on itävaltalainen hitsauslaite valmistaja. CMT on kylmäkaarihitsausmenetelmä, jonka toiminta perustuu mekaniisiin muutoksiin lisäainelangan syöttönopeudessa ja syöttösuunnassa. Kylmäkaari menetelmässä hitsausprosessi on niin sanotusti kylmä, verrattuna perinteiseen MIG/MAG-hitsausprosessiin. (Lehti 2010, 18 – 19.) CMT on mullistanut erilaisten metallien ja paksumpien metallien hitsauksen tuottaen paremman hitsauspisaran estetiikan kontrolloidulla metallinjuotolla ja matalalla tulolämmöllä. CMT-hitsausta on perinteisen liittämisen ja pinnoittamisen lisäksi sovellettu autoteollisuudessa, puolustussektorilla ja sähkölaitoksissa materiaalia lisäävänä menetelmänä. (Selvi, Vishvaksenan & Rajasekar 2017.).

3.1 CMT-hitsausprosessin kulku

CMT-hitsausprosessissa langanliike on integroitu. Prosessiohjaus on digitalisoitu, jonka ansiosta se havaitsee lyhyenkin oikosulun ja langan syöttösuuntaa vaihdetaan silloin heti. Normaalisti lyhytkaarihitsauksessa lisäainelankaa syötetään koko ajan eteenpäin niin kauan, että se aiheuttaa oikosulun hitsattavan kappaleen ja lisäainelangan välille. Tässä tilanteessa virta nousee ja sula pisara irtoaa lisäainelangasta ja tästä seuraa uuden valokaaren syttyminen. Tämä jatkuva oikosulun aiheuttama virran nousu tuottaa runsaasti lämpöä hitsiin. Tästä seurauksena on pisaran irtoaminen lisäainelangasta rajulla tavalla ja se aiheuttaa hitsauksen roiskeet. (Lehti 2010, 18 – 19.)

CMT-hitsausmenetelmässä syöttölangan osuessa hitsauskappaleeseen ja oikosulun syttyessä langansuunta vaihdetaan takaisinpäin digitaalisen prosessiohjauksen ansiosta. Tätä lisäainelangan syöttösuuntaa vaihdetaan jopa 90 kertaa sekunnissa. Tämän taaksepäin vedettävän langanliikkeen ansiosta oikosulku on kontrolloitu ja täten virta pysyy pienenä (20 – 30% pienempänä verrattuna MIG/MAG-hitsaukseen), eikä tuota niin paljon lämpöä hitsiin. Tämä taas auttaa siihen, ettei synny hitsausroiskeita. (Pronius 2012.) Mekaaninen hitsauspisaran katkeaminen siis erottaa CMT-hitsausprosessin perinteisestä MIG/MAG-hitsausprosessista (Selvi ym. 2017).

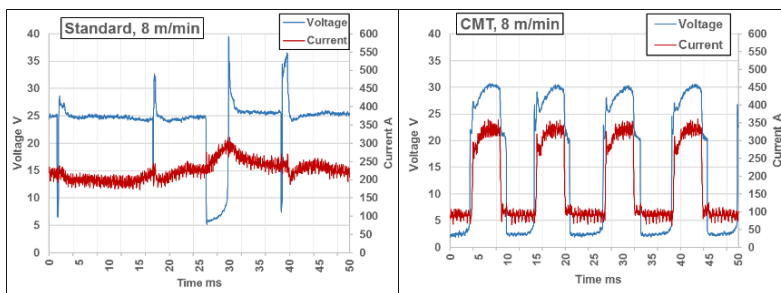
KUVASSA 1 on havainnollistettu CMT-hitsauksen toimintaperiaate ja valokaaren eri vaiheet. Ensimmäisessä ruudussa valokaari on syttynyt ja lisäainelanka siirtyy kohti hitsisulaa. Toisessa ruudussa on tilanne, jossa lisäainelanka koskettaa hitsisulaa ja tällöin valokaari sammuu. Hitsausvirta on tässä tilanteessa alennettuna. Kolmannessa ruudussa tapahtuu langan takaisinpäin veto, joka auttaa sulapisaran irtautumista oikosulun aikana. Neljännessä ruudussa lankaa taas syötetään kohti hitsisulaa ja prosessi alkaa alusta. (Pronius 2012.)



KUVA 1. CMT-hitsauksen toimintaperiaate (Lehti 2010, 19)

Lämpötilan vaihteluilla hitsissä ja perusmetallissa hitsauksen aikana on tärkeitä vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin, lisäkuormituksiin kuin myös hitsattujen tuotteiden ulottuvuuksiin ja muototarkkuuksiin. CMT tarjoaa kontrolloidun materiaalin juottomenetelmän ja matalan tulo­lämmön liittämällä yhteen innovatiivisen langansyöttöjärjestelmän nopean digitaalisen ohjauk-

sen kanssa. (Selvi ym. 2017) CMT-hitsausprosessi on aaltomuotokontrolloitu kaarihitsausmenetelmä (Selvi ym. 2017; Näkki 2017). Aaltomuotokontrolloidussa hitsausprosessissa jännitteen ja/tai virran aaltomuoto on kontrolloitu pisaran koon, tunkeuman, kostutuksen, palon muodon tai aineensiirtymismuodon ohjaamiseksi. Näkki on työssään esittänyt standardi-MIG ja CMT-prosessien mittaustuloksia virta-jännitekuvina. Standardi-MIGin jännite-virtakuvassa näkyy selvästi oikosulkujen aiheuttamat piikit jännitekuvasa, KUVA 2. CMT-hitsausprosessin virta-jännitekuvasa puolestaan käy hyvin ilmi aaltomuodon säännöllinen ja kontrolloitu luonne. Hitsauslankaa myös ohjataan samalla taajuudella virran ja jännitteen kanssa. (Näkki 2017)



KUVA 2. Virta- jännitekuvioita standardi-MIG- ja CMT-prosesseille (Näkki 2017)



KUVA 3. CMT-hitsausmenetelmällä hitsattu kappale

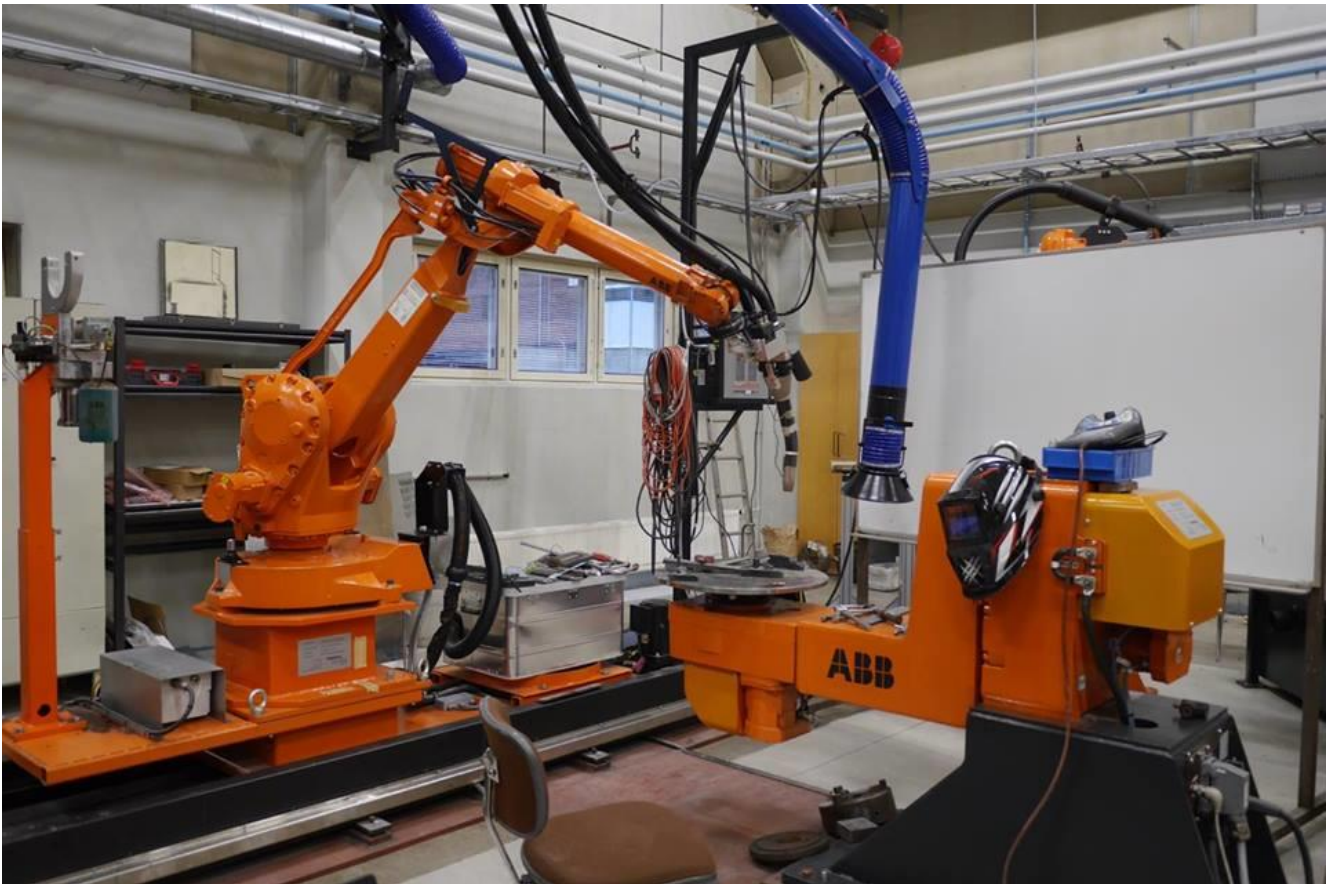
Ainetta lisäävä valmistus, ns. additive manufacturing (AM), on kerännyt osakseen valtavaa huomiota viime vuosien aikana (Näkki 2017; Leino ym. 2016). Tulevaisuuden visioissa koneiden tarvitsemia varaosia voitaisiin valmistaa suoraan paikan päällä AM-menetelmällä, eikä varaosia tarvitsisi varastoida taikka lähettää tarvittaessa toiselle puolelle maapalloa. CMT-prosessi soveltuu hyvin myös AM-menetelmäksi, koska menetelmän lämmöntuonti alustamateriaaliin on pienempi verrattuna perinteisiin kaarihitsausmenetelmiin. CMT-AM-menetelmällä saadaan tuotettua yksinkertaisia ja kookkaita muotoja, tuottavuuden ollessa parhaimmillaan yli 1 kg tunnissa. Lähteessä (Näkki 2017.) on käsitelty AM-menetelmällä valmistetun levymateriaalin ja valetun materiaalin mekaanisia ominaisuuksia ja korroosiokoetuloksia. Tulokset osoittavat, että CMT-AM-menetelmällä valmistetun materiaalin mekaaniset ja korroosiokesto-ominaisuudet vastaavat materiaalista valmistetun levyn tai valetun materiaalin ominaisuuksia. (Näkki 2017.) Ainetta lisäävillä valmistusmenetelmillä voidaan mahdollisesti vähentää materiaalin elinkaarta ja energiankulutusta verrattuna perinteisiin menetelmiin. Näissä perinteisissä menetelmissä valetaan ensin aihio, joka sitten työstetään halutuksi tuotteeksi. Tällaista työstöstä syntyvää metalliromua tai -jätettä ei synny, tai ainakin sen määrä vähenee, käytettäessä materiaalia lisäävää valmistustekniikkaa. (Morrow, Qi, Kim, Mazumder & Skerlos 2007.) KUVASSA 3 on esitetty CMT-hitsausmenetelmällä hitsattu kappale.

3.2 CMT Twin

Tässä projektissamme on käytössä CMT Twin laitteisto, joka on liitetty ABB:n hitsausrobottiin, jotka on esitetty KUVISSA 4 ja 5.



KUVA 4. CMT twin laitteisto



KUVA 5. Hitsausrobotti

CMT twin eli kaksoishitsausprosessijärjestelmässä on kahden erikseen ohjattavan virtalähteen synkronoitu käynnistys, kaksi lankaelektrodia ja kaasusuutin. Tämän prosessin ansiosta hitsaustuloksessa päästään syvään tunkeumaan, railon seinämät sulavat optimaalisesti, hitsauskaari on vakaa ja hitsausroiskeiden määrä on vähäistä. (Pronius 2012.)



KUVA 6. CMT twin eli kaksoishitsausprosessi (Pronius 2012, 1)

4 LASERPINNOITUS

Laserpinnoitusmenetelmät jaotellaan lisäaineentuontitavan mukaan. Lisäaine voidaan tuoda dynaamisella jauheensyötöllä suoraan prosessiin tai sulattamalla lasersäteellä pinnoite. Kummallakin menetelmällä on mahdollisuus valmistaa ominaisuuksiltaan samankaltaisia pinnoitteita. Jauheensyöttö pinnoitus soveltuu paremmin paksummille (>0,5mm) pinnoitteille ja pinnoitteen sulatus ohuiden (<0,5mm) pinnoitteiden valmistukseen. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005,189.)

4.1 Laserpinnoitus dynaamisella jauheensyöttö menetelmällä

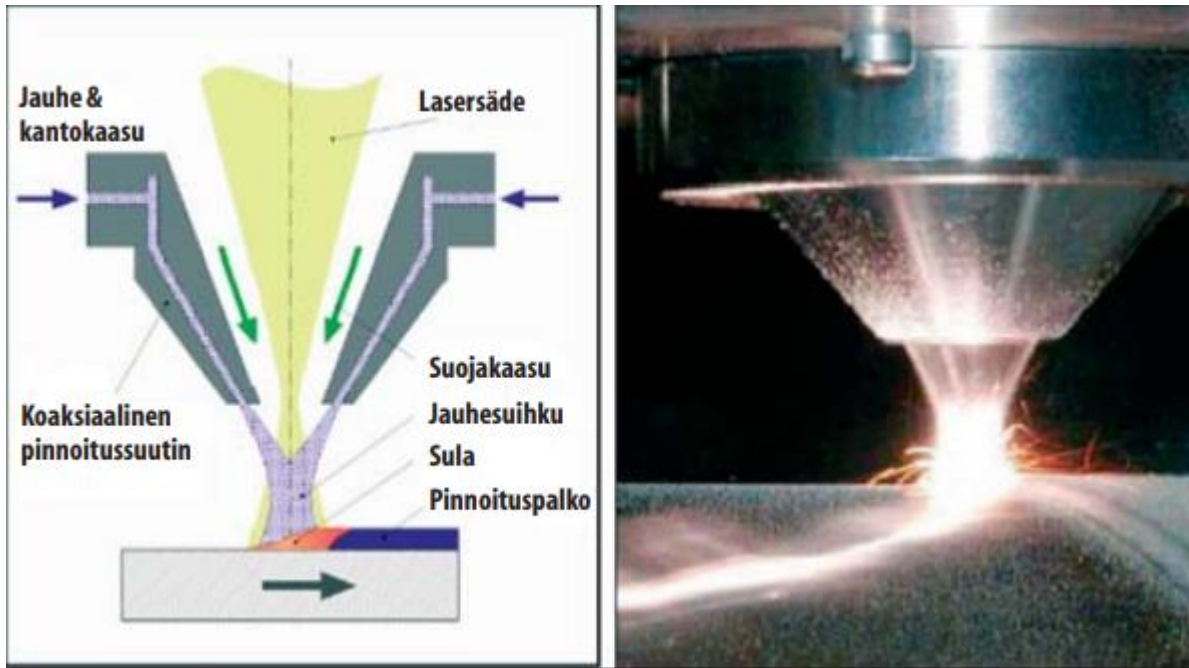
Opinnäytetyöprosessissamme on käytössä laserpinnoitus dynaamisella jauheensyötöllä, joten syvennymme vain tähän menetelmään tarkemmin. Laserpinnoitus tarkoittaa sulakäsittelyä, jossa lasersäde on sulattanut perusaineen pintaa niin että siihen voidaan pneumaattisesti tai painovoiman avulla syöttää lisäainetta. Tähän pinnoitusprosessiin ja pinnoitteen tasalaatuisuuteen vaikuttaa moni asia. Jauheensyötön parametrien on oltava optimoitu huolellisesti. Näitä parametreja ovat jauheensyöttönopeus (g/min), jauheen partikkelikoko (μm), kantokaasun virtausnopeus (l/min), jauheen tiheys (g/cm^3), jauhepartikkelien säteessä olo aika (s) sekä jauhesuihkun kohdistus. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005,189.)

Dynaamisessa jauheensyöttömenetelmässä lisäaine tuodaan jauheena säteen ja perusaineen väliselle vuorovaikutusalueelle joko säteen sivusta (off-axis-menetelmä) tai samanaikaisesti säteen kanssa koaksaalisen pinnoituspään avulla. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005,193.) Tässä projektissa on käytössä jälkimmäinen tapa.

4.2 Koaksaalinen pinnoituspää menetelmä

Koaksaalisen pinnoituspään rakenne koostuu kolmesta suuttimesta jotka ovat sisäkkäin. Lasersäde kulkee sisimmässä suuttimessa suojakaasun kanssa. Kantokaasu kulkee keskimmissä suuttimessa jauheen kanssa, ja ulommainen suutin on suojakaasulle. Koaksaalisessa menetelmässä jauheenkäytön hyötysuhteessa voidaan päästä jopa 90% :iin. Epätarkka jauhesuihkun kohdistus polttopisteeseen voi laskea hyötysuhdetta jopa 20 – 30 % :n tasolle. (Kujanpää ym. 2005,190 – 193.)

Koaksiaalinen pinnoituspää lisää pinnoitukseen vapaampaa liikettä koska pinnoituspäätä voidaan liikuttaa x – y -tasossa. Etuina tässä menetelmässä on tehokas jauhepartikkelien sulaminen ja syöttötapa mahdollistaa suurien jauhemäärien sulatuksen ja suuremmat pinnoitusnopeudet. (Kujanpää ym. 2005,190 – 193.)



KUVA 7. Laserpinnoituksen periaate- ja prosessikuva. (Korpisalo 2006, 2)

4.3 Laserpinnoituksen käyttö ja hyödyt

Laserpinnoitusta voidaan käyttää niin uudiskohteisiin kuin myös kunnossapidon kohteisiin. Laserpinnoituksen hyötyjä on komponenttien raaka-aine ja valmistuskustannuksien aleneminen. Kustannussäästöjä voidaan saavuttaa esimerkiksi käyttämällä perusainetta, joka on edullisempaa, käyttövarmuuden parantuminen, tuotteen eliniän piteneminen ja pääoma joka sidottu varasiin pienenee. (LCC 2012.)

5. SUOJAKAASUT

CMT-hitsaus ja laserpinnoitusprosesseissa käytetään erilaisia suojakaasuja. Niillä on omat tehtävänsä prosessin onnistumisen kannalta ja niillä voidaan myös vaikuttaa kustannuksiin.

5.1 Suojakaasun tehtävät

Suojakaasun tehtävänä on suojata hitsisulaa, elektrodiä, lisäainelangan päätä ja sulia lisäainepisaroita typeltä ja ilman hapelta. Suojakaasu myös antaa valokaarelle hyvät edellytykset palaa siten, miten sen toivotaan palavan. (Lepola & Makkonen 2005, 110.)

Jos ilma pääsee kosketukseen kuumen metallin ja hitsisulan kanssa tapahtuu reaktio, jossa ilman happi alkaa hapettamaan sulaa metallia ja sen ympäristöä. Huokoisuutta hitsiin taas aiheuttaa, jos ilman typpi ja kosteus pääsevät sulaan metalliin. Roiskeiden määrään ja kokoon vaikuttaa suojakaasun koostumus ja miten aineensiirtyminen tapahtuu sulavasta lisäainelangasta hitsisulaan. Suojakaasun avulla myös vaikutetaan hitsaustuloksen ulkonäköön, muotoon, hitsausnopeuteen, seosaineiden palamishäviöihin, korroosio-ominaisuuksiin ja oksidien muodostumiseen. Seosaineiden palamishäviöt vaikuttavat hitsin lujuuteen ollen täten hyvin merkittävä vaikutusalue. (AGA 2003, 4.)

5.2 Suojakaasujen komponenttien vaikutukset

Suojakaasujen eri komponenteilla on erinäisiä vaikutuksia suojakaasun ominaisuuksiin. Komponentit vaikuttavat myös siihen, mille metalleille mitäkin suojakaasuseosta on hyvä käyttää.

5.2.1 Argon (Ar)

Argon on pääkomponentti useimmissa hitsauksen suojakaasuissa. Ominaisuuksiltaan argon on inertti reagoimaton kaasu, se ei hapeta eikä muuta mitenkään hitsin kemiallista koostumusta. (AGA 2003, 5.)

5.2.2 Hiilidioksidi (CO₂) ja happi (O₂)

Jos suojakaasu tarvitsee hapettavan komponentin (esim. MAG-hitsauksessa), kaaren epävakauden takia silloin suojakaasuun lisätään hiilidioksidia, happea tai näiden komponenttien yhdistelmää. Terästyypin ja hitsattavan kappaleen rakenteesta riippuen, hapettavan komponentin määrä vaihtelee. Hiilidioksidi on edullisempaa käyttää ja argon-hiilidioksidin yhdistelmällä saadaan parempi geometria ja ulkonäkö. Tunkeuma on myös parempi tällä yhdistelmällä. (AGA 2003, 5-6.)

5.2.3 Helium (He)

Helium on inerttikaasu, jota käytetään yhdessä argonin kanssa. Seokseen lisätään myös muutama prosentti hiilidioksidia tai happea. Tätä kaasu tyyppiä käytetään ruostumattomien terästen MAG-hitsauksessa. Puhdas helium tai helium-argonseos on hyvä suojakaasu TIG- ja MIG-hitsauksessa. Helium suojakaasun hyviä ominaisuuksia on parempi sivutunkeuma verrattuna argoniin. Jos halutaan, että kaasu nousee ylöspäin juurensuojauksen aikaansaamiseksi, tällöin helium ja argon-heliumseokset ovat hyviä valintoja. (AGA 2003, 6.)

5.2.4 Vety (H₂)

Vedyn lisääminen suojakaasuun auttaa antamaan kuumemman ja keskitetyimmän valokaaren. Tämä mahdollistaa nopeampaan hitsausnopeuteen sekä parempaan tunkeumaan, myös hitsin hapettuminen vähenee. Suojakaasua johon on lisätty vetyä, käytetään austeniittisten ruostumattomien terästen TIG-hitsauksessa. (AGA 2003, 6.)

5.2.5 Typpi (N₂)

Suojakaasu typpi seoksella on hyvä seos käytettäväksi ruostumattomien austeniittisten ja superduplex-terästen TIG-hitsauksessa. Typpi parantaa teräksen lujuutta, ehkäisee pistekorrosiota sekä ehkäisee hitsauksen aikana tapahtuvaa typpi katoa hitsissä. (AGA 2003, 7.)

5.2.6 Typpimonoksidi (NO)

Typpimonoksidin lisääminen suojakaasuun vähentää otsonin määrää jota syntyy hitsauksessa. Otsoni aiheuttaa hitsaajalle limakalvo ärsytystä, joten typpimonoksidi lisäys suojakaasuun parantaa hitsaajan työympäristöä. Tämä vaikuttaa myös hitsaajan keskittymiskykyyn, tuottavuuteen ja hitsauksen laatuun. (AGA 2003, 7.)

5.3 Suojakaasun valinnan taloudellinen merkitys

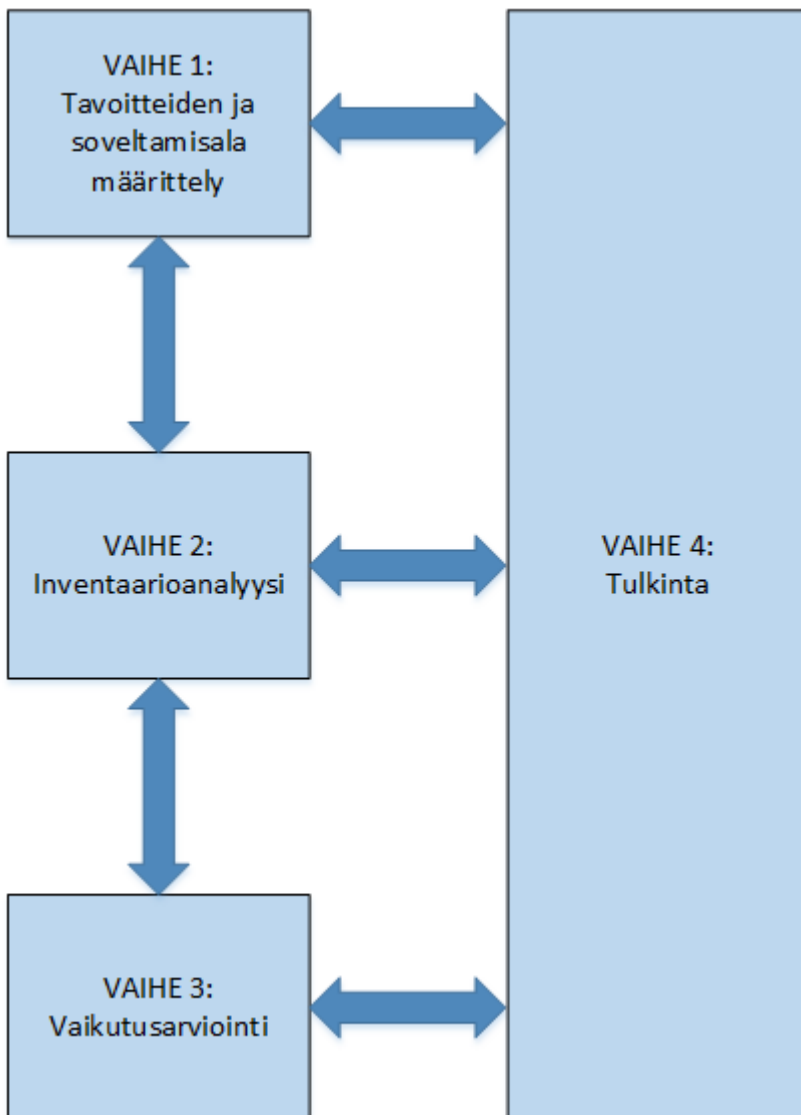
Suojakaasun valinnalla voidaan vaikuttaa hitsauksen kokonaiskustannuksiin tuotettua yksikköä kohti. Suojakaasu, lisäaine, kunnossapito ja energia muodostavat yhdessä pienen osan kokonaiskustannuksista. Suurin osa kustannuksista jakaantuu työ- ja pääomakustannuksista. Työkustannuksia voidaan pienentää valitsemalla oikea suojakaasu. Suojakaasulla joka mahdollistaa suuren hitsausnopeuden, pystytään kasvattamaan lisäaineentuottoa. Suojakaasu joka mahdollistaa vähäroiskeisen hitsaustapahtuman auttaa vähentämään jälkityön määrää vähentäen näin työkustannuksia. Laatutasoa voidaan myös ohjata oikealla suojakaasuvalinnalla. Suojakaasujen hintaerot ovat kuitenkin minimaalisia, joten tuottavuuden kannalta parhaan suojakaasun valinta antaa kokonaiskustannuksiin säästön. (AGA 2003, 18-21.)

6 ELINKAARIARVIOINTI

Teollisen vallankumouksen aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin on havahduttu viimeisten parin vuosikymmenen aikana ja nykyään globaaliksi tavoitteeksi on muodostunut ilmastonmuutoksen torjuminen. Yksi tähän tavoitteeseen tähtäävistä toimista on Euroopan komission vuonna 2015 hyväksymä kiertotalouspaketti, jossa esitetään tuotteen koko elinkaaren kattavia toimenpiteitä suunnittelusta, hankinnasta, tuotannosta ja kulutuksesta jätehuoltoon sekä uusioraaka-aineiden markkinointiin. Kiertotaloudessa materiaalit ja raaka-aineet pyritään hyödyntämään mahdollisimman hyvin, mahdollisimman pitkään, jätettä ei ole. Tuotteita ajatellaan koko elinkaaren kautta, ja elinkaari alkaa aina loputtuaan uudestaan. (EU komissio 2015; Leino ym. 2016.) Kiertotalouden avulla pyritään luonnonvarojen kestäväan käyttöön, resurssiviisauteen. Neitseellisillä materiaaleilla ei välttämättä pystytä vastaamaan raaka-aineiden kasvavaan kysyntään. (Kanala-Salminen 2017) Kiertotalous ja lainsäädäntö kulkevat käsi kädessä ja lainsäädännöllä voikin olla ratkaiseva merkitys kiertotalousinnovaatioiden menestyksen kannalta. Lainsäädännön näkökulmasta on olennaista, luokitellaanko materiaali jätteeksi, sivutuotteeksi vai end-of-waste-materiaaliksi (materiaali, joka on aiemmin ollut jätettä). (Alaranta 2017.)

Teknologian nopeasta kehityksestä odotetaan vastauksia ja työkaluja myös ympäristökysymyksiin. Teknisten ratkaisujen lisäksi, ympäristöongelmien ratkaisujen tulisi olla kustannustehokkaita sekä niiden tulisi vastata lainsäädäntöä ja säädöksiä (Lundström 2017). Nykyisin on jo kehitetty työkaluja tuotteiden, palveluiden ja prosessien ympäristövaikutuksien arviointiin. Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment –LCA) on eräs tällaisista työkaluista, joka on kehitetty tuotteiden valmistukseen ja käyttöön liittyvien ympäristövaikutusten ymmärtämistä ja käsittelyä varten.

Tuote on määritelty elinkaariarviointia käsittelevässä kansainvälisessä ISO-standardissa miksi tahansa tavaraksi tai palveluksi. Tuotteet on luokiteltu standardissa seuraavasti: palvelut (esim. kuljetus), tietotuotteet (esim. tietokoneohjelma, sanakirja), tavaratuotteet (esim. koneenosa), prosessoidut materiaalit (esim. voiteluaine). Lisäksi palvelut voidaan jakaa aineellisiin ja aineettomiin osiin. Palvelun tuottaminen voi olla esimerkiksi: toimenpide, joka suoritetaan asiakkaan tavaratuotteelle (esim. auton korjaaminen); toimenpide, joka suoritetaan asiakkaan aineettomalle tuotteelle (esim. ennakonpidätystodistus); aineettoman tuotteen toimittaminen (esim. informaation antaminen tiedonvälityksen yhteydessä); ilmapiirin luominen asiakkaalle (esim. hotelleissa tai ravintoloissa). (SFS-EN 14040, 14.)



KUVIO 1. Elinkaarianalyysin vaiheet. (SFS-EN 14040, 8)

Elinkaariarviointia voidaan käyttää parantamaan tuotteiden ympäristösuorituskykyä sen elinkaaren eri vaiheissa, lisäämään ympäristötietoisuutta teollisuuden, julkishallinnon tai järjestöjen päätöksenteossa (esim. strategista suunnittelua, prioriteettien asettamista, tuotteiden tai prosessien suunnittelua tai kehittämistä varten), sopivien ympäristösuorituskyvyn indikaattoreiden ja mittausmenetelmien valintaan tai markkinointitarkoituksiin (esim. erilaisten ympäristömerkintäohjelman toteutumisessa, ympäristöväittämien laatimisessa tai tuotteen ympäristöselosteen tekemisessä). Tuotteen ympäristönäkökulmat ja potentiaaliset ympäristövaikutukset käsitellään elinkaariarvioinnissa. Arviointi kattaa tuotteen koko elinkaaren, ns. kehdestä hautaan periaatteella, raaka-aineen uuttamisesta tuotantoon, käyttöön, käytöstä poistoon ja

jätteiden loppusijoitukseen. Elinkaariarviointi koostuu neljästä eri vaiheesta, joita on havainnollistettu KUVIOSSA 1. (SFS-EN 14040, 8.; Sangwan, Herrmann, Egede, Bhakar & Singer 2016.)

Elinkaariarvioinnin soveltamisala koostuu järjestelmän rajoista ja yksityiskohtaisuuden tasosta. Järjestelmän rajat määritellään kriteerijoukkona, joilla selvitetään, mitkä yksikköprosessit ovat osa tuotejärjestelmää. Aihe ja selvityksen käyttötarkoitus määrittävät elinkaariarvioinnin soveltamisalan. Elinkaariarvioinnin tarkkuus ja mittasuhteet voivat vaihdella suuresti selvityksen päämäärästä riippuen. Elinkaariarvioinnin toinen vaihe on inventaarioanalyysivaihe (LCI-vaihe), mikä on elinkaariarvioinnin ydin ja aikaa vievin vaihe. Inventaariovaiheessa selvitetään järjestelmän syöte- ja tuotostiedot ja siihen sisältyy määritellyn selvityksen kannalta tarvittavan tiedon kerääminen. Inventaario on iteratiivinen prosessi. Elinkaarianalyysin kolmannessa vaiheessa, vaikutusarviointivaiheessa (LCIA), saadaan lisätietoa tuotejärjestelmän inventaarioanalyysin tulosten arvioinnin tueksi. Uudet, tunnistetut tietovaatimukset ja rajoitukset voivat edellyttää tiedonkeruun menettelytapojen muuttamista arvioinnin tavoitteiden saavuttamiseksi. Joskus selvityksen tavoitteet tai soveltamisala tulee määritellä uudelleen tunnistettujen asioiden pohjalta. Elinkaariarvioinnin viimeinen vaihe on tulosten tulkinta. Vaiheen tarkoituksena on yhdistää kahden edellisen vaiheen, inventaarioanalyysin (LCI) ja vaikutusarvioinnin (LCIA), tulokset joko erikseen tai yhdessä siten, että niitä käsitellään johtopäätösten, suositusten ja päätöksenteon pohjaksi ensimmäisessä vaiheessa määritellyllä tavalla. Elinkaari-inventaarioselvitys (LCI-selvitys) on samankaltainen elinkaariarvioinnin kanssa, mutta niistä puuttuu vaikutusarviointivaihe. (SFS-EN 14040, 8.;Tonteri 1998.)

Päätöksenteon tukena voidaan käyttää elinkaariarviointiselvityksistä saatuja tuloksia. Jotta useat eri selvitykset olisivat keskenään vertailukelpoisia, oletukset ja asiayhteys tulee olla eri arvioinneissa samoja. Tästä syystä elinkaariarviointia koskevissa ISO-standardeissa on laadittu useita vaatimuksia ja suosituksia, joilla taataan läpinäkyvyys eri selvitysten välillä. (SFS-EN 14040,10.)

Elinkaariarviointi voidaan nähdä ensisijaisesti ympäristöasioiden hallinnan tekniikkana (riskien hallinta, ympäristösuorituskyvyn arviointi, ympäristöauditointi tai ympäristövaikutusten arviointi). Tuotteen taloudellisia ja yhteiskunnallisia näkökulmia ei yleensä tarkastella elinkaariarvioinnin yhteydessä, mutta elinkaari-lähestymistapaa ja menetelmätekniikkoja voidaan soveltaa myös näihin näkökohtiin. (SFS-EN 14040,10.)

6.1 Elinkaariarvioinnin (LCA) yleinen kuvaus

Tuotteen koko elinkaari raaka-aineen hankinnasta energian ja materiaalin tuotannon ja valmistuksen kautta käyttöön ja käytöstä poistoon sekä jätteiden loppusijoitukseen käsitellään elinkaarianalyysissä. Ympäristökuormien siirtyminen tuotteen elinkaaren eri vaiheiden tai yksittäisten prosessien välillä voidaan tunnistaa ja mahdollisesti välttää käyttämällä elinkaarianalyysin kaltaista järjestelmällistä katsausta. Elinkaarianalyysi keskittyy pelkästään tuotejärjestelmän ympäristönäkökohtiin ja -vaikutuksiin eikä sisällä taloudellisia ja yhteiskunnallisia näkökulmia ja vaikutuksia. Laajempia analyysijä voidaan toteuttaa yhdistämällä elinkaarianalyysiin muita työkaluja. (SFS-EN 14040, 22.)

Elinkaariarviointi rakentuu toiminnallisen yksikön ympärille ollen suhteellinen lähestymistapa ympäristönäkökulmiin. Tarkasteltava kohde sanelee toiminnallisen yksikön. Myöhemmin elinkaariarvioinnin aikana tehtävät analyysit ovat aina suhteessa tähän toiminnalliseen yksikköön. Täten kaikki inventaarioanalyysin syötteen ja tuotokset sekä vaikutusarviointiprofiili kytkeytyvät toiminnalliseen yksikköön. Elinkaariarviointi on iteratiivinen tekniikka, jossa yksittäiset vaiheet käyttävät hyväkseen muiden vaiheiden tunnistettuja tietovaatimuksia, rajoituksia ja tuloksia. Selvityksen ja raportoitujen tulosten kattavuus ovat suoraa seurausta iteratiivisesta lähestymistavasta vaiheiden sisällä ja välillä. (SFS-EN 14040, 22.)

Läpinäkyvyys on yksi tärkeimmistä elinkaarianalyysin suorittamista ohjaava toimintaperiaate. Läpinäkyvyys juontaa juurensa elinkaariarvioinnin monimuotoisesta luonteesta. Tulosten tulkitseminen oikein on taattu läpinäkyvyyden avulla. (SFS-EN 14040, 22.)

Kaikki ympäristön, ihmisten terveyden ja resurssien ominaisuudet tai näkökulmat otetaan laskuun elinkaariarviointia suoritettaessa. Mahdollisia kompromisseja voidaan tunnistaa ja arvioida tarkastelemalla ja näkökulmia samassa selvityksessä hyödyntäen eri tietovälineitä yhdistävää näkökulmaa. (SFS-EN 14040, 22.)

Elinkaarianalyysin päätökset pohjautuvat ensisijaisesti luonnontieteisiin. Poikkeustapauksissa myös muut tieteelliset lähestymistavat voivat olla mahdollisia kuten yhteiskuntatieteet ja taloustieteet. Myös viittaukset kansainvälisiin sopimuksiin voivat olla mahdollisia. Asianmukaiset arvovalinnat voivat olla elinkaariarvioinnin päätösten pohjalla, mikäli mikään edellä mainituista menetelmistä ei ole mahdollinen. (SFS-EN 14040, 22.)

6.2 Elinkaariarvioinnin keskeiset piirteet

Yhtä tiettyä menetelmää ei ole olemassa elinkaariarviointiin. Standardissa ISO 14040 määritelty elinkaariarviointi on vapaasti organisaation toteutettavissa organisaatiossa tarkoitetun soveltamistavan ja organisaation vaatimusten mukaisesti. (SFS-EN 14040, 26.)

Elinkaariarviointi on poikkeuksellinen tekniikka sen toiminnalliseen yksikköön perustuvasta suhteellisesta lähestymistavasta johtuen. Elinkaariarvioinnissa voidaan käyttää hyväkseen muilla tekniikoilla, kuten ympäristösuorituskyvyn arviointi, ympäristövaikutusarviointi ja riskiarviointi, kerättyä tietoa. Potentiaaliset ympäristövaikutukset käydään läpi elinkaariarvioinnissa. Todellista tai tarkkaa ympäristövaikusta ei kuitenkaan ennusteta elinkaarianalyysin avulla. Tämä johtuu siitä, että potentiaaliset ympäristövaikutukset ilmaistaan suhteessa vertailuyksikköön. Ympäristötietoja yhdistellään eri paikoista ja eri ajankohdilta, mikä osaltaan johtaa karkeisiin ennusteisiin. Ympäristövaikutusten mallintaminen on jo luonteeltaan epävarmaa. Kuitenkin jotkut mahdolliset ympäristövaikutukset ovat selkeästi tulevaisuuden vaikutuksia. (SFS-EN 14040, 26.)

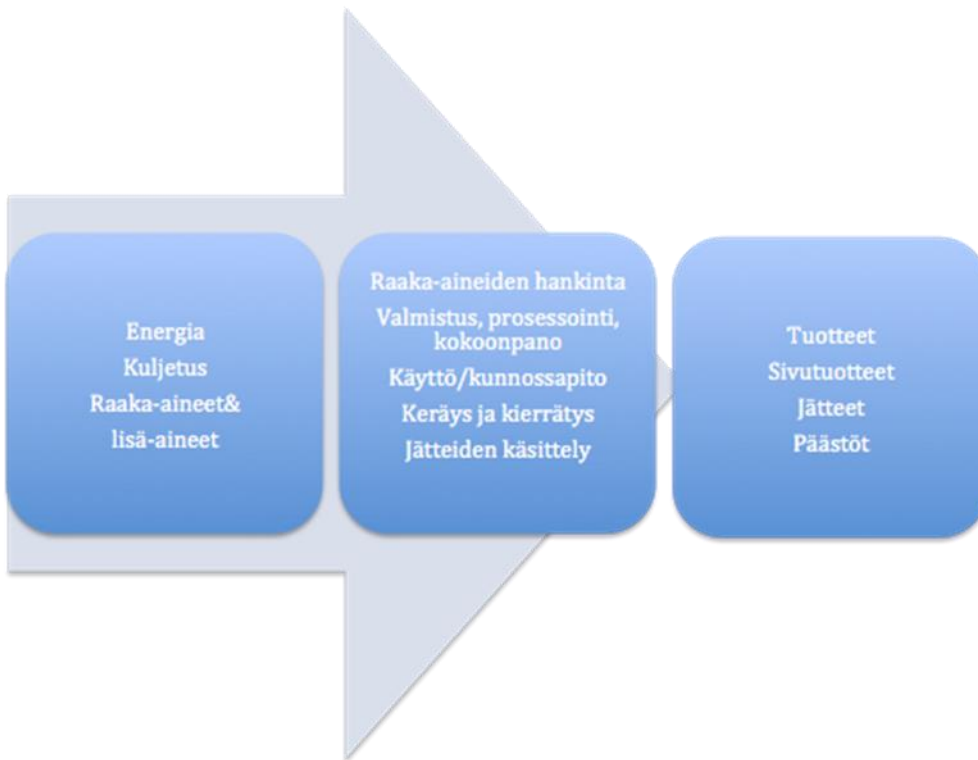
Elinkaariarvioinnille on ominaista, että koko järjestelmän kattava näkökulma luonnonvara- ja ympäristökysymyksiin yhden tai useamman tuotejärjestelmän osalta saadaan vaikutusarviointivaiheesta yhteistyössä muiden elinkaariarviointivaiheiden kanssa. Vaikutusarvioinnissa inventaarioanalyysin tulokset sijoitetaan vaikutusluokkiin, joille valitaan vaikutusluokkaindikaattori ja lasketaan vaikutusluokan indikaattoritulos. Vaikutusindikaattoritulosten tai vaikutusarvioinnin tulosten kooste, jota kutsutaan myös vaikutusarvioinnin profiiliksi, antaa tietoa tuotejärjestelmän syötteisiin ja tuotoksiin liittyvistä ympäristökysymyksistä. (SFS-EN 14040, 26.)

Tieteellisesti ei ole perusteltua muuntaa elinkaariarvioinnin tuloksia yhdeksi yleiseksi numeroksi tai tulokseksi, koska painotus pohjautuu arvovalintoihin. Järjestelmällinen menetelmä on käytössä tulosten tulkinnassa. Menetelmällä löydöksiin perustuvat johtopäätökset yksilöidään, määritellään, tarkistetaan, arvioidaan ja esitetään selvityksen ensimmäisessä vaiheessa (tavoitteet ja soveltamisala) määritellyn sovelluksen vaatimusten mukaisesti. Tulosten tulkinta määrittelee viitekehyksen elinkaariarvioinnin ja muiden ympäristöasioiden hallinnan tekniikoiden välisille yhteyksille painottamalla erityisesti elinkaariarviointiselvityksen vahvuuksia ja rajoituksia, jotka liittyvät selvityksessä määriteltyihin tavoitteisiin ja soveltamisalaan. (SFS-EN 14040, 26.)

Elinkaariarvioinnin vaiheissa sovelletaan iteratiivista menettelyä. Tämä tarkoittaa ongelmanratkaisumenetelmää, jossa vähitellen edetään kohti tarkennettua ongelman ratkaisua, kun menetelmää toistetaan kerta kerralta. (SFS-EN 14040, 26.)

6.3 Tuotejärjestelmä

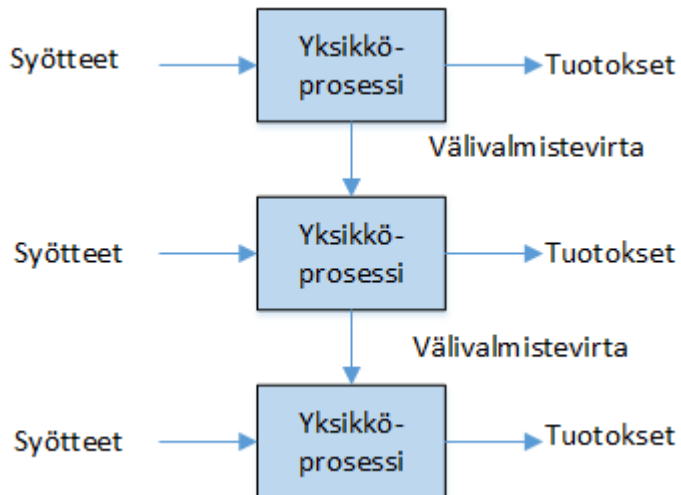
Tuotetta tarkastellaan omana tuotejärjestelmänä elinkaariarvioinnissa. Tuotejärjestelmä suorittaa yhden tai useamman ennalta määritellyn toiminnon ja sen ominaisuutta kuvataankin sen toiminnolla. Tuotejärjestelmää ei voida määritellä pelkästään lopputuotteisiin liittyvillä muuttujilla. KUVIOSSA 2 on havainnollistettu pelkistetty esimerkki tuotejärjestelmästä. (SFS-EN 14040, 28.; Tonteri 1998, 9.) Kuvassa nuolen osoittama alue kuvaa järjestelmän rajoja. Ihanetapauksessa tuotejärjestelmä mallinnetaan siten, että syötteet ja tuotokset tuotejärjestelmän rajoilla ovat perus- ja tuotevirtoja. Niiden syötteiden ja tuotosten tunnistaminen on jälleen iteratiivinen prosessi ja niitä tulisi seurata ympäristöön asti. Prosessissa tunnistetaan tarkasteltavaan tuotejärjestelmään syötteitä tuottavat ja tuotoksia vastaanottavat yksikköprosessit. Alustavaan tunnistamiseen hyödynnetään olemassa olevaa tietoa. (SFS-EN 14044, 26.) Tuotejärjestelmään yksikköprosessiin tulevat perusvirrat ovat uusiutuvat ja uusiutumattomat luonnonvarat. Esimerkkejä näistä perusvirroista ovat raakaöljy maaperästä ja auringon säteily. Tuotejärjestelmään tulee tuotevirtoja muista järjestelmistä ja siitä lähtee tuotevirtoja muihin järjestelmiin. Muista järjestelmistä tulevat tuotevirrat ja muihin järjestelmiin lähtevät tuotevirrat koostuvat lähinnä kierrätysmateriaaleista ja uudelleenkäytettävistä komponenteista. Tuotejärjestelmästä lähtevät päästöt koostuvat päästöistä ilmaan, veteen tai maaperään sekä säteilystä. (SFS-EN 14040, 28.; Tonteri 1998, 9.)



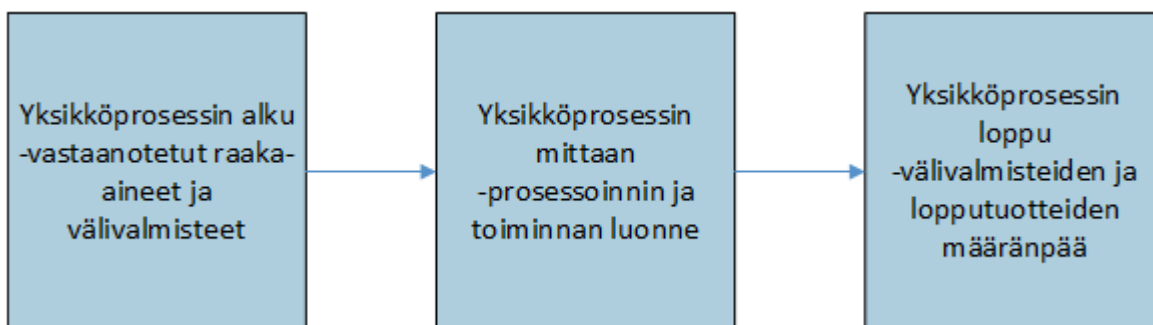
KUVIO 2. Elinkaariarvioinnin tuotejärjestelmä (SFS-EN 14040, 28.; Tonteri 1998, 9)

Tuotejärjestelmä jaetaan yksikköprosessien sarjaan, joka on esitetty KUVIOSSA 3. Tuotejärjestelmän kuvaaminen helpottuu käyttämällä prosessinkulkukaavioita, joissa kuvataan nimenomaan yksikköprosessit ja niiden väliset suhteet. Yksikköprosessit kytkeytyvät toisiinsa välivalmistevirroilla sekä jätteenkäsittelyyn päättyvillä virroilla tai molemmilla, toisiin tuotejärjestelmiin johtavilla tuotevirroilla ja ympäristöön johtavilla perusvirroilla. Yksikköprosessiin tulevat perusvirrat koostuvat luonnosta saatavista raaka-aineista ja niiden määrästä kuten raakaöljy maaperästä ja auringon säteily. Yksikköprosessiin tulevia perusvirtoja kutsutaan syötteiksi. Yksikköprosessista lähteviä perusvirrat vastaavat luontoon, ilmaan, veteen ja maahan, pääseviä päästöjä ja niiden määrää. Näitä virtoja kutsutaan tuotoksiksi. Syötteiden ja tuotosten tunnistaminen helpottuu jakamalla tuotejärjestelmä pienempiin yksikköprosessien kokonaisuuksiin. Yksikköprosessin rajat määräytyvät selvityksen tavoitteiden yksityiskohtaisuuden mukaan. Inventaarioanalyysin tavoitteena on määrittää tarkasteltavan tuotejärjestelmän yksikköprosessia kohti syötteet ja tuotokset ne muodostavat inventaarioanalyysin tulokset. Toisaalta syötteet ja tulokset toimivat syötteinä vaikutusarviointiin. Esimerkkejä KUVIOSSA 3 esitetyistä välivalmistevirroista ovat perusmateriaalit ja osakokoonpanot. (SFS-EN 14040, 28.; Tonteri 1998, 9.)

Jokaisen yksikköprosessin alustavaan kuvaukseen tarvittavia määrittelyjä on koottu KUVIOON 4. (SFS-EN 14044, 26.)



KUVIO 3. Tuotejärjestelmän yksikköprosessisarja (SFS-EN 14040, 28)



KUVIO 4. Yksikköprosessin vaiheet (SFS-EN 14044, 26)

7 ELINKAARIARVIOINNIN VAIHEET

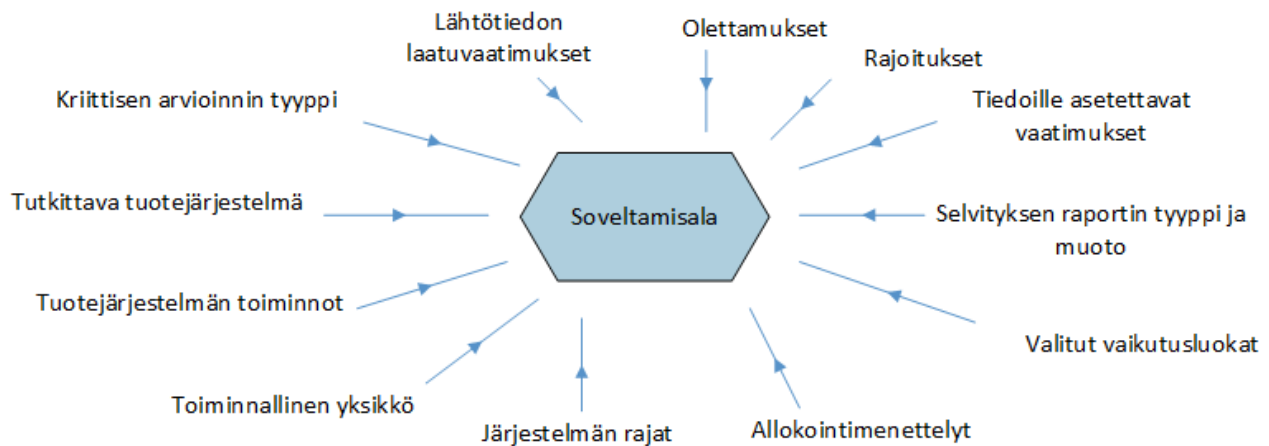
Elinkaariarviointiselvitys (LCA-selvitys) koostuu neljästä vaiheesta, jotka on kuvattu ja joiden välisiä suhteita on havainnollistettu KUVIOSSA 1. Elinkaarianalyysin iteratiivinen luonne käy hyvin ilmi kuvasta. Elinkaariarviointin neljä vaihetta ovat: 1. Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely 2. Inventaarioanalyysi 3. Vaikutusarviointi 4. Tulosten tulkinta. Elinkaari-inventaario-selvitys (LCI-selvitys) puolestaan koostuu muuten samoista vaiheista lukuun ottamatta vaikutusarviointivaihetta eli LCI-selvitys rakentuu yhteensä kolmesta vaiheesta: 1. Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely 2. Inventaarioanalyysi 3. Tulosten tulkinta. (SFS-EN 14040, 24.)

Elinkaariarviointin tuloksia voidaan hyödyntää erilaisissa päätöksentekoprosesseissa. Elinkaarianalyysin- tai elinkaari-inventaarioselvitysten soveltamistapoja ovat esim. tuotteiden kehittäminen ja parantaminen, strateginen suunnittelu, poliittinen päätöksenteko, markkinointi. Nämä ovat niitä sovelluksia, joita varten elinkaariarviointi- tai elinkaari-inventaarioselvityksen tavoite ja soveltamisala on määritelty. (SFS-EN 14040, 24.)

7.1 Elinkaariarviointin tavoitteet ja soveltamisalan määrittely (Vaihe 1)

Elinkaariarviointin ensimmäinen vaihe on tavoitteen asettaminen, joka on hyvin oleellinen osa arviointia. Arvioinnin kohdistaminen oikeisiin asioihin ja oleellisten näkökulmien huomioonottaminen ovat suoraa seurausta huolellisesti tehdystä tavoitteenasettelusta. Tavoitteenasettelua voidaan myöhemmin arvioinnin edetessä tarvittaessa tarkastella uudelleen elinkaariarviointin iteratiivisesta luonteesta johtuen. (Tonteri 1998, 7.)

Kohteena oleva tuotejärjestelmä ja arvioinnin tulosten käyttötarkoitus määrittellään tavoitteenasettelussa. Yksi tavoitteenasettelun päämäärinä heti kättelyssä on selvittää aiottu kohdeyleisö eli tehdäänkö arviointi organisaation sisäiseen käyttöön vai onko tulokset tarkoitus julkaista ulkopuolisten osapuolten käyttöön. Elinkaariarviointin tavoitteissa määrittellään lisäksi selvityksen tekemisen syyt ja se aiotaanko selvityksen tuloksia käyttää julkisesti esitettävissä vertailuväitteissä. Selvityksen laajuuden, syvyyden ja yksityiskohtaisuuden tulisi vastata ja olla riittäviä määriteltyjen tavoitteiden suhteen, mistä syystä soveltamisala tulisi määritellä riittävällä tarkkuudella. Elinkaarianalyysin soveltamisalaan sisältyvät seikat on koottu KUVIOON 5. (SFS-EN 14040, 30.;Tonteri 1998, 7.)



KUVIO 5. Elinkaarianalyysin soveltamisala (SFS-EN 14040, 30; Tonteri 1998,7)

Elinkaariarvioinnin tavoitteista ja soveltamisalasta riippuen valitaan selvityksen kohteeksi tietty järjestelmän toiminto, joka voi olla vain yksi järjestelmän monista mahdollisista toiminnoista. Toiminnolla tässä tapauksessa tarkoitetaan nimenomaan tuotetta tai palvelua. Arvioitava toiminto, tuote tai palvelu tulisi määrittellä hyvinkin yksityiskohtaisesti. Määrittely tulisi vastata useisiin kysymyksiin, kuten mikä tuote on kyseessä, mikä määrä, miltä ajalta käytetyt tiedot on kerätty ja mikä on arvioinnin kannalta tuotteen olennaisin ominaisuus sekä tämän ominaisuuden yksikkö, toiminnallinen yksikkö eli se ilmaisee tuotteen tunnistetut toiminnot (suorituskyky-mittarit) kvantitatiivisessa muodossa. Toiminnallisen yksikön funktio on antaa vertailuyksikkö, johon syötteitä ja tuotoksia suhteutetaan. Täten taataan eri elinkaariarviointien tulosten vertailukelpoisuus eli eri järjestelmien elinkaariarviointien tuloksia voidaan vertailla keskenään yhteisillä perusteilla vertailuyksikön ansiosta. (SFS-EN 14040, 30.; Tonteri 1998, 7.)

Toiminnallinen yksikkö toimii tuotejärjestelmän eri tuotevertailun pohjana. Eri tuotevertailuissa toiminnallinen yksikkö määrittää verrattavien tuotteiden käyttötarkoituksen mukaan. Täten tulee taatua se, että samanarvoisia yksiköitä käytetään vertailussa. Tuotteen käyttötarkoitus määrittää toiminnallisen yksikön, kuten esimerkiksi pinnoitettaessa tietyksi periodiksi suojattu yksikköpinta-ala. Tai esimerkiksi hitsisauman toteuttaminen eri tekniikoilla, jolloin aika-, materiaali- ja energiavaatimukset kasvavat suhteessa hitsattavan levyn paksuuden kanssa. Tällöin toiminnallinen yksikkö voitaisiin määrittellä hitsisauman ja levyn paksuuden suhteen. Jos arvioidaan vain yhtä tuotetta, arvioitavan tuotteen ja sen toiminnallisen yksikön määrittäminen on

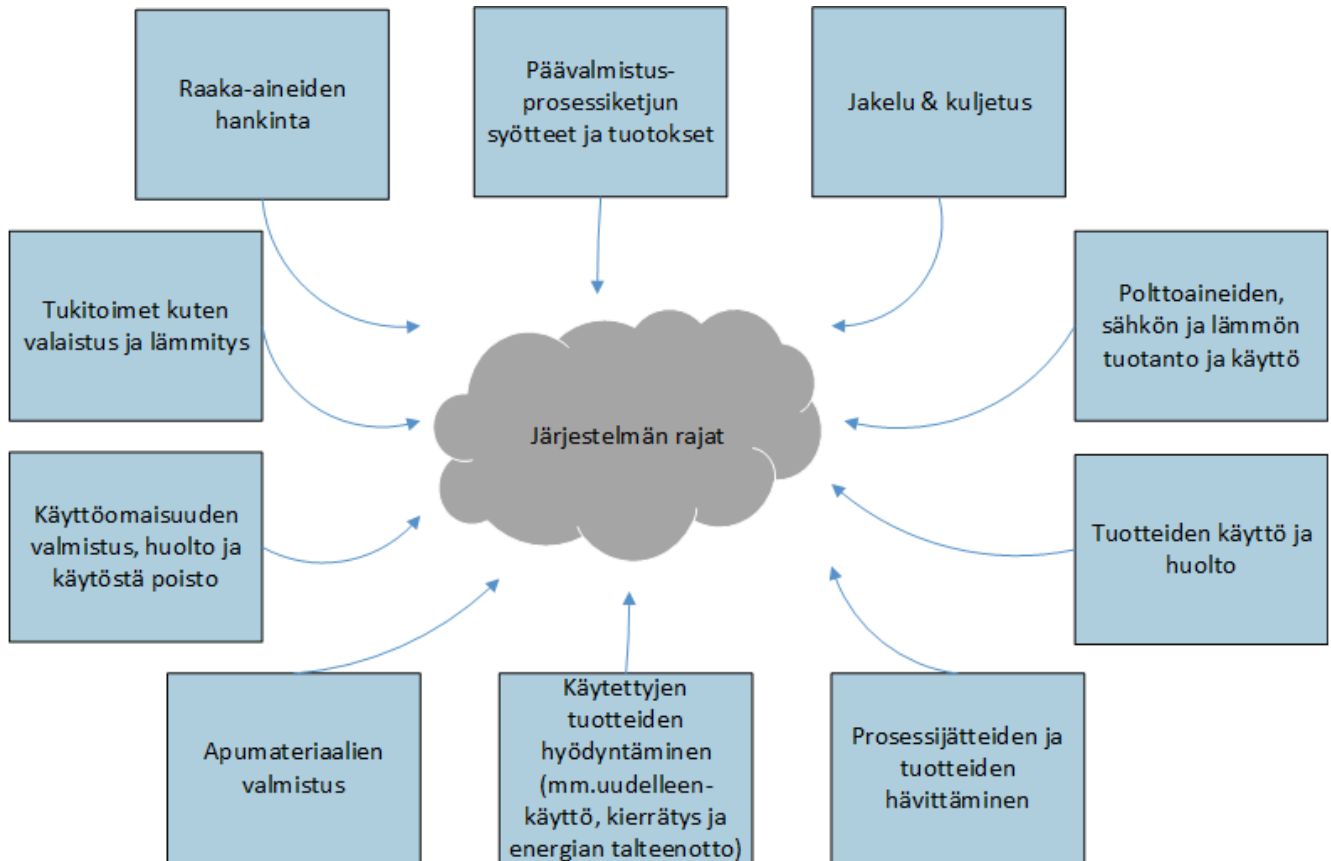
riittävää. (Tonteri 1998, 7.; Finkbeiner, Rethmeier, Chang, Pittner & Sproesser 2015.) Yksi esimerkki toiminnallisen yksikön käytöstä voisi olla maidon pakkausjärjestelmä. Oletetaan, että maito voidaan pakata joko kertakäyttöiseen kartonkitölkkiin tai kierrätettävään, pestävään lasipurkkiin. Tällöin vertailua ei kannata tehdä yhden kartonkitölkin ja yhden lasipurkin välillä, vaan elinkaarianalyysiin tulisi ottaa käsittelyyn esimerkiksi 1000 maitolitrin pakkaus ja kuljetus. Tällöin vertailussa olisi 1000 kartonkitölkin ja 100 lasipullon (olettaen 9 pesukertaa/pullo) elinkaarianalyysit. (Goedkoop, Oele, Lejting, Ponsioen & Meijer, 10.)

Elinkaariarvioinnin tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaiheessa haetaan ratkaisuja siihen, mitä halutaan tietää ja miksi, millä tavoin arvioinnin syvyys vaikuttaa lopputulokseen ja mikä tuotteen käyttötarkoitus valitaan vertailuun. Elinkaariarvioinnin toiminto tulisi määritellä riittävällä tarkkuudella, jotta selvityksen laajuus, syvyys ja yksityiskohtaisuus kohtaisivat määritellyt tavoitteet riittävästi. (Tonteri 1998, 8.)

Tuotejärjestelmän rajaaminen tarkoittaa tuotejärjestelmien fyysisten järjestelmien keskeisten osien määrittelemistä kuvaavina malleina toisin sanoen tuotejärjestelmän rajapintojen esittämistä ympäristöön ja toisiin tuotejärjestelmiin. Elinkaarianalyysiin sisällytettävät yksikköprosessit määrittyvät järjestelmän rajojen mukaan. Elinkaariarvioinnin täydellisessä toteutuksessa tuotejärjestelmä mallinnetaan sen rajoilla oleviin perusvirtoihin, syötteisiin ja tuotoksiin. Käytännössä täydellistä elinkaariarviointia ei voida toteuttaa. Järjestelmän rajoja määriteltäessä tarkasteluun tulisikin sisällyttää vain sellaiset syötteet ja tuotokset, jotka vaikuttavat merkittävästi selvityksen lopullisiin johtopäätöksiin ja muut voidaan jättää huomioimatta. (SFS-EN 14040, 32.; Tonteri 1998, 11.)

Määritetään raja mallinnettavan kohteen ja siihen läheisesti liittyvien osien välillä. Näiden osien valinta riippuu selvityksen alkuun tehdyn tavoitteen ja soveltamisalan määrittelystä, sen käyttötarkoituksesta ja kohdeyleisöstä, tehdyistä olettamuksista, tietoihin ja kustannuksiin liittyvistä rajoituksista sekä rajauskriteereistä. Valitut mallit tulisi identifioida kuin myös niiden valintaan johtavat olettamukset. Elinkaarianalyysissä käytetyt rajauskriteerit tulisi ymmärtää selkeästi ja kuvailuilla. Selvityksen tulosten luottavuuden ja tavoitteen mahdollistamisen kannalta tärkeitä ovat järjestelmän rajauskriteerit. (SFS-EN 14040, 32.)

KUVIOSSA 6 on esitetty järjestelmän rajoja mietittäessä huomioon otettavia seikkoja. Usein alun perin määritellyjä järjestelmän rajoja joudutaan selvityksen edetessä tarkentamaan uudestaan. (SFS-EN 14040, 32.)



KUVIO 6. Järjestelmän rajat ja siihen liittyvät seikat (SFS-EN 14040, 32)

Tuotejärjestelmät vaikuttavat liittyvän toisiinsa monitahoisesti. Esimerkiksi, reikkoja käytetään elinkaarianalyysissä maitotölkkien kuljetukseen, jos jatkamme toiminnallisen yksikön kohdalla esitettyä maitotölkiesimerkkiä. Rekat ovat myös tuotteita, joilla on oma elinkaarensa. Rekkojen valmistukseen tulee tuottaa terästä. Teräksen tuottamiseen tarvitaan hiiltä. Hiilen tuottamiseen tarvitaan reikkoja jne. Tämä esimerkki selventää hyvin sen, ettei kaikkia tuotejärjestelmän syötteitä ja tuotoksia voida jäljittää ja järjestelmän rajat tulee määritellä. Kuitenkin lopputuloksiin voi vaikuttaa se, että joitain osia rajataan järjestelmän rajojen ulkopuolelle. (Goedkoop ym.,10.)

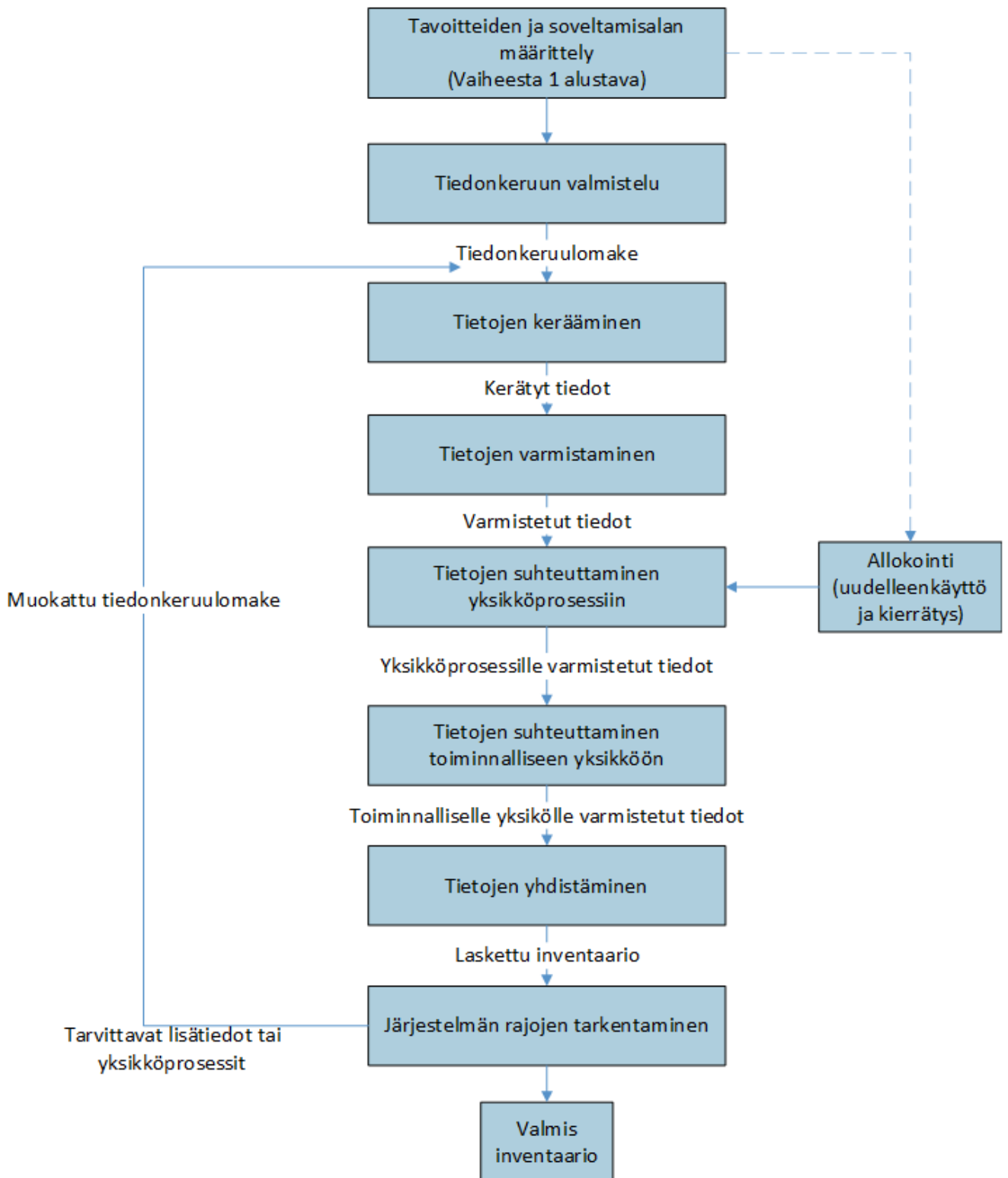
Elinkaarianalyysin ensimmäisen, tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, vaiheen tulokset on kerätty KUVIOON 7. (Tonteri 1998, 8.)



KUVIO 7. Elinkaarianalyysin ensimmäisen vaiheen tulokset (Tonteri 1998, 8)

7.2 Inventaarioanalyysi (Vaihe 2)

Elinkaarianalyysin punainen lanka on inventaarioanalyysi, joka on myös selvityksen aikaa vievin vaihe. Ensimmäisessä vaiheessa toteutettu tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely sisältää toisen vaiheen, inventaarioanalyysivaiheen, alustavan suunnitelman. Inventaarioanalyysi koostuu tiedonkeruusta ja laskennan menettelytavoista, joiden avulla tutkittavan tuotejärjestelmään asiankuuluvat syötteen ja tuotokset saadaan kvantitatiiviseen muotoon. KUVIOSSA 8 on esitetty inventaarioanalyysisuunnitelmaa toteutettaessa läpikäytävät vaiheet. (SFS-EN 14044, 32, 34.)



KUVIO 8. Inventaarioanalyysin vaiheet (SFS-EN 14044, 34)

Kuviosta käy hyvin ilmi inventaarioanalyysin iteratiivinen luonne. Tiedon keruuvaiheessa ja järjestelmän syvemmässä analyysissä saatetaan identifioida uusia tietovaatimuksia tai –rajoituksia, jotka edellyttävät tiedonkeruun menettelytapojen varioimista selvitysten tavoitteiden saavuttamiseksi. Joskus identifioidaan asioita, jotka edellyttävät paluuta ensimmäiseen vaiheeseen ja edellyttävät selvityksen tavoitteiden tai soveltamisalan uudelleen määrittelemistä. (SFS-EN 14040, 32.)

7.2.1 Tietojen kerääminen

Jokaisesta tuotejärjestelmän rajojen sisään kuuluvasta yksikköprosessista tulee kerätä kvalitatiivista ja kvantitatiivista tietoa inventaarion aikana. Yksikköprosessien syötteiden ja tuotosten määrien ilmoittamiseen käytetään kerättyjä lähtötietoja. Lähtötiedot voivat olla joko mitattuja, laskettuja tai arvioituja. (SFS-EN 14044, 32.) Tietojen kerääminen vie runsaasti aikaa johdun useista yksikköprosesseista ja kerättävän tiedon määrästä. (Tonteri 1998, 12.)

Asianmukaiset viitteet tulee olla siinä tapauksessa, että tiedot on kerätty julkaistuista lähteistä. Asiankuuluvan tiedonkeruuprosessin yksityiskohdat, tietojen keräämisen ajankohta ja muut tietojen laatuindikaattorit tulee mainita siten, että selvityksen johtopäätöksiä tehdessä selvityksen kannalta merkittävät tiedot tulee huomioiduiksi. Jos nämä tiedot ja lähtötiedon laatuvaatimukset eivät kohtaa, asiasta on mainittava selvityksessä. (SFS-EN 14044, 32.)

Tiedonkeruun ulottuessa useisiin raportointikohteisiin ja julkaisuihin tarvitaan toimenpiteitä, joilla taataan mallinnettavien tuotejärjestelmien samanlainen ja koherentti käsittely. Kaikkien mallinnettavien yksikköprosessien ja niiden keskinäisten suhteiden kuvaavien prosessinkulukaavioiden piirtäminen on yksi tällaisista toimenpiteistä. Lisäksi jokainen yksikköprosessi tulisi kuvata yksityiskohtaisesti siten, että syötteisiin ja tuotoksiin vaikuttavat tekijät esitetään. Virtojen ja kunkin yksikköprosessin toimintaolosuhteisiin liittyvät tiedot tulee listata sekä käytetyt yksiköt tulee luetteloida. Tiedonkeruun ja kaikille tiedoille tarvittavien laskentamenetelmien hahmottaminen kuuluu myös koherentin käsittelyn takaaviin toimenpiteisiin eri julkaisujen välillä. Erikoistapaukset, epätavanomaisuudet tai muut tarvittavat tietoon liittyvät seikat tulee selkeästi dokumentoida. (SFS-EN 14044, 32.)

Tiedonkeruulomakkeen tärkeimmät tietojen luokittelussa käytettävät otsikot on esitetty KUVIOSSA 9



KUVIO 9. Tiedonkeruulomakkeen pääotsikot (SFS-EN 14044, 32)

Yksilöidymät jaottelut selvityksen tavoitteiden mukaisesti tehdään näiden otsikoiden alle. (SFS-EN 14044, 32.) Kerätessä tietoa kukin yksikköprosessi kuvataan suurpiirteisesti siten, että kussakin prosessissa käytetty tekniikka ja siihen liittyvät toimintaympäristö tulee esiin. Tiedonkeruuvaiheessa raaka-aineiden, kemikaalien ja komponenttien kulutus sekä niiden valmistajat/tuottajat esitetään. Valmistajilta/tuottajilta voidaan kysyä heidän tuotteidensa valmistamisen inventaariotietoja. Energiankulutuksesta ilmoitetaan suora sähkönkulutus, kWh, J ja polttoaineiden sekä palavien materiaalien kulutus painoyksikköinä, jotka voidaan muuntaa energiayksiköiksi kertomalla se vastaavalla lämpöarvolla. Tiedonkeruuvaiheessa tulisi esittää myös suoraan luonnosta otettavat raaka-aineet, esim. vesi. Tiedonkeruulomakkeessa ilmoitetaan myös syntyvät sivutuotteet ja niiden käyttäjä/vastaanottaja. Sivutuotteen käyttäjältä/vastaanottajalta voidaan vastaavasti tiedustella sivutuotteen käytön inventaariotietoja. Syntyvät jätteet, jätteiden vastaanottaja ja oletettu käsittelytapa käsitellään myös tiedonkeruuvaiheessa. Lisäksi tiedonkeruulomakkeessa ilmoitetaan syntyvät päästöt ilmaan, veteen ja maaperään. Mitatut päästöt ilmoitetaan. Jos mitattua tietoa ei ole saatavilla, pyritään identifioimaan ne elinkaaren vaiheet, joissa päästöt ovat todennäköisiä, vaikkakaan näistä ei ole sen tarkempaa tietoa tässä vaiheessa. Seuraavassa vaiheessa tietoa voidaan täydentää joko mittauksin tai tarkemmin arvioimalla. Mahdolliset muut ympäristönäkökohdat tulee myös kerätä tiedonkeruulomakkeeseen. Näitä ovat esimerkiksi muut päästöt, kuten hukkalämpö, säteily ja esim. melu. (Tonteri 1998, 12.)

7.2.2 Tietojen laskenta

Koko selvityksen läpi tulisi käyttää johdonmukaisesti samoja laskentamenettelyjä, ja ne tulisi dokumentoida tarkasti ja yksiselitteisesti. Kaikki tehdyt oletukset tulee myös dokumentoida selkeästi ja täsmällisesti. (SFS-EN 14044,34.)

Mahdollisuuksien mukaan tulisi käyttää todellisia tuotantojakaumia, kun määritellään tuotantoon liittyviä perusvirtoja. Täten todelliset luonnonvarojen kulutusmäärät tulee huomioitua selvityksessä. Esimerkiksi sähkötuotantoon liittyviä perusvirtoja käsiteltäessä tulee huomioida sähkön jakauma, polttoprosessi, muuntaminen ja siirtämisen tehokkuus sekä jakelun hävikki. Palamislämpökertoimella poltettavien materiaaleihin liittyvät syötteet ja tuotokset muunnetaan energiasyötteiksi tai -tuotoksiksi. Jälleen nämä tapaukset tulee dokumentoida tarkasti ja ilmoittaa käytetäänkö ylempää vai alemmaa lämpöarvoa. (SFS-EN 14044, 34.)

7.2.3 Tietojen varmistaminen

Tietojen oikeellisuus tulee varmentaa tiedonkeruuprosessin aikana, jotta taataan aiotun käyttötarkoituksen lähtötietojen laatuvaatimusten täyttyminen ja todennetaan ne. Yksi mahdollisuus tarkistaa tietojen oikeellisuus on laskea kokonaissyötteet ja tuotokset, jolloin näiden summien tulee olla yhtä suuria. Tasapaino voidaan laskea esim. massataseiden mukaan, mutta vertailu voidaan tehdä myös energiataseiden avulla. Massa- ja energiataseet ovat hyvin käytännöllinen keino tarkistaa yksikköprosessin kuvauksen kelpoisuus, sillä jokainen yksikköprosessi noudattaa massan ja energian häviämättömyyden lakeja. Jos varmistusvaiheessa tulee esille poikkeavuuksia, lähtötietoja tulisi tarkentaa. Iteraatiokierrosten myötä tasapaino todennäköisesti saavutetaan. Arvioinnin sovelluskohde määrittelee tietojen yksityiskohtaisuuden ja arvioinnin tulos voi olla enintään yhtä tarkkoja kuin lähtötiedot. (SFS-EN 14040, 34.; Tonteri 1998, 14.)

7.2.4 Tietojen suhteuttaminen yksikköprosessiin ja toiminnalliseen yksikköön

Asianmukainen virta tulee määritellä jokaiselle yksikköprosessille, jonka kvantitatiiviset syötteet ja tuotokset on laskettava suhteessa kyseiseen virtaan. Lisäksi tuotejärjestelmän vuokaa-

vion ja yksikköprosessien välisten virtojen pohjalta yksikköprosessien virrat suhteutetaan vertailuvirtaan. Tämän toiminnon seurauksena tuotejärjestelmän kaikki syöte- ja tuotostiedot liittyvät toiminnalliseen yksikköön. (SFS-EN 14044, 36.)

Tuotejärjestelmän syötteitä ja tuotoksia on mahdollista yhdistellä, mutta tämä tulisi tehdä varoen. Tietoja tulisi yhdistellä johdonmukaisesti selvityksen tavoitteiden suhteen ja se tulisi tehdä vain, jos ne kytkeytyvät toisiaan vastaaviin aineisiin ja samankaltaisiin ympäristövaikutuksiin. Yksityiskohtaisemmat yhdistelysäännöt tulisi dokumentoida selvityksen ensimmäisessä, tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, vaiheessa tai vaihtoehtoisesti myöhemmin vaikutusarviointivaiheessa. (SFS-EN 14044, 36.)

7.2.5 Järjestelmän rajojen tarkentaminen

Järjestelmän rajaamisella määritellään, mitkä yksikköprosessit sisällytetään elinkaariarviointiin. Tietojen sisällyttämistä koskevien päätösten tulee pohjautua herkkyysanalyysiin, jossa niiden merkittävyys luokitellaan. Elinkaariarvioinnin iteratiivisesta luonteesta johtuen ensimmäisessä vaiheessa määriteltyjä alustavia tuotejärjestelmän rajoja tarkastellaan uudelleen inventaarioanalyysivaiheessa. Tarkentamisprosessin tulokset ja herkkyysanalyysi tulee jälleen dokumentoida huolella. (SFS-EN 14044, 36.)

Herkkyysanalyysin pohjalta elinkaarianalyysin vaiheita tai yksikköprosesseja voi tippua pois tarkastelusta, mikäli inventaarioanalyysissä paljastuu niiden vähäinen merkitys. Herkkyysanalyysi voi johtaa myös selvityksen tulosten kannalta vähäpitoisten syötteiden ja tuotosten poistamiseen tai vaihtoehtoisesti uusien herkkyysanalyysin mukaan merkittävien yksikköprosessien, syötteiden ja tulosten sisällyttämiseen elinkaarianalyysiin. Herkkyysanalyysi auttaa sisällyttämään elinkaariarviointiin vain ne syötteet ja tuotokset, joilla on merkitystä selvityksen tavoitteiden kannalta. (SFS-EN 14044, 36.)

7.2.6 Allokointi

Harvat teollisuusprosessit tuottavat vain yhtä tuotosta tai perustuvat selkeään ja suoraviivaiseen raaka-ainensyötteiden ja –tuotosten etenemiseen, vaan useimmat teollisuusprosessit tuottavat useampaa kuin yhtä tuotetta ja välivalmisteita tai hylättyjä tuotteita kierrätetään. (SFS-

EN 14040, 34.) Syötteet ja tuotokset tulee jakaa, allokoida, eri tuotteille selkeästi ilmoitettujen menettelyjen mukaisesti. Allokointia tehtäessä käytetty allokointitapa on raportoitava ja perusteltava. Yksikköprosessiin allokoitujen syötteiden ja tuotosten summan tulee vastata yksikköprosessin syötteiden ja tuotosten summaa ennen allokointia. (SFS-EN 14044, 36.)

Elinkaariarvioinnissa tulee identifioida muiden tuotejärjestelmien kanssa yhteiset prosessit. Ensimmäisenä vaihtoehtona tulisi mahdollisuuksien mukaan välttää allokointia yhteisten prosessien välillä siten, että jaetaan allokoitava yksikköprosessi kahteen tai useampaan yksikköprosessiin ja kokoamalla näihin osaprosesseihin liittyvät syötteet ja tuotokset. Toinen vaihtoehto välttää allokointi on laajentaa tuotejärjestelmän rajoja kattamaan myös rinnakkaistuotteisiin liittyvät lisätoiminnot. (Tonteri 1998, 11.; SFS-EN 14044, 36.)

Kuitenkaan allokointia ei pystytä aina välttämään. Tällöin tuotejärjestelmän syötteet ja tuotokset tulisi jakaa eri tuotteiden ja toimintojen välillä siten, että niiden väliset fysikaaliset suhteet tulevat esiin. Eli suhteiden tulisi kuvata tapaa, jolla syötteet ja tuotokset muuttuvat suhteessa järjestelmän tuottamien tuotteiden ja toimintojen määrään. (SFS-EN 14044, 38.) Esimerkiksi, kun eri tuotteita kuljetetaan samalla rekalla, ympäristö syötteet ja tuotokset voidaan allokoida tuotteiden massaan pohjautuen siten, miten se vaikuttaa polttoaineen kulutukseen. Kuitenkin, jos rajoittava tekijä on tilavuus, tilavuuteen pohjautuva allokointi olisi soveltuvampi. (Goedkoop ym., 13.)

Muut allokointitavat tuotteiden ja toimintojen välillä ovat mahdollisia, jos allokointi ei voi pohjautua yksinomaan fysikaalisiin suhteisiin. Tällaisessa tapauksessa tuotteiden kaupallinen arvo voi olla esimerkiksi yksi mahdollinen peruste allokoida syöte- ja tuotostiedot rinnakkaistuotteiden välillä. Jotkin tuotokset voidaan luokitella osaksi rinnakkaistuotetta ja osaksi jätettä. Tällaisissa tapauksissa syötteet ja tuotokset allokointi tehdään vain rinnakkaistuotteen käsittävälle osalle, joten rinnakkaistuotteen ja jätteen välinen suhde tulisi tunnistaa huolella. (SFS-EN 14044, 38.)

Elinkaarianalyysissä tarkasteltava järjestelmän samanlaisiin syötteisiin ja tuotoksiin tulisi soveltaa allokointimenettelyjä koherentisti. Esimerkiksi jos allokointi on tehty järjestelmästä poistuville käytettäville tuotteille (esim. välivalmiste tai hylättävä tuote), käytettävän allokointitavan tulee vastata järjestelmään saapuvien vastaavien tuotteiden allokointitapaa. (SFS-EN 14044, 38.)

Syötteiden ja tuotosten välinen materiaalitase on inventaarioanalyysin perusta. Tästä syystä allokoititavan olisi vastattava alkuperäisiä syöte-tuotos –suhteita ja perusominaisuuksia mahdollisimman tunnollisesti. (SFS-EN 14044, 38.)

Edellä kuvatut allokoititavat soveltuvat hyvin myös uudelleenkäyttö- ja kierrätystilanteisiin. Kuitenkin materiaalien luontaisten ominaisuuksien vaihteluihin tulee varautua. (SFS-EN 14044, 40.) Tästä hyvänä esimerkkinä metallien uudelleensulatus. Metalliteollisuus on hyödyntänyt metallien uusiokäyttöä pitkään, joten metallien keräyksellä ja kierrätyksellä on pitkät juuret. Ongelmalliseksi asian tekee se, että metallien kirjo on kasvanut vuosien varrella ja kierrätettyjen metallien joukosta löytyy myös ihmisten tekemiä yhdistelmiä. Metallien erottelu näistä kierrätetyistä materiaaleista on kompleksista ja mahdollisesti kustannustehotonta. (Salminen 2017.) Toisaalta metallien tuottajamaat ovat Euroopan ulkopuolelta, joten Euroopalle kriittisten raaka-aineiden (suurin osa metalleja) talteenotto ja kierrätys ovat erittäin tärkeää ja oleellista kiertotalouden näkökulmasta katsoen (Virolainen 2017).

Raja alkuperäisen ja tulevan tuotejärjestelmän välisten talteenottoprosessien välillä tulee identifioida ja dokumentoida. Uudelleenkäyttö ja kierrätys vaativat kuitenkin tarkkuutta käsittelyssä, koska niiden ja niihin rinnastettavien prosessien (kuten kompostointi ja energian talteenotto) kohdalla allokointi voi tarkoittaa sitä, että syötteet ja tuotokset allokoidaan useamman kuin yhden tuotejärjestelmän kesken. Lisäksi talteenottoprosessien kohdalla erityistä huomiota tulisi kiinnittää järjestelmän rajojen määrittelyyn. Uudelleenkäytön ja kierrätyksen ollessa kyseessä allokoitimenettelyssä allokoinnin perusteena tulisi ensisijaisesti käyttää materiaalin fysikaalisia ominaisuuksia (esim. massaa). (SFS-EN 14044, 40.) Esimerkiksi saha, jossa valmistetaan puisia lankkuja. Sahanpurua tuotetaan myös prosessissa. Jos sahanpurua muodostuu 20% sahan tuotoksista, 20% ympäristökuormasta allokoidaan tälle tuotokselle ja 80% puisille lankuille. (Goedkoop ym., 13) Toissijaisena allokoinnin perusteena voidaan käyttää taloudellista arvoa (esim. jäte- tai kierrätysmateriaalin markkina-arvo suhteessa perusraaka-aineen markkina-arvoon). (SFS-EN 14044, 40.) Tällaisen allokoinnin heikko puoli on siinä, että hinnat heittelevät, mikä voi vaikuttaa tuloksiin merkittävästi useiden vuosien keskiarvojen käytöstä huolimatta. (Goedkoop ym., 13) Näiden lisäksi allokoinnin perusteena voidaan käyttää myös kierrätetyn materiaalin myöhempien käyttökertojen määrää. (SFS-EN 14044, 40.)

7.3 Vaikutusarviointi (Vaihe 3)

Vaikutusarviointi on toiminnalliseen yksikköön perustuva suhteellinen lähestymistapa. Tämä on se seikka, mikä erottaa vaikutusarvioinnin monista muista tekniikoista, kuten ympäristösuorituskyvyn arvioinnista, ympäristövaikutusarvioinnista ja riskiarvioinnista. Vaikutusarvioinnissa voidaan hyödyntää näillä tekniikoilla saatua tietoa. (SFS-EN 14044, 40.)

Vaikutusarviointivaihe (LCIA) vaatii huolellista suunnittelua elinkaariselvityksen tavoitteiden ja soveltamisalan tavoitteiden saavuttamiseksi. Vaikutusarviointivaihe tulee sovittaa yhteen aiempien elinkaarianalyysivaiheiden kanssa siten, että analyysin ulkopuolelle jääneet seikat ja epävarmuuden lähteet huomioidaan. Se, onko inventaarioanalyysitietojen ja -tulosten laatu riittävä vaikutusarvioinnin tekemiseen elinkaariselvityksen tavoitteiden ja soveltamisalan puitteissa. Lisäksi tulee huomioida se, onko järjestelmän rajauksia ja päätöksiä tiedon rajaamisesta arvioitu riittävästi takaamaan vaikutusarvioinnin indikaattoritulosten laskennassa olennaisten inventaarioanalyysin tulosten saatavuus. Viimeiseksi tulee arvioida, onko vaikutusarvioinnin tulosten ympäristörelevanssi heikentynyt tehtyjen toimintojen vuoksi. Tällaisia toimintoja ovat esimerkiksi toiminnalliseen yksikköön pohjautuvan laskenta, koko järjestelmän kattavan keskiarvolaskenta, yhdistäminen tai allokointi. Vaikutusarviointivaihe kokoaa erilaisten vaikutusluokkien indikaattoritulokset ja yhdessä nämä tulokset merkitsevät LCIA-profiilia. (SFS-EN 14044, 40.)

Vaikutusarviointi koostuu pakollisista ja vapaaehtoisista osista. Yksi vaikutusarvioinnin pakollisista osista on vaikutusluokkien, vaikutusindikaattoreiden ja karakterisointimallien valinta. Toinen vaikutusarvioinnin pakollinen osa on inventaarioanalyysin (LCI) tulosten sijoittaminen vaikutusluokkiin (luokittelu). Lisäksi vaikutusluokkaindikaattoritulosten laskeminen (karakterisointi eli luonnehdinta) on vaikutusvaiheessa pakollista. (SFS-EN 14044, 42.)

7.3.1 Vaikutusluokkien, niiden indikaattoreiden ja karakterisointimallien valinta

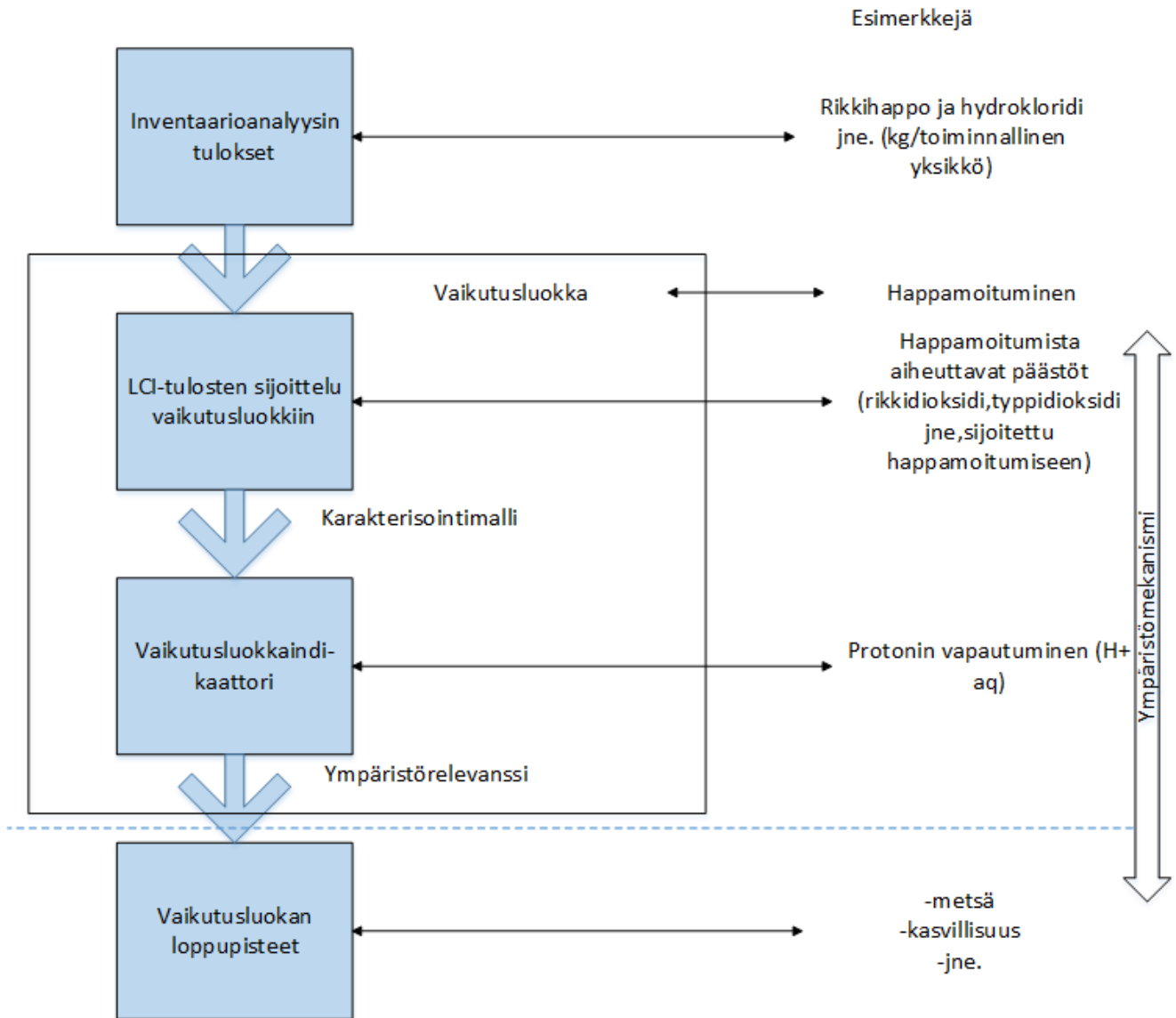
Vaikutusluokkaindikaattoreita, vaikutusluokkia ja karakterisointimalleja valittaessa asianmukaiset viittaukset valintaan liittyvään informaatioon ja tietolähteeseen tulee löytyä LCA-selvityksestä. Lisäksi tämä tulisi tehdä, jos määritellään uusia vaikutusluokkia, vaikutusluokkaindikaattoreita tai karakterisointimalleja. Vaikutusluokkien ja vaikutusluokkaindikaattoreilla tulisi olla

tarkat ja kuvaavat nimet, kuten esimerkiksi happamoituminen (vaikutusluokka) ja protonin vapautuminen (vaikutusluokkaindikaattori). Vaikutusluokkien, vaikutusluokkaindikaattoreiden ja karakterisointimallien valinnan tulee olla perusteltuja ja yhdenmukaisia elinkaariarvioinnin tavoitteiden ja soveltamisalan kanssa, josta käy hyvin ilmi jälleen elinkaariarvioinnin iteratiivinen luonne. Tuotejärjestelmään liittyviä ympäristökysymyksiä tulisi käsitellä mahdollisimman kattavasti valittavilla vaikutusluokilla siten, että otetaan huomioon tavoite ja soveltamisala. (SFS-EN 14044, 42.)

Ympäristömekanismi ja karakterisointimalli tulee kuvailla elinkaariselvityksessä. Ympäristömekanismi ja karakterisointimalli liittyvät inventaarioanalyysin (LCI) tulokset vaikutusluokkaindikaattoriin sekä toimivat karakterisointikertoimien perustana. Karakterisointimallia käyttämällä johdetaan vaikutusluokkaindikaattori. Käytetyn karakterisointimallin soveltuvuus tavoitteen ja soveltamisala kannalta tulee dokumentoida. Tästä kaikesta huokuu jälleen elinkaariselvityksen iteratiivinen luonne. (SFS-EN 14044, 42.)

Muut inventaarioanalyysin tulokset, jotka sisältyvät elinkaarianalyysiin, kuin massa- ja energia- virtoja koskevat tiedot (esim. maankäyttö) tulee eritellä ja niiden suhde asianmukaisiin vaikutusluokkaindikaattoreihin tulee määritellä. (SFS-EN 14044, 42.)

Yleensä elinkaariarvioinnissa käytetään jo olemassa olevia vaikutusluokkia, vaikutusluokkaindikaattoreita ja karakterisointimalleja, jotka eivät kuitenkaan ole aina riittäviä elinkaariarvioinnin tavoitteiden ja soveltamisalan kannalta. Tällöin tarvitaan uusien vaikutusluokkien, vaikutusluokkaindikaattoreiden ja karakterisointimallien määrittelyä. (SFS-EN 14044, 42.)



KUVIO 10. Esimerkki vaikutusindikaattoreista (SFS-EN 14044, 44)

KUVIO 10 esittää vaikutusluokkaindikaattoreiden käsitettä ympäristömekanismien perusteella, jossa "happamoitumista" on käytetty vaikutusluokan esimerkkinä. Jokaisella vaikutusluokalla on oma ympäristömekanisminsa. Karakterisointimallit ilmaisevat inventaarioanalyysin tulosten, vaikutusluokkaindikaattoreiden ja mahdollisesti vaikutusluokan loppupisteiden välistä suhdetta. Karakterisointikertoimet saadaan karakterisointimallin avulla. Ympäristömekanismi voidaan nähdä vaikutusten karakterisointiin liittyvien ympäristöprosessien summana. Vaikutusluokkien vaikutusarvioinnin rakenteosissa on tarpeen identifioida vaikutusluokan loppupiste tai mahdollisesti loppupisteet, määrittellä vaikutusluokkaindikaattori tietyn vaikutusluokan loppu-

pisteelle, havaita asiaankuuluvat vaikutusluokkaan liitettävät inventaarioanalyysin tulokset ottaen huomioon valitun vaikutusluokkaindikaattorin ja tunnistetun vaikutusluokan loppupisteen tai mahdolliset loppupisteet. Näin helpotetaan asiaankuuluvien inventaarioanalyysin tulosten kokoamista, sijoittamista sekä karakterisointimallin laadintaa. Lisäksi karakterisointimallin tieteellinen ja tekninen kelpoisuus, oletukset, arvovalinnat ja tarkkuusaste korostuvat. Kuten KUVIOSTA 10 nähdään, vaikutusluokkaindikaattori voidaan valita mistä ympäristömekanismin kohdasta tahansa tulosten ja vaikutusluokan loppupisteen väliltä. Vaikutusluokan indikaattoritulosten ja vaikutusluokan loppupisteen välisen yhteyden laadullinen arviointi tarkoittaa ympäristörelevanssia. Tämä yhteys voi olla suuri, keskitasoinen tai vähäinen. (SFS-EN 14044, 44.)

Otetaan vaikutusluokan esimerkkinä ilmastonmuutos. Tällöin inventaarioanalyysin tulokset kuvaavat kasvihuonekaasujen määrää toiminnallista yksikköä kohden. Karakterisointimallina tässä esimerkissä voidaan puolestaan pitää kansainvälisen ilmastonmuutospaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change) 100 vuotta kattavaa vertailumallia. Vaikutusluokkaindikaattorina on infrapunasäteilypakote (W/m^2) ja karakterisointikertoimen puolestaan pidetään ilmaston lämpenemispotentiaalia (GWP_{100}) kunkin kasvihuonekaasun osalta ($kg\ CO_2$ -ekvivalenttia/kg kaasua). Vaikutusluokan indikaattoritulos tässä esimerkissä ilmaistaan kilogrammoina CO_2 -ekvivalenttia toiminnallista yksikköä kohti. Esimerkin vaikutusluokan loppupisteenä on koralliriutat, metsät ja sato. Ympäristörelevanssina puolestaan tässä esimerkissä on se, että infrapunasäteilypakotteella on välillinen vaikutus potentiaalisiin ilmastovaikutuksiin ja riippuu kokonaisvaltaisesta ilmakehän lämpöabsorptiosta, jota aiheuttavat päästöt ja lämpöabsorption ajallinen jakautuminen. (SFS-EN 14044, 46.)

Vaikutusluokkien, vaikutusluokkaindikaattoreiden ja karakterisointimallien vallinnassa on edellä esitettyjen vaatimusten lisäksi noudatettava erinäisiä suosituksia. Niiden tulisi olla kansainvälisesti hyväksytyjä pohjautuen kansainvälisiin sopimuksiin tai olla pätevän kansainvälisen elimen hyväksymiä sekä niiden valinnassa tulisi minimoida arvovalinnat ja oletukset. Vaikutusluokkien tulisi kuvata tuotejärjestelmän syötteiden ja tuotosten yhdistettyjä vaikutuksia vaikutusluokan loppupisteeseen ottaen huomioon vaikutusluokkaindikaattorin. Vaikutusluokkaindikaattorien puolestaan tulee olla ympäristön kannalta relevantteja. Jos tavoite ja soveltamisala ei edellytä vaikutusluokkien, vaikutusluokkaindikaattoreiden ja karakterisointimallien päällekkäistä laskentaa (esimerkiksi kun selvitys käsittelee sekä ihmisen terveyttä, että karsinogeenisuutta), sitä tulisi välttää. Karakterisointimallin pitää olla tieteellisesti ja teknisesti pä-

tevä pohjautuen tunnistettavaan ympäristömekanismiin ja toistettaviin empiiriseen havainnointiin. Karakterisointimallin ja –kertoimien tieteellinen ja tekninen pätevyys tulisi määritellä. (SFS-EN 14044, 46.)

Ajallisten ja alueellisten olosuhteiden erottelua inventaarioanalyysin tulkintaan liittyvässä karakterisointimallissa tulisi harkita riippuen ympäristömekanismista sekä selvityksen tavoitteista ja soveltamisalasta. Karakterisointimallin tulisi sisältää aineiden kohtalon ja kulkeutumisen. (SFS-EN 14044, 46.)

Vaikutusluokkaindikaattorin ympäristörelevanssi tulisi esittää siten, että vaikutusluokkaindikaattorin tulisi ilmaista toisen, inventaarioanalyysin, vaiheen tulosten laadulliset seuraukset vaikutusluokan loppupisteeseen. Karakterisointimalliin tulisi lisätä ympäristöä koskevia tietoja suhteessa vaikutusluokan loppupisteeseen, kuten vaikutusluokan loppupisteen tila ja vaikutusluokan loppupisteessä arvioidun muutoksen suhteellinen voimakkuus. Lisäksi karakterisointimalliin tulisi lisätä alueelliset näkökohdat, kuten tietty alue ja mittakaava, ajalliset tekijät, kuten kesto, viipymäaika, pysyvyys, ajoitus jne. Ympäristömekanismien palautuvuus ja yhteyksien epävarmuus karakterisointimallin ja vaikutusluokan loppupisteiden välillä ovat ympäristöä koskevia tietoja, jotka tulisi myös lisätä karakterisointimalliin. (SFS-EN 14044, 46, 48.)

Inventaarioanalyysin (LCI) tulokset tulee sijoittaa vaikutusluokkiin. Tämä tulee tehdä niin, että huomioidaan sellaiset inventaarioanalyysin tulosten sijoittaminen, jotka kuuluvat vain yhteen vaikutusluokkaan. Lisäksi sellaiset inventaarioanalyysin tulokset tulisi tunnistaa, jotka liittyvät useampaan kuin yhteen vaikutusluokkaan. Tällaisia ovat esimerkiksi rinnakkaisten mekanismien erottaminen, esimerkiksi rikkidioksidi ositetaan vaikutusluokkiin ihmisten terveys ja happamoituminen. Toinen esimerkki useampaan vaikutusluokkaan liittyvistä inventaarioanalyysin tuloksista on sarjassa tapahtuvien mekanismien sijoittaminen, esimerkiksi typpioksidi voidaan sijoittaa sekä maanpinnan otsonin muodostumiseen, että happamoitumiseen. (SFS-EN 14044, 48.)

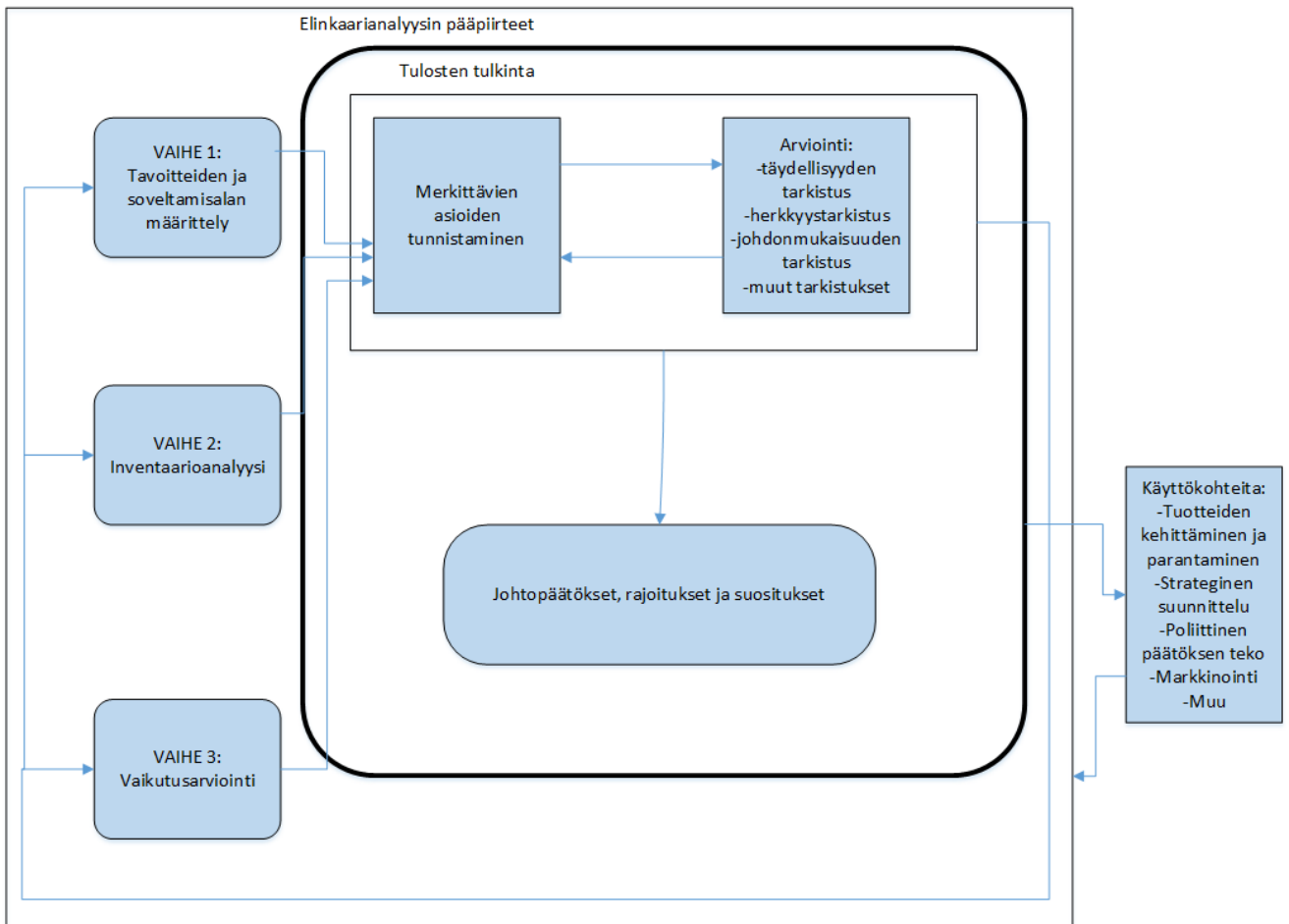
Karakterisointi eli indikaattoritulosten laskenta sisältää inventaarioanalyysin tulosten muuntamisen karakterisointikertoimien avulla yhteiseen yksikköön ja näiden muunnettujen tulosten yhdistämiseen vaikutusluokan sisällä. Numeerinen indikaattoritulos saadaan tämän laskennan, eli karakterisoinnin, lopputuloksena. Jälleen käytetyt menetelmät, arvovalinnat ja oletukset tulee huolella dokumentoida. (SFS-EN 14044, 48.)

Karakterisointimallien ja -kertoimien tarkkuudesta, pätevydestä ja ominaispiirteistä riippuu indikaattoritulosten relevanssi asetetun tavoitteen ja soveltamisalan kannalta. Myös tehdyt oletukset ja arvovalintojen määrä ja laatu karakterisointimallissa vaihtelevat vaikutusluokasta toiseen ja saattavat riippua maantieteellisestä sijainnista. Karakterisointimallin yksikertaisuuden ja tarkkuuden välillä voidaan joutua tekemään kompromissi. Elinkaariarvioinnin kokonaisluotettavuuteen saattaa vaikuttaa vaikutusluokkaindikaattoreiden laadun vaihtelu eri vaikutusluokissa. Järjestelmän rajan ja vaikutusluokan loppupisteen välisten ympäristömekanismien moninaisuus on esimerkki eri vaikutusluokissa esiintyvistä eroista. Lisäksi alueelliset ja ajalliset ominaispiirteet, esimerkiksi aineen pysyvyys ympäristössä, ja annos-vasteominaisuudet voivat vaihdella eri vaikutusluokissa. (SFS-EN 14044, 48.)

Elinkaariarvioinnin tavoitteesta ja soveltamisalasta riippuen vaikutusarvioinnissa voidaan käyttää pakollisten osien lisäksi myös valinnaisia osia ja tietoja. Normalisointi, jossa vaikutusluokan indikaattoritulosten suhteellinen suuruus vertailutietoon nähden lasketaan, on yksi tällaisista valinnaisista osista. Vaikutusluokkien lajittelua ja priorisointia eli ryhmittelyä on myös mahdollista käyttää vaikutusarvioinnissa. Painotus eli indikaattoritulosten muuntaminen ja mahdollinen yhdistely vaikutusluokkiin käyttäen arvovalintoihin perustuvia numerovalintoja on yksi mahdollinen valinnainen osa. Lisäksi lähtötiedon laadun analysointi, jotta saavutetaan entistä kattavampi käsitys indikaattoritulosten koosteen luotettavuudesta, on mahdollinen vaikutusarvioinnin valinnainen osa. Näitä menetelmiä käytettäessä tulisi pitää mielessä selvityksen läpinäkyvyys ja huolellinen dokumentointi on avainasemassa. (SFS-EN 14044, 50.)

7.4 Tulosten tulkinta (Vaihe 4)

Elinkaariarvioinnin tulosten tulkinta muodostuu kolmesta osasta ja nämä ovat kuvattuna KUVI-OON 11, johon on myös kuvattu tämän elinkaariarvioinnin viimeisen vaiheen keskinäinen suhde muiden elinkaariarvioinnin vaiheiden kanssa. Tulosten tulkinnassa elinkaariarvioinnin inventaarioanalyysi- ja vaikutusarviointivaiheiden tuloksista tunnistetaan merkitsevät asiat, arvioidaan täydellisyyttä ja herkkyyttä sekä tarkistetaan johdonmukaisuus, tehdään johtopäätökset, rajoitukset ja suositukset. (SFS-EN 14044, 54.)



KUVIO 11. Tulosten tulkintavaihe (SFS-EN 14044, 54)

Elinkaariarviointi rajataan ensimmäisessä ja viimeisessä vaiheessa, kun taas elinkaariarvioinnin inventaarioanalyysi- ja vaikutusarviointivaihe tuottavat tietoa tuotejärjestelmästä. Näiden tietoa tuottavien vaiheiden tulkinta tulisi tehdä elinkaariselvityksen tavoitteen ja soveltamisalan mukaisesti. Tulosten epävarmuuden käsittämiseksi merkittävien syötteiden, tuotosten ja menetelmäteknikkavalintojen arviointi ja herkkyystarkistus tulisi sisällyttää tulkintavaiheeseen. (SFS-EN 14044, 54.)

Selvityksen tavoitteet vaativat tulosten tulkinnalta sekä järjestelmän toimintojen ja toiminnallisen yksikön kuvausten asianmukaisuutta, että lähtötietojen laadun arvioinnin ja herkkyysanalyysin rajoitusten tunnistamista. Inventaarioanalyysin tulosten tulkinta tulisi tehdä varovasti, koska inventaarioanalyysin tulokset viittaavat syöte- ja tuotostietoihin (eivät ympäristövaikutuksiin) ja tuloksissa on lisäksi epävarmuutta syötteiden epävarmuuksien ja lähtötietojen vaihtelun aiheuttamien yhdistyneiden vaikutusten vuoksi. Tulosten epävarmuuden kuvaamiseen voi

käyttää todennäköisyysjakaumia tai arvoalueita. Tällaista analyysiä tulisi mahdollisuuksien mukaan käyttää inventaarioanalyysin johtopäätösten perustelemiseen ja tukemiseen. (SFS-EN 14044, 56.)

Inventaarioanalyysin ja vaikutusarvioinnin tulokset tulisi järjestellä siten, että merkittävät asiat ovat määriteltävissä tavoitteiden ja soveltamisalan (ensimmäinen vaihe) mukaisesti ja vuorovaikutuksessa arviointivaiheen (viimeinen vaihe) kanssa. Tämän vuorovaikutuksen tulisi ottaa huomioon muissa vaiheissa käytettyjen menetelmien, olettamusten ym. seuraukset, joita on mm. allokointisäännöillä, rajauspäätöksillä, vaikutusluokkien valinnalla, vaikutusluokkaindikaattoreilla ja malleilla. Merkittäviä asioita ovat esimerkiksi inventaariotiedot (energia, päästöt, jätteet), vaikutusluokat (luonnonvarojen käyttö, ilmastonmuutos) ja inventaarioanalyysin tai vaikutusarvioinnin tuloksiin olennaisesti vaikuttavat elinkaaren vaiheet (yksittäiset yksikköprosessit tai prosessiryhmät kuten kuljetus tai energiatuotanto). Kun edeltävien vaiheiden (inventaarioanalyysi, vaikutusarviointi) tulosten on todettu olevan selvityksen tavoitteiden ja soveltamisalan mukaisia määritellään näiden tulosten merkittävyys. (SFS-EN 14044, 58.)

Elinkaariarviointiselvityksen tulosten luotettavuuden määrittely on arviointiosan ensisijainen funktio sisältäen myös tulkinnan ensimmäisessä vaiheessa tunnistetut merkittävät asiat. Korostetaan vielä, että arviointi tulisi tehdä selvityksen tavoitteiden ja soveltamisalan mukaisesti. Arvioinnista käytettäviä menetelmiä ovat täydellisyyden tarkistus, herkkyystarkistus ja johdonmukainen tarkistus. Näitä tarkistuksia täydennetään epävarmuusanalyysillä ja lähtötietojen laadun analyysillä. (SFS-EN 14044, 58.)

Täydellisyyden tarkistuksen tavoitteena on taata olennaisten tulosten tulkintaan tarvittavan tiedon ja lähtötiedon saatavuus ja riittävyys. Jos jokin olennainen tieto ei ole riittävää tai ei ole saatavilla, tiedon tarpeellisuus elinkaariarvioinnin tavoitteiden saavuttamisen kannalta tulee estimoida ja dokumentoida. Jos merkittävien asioiden määrittämisen kannalta tarpeellinen tieto puuttuu tai se on epätäydellistä, aiemmat kaksi vaihetta (inventaarioanalyysi ja vaikutusarviointi) tulisi kahlata uudestaan läpi tai vaihtoehtoisesti muuttaa tavoitteita ja soveltamisalaa. (SFS-EN 14044, 60.)

Herkkyystarkistuksen funktio on estimoida lopputulosten ja johtopäätösten luotettavuus. Tämä tehdään määrittämällä lähtötietoihin, allokointimenetelmiin tai vaikutusluokan indikaattoritulosten laskentaan yms. liittyvien epävarmuustekijöiden vaikutus lopputuloksiin ja johtopäätöksiin.

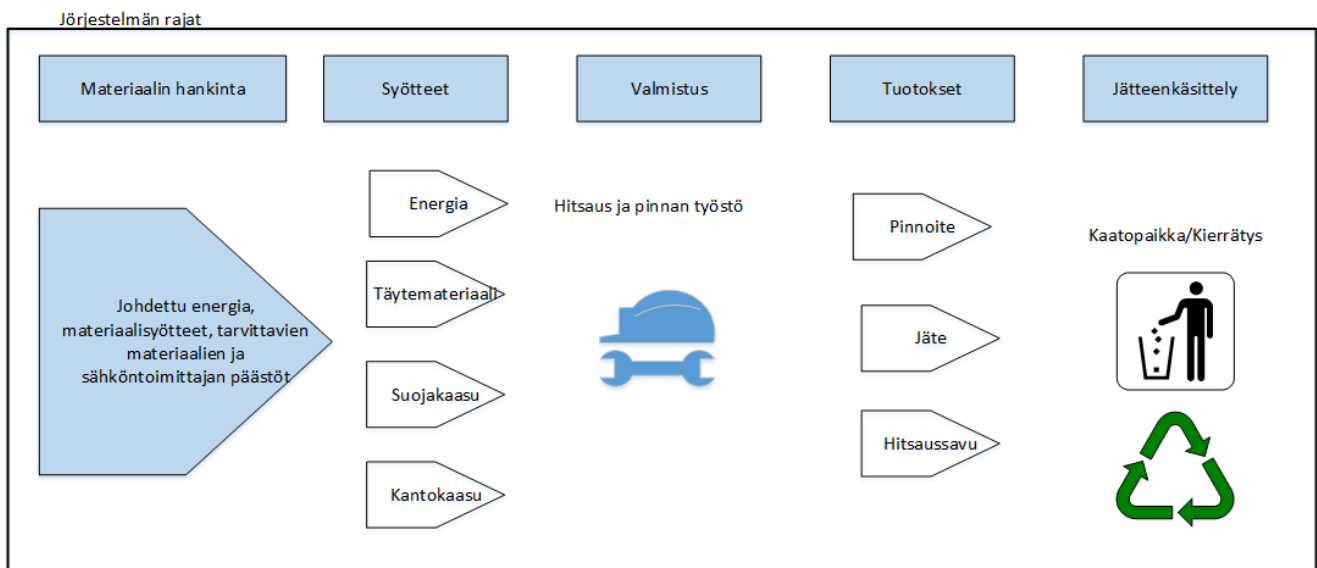
Herkkyystarkistuksessa tulee kiinnittää huomiota selvityksen tavoitteissa ja soveltamisalassa määriteltyihin asioihin, selvityksen muiden vaiheiden tuloksiin sekä asiantuntija-arvioihin ja aiempiin kokemuksiin. Herkkyystarkistuksen tulokset voivat osoittaa laajemman tai tarkemman herkkyysanalyysin tarpeen ja osoittavat ilmeiset vaikutukset selvityksen tuloksiin. Johdonmukaisen tarkistuksen funktio puolestaan on määritellä olettamusten, menetelmien ja lähtötietojen yhdenmukaisuus tavoitteiden ja soveltamisalan kanssa. (SFS-EN 14044, 60.)

Tulosten tulkinnan viimeisessä osassa tehdään johtopäätöksiä, tunnistetaan rajoituksia ja annetaan suosituksia koko selvityksen kohderyhmälle. Johtopäätökset tehdään selvityksen perusteella iteratiivisesti vuorovaikutuksessa tulosten tulkintavaiheen muiden osien kanssa. Karkeasti tulkintaprosessin ensimmäisessä vaiheessa tunnistetaan merkittävät asiat. Sen jälkeen arvioidaan menetelmätekniikka ja tulosten täydellisyys, herkkyys ja johdonmukaisuus. Sitten voidaan tehdä alustavat johtopäätökset ja tarkistetaan niiden johdonmukaisuus selvityksen tavoitteiden ja soveltamisalan kanssa mukaan lukien erityisesti lähtötietojen laatuvaatimukset, ennalta määritellyt oletukset ja arvot, menetelmätekniikan ja selvityksen rajoitukset sekä sovelluslähtöiset vaatimukset. Näitä vaiheita iteroidaan niin kauan, että saavutetaan johdonmukaiset johtopäätökset. Lopuksi raportoidaan johdonmukaiset johtopäätökset lopullisina. Suositukset pohjautuvat puolestaan näihin lopullisiin johtopäätöksiin ja heijastavat niiden loogisia ja järkeviä seurauksia sekä niiden tulisi liittyä aiottuun käyttötarkoitukseen. (SFS-EN 14044, 62.)

8 CMT- JA LASERHITSAUSPINNOITAMISEN ELINKAARIANALYYSI

Tässä työssä keskitymme pelkästään CMT- ja laserhitsauspinnoitusprosessin elinkaarianalyysiin. Elinkaarianalyysi on toteutettu SimaPro-ohjelmistolla. Muita elinkaarianalyysiin käytettäviä ohjelmistoja ovat esimerkiksi GaBi ja Umberto NXT. Eri elinkaarianalyysiin käytettävät ohjelmistot käyttävät ainakin osittain samoja tietokantoja, sillä lähteessä (Sangwan ym. 2016) Umberto NXT ohjelmistoa on käytetty elinkaarianalyysiin ja siinä on käytetty ecoinvent 3.0-tietokantaa, mikä löytyy myös SimaProsta.

CMT-hitsausprosessin tai laserhitsausprosessin järjestelmän rajat, syötteet ja tuotokset ovat karkeasti esitetty KUVIOSSA 12. Kuvio on mukautettu lähteestä (Finkbeiner ym. 2015) löytyvästä vastaavasta kuvioista. Hitsausrobottien energiankulutuksella on osoitettu olevan vähäinen vaikutus elinkaarianalyysiin (Finkbeiner ym. 2015) ja hitsauslaitteiston poistolla on puolestaan osoitettu olevan pieni ympäristövaikutus (Sproesser, Schenker, Pittner, Borndöfer, Rethmeier, Chang & Finkbeiner 2016). Hitsauspinnoitteiden tapauksessa toiminnalliseksi yksiköksi valitaan pinnoitteen pinta-ala, 1 m^2 , johon kaikkia elinkaarianalyysissä käytettäviä tietoja suhteutetaan. Elinkaarianalyysimme keskittyy vain hitsausprosessiin, mutta on helposti laajennettavissa käsittämään erilaisia pinnoitettuja tuotteita suhteutettuna kyseisen tuotteen pinnoitteen pinta-alaan.

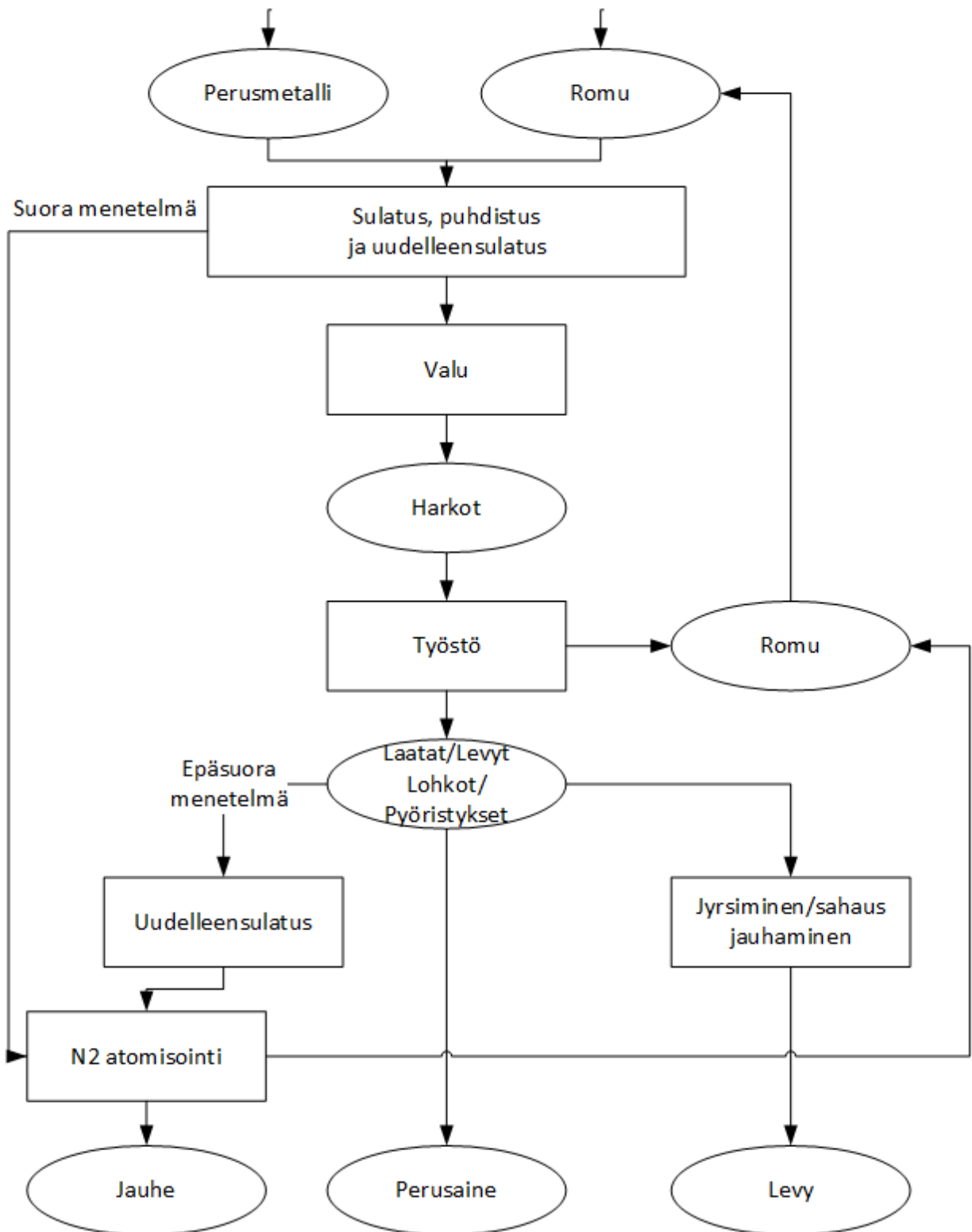


KUVIO 12. Hitsausprosessin järjestelmän rajat ja syötteet ja tuotokset. (Finkbeiner ym. 2015)

Hitsauspinnoitteeseen käytettävää materiaalia nikkelpohjaista Inconel 625 metalliseosta ei löytynyt SimaProsta valmiiksi mallinnettuna, joten päädyimme mallintamaan sen itse. Inconel 625 -metalliseoksen elementit ja niiden suhteellinen määrä on listattu taulukossa 1 (SFS-EN 18274, 19). Inconel 625 -valmistusprosessissa kuluvaa energiaa valmistusvolyymin suhteen ei löytynyt kirjallisuudesta eikä valmistajakaan suostunut näitä tietoja jakamaan.

TAULUKKO 1. Inconel 625 -nikkeliseoksen elementit ja niiden suhteellinen osuus seoksesta.

Inconel 625										
Ni	Cr	Mo	Fe	Nb	Cu	Mn	Si	Al	Ti	C
≥58,0	20,0- 23,0	8,00- 10,00	5	3,2-4,1	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,1



KUVIO 13. Raakamateriaalin hitsausjauheeksi tai perinteisemmäksi materiaaliksi, valmistusprosessit (Morrow ym. 2007)

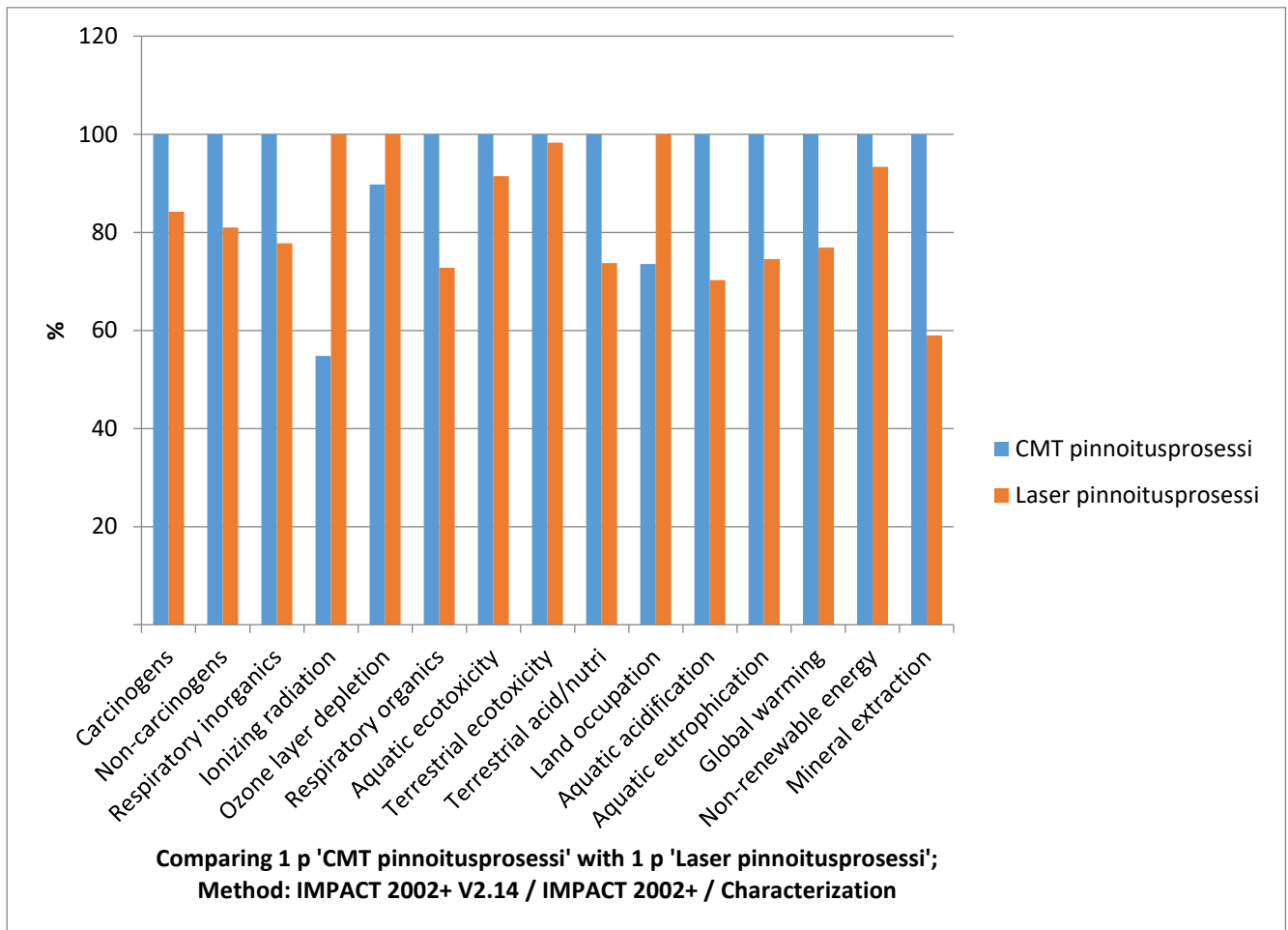
Lähteessä (Morrow ym. 2007) on kerrottu teräksisen hitsausjauheen ja perinteisempien materiaalien valmistusprosessista sekä energiankulutuksesta prosessin aikana. Oletamme, että Inconel 625 -hitsauslisäaineen valmistusprosessissa energiankulutus on samaa luokkaa kuin teräksisten vastineitten. KUVIOSSA 13 on esitetty valmistusprosessin eri vaiheet teräksisille materiaaleille (Morrow ym. 2007.). Kuvatussa valmistusprosessissa raakamateriaali ja kierrätetty materiaali jalostuvat joko jauheeksi tai levyksi. SimaProsta löytyi valmiiksi mallinnettuna metalliseoksen valmistusprosessi ruostumattomalle teräkselle ja prosessiin kuluva energia. Inconel 625 -metalliseoksen mallinnuksessa on hyödynnetty tätä olemassa olevaa mallinnusta, nikkeli- ja rautamalmin tilalle on vain vaihdettu Inconel 625 -metalliseoksen komponentit. Tässä esimerkkimallinnuksessa kierrätetyn metalliromun osuutta metalliseoksesta ei ollut huomioitu, joten sitä ei myöskään huomioitu Inconel 625 -metalliseoksen mallinnuksessa. Suhdeluku malmin ja valmiista seoksesta löytyvän metallin välillä on 0,575 ja tämän on oletettu olevan sama kuin SimaPron ruostumattoman teräksen mallinnuksessa käytetty.

Inconel 625 -hitsauslangat ovat niin sanottuja vedettyjä hitsauslankoja eli umpilankoja. SimaProsta löytyy valmiiksi mallinnettuna langanvetoon liittyvä prosessi, joka kuvaa energiankulutusta (suhteessa valmistusmäärään) metalliseoksesta valmiiksi hitsauslangaksi. Tätä prosessia hyödynsimme Inconel 625 -metalliseoksen mallintamisessa hitsauslangaksi. Inconel 625 -hitsausjauheet puolestaan ovat niin sanottuja kaasuatomisoituja jauheita. Metallijauhe voidaan valmistaa joko suoraan sulatetusta metalliseoksesta, tai epäsuoraan viimeistellyistä metallilevyistä tai -laatoista kuten on esitetty KUVIOSSA 13 (Morrow ym. 2007). Oletuksena on, että hitsausjauhe valmistetaan suoralla menetelmällä ja prosessin energiankulutuksen on oletettu vastaavan lähteessä (Morrow ym. 2007) esitetyn teräksisen jauheen valmistusprosessissa kuluvaa energiaa. Tämän lisäksi kaasuatomisoinnissa kuluvaa typpikaasun määrää arvioitiin hyödyntäen lähteestä (Lagutkin, Achelis, Sheikhaliev, Uhlenwinkel & Srivastava 2004) löytyvää kaasun ja metallin välistä suhdetta.

Taulukko 2. Hitsausprosessien inventaariotaulukko

Inventaariotaulukko	CMT-hitsauspinnoitus (3,8 mm)	Laserhitsauspinnoitus (1,5mm)
Materiaalinkulutus	21,304 kg/ m ²	12,14276 kg/ m ²
Energiankulutus	13,5 kWh/ m ²	109,166 kWh/ m ²
Suojakaasun kulutus	7,951504 kg/ m ²	9,3 kg/ m ²

Taulukossa 2 on esitetty hitsausprosessien inventaariotaulukko. Inventaariotaulukon arvot on saatu pohjautuen (Näkki 2017) tekemiin mittauksiin.



KUVIO 14. CMT- ja laserhitsauspinnoitteiden ympäristökuormien vertailu

Tässä työssä keskitytään CMT- ja laserhitsauspinnoitusprosessien vertailuun. Tarkastelu on rajattu siihen pisteeseen, että pinnoite on valmis koneistettavaksi. Inventaariotaulukosta nähdään, että CMT-hitsauspinnoituksessa materiaalia kuluu enemmän kuin laserhitsauspinnoituksen tapauksessa. Tämä johtuu siitä, että laserpinnoitusmenetelmällä saavutetaan laadukas pinnoite pienemmällä pinnoitusmateriaalin määrällä (pinnoitteen vahvuus lasermenetelmällä 1,5 mm ja CMT-hitsauspinnoitusmenetelmällä 3,8 mm). Energiankulutus puolestaan on laserhitsauspinnoituksessa merkittävästi suurempi kuin CMT-hitsauspinnoittamisessa. Kuitenkin ympäristökuormia tarkastellessa, KUVIO 14, CMT-hitsauspinnoittaminen on ympäristölle haitallisempaa. Tämä johtuu siitä, että materiaalilla on suurempi painoarvo kuin energiankulutuk-

sella, kun asioita tarkastellaan ympäristökuormituksen näkökulmasta. CMT-hitsauspinnoituksen ollessa 25% ohuempi kuin tämän hetkessä tarkastelussa, ympäristövaikutukset menetelmien välillä tasoittuivat ollen lähes samoja. Ympäristövaikutusten näkökulmasta materiaalin optimaalinen käyttö on merkittävässä roolissa.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tässä työssä on tutkittu CMT- ja laserhitsauspinnoituksen elinkaarianalyysiä. Tarkastelu rajattiin koskemaan vain pinnoitusprosessia yhden neliön alalle, ja pinnoite vaatii vielä jälkikäsitteilyä (koneistuksen). Elinkaarianalyysin tuottamiseen käytettiin SimaPro 8.4.- ohjelmistoa. Alkuasetelma CMT- ja laserhitsauspinnoitusten välillä oli sellainen, että CMT-hitsausprosessi koettiin paremmaksi myös ympäristövaikutusten osalta johtuen sen huomattavasti pienemmästä energiankulutuksesta. Kuitenkin perusteellisempi analyysi osoitti, että pinnoitemateriaalinkulutuksella on painokkaampi vaikutus ympäristöasioiden näkökulmasta. Suhteellisen pienillä pinnoitemateriaalivähennyksillä CMT-hitsauspinnoitusprosessissa menetelmien välinen ero ympäristökuormien osalta tasoittuu. CMT-hitsauspinnoitusprosessissa tulisikin optimoida pinnoitemateriaalin kulutus pinnanlaadusta tinkimättä.

Epätäydellisistä tietokannoista SimaPro-ohjelmistossa johtuen työn tekeminen vaati syvällistä ja yksityiskohtaista perehtymistä hitsausprosessin eri vaiheisiin ja niissä käytettäviin materiaaleihin. Osa prosesseista ja materiaaleista löytyi valmiina tietokannoista, mutta osan jouduimme luomaan sinne itse alusta alkaen. Tämän prosessin aikana jouduimme tekemään paljon oletuksia, jotka on dokumentoitu SimaPro-ohjelmistoon kyseisten prosessien oheen. Perehdyimme laajasti myös alan kirjallisuuteen.

Jatkokehityshankkeena näkisimme koneistuksen lisäämisen pinnoitusmenetelmien elinkaarianalyysiin. Tämän jälkeen elinkaarianalyysi on helposti muokattavissa erilaisten pinnoitettujen tuotteiden elinkaaren analysointiin. Hitsauspinnoitusprosessi on suhteellisen vaivattomasti muokattavissa koskemaan liitoshitsausprosessia, jolloin toiminnalliseksi yksiköksi valitaan pinta-alan sijaan ja lasketaan vastaavat parametrit prosessille.

LÄHTEET

AGA. 2003. Suojakaasukäsikirja. 3., uudistettu painos.

Alaranta J.: Metallikierron & kemikaaliturvallisuuden sääntelyn yhteensovittaminen kiertotaloudessa, Krogerus, Material Week Kokkola seminaariesitys, 2017.

Cold metal transfer. Pronius. 2012. Saatavissa: http://www.pronius.fi/uploads/Esite_CMT_FIN.pdf Viitattu 13.9.2017.

Eskelinen, H. 2010. Booriteräksen MAG- ja CMT- hitsaus. Metropolia ammattikorkeakoulu. Tekniikka ja liikenne. Kone- ja tuotantotekniikka. Konetekniikka. Insinööriyö. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/38487/Booriter.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Viitattu 13.9.2017.

EU komissio 2015, Kierto kuntoon – Kiertotaloutta koskeva EU:n toimintasuunnitelma, COM (2015)614.

Finkbeiner M., Rethmeier M., Chang Y.-J., Pittner A. & Sproesser G.: Environmental Impacts of Welding Methods, The Laer Magazine from TRUMPF, 3rd November, 2015.

High performance welding. Pronius. 2012. Saatavissa: http://www.pronius.fi/uploads/Esite_HighPerformance_FIN.pdf Viitattu 23.9.2017.

Kanala-Salminen H.: Kehitystyötä kiertotalouden edistämiseksi - KISS, Centria, Kokkola Material Week seminaariesitys, 2017.

Kujanpää, V., Salminen, A., Vihinen, J. 2005. Lasertyöstö. Tampere: Tammer-Paino Oy.

Korpisalo, V-M. 2006. Laserpinnoitteella lisää kilpailukykyä. Saatavissa: http://www.lcc.fi/pdf/Laserpinnoitteella_lisaa_kilpailukyky.pdf Viitattu 23.9.2017.

Lagutkin S., Achelis L., Sheikhaliev S., Uhlenwinkel V. & Srivastava V.: Atomization process for metal powder, Material Science and Engineering: A, Vol. 383 Issue 1, October 2004, s. 1-6.

Lehti, K. 2010. Sinkityn levyn hitsaus kylmäkaariprosessilla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Konetekniikan osasto. BK10A0400 Kandidaatintyö. Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/39933979.pdf> Viitattu 13.9.2017.

Leino M., Pekkarinen J. & Soukka R.: The role of laser additive manufacturing methods of metals in repair, refurbishment and remanufacturing -enabling circular economy, 9th International Conference on Photonic Technologies –LANE 2016, published by Elsevier B.V., 2016.

Lepola, P. & Makkonen, M. 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOY.

Lundström M.: Saadaanko litium kierrätettyä litiumparistojätteestä?, Aalto yliopisto, Kokkola Material Week seminaariesitys, 2017.

Morrow W.R., Qi H., Kim I., Mazumder J. & Skerlos S.J.: Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing, Journal of Cleaner Production 15, 2007.

Näkki J.: Hitsauksen ja hitsauspinnoituksen tutkimusta Centriassa, Centria bulletin, 12.5.2017 <https://centriabulletin.fi/hitsauksen-ja-hitsauspinnoituksen-tutkimusta-centriassa/> Viitattu 27.10.2017.

Näkki J.: Hitsauksen lämmöntuonti ja kaarienergian mittaaminen, lokakuu 2017.

Näkki J.: Pinnoitteet Offshore –sovelluksissa, seminaariesitys Pinnoituspäivät, 2010, KETEK.

PRe Goedkoop M., Oele M., Leijting J., Ponsioen T., Meijer E.: Introduction to LCA with SimaPro, January 2016.

Salminen J.: Metallien talteenotto ja kierrätys sinkkiteollisuudessa, Boliden, Kokkola Material Week seminaariesitys, 2017.

Sangwan K.S., Herrmann C., Egede P., Bhakar V. & Singer J. : Life Cycle Assessment of Arc Welding and Gas Welding Processes, 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering published by Elsevier, 2016.

SFS-EN ISO 14040 (2006-12-18) Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework.

SFS-EN ISO 14044 (2006-12-18) Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines.

SFS-EN ISO 18274 Hitsausaineet. Umpilangat, hitsausnauhat & hitsaussauvat nikkelin ja nikkeliseosten sulahitsaukseen, 2011.

Selvi S., Vishvaksenan A. & Rajasekar: Cold Metal Transfer (CMT) technology – an Overview, Defence Technology, published by Elsevier, August 2017.

Sproesser G., Schenker S., Pittner A., Borndörfer R., Rethmeier M., Chang Y.J. & Finkbeiner M.: Sustainable welding process selection based on weight space partitions, 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing-Decoupling Growth from Resource Use, published by Elsevier, 2016.

Tonteri H.: Metallituotteiden elinkaariarviointi, Tekninen tiedotus, MET-julkaisu nro 7/1998, Helsinki, s. 32.

Tunturi Pirjo & Tunturi Pekka: Metallien Pinnoitteet ja Pintakäsittelyt, Tekninen tiedotus, MET-julkaisu nro 3/1999, Tampere, s. 190.

Virolainen S.: Kriittisten ja arvokkaiden metallien kierrätys, Lappeenrannan yliopisto, Kokkola Material Week seminaariesitys, 2017.

Ylivoimaiset pinnoitteet laserilla. LCC-Laser Coating Centre. Saatavissa: <http://www.lcc.fi/pdf/LCC-Esite2012.pdf> Viitattu 23.9.2017.