

Simo Pönni

TOIMITUSKETJUN YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN MALLINNUS ERP-JÄRJESTELMISSÄ

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Pro gradu -tutkielma
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Simo Pönni: Toimitusketjun ympäristövaikutusten mallinnus ERP-järjestelmissä
Pro gradu -tutkielma, 86 sivua
Tampereen yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2020

Tuotteita valmistavilta yrityksiltä vaaditaan enenevässä määrin kykyä seurata ja kommunikoida oman toimintansa ympäristövaikutuksia. Yksi yleisesti hyväksytyimmistä ja luotettavimmista menetelystään tuotteen elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten selvittämiseen ja kuvailuun on ISO-standardoitu elinkaaritutkimus (Life Cycle Assessment, LCA). LCA-tutkimuksen tekeminen on työläs ja haastava prosessi, jonka haastavuus korostuu dynaamisista, alati muuttuvaa toimitusketjua tutkiessa.

Toiminnanohjausjärjestelmät (Enterprise Resource Planning, ERP) ovat yleisimmin käytettyjä ohjelmallisia ratkaisuja toimitusketjujen mallinnukseen ja hallintaan. ERP-järjestelmät suoriutuvat dynaamisen toimitusketjun hallinnasta hyvin, mutta toimitusketjun hallintaan kuuluvat vakioitominneellisuudet ja tietomallit eivät kata ympäristövaikutusten mallinnusta. Ympäristövaikutusten mallinnukseen on olemassa erillisiä LCA-sovelluksia, mutta niiden käyttämän tietomallin ja ERP-järjestelmien toimitusketjuja kuvailevan tietomallin välillä on semanttinen etäisyys, joka tekee ERP-järjestelmien ja LCA-sovellusten integroimisesta vaikeaa.

Tämä tutkielma etsii ratkaisua LCA-tiedon jatkuvaan mallintamiseen ERP-järjestelmissä dynaamisen toimitusketjun mallintamisen ohella. Suunnittelutieteellinen tutkimusprosessi alkaa ongelma-alueen kartoituksella, jonka perusteella tehdään LCA- ja ERP-käsitteistöjen synteesi. Käsitesynteesin pohjalta rakennetaan tietomalli, joka osoittaa LCA:lle ominaisen tavan mallintaa ympäristövaikutuksia olevan yhteensopiva ERP-tietomallin kanssa.

Ratkaisuna jatkuvan mallinnuksen ongelmaan dynaamisen toimitusketjun muuttuessa, tutkielma esittää ympäristövaikutusten mallinnus- ja tarkastelutavan, joka perustuu tuotteen logistisen tilan muutosten yhteydessä tehtäviin varastopaikkakohtaisiin kirjauksiin. Esitetty mallinnustapa mahdollistaa tuotenimike- ja varastopaikkakohtaisen ympäristövaikutusten tarkastelun, jonka avulla voidaan muodostaa erillisiä, fyysiseen sijaintiin sidottuja arvioita tuotteen toimitusketjun ympäristövaikutuksista, tuottaa markkina-aluekohtaista ympäristövaikutusraportointia ja kehittää toimitusketjujen ympäristöllistä tehokkuutta sekä alue- että tuotenimikekohtaisesti.

Avainsanat: elinkaaritutkimus (LCA), toiminnanohjausjärjestelmät (ERP), toimitusketjun hallinta (SCM), tietojärjestelmät, suunnittelututkimus, ympäristö, kestävyys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuskysymyksen asettelu	1
1.2	Tutkielman rakenne.....	3
2	Tutkimusmenetelmät	6
2.1	Tietojärjestelmätutkimus ja tietojärjestelmien suunnittelutiede	6
2.2	Tietotekninen artefakti	8
2.3	Tietoteknisen artefaktin suunnittelu ja suunnittelututkimuksen asettelu	10
2.4	Tietoteknisen artefaktin rakentaminen ja arviointi	12
3	Tutkimusprosessi	15
4	Ongelma-alue ja sen aikaisempi tutkimus	18
4.1	Kirjallisuuskatsaus	18
4.2	Life Cycle Assessment (LCA)	24
4.2.1	LCA-tutkimuksen vaiheet	24
4.2.2	LCA-tutkimuksen saavutettavuus.....	30
4.3	Toimitusketjun hallinta ja LCA:n tulosten mallinnus ERP-järjestelmissä	31
5	Ratkaisumallin muodostus	35
5.1	Vaatimusmäärittely	35
5.2	Ratkaisuehdotus ja suunnittelutehtävä	37
6	Käsitesynteesi	41
6.1	Yleiskäsitteistön määrittely	41
6.2	Käsittekartoitus	44
6.3	Semanttinen tietomalli	48
7	Toimintalogiikka	54
7.1	Oletukset ja esitystapa.....	54
7.2	Toimitusketjun prosessien kuvaus jäljitettävyyssgraafina	56
7.3	Tietokantakaavio ja esimerkkidatan muodostus	59
7.4	Alkeisvirtojen allokointi	64
7.5	Alkeisvirtojen laskenta ja ympäristövaikutusten luonnehdinta	67
8	Pohdinta	84
9	Johtopäätökset	86

Viiteluettelo	87
Liite 1: Sanasto	91

1 Johdanto

Inhimillisen toiminnan haitallisten ympäristövaikutusten seuranta ja hillitseminen on tärkeää elämän jatkuvuuden ja elämän laadun takaamiseksi, niin nykyisille kuin tuleville sukupolville. Erityisesti ilmaston lämpenemiseen liittyvän ympäristötietoisuuden ja ympäristökeskustelun laajuuden kasvaessa kuluttajat perustavat kulutuskäyttäytymisensä enenevässä määrin tuotteiden ja palveluiden ympäristövaikutuksiin. Lisääntyvät vaatimukset ympäristöllisestä vastuusta voivat ennen pitkää vaikuttaa poliittisiin linjauksiin, ja on mahdollista, että tulevaisuudessa tuotantoketjujen ympäristövaikutusten läpinäkyvyys kuluttajalle ei enää ole kilpailuvaltti, vaan lakiin perustuva vaatimus.

Tarve tuotantoketjujen ympäristövaikutusten mittaamiseen, tallentamiseen ja esittämiseen on joka tapauksessa kasvava. Jotta tuotteita valmistavat yritykset voisivat vastata erilaisiin ympäristövaikutustiedon raportointiin vaateisiin, on niiden voitava mallintaa oman toimintansa vaikutukset ympäristöön luotettavasti ja tarkasti, mutta ympäristövaikutusten mittaaminen ja jatkuva mallintaminen muuttuvassa toimintaympäristössä on kallista, aikaa vievää ja henkilöstöresursseja sitovaa.

1.1 Tutkimuskysymyksen asettelu

Tutkielman tarkasteleman ongelman lähtökohdan voi tiivistää yhteen tutkimusprosessin asettelua ohjaavaan kysymykseen: ”Miten tuotenimikkeen toimitusketjun ympäristövaikutuksia voitaisiin mallintaa yleisesti hyväksytyllä tavalla, joka olisi helposti saavutettavissa ja ylläpidettävissä, huomioiden mahdolliset muutokset tarkasteltavan tuotenimikkeen toimitusketjussa?” Tutkimuskysymyksestä voidaan tunnistaa kolme osaa, joiden avulla kysymyksen ongelma-alue voidaan kytkeä tutkielman kannalta olennaisiin tutkimusaloihin:

1. Ympäristövaikutukset (elinkaaritutkimus)
2. Toimitusketjut (toimitusketjujen hallinta, tuotannonohjaus)
3. Mallinnus (tietojärjestelmät, toiminnanohjausjärjestelmät)

Nämä tutkimusalueet määrittelevät tutkielman ongelma-alueen - käsitteet ja menetelmät, joilla samanaikaisesti kuvaillaan tutkimuskysymyksen asettamaa ongelmaa ja joiden avulla ongelma pyritään ratkaisemaan. Ongelma-alueen määrittelyn lisäksi tutkimuskysymys asettaa kolme vaatimusta etsittävän ratkaisun ominaisuuksille:

1. Ympäristövaikutustieto on mallinnettava yleisesti hyväksytyllä tavalla
2. Mallinnusmenettelyn tulee olla helposti saavutettavissa
3. Mallinnuksen ylläpidon tulee olla helppoa myös dynaamisen, muuttuvan toimitusketjun ympäristövaikutusten mallinnuksen tapauksessa

Ympäristövaikutustiedon hyväksyttävyyksivaatimus täytetään lähestymällä toimitusketjun ympäristövaikutusten selvittämistä ja mallinnusta elinkaaritutkimuksen (Life Cycle Assessment, LCA) viitekehyksessä. ISO:n (International Organization for Standardization) standardoima elinkaaritutkimus on yksi laajimmin tunnistetuista ja hyväksytyistä metodologisista viitekehysistä, jota soveltaen voidaan kerätä ja kuvailla tietoa tuotteen elinkaaren aikaisista ympäristövaikutuksista (Jones & Azapagic 2016; Minkov et al. 2016). Hyväksyttävyydellä tarkoitetaan myös tietyn tarkkuustason saavuttamista mallinnuksen lopputuloksessa. Ratkaisun on yllettävä tarkkuuteen, joka mahdollistaa toimitusketjun ympäristövaikutusten tarkastelun esimerkiksi tuote-, prosessi-, valmistusyksikkö- tai toimittajakohtaisesti, jotta mallinnusta tekevät organisaatiot voisivat tehdä kohdistettuja päätöksiä ja parantaa siten toimintansa kestävyyttä niin ympäristöllisestä kuin taloudellisestakin näkökulmasta.

LCA-tutkimuksen aikana kerättyä ympäristövaikutustietoa on mahdollista mallintaa erillisillä LCA-sovelluksilla, jotka käsittelevät tuotteen elinkaarta ns. tuotejärjestelmänä, jossa sovelletaan LCA:lle ominaista käsitteistöä ja tapaa tarkastella tuotteen kulkua toimitusketjun läpi. Nykyaikaiset organisaatiot kuitenkin lähes poikkeuksetta mallintavat oman toimitusketjunsä ja seuraavat niiden suorituskykyä käyttäen toiminnanohjausjärjestelmiä (Enterprise Resource Planning, ERP), jotka mallintavat toimitusketjuja käyttäen toimitusketjun hallinnalle (Supply Chain Management, SCM) ja tuotannonohjaukselle (Material Resource Planning, MRP) ominaista käsitteistöä. Eri käsitteistöjen soveltamisen seurauksena LCA-sovellusten ja ERP-järjestelmien tietorakenteiden välillä on semanttinen etäisyys, joka voi olla vaikea ylittää integraatoratkaisuilla (Hilty et al. 2011), samalla säilyttäen tiedon ylläpidettävyyden mallinnettavan toiminnan muuttuessa. Tutkimuskysymyksen edellyttämät saavutettavuuden ja ylläpidettävyyden helppouden vaatimukset eivät LCA-sovellusten käyttöönnoton ja ERP-integraation tapauksessa toteudu.

Ylläpidettävyyden näkökulmasta ideaalitalanne olisi se, että toimitusketjun rakenteellisten muutosten mallintaminen ja LCA-tiedon mallintaminen voisivat tapahtua samanaikaisesti. Ympäristövaikutusten muutosten mallintaminen ja tarkastelu suhteessa muuttuvaan toimitusketjuun olisi helppointa, jos tarkasteltava tieto olisi käsitteellisesti sidottu ERP-järjestelmän tietorakenteiden käsitteistöön ja mallinnettu ERP-järjestelmän omassa tietokannassa, käyttäen järjestelmän omia ohjelmallisia toimintoja. Hilty et al. (2011) toteavat artikkelissaan, että ERP-järjestelmät eivät tarjoa toimitusketjun hallintaan liittyvissä vakiotoiminnallisuuksissaan mahdollisuuksia mallintaa toimitusketjun ympäristövaikutuksia. Tutkielman yhteydessä tehdyn ERP-toimittajien palvelutarjonnan tarkastelun perusteella tilanne ei ole muuttunut vuoteen 2020 mennessä.

Tutkielman ensimmäinen oletus ongelman ratkaisualueesta on se, että toimitusketju, jonka ympäristövaikutuksia pyritään mallintamaan, on jo mallinnettu tai voidaan mallintaa olemassa olevassa ERP-järjestelmätoteutuksessa. Tutkimuskysymyksen esittämällä vaatimuksella helposta saavutettavuudesta tarkoitetaan matalaa käyttöönottokustannusta niin rahallisesta, ajallisesta, kuin henkilöstöressurssinäkökulmasta. Vastatakseen saavutettavuusvaatimukseen, tutkielman esittämä ratkaisu käyttää hyväkseen olemassa olevaa ERP-järjestelmissä toimitusketjuja kuvailevaa tietomallia, jota laajennetaan LCA-tiedon tallennuksen mahdollistavilla entiteettityypeillä ja relaatioilla tarvittavilta osin.

Tutkielman toinen oletus on, että LCA-tutkimus mallinnettaville toimitusketjun osille on tehty, eikä tutkielman ole tarkoitus ottaa kantaa LCA-tutkimuksen tekemisen haasteisiin. Tutkielman kolmas oletus - ja ainoa oletus, jonka tutkielman esittämä ratkaisumalli kohdistaa LCA-tutkimukseen itseensä - on LCA-tutkimuksen tulosten jäsentely ja kuvailu tavalla, joka on sovitettavissa tutkielman esittämän ratkaisun mukaisesti laajennettuun ERP-tietomalliin.

Tutkielman esittämään ratkaisumalliin kuuluva toimintalogiikan laajennus on verratien yksinkertainen. Jos toimintalogiikkaa ei integroida ERP-järjestelmään, sama logiikka voidaan käsitellä myös ERP-järjestelmän ulkopuolisena jälkilaskentana. Ratkaisun yksinkertaisuus myöskin osaltaan vastaa saavutettavuusvaatimukseen.

Tutkimuskysymyksen asettaman helpon ylläpidettävyyden vaatimus täytetään kytke-mällä tutkielman esittämä tietomalli ja toimintalogiikka ERP-järjestelmissä mallinnettuihin toimitusketjun yksikköprosesseihin tavalla, joka mahdollistaa prosessin ympäristövaikutusten seurannan ja mallinnuksen erillisinä osakokonaisuuksina. Toimitusketjun muuttuessa vain muuttuneen osan ympäristövaikutukset on selvitettävä uudelleen. On huomioitava, että kuten kaiken perustiedon hallinnointiin, myös LCA-tiedon ylläpitoon liittyy työtä, jolta ei voida välttyä. Ympäristövaikutukset on kuvailtava jollakin tavalla; ne on nimettävä, kvantifioitava ja ryhmiteltävä. Lisäksi kerätty LCA-tieto on tallennettava ja allokoitava tiettyyn osaan toimitusketjua. Tutkielman ehdottama ratkaisumalli kuitenkin edellyttää lisätyötä vain LCA-tiedon ylläpitoon liittyen. Toimitusketjun mallinnuksen menettely pysyy muilta osin muuttumattomana.

1.2 Tutkielman rakenne

Tutkielma tavoittelee rakenteessaan konstruktivistista esitystapaa, jonka tarkoitus on esitellä tutkimusprosessin rakentuminen, ongelma-alueen kartoitus ja lopulta tutkimuksen tulosten saavuttaminen ja arviointi luonnollisesti etenevässä, edellisiin vaiheisiin tukeutuvassa järjestyksessä. Konstruktivistisen narratiivin tarkoitus on heijastella tehdyn suunnittelututkimuksen luonnetta etsimisprosessina ja antaa tutkielman lukijalle mahdollisuus seurata johtopäätösten rakentumista tutkijan näkökulmasta.

Tietojärjestelmätutkimuksen ja erityisesti tietojärjestelmien yhteydessä tehtävän suunnittelututkimuksen tieteellinen tausta, sekä tutkimusta ohjaavat menetelmät ja ohjeistukset esitetään luvussa 2. Samassa luvussa kuvaillaan yleisellä tasolla myös suunnittelututkimuksen tulokset - tietotekniset artefaktit - ja niiden merkitys tietojärjestelmätutkimuksen viitekehyksessä.

Luku 3 kertoo tutkimusprosessin muodostamisesta, pohjautuen luvussa 2 esitettyihin suunnittelututkimuksen menetelmiin. Tutkimuskysymyksen määrittelemä ongelma-alue kartoitetaan luvussa 4. Kartoitus on tutkimusprosessin ensimmäinen vaihe - katsaus ongelma-alueen kirjallisuuteen. Sen tuloksena määritetään tutkimuskysymyksen asettelun näkökulmasta mielenkiintoinen ongelma, sekä ongelman ratkaisun mahdollisuudet ja rajoitteet. Tehty kartoitus on samalla tutkimuksen perustelu, joka osoittaa tutkimuksen tuloksen uutuusarvon sovellusalueellaan.

Tutkielman ongelma-alueen määrittelevät LCA-tutkimuksen ISO-standardoitu käsitteellinen viitekehys, LCA-tutkimuksen parhaiksi tunnistetut käytännöt, sekä ERP-järjestelmissä sovelletut tavat kuvailla ja mallintaa toimitusketjuja. Luvussa 5 tarkastellaan edellä määritettyä ongelma-aluetta ja rakennetaan oletus ongelman ratkaisualueesta. Tarkastelun pohjalta asetetaan vaatimukset suunnittelutehtävälle.

Ratkaisualuetta tutkitaan luvussa 6, tekemällä synteesi LCA:n ja ERP:n käsitteistöistä ja osoittaen käsitteistöjen keskinäinen yhteensopivuus. Käsitesynteesin pohjalta rakennetaan ratkaisualuetta kuvaileva semanttinen tietomalli, jonka sovelluksen mahdollisuus ERP-ympäristöissä osoitetaan luvussa 7, esittämällä yleistettyjen esimerkkien avulla ehdotus toimintalogiikasta, eli ympäristövaikutusten mallinnuksesta ja laskennasta, jolla tietomallia voidaan soveltaa tuotteen siirtyessä toimitusketjun prosessista toiseen.

Tutkielman tieteellinen kontribuutio jakautuu kahteen osaan. Käsitesynteesi ja sen pohjalta rakennettava tietomalli on osoitus siitä, että LCA-tutkimuksen tuloksena kerättyä, LCA:lle ominaisella ympäristövaikutusten esitystavalla esitettyä ympäristövaikutustietoa on mahdollista kytkeä ERP-järjestelmissä käytettyihin tietomalleihin tavalla, joka sallii LCA-tiedon jatkuvan mallinnuksen muuttamatta rakenteellisesti ERP-järjestelmien tapaa mallintaa dynaamisia toimitusketjuja.

Tutkielman toinen kontribuutio on tietomallin tarkastelutapa. Esitettävää tietomallia soveltava toimintalogiikka ei ainoastaan osoita ympäristövaikutusten laskennan mahdollisuutta, vaan ehdottaa uutta näkökulmaa ympäristövaikutusten mallinnukseen ja tarkasteluun tuotenimikkeen ja fyysisen varastopaikan kautta.

Tietojärjestelmien suunnittelututkimuksen perimmäinen tavoite on ratkaista inhimillisiä ongelmia teknologisten tietojärjestelmätoteutusten avulla. Suunnittelututkimuksen tulokset voivat olla luonteeltaan myös tulevaa suunnittelua ja toteutuksia ohjaavia, kuten tämän tutkielman tapauksessa rakennettavat käsitteistöt, mallit ja menetelmät. Olennaista

suunnittelututkimukselle on iteratiivisuus: Se, että luodut artefaktit annetaan asiantuntijayhteisön arvioitaviksi ja niitä kehitetään edelleen saadun palautteen perusteella. Luvussa 8 arvioidaan tutkielman kontribuution kelpoisuutta suunnittelutieteellisen tutkimuksen tuloksena, esitetyn ratkaisumallin heikkouksia ja vahvuuksia, sekä potentiaalia mallin jatkokehityksen kannalta. Tutkimuksen johtopäätökset annetaan luvussa 9.

Liitteessä 1 annetaan suunnittelututkimuksen metodologiaan ja ongelma-alueeseen liittyvä alkuperäinen englanninkielinen termistö ja termien suomen kielelle käännetty, tutkielmassa käytetyt vastineet.

2 Tutkimusmenetelmät

Tässä luvussa esitellään tutkimuksessa käytetyt menetelmät, jotka ohjaavat tutkimusprosessin muodostamista ja joita sovelletaan tutkimuskysymyksen asettaman ongelman ratkaisun tavoitteluun ja muodostetun ratkaisumallin arviointiin. Tutkielma lähestyy tutkimusongelmaa tietojärjestelmien suunnittelutieteen (information systems design research) keinoin, noudattaen Hevnerin et al. (2004) esittämää tietojärjestelmätutkimuksen (information systems research) viitekehystä, sekä tietoteknisen artefaktin suunnittelun ja arvioinnin suosituksia.

Kohdassa 2.1 esitellään tietojärjestelmätutkimuksen tieteellinen tausta tutkielman kannalta merkittävien osin, sekä Hevnerin et al. näkemystä noudattavat tietojärjestelmien suunnittelutieteen keskeiset periaatteet ja tietojärjestelmätutkimuksen viitekehys. Sovellettavat suunnittelututkimuksen käsitteet ja metodiikka esitellään kohdissa 2.2 - 2.4.

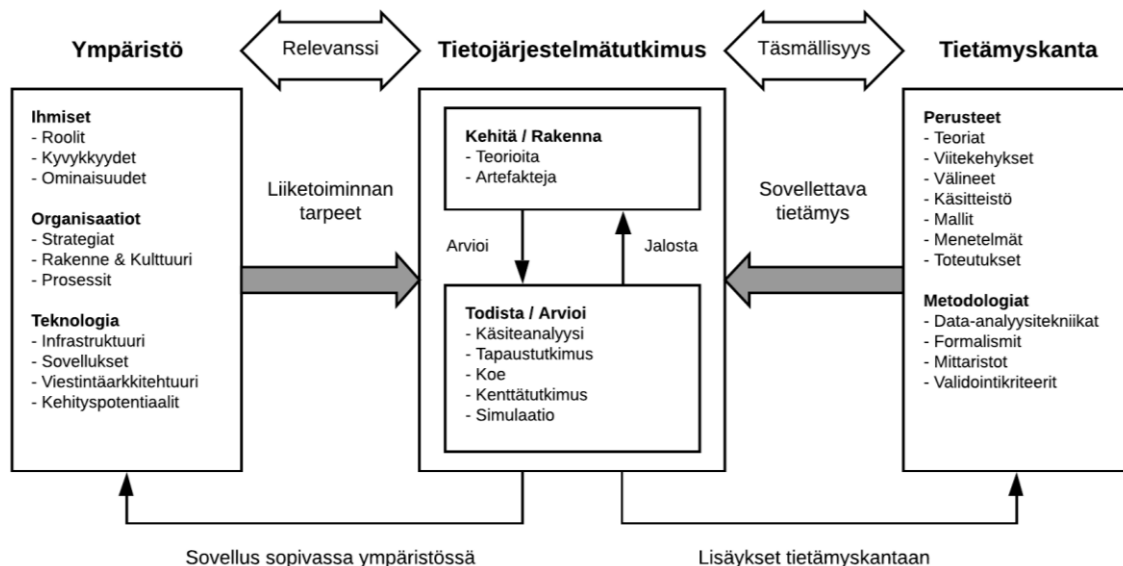
2.1 Tietojärjestelmätutkimus ja tietojärjestelmien suunnittelutiede

Tietojärjestelmä käsitteenä on määritelty tarkasteluyhteytensä perusteella monin tavoin (Falkenberg et al., 1997), mutta määritelmillä on selkeitä yhteisiä piirteitä. Selvityksessään tietojärjestelmän käsitteen merkityksistä tietojärjestelmätutkimuksen piirissä, Carvalho (2000) toteaa laveasti seuraavien asioiden yhdistävän lähes kaikkia määritelmiä tietojärjestelmistä: ”Tietojärjestelmät käsittelevät tietoa ja liittyvät jossakin määrin organisaatioihin tai organisaatioissa tehtyyn työhön. Lisäksi tietojärjestelmät liittyvät tietotekniikkaan joko toteutuksensa kautta, tai siten, että niissä voidaan soveltaa tietoteknisiä ratkaisuja.”

Tietojärjestelmätutkimuksen piirissä tehtyjä tutkimuksia voidaan luonnehtia kahdella eri tavalla: luonnontieteellisinä tai suunnittelutieteellisinä (March & Smith 1995). Hevner et al. (2004) tunnustavat luonnontieteelliseen paradigmaan perustuvien käyttäytymistieteellisten tutkimusten tärkeyden tietojärjestelmätutkimuksessa, koska ne tarkastelevat erityisesti organisatorisen, inhimillisen toiminnan ja tietoteknisten ratkaisujen leikkauskohdassa esiintyviä ilmiöitä (Silver et al. 1995) - samalla hienovaraisesti tuoden esiin näkemysensä tietotekniikan merkityksestä tietojärjestelmätutkimuksen alueella rajapintana inhimillistä toimintaa vasten. Käyttäytymistieteellinen tutkimus, muiden luonnontieteiden tapaan, pyrkii etsimään totuutta, eli luomaan uutta teoriaa esittämällä, todistamalla ja kumoamalla näihin ilmiöihin perustuvia hypoteeseja (Hevner et al. 2004). Suunnittelutieteellinen tutkimus sen sijaan tavoittelee uutta tietoa ongelmanratkaisun ja sovelluksen kautta. Suunnittelutieteellinen paradigma ammentaa insinööritieteiden periaatteista, jotka antavat sovellettavalle ratkaisulle tutkimustuloksen arvon (Pefferers et al. 2007) perinteisen luonnontieteellisen tutkimuksen tuottaman totuuden rinnalla.

Hevner ja Chatterjee (2010) kuvailevat suunnittelutieteen olevan ongelmanratkaisuparadigma, jonka olennainen periaate on, että tietoa ja ymmärrystä suunnitteluongelmasta

ja sen ratkaisusta saadaan rakentamalla artefakti, soveltamalla sitä käytäntöön ja arvioimalla sitä. Tietojärjestelmien suunnittelutieteen tapauksessa rakennettavat artefaktit ovat tietoteknisiä artefakteja (March & Smith 1995). Hevnerin ja Chatterjeen näkemyksen mukaan suunnittelutieteellinen paradigma ei ole, eikä voi olla täysin irrallinen luonnontieteellisestä paradigmasta; paradigmat ovat toistensa komplementteja ja ovat keskenään vuorovaikutuksessa tietojärjestelmien tutkimuksessa. Tämä näkemys on kuvailtu Hevnerin et al. (2004) määrittelemässä tietojärjestelmätutkimuksen viitekehyksessä. Kuva 2.1 on suomen kielelle käännetty mukaelma Hevnerin et al. viitekehyyksen graafisesta esityksestä, jossa ympäristö (environment), tietojärjestelmätutkimus (IS research) ja tietojärjestelmätutkimuksen tietämuskanta (knowledge base) ovat keskinäisessä, syklisessä vuorovaikutuksessa.



Kuva 2.1: Tietojärjestelmätutkimuksen viitekehys

Tietojärjestelmätutkimuksen viitekehyyksen graafisen esityksen (kuva 2.1) keski-osassa kuvataan tutkimuksen käyttäytymistieteellinen, teoriaa kehittävä ja todistava (develop-justify) lähestymistapa sekä suunnittelutieteellinen, artefakteja rakentava ja arvioiva (build-evaluate) lähestymistapa samanvertaisina ja toisiinsa liittyvinä tietojärjestelmätutkimuksen tietämuskantaa soveltavina ja kartuttavina prosesseina. Tietojärjestelmätutkimuksen tulokset jakautuvat viitekehyksessä kahtia ympäristöön sovellettavuutensa, eli relevanssinsa (relevance) sekä tutkimukseen sovellettavuutensa ja täsmällisyytensä (rigor) mukaan. Suunnittelutieteellisen prosessin tuloksena rakennetut artefaktit ovat Hevnerin et al. määritelmän mukaan kontribuutioita tietämuskantaan yhtä lailla kuin

käyttäytymistieteellisen tutkimuksen pohjalta syntynyt teoria, viitekehykset ja metodologiat. Samanaikaisesti artefakteilla on merkitys ympäristölle vastauksina esiin nostettuihin liiketoiminnallisiin tarpeisiin, jotka voidaan laajemmin tulkita myös erilaisina inhimillisinä tiedon käsittelyyn liittyvinä ongelmina (Hevner & Chatterjee 2010). Viitekehyksen esittämä syklinen malli sulkeutuu, kun rakennettuja artefakteja tarkastellaan sovellusympäristössään käyttäytymistieteellisen tutkimuksen keinoin - mahdollisesti paljastaen uusia ongelmia, joihin taas voidaan hakea ratkaisua parantamalla olemassa olevia artefakteja tai rakentamalla uusia.

2.2 Tietotekninen artefakti

Tietojärjestelmätutkimuksen kontekstissa tietotekninen artefakti (IT artifact) on laaja yläkäsite suunnittelutieteellisen tutkimuksen tuloksille, joiden March ja Smith (1995) sekä Hevner et al. (2004) määrittelevät koostuvan käsitteistöistä (constructs), malleista (models), menetelmistä (methods) ja toteutuksista (instantiations). Heidän määritelmässään käsitteistöt koostuvat sanastoista ja symboleista, joilla tietojärjestelmän tietoalkioita tunnustetaan. Mallit ovat määritelmän mukaan abstraktioita ja esityksiä, joilla kuvaillaan tietoalkioita ja niiden välisiä suhteita. Menetelmät ovat algoritmeja ja käytäntöjä, joiden avulla mallinnettua tietoa voidaan manipuloida, ja joiden avulla tietojärjestelmän sisältämästä tiedosta voidaan saada sovellusarvoa. Toteutukset määritellään valmiina, tai prototyypivaiheessa olevina tietojärjestelminä tai niiden osina.

Hevner et al. (2004) käyttävät käsitteistön, mallin ja menetelmän käsitteitä kuvaamaan myös tietojärjestelmän suunnittelun apuvälineitä, jotka eivät suoranaisesti ole toteutettavien tietojärjestelmien osia, mutta kuuluvat tietojärjestelmätutkimuksen tietämuskantaan suunnittelun apuvälineinä. He kutsuvat tämänkaltaisia artefakteja suunnitteluartefakteiksi (design artifacts). Hevner ja Chatterjee (2010) ovat myöhemmin omaksuneet myös parannukset ja laajennukset suunnittelutieteelliseen teoriaan (better design theories) tietoteknisiksi artefakteiksi, josta voidaan tulkita heidän näkemyksensä kehittyneen suuntaan, joka pyrkii kaventamaan sovellettavan ja suunnittelun teoriaa edistävän artefaktin käsitteellistä eroa.

Tietojärjestelmiin liittyvien artefaktien merkityksistä ja niiden keskinäisistä hierarkioista on esitetty erilaisia näkemyksiä. Lee et al. (2015) ovat ehdottaneet tietojärjestelmäartefaktin (IS artifact) käsitettä kuvailemaan järjestelmää, joka koostuu tietoteknisistä artefakteista, informaatioartefakteista ja sosiaalisista - eli ihmisten välistä viestintää ja käyttäytymistä kuvailevista - artefakteista. Tässä näkemyksessä tietotekninen artefakti käsitetään ainoastaan teknologisenä komponenttina, jolla ei itsessään ole informaatioisisältöä. Iivari (2017) kritisoi Leen et al. esittämää tietojärjestelmän jakoa komponentteihin suunnittelutieteellisestä näkökulmasta, mm. koska tietojärjestelmän suunnitteluprosessia täytyisi - jakotapaa vastaavasti - kuvailla komponenttiensa suunnitteluprosesseina, joista erityisesti sosiaalisen artefaktin tarkoituksenmukainen suunnittelu on vähintään haastavaa,

jos ei mahdotonta. Matookin ja Brownin selvitys (2017) tietoteknisen artefaktin määritelmistä tietojärjestelmätutkimuksen alalla antaa mahdollisuuden todeta, että Marchin ja Smithin (1995) määritelmän jälkeen tietoteknisen artefaktin määritelmät suunnittelututkimuksen piirissä ovat painottaneet teknologisen komponentin merkitystä eri tavoin, mutta määritelmässä on säilytetty sallivan muotoilun avulla jonkinlainen yhteensopivuus. Osa määritelmistä ei korosta teknologista komponenttia, mutta yhdessäkään määritelmässä ei teknologiasta ole sanouduttu irti kokonaan. Tuoreimmat näkemykset kuitenkin edellyttävät teknologian läsnäoloa (Matook & Brown 2017) tietoteknisistä artefakteista keskustellessa.

Iivari (2007) kritisoi Hevnerin et al. omaksumaa artefaktien määrittelytapaa sen yleisluontoisuudesta. Hän toteaa, että määrittely ei kuvaile niinkään teknologisia ratkaisuja kuin tietoa mallintavia ja suunnittelua ohjaavia meta-artefakteja. Lisäksi Hevnerin et al. tietojärjestelmätutkimuksen viitekehys ei Iivarin (2010) mukaan kytkeydy vahvasti tietotekniikkaan tai tietojärjestelmiin, vaan on enemmänkin yleinen suunnittelututkimuksen viitekehys. Kritiikin aiheellisuutta tukee mm. edellä mainittu Hevnerin ja Chatterjeen ajattelu tietoteknisen ja suunnitteluartefaktin käsitteellisestä yhtenäistämistä heidän esittämänsä viitekehysten yhteydessä. Ajattelutapa on salliva, eikä erityisesti tietojärjestelmäsperi kaikissa tietojärjestelmien määritelmässä (Matook & Brown 2017). Tämä ei kuitenkaan tarkoita Hevnerin et al. viitekehysten tai artefaktien luokittelutavan olevan sopimaton sovellettavaksi tietojärjestelmätutkimuksessa.

Tämän tutkielman yhteydessä sovelletaan Hevnerin et al. määritelmää tietoteknisestä artefaktista, joka olettaa teknologian olevan läsnä sen toteutuksessa tai sovelluksessa, vaikka artefakti itsessään ei sisältäisi teknologista elementtiä. Määritelmä mahdollistaa artefaktin tulkinnan sekä teoreettista että sovellusarvoa tarjoavana asiana. Hevnerin et al. näkemys tietoteknisestä artefaktista on suunnittelututkimuksen apuväline, joka tarjoaa mielekkään tavan lähestyä suunnitteluongelmaa ja luokitella tutkimuksen tulokset. Tietoteknisten artefaktien tarkastelu käsitteinä, malleina, menetelminä ja toteutuksina muodostaa – edellä luetellussa järjestyksessä – hierarkkisen, toteutusta asteittain lähestyvän mallin tietojärjestelmän rakentamiseen ja samalla suoraviivaisen, mutta tehokkaan tavan lähestyä artefaktin suunnitteluprosessia. Oletettaessa, että suunnittelututkimuksen perimmäinen tarkoitus on rakentaa tietoteknisen artefaktin toteutus, niin tarvittavien käsitteiden, mallien ja menetelmien muodostaminen palvelevat tätä tarkoitusta ja niitä voidaan pitää itsessään arvokkaina välituloksina (Iivari 2010).

Tutkielman esittämä suunnittelutieteellisen prosessin tulos on kahteen osaan jakautuva ratkaisumalli tutkimuskysymyksen asettamaan ongelmaan. Ensimmäinen osa on luvussa 6 esitettävä käsitesynteesi, joka yhdistää ja yleistää elinkaariarvioinnissa (LCA) käytettävän tuotejärjestelmää kuvailevan käsitteistön ja ERP-järjestelmissä toimitusket-

jun hallintaa (SCM) kuvailevan käsitteistön tavalla, jonka tarkoitus on osoittaa toimitusketjun elinkaariarvioinnin aikana kerätyn ympäristövaikutusaineiston jatkuvan mallinnuksen ja laskennan mahdollisuus ERP-järjestelmissä tutkimuskysymyksen edellyttämällä helposti saavutettavalla ja ylläpidettävällä tavalla. Käsitesynteesi koostuu kahdesta artefaktista: käsitteistöstä ja sen pohjalta luotavasta semanttisesta tietomallista.

Tuloksen toinen osa on luvussa 7 esitettävä toimintalogiikka, jonka tarkoitus on osoittaa, että on olemassa menetelmiä, joiden avulla esitettyä tietomallia voidaan soveltaa käytäntöön ERP-ympäristössä ja siten saada sovellusarvoa tutkielman esittämästä ratkaisumallista. Menetelmät kuvaillaan luvussa 7 esitettäviin sovellusympäristöllisiin oletuksiin (käytännöt) perustuvina ympäristövaikutusten laskentaoperaatioina (algoritmit), joita suoritetaan tuotteen kulkiessa toimitusketjun läpi. Toimitusketjua havainnollistetaan muikailemalla Sirkan ja Junkkarin (2012) esittämää jäljitettävyysohraafia. Tuotteen kulku prosessista toiseen esitetään jäljitettävyysohraafin polkuina graafiteoriassa käytetyllä notaatiolla.

2.3 Tietoteknisen artefaktin suunnittelu ja suunnittelututkimuksen asettelu

Hevner et al. (2004) kuvailevat tietoteknisen artefaktin suunnitteluprosessin sarjana asiantuntijatoimintoja, joiden tuotos on innovatiivinen tuote. Heidän mukaansa suunnittelutieteellinen tutkimus eroaa asiantuntijayhteisön tekemästä rutiininomaisesta suunnittelutyöstä innovaatioaspektin kautta: Rutiinisuunnittelun tarkoitus on soveltaa parhaiksi tunnistettuja ratkaisuja tunnettuihin ongelmiin, siinä missä suunnittelututkimuksen tarkoitus on ratkaista ennalta ratkaisemattomia ongelmia tai keksiä tunnettuihin ongelmiin tehokkaampia, parempia ratkaisuja.

Suunnittelututkimus on luova prosessi, jonka aikana tutkimuksen tekijän on pyrittävä kehittämään sekä tuotostaan, eli artefaktia, että tuotoksen suunnittelun prosessia itseään. Formalisoidakseen suunnittelututkimuksen tavoitteet, Hevner et al. (2004) ovat esittäneet seitsemän suositusta, tai laadullista vaatimusta, joihin jokaisen suunnittelututkimuksen tulisi vastata tavalla tai toisella. Nämä suositukset on listattu taulukossa 2.1.

Hevnerin et al. suositukset eivät tietenkään ole muotoilussaan täydellisiä ja tyhjentyviä, vaan ne jättävät tulkinnan varaa tutkimuksen tekijälle, jonka on oman asiantuntemuksensa ja asiantuntijayhteisön arvioinnin kautta varmistettava tehdyn tutkimuksen kyky vastata suositusten esittämiin vaateisiin. Esimerkiksi, suositukset 3 ja 5 edellyttävät täsmällisyyttä suunnittelun menetelmien soveltamisessa ja tuotoksen arvioinnissa. Menetelmänsä riittävän täsmällisyyden osoittaminen on tutkimuksen tekijän vastuulla, ja menetelmän on kestävä asiantuntijayhteisön kriittinen arviointi.

Suosituksiin 2, 4 ja 7 – relevanssiin, kontribuutioon ja kommunikointiin – vastaaminen selviää tutkimuksen tekijän ja kohdeyleisön välisen dialogin perusteella. On kuitenkin mahdollista, että suunnittelututkimuksen tekijä on myös sovellusalueen ammattilainen, jolloin tutkimuksen muodostus saattaa muistuttaa enemmänkin monologia, mutta

Taulukko 2.1: Suunnittelututkimusta ohjaavat suositukset

Suositus	Kuvaus
Suositus 1: Suunnittelu artefaktina	Suunnittelututkimuksen on tuotettava tuloksenaan toteuttamiskelpoinen artefakti käsitteistön, mallin, menetelmän tai toteutuksen muodossa.
Suositus 2: Ongelman relevanssi	Suunnittelututkimuksen päämäärä on kehittää teknologiaan perustuvia ratkaisuja tärkeisiin ja relevantteihin liiketoiminnallisiin ongelmiin.
Suositus 3: Suunnittelun arviointi	Suunnitteluarteaktin hyödyllisyyden, laadun ja tehokkuuden on tultava täsmällisesti osoitetuiksi hyvin suoritettujen arviointimenetelmien avulla.
Suositus 4: Tutkimuksen kontribuutio	Tehokkaan suunnittelututkimuksen on tarjottava selkeitä ja todistettavia kontribuutioita suunnitteluarteaktin sovellusalueelle, suunnittelun perusteisiin ja/tai suunnittelun metodologioihin.
Suositus 5: Tutkimuksen täsmällisyys	Suunnittelututkimus nojaa täsmällisten menetelmien soveltamiseen suunnitteluarteaktin rakentamisen ja arvioinnin aikana.
Suositus 6: Tutkimus etsimisprosessina	Tehokkaan arteaktin etsintä edellyttää saatavilla olevien keinojen hyödyntämistä toivottujen tulosten saavuttamiseksi, samalla mukautuen ongelma-alueen asettamiin vaatimuksiin.
Suositus 7: Tutkimuksen kommunikointi	Suunnittelututkimus on esitettävä tehokkaasti sekä ammatilliselle yleisölle että hallinnolliselle yleisölle.

tutkimuksen tuotos voi olla relevantti sovellusalueellaan. Kohdeyleisön on kuitenkin vahvistettava tai hylättävä tuotos osana suunnittelututkimuksen relevanssisyyskliä, joka esitellään kohdassa 2.4.

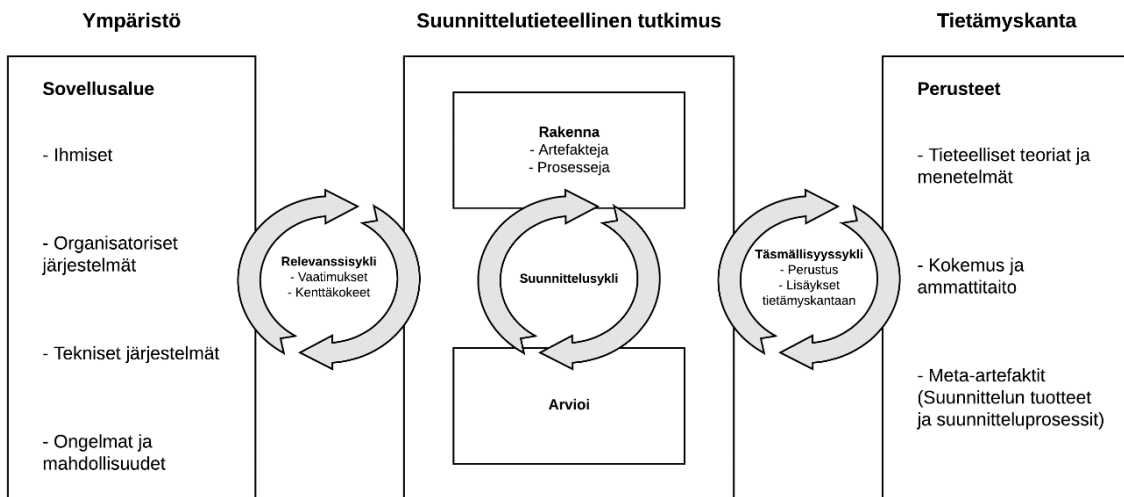
Edellä mainitun lisäksi suositus 2 edellyttää ”teknologiaan perustuvia ratkaisuja liiketoiminnallisiin ongelmiin”, mutta samaan aikaan Hevner et al. näkevät myös suosituksessa 1 luetellut, ei-teknologiset arteaktit suunnittelututkimuksen tuotteina ja liiketoiminnalliset ongelmat inhimillisinä, vaikkakin organisatorisina ongelmina. Liiketoiminnalliset ongelmat ovat tietenkin yksi ilmentymä inhimillisistä, organisatorisista ongelmista, mutta tämä esimerkki ristiriidasta (vaikkakin lievistä) Hevnerin et al. suosituksen ja muun ilmaisun välillä osoittaa, että tutkijan on käytettävä suositusten tulkinnassa omaa arviointikykyään. Hevner et al. toteavat itsekin (2004), että suositukset tulisi ottaa suosituksina, eikä niitä tulisi seurata orjallisesti. Heidän esittämiensä suositusten tarkoitus on tarjota suuntaviivat suunnittelututkimuksen tekoon. Tutkija itse päättää, millä tavoin ja mihin vaateisiin vastataan.

Tämä tutkielma noudattaa Hevnerin et al. esittämiä suosituksia suunnittelututkimusprosessin ja tutkimuksen tavoitteiden asettelussa. Suositusten soveltaminen tutkimuksen yhteydessä esitellään tarkemmin luvussa 3.

2.4 Tietoteknisen artefaktin rakentaminen ja arviointi

Tietoteknisen artefaktin rakentaminen on iteratiivinen prosessi, joka alkaa ongelma-alueen kartoittamisella. Yksi Hevnerin et al. esittämistä suunnittelututkimusta ohjaavista suosituksista (taulukko 2.1, suositus 6) edellyttää suunnittelututkimuksen olevan etsimisprosessi, jonka tuloksena voidaan löytää tehokas artefakti hyödyntämällä saatavilla olevia keinoja samalla mukautuen ongelma-alueen asettamiin vaatimuksiin. Ympäristö, jossa tutkimuksen kannalta mielenkiintoiset ilmiöt esiintyvät ja jossa artefaktia tullaan soveltamaan, määrittelee ongelma-alueen.

Ongelma-alueita kuvailevat mallit edustavat yhteyttä ongelman ja sen ratkaisun välillä, ja metodit ovat tapa tutkia ongelman ratkaisualuetta (Hevner et al. 2004). Suunnittelututkimuksen tuloksena luotavien mallien ja metodien arviointi antaa tutkijalle ja asiantuntijayhteisölle mahdollisuuden sekä ymmärtää ongelma-alueita paremmin että kehittää esitettyä ratkaisua ja suunnitteluprosessia itseään. Tätä menettelyä Hevner et al. kutsuvat tietojärjestelmätutkimuksen viitekehyyksessä rakenna-arvioi -silmukaksi. Hevner on myöhemmin esittänyt viitekehyyksestä eriytetyn suunnittelutieteellisen aspektin omana osakokonaisuutenaan (Hevner 2007), jossa hän luonnehtii ympäristön, suunnittelutieteellisen tutkimuksen (design science research) ja tietämyskannan välillä, sekä suunnittelutieteellisen tutkimuksen aikana sisäisesti tapahtuvia toimintoja kolmena syklinä. Nämä syklit ovat relevanssisykli, suunnittelusykli ja täsmällisyssykli (relevance cycle, design cycle, rigor cycle). Kuva 2.2 on suomen kielelle käännetty mukaelma Hevnerin esityksestä suunnittelutieteellisen tutkimuksen syklisestä luonteesta.



Kuva 2.2: Suunnittelutieteellisen tutkimuksen syklit

Ongelma-alueella sovellettavan artefaktin arviointi siltä osin, ratkaiseeko luotu artefakti ongelman, tai pystyykö artefakti kuvailemaan ongelmakentän tavalla, joka mahdollistaa ratkaisun etsimisen ja tuottamisen, kuuluu relevanssisykliin. Täsmällisyssykyklissä tutkija ja asiantuntijayhteisö arvioivat, onko suunnittelutieteellinen tutkimus tuottanut arvokkaita kontribuutioita suunnittelutieteellisen tutkimuksen tietämuskantaan ja ovatko kontribuutiot laadullisesti hyväksyttäviä. Suunnittelusykli liittyy osittain relevanssi- ja täsmällisyssykykien kanssa: Relevanssi- ja täsmällisyssykykien aikana kerätyn palautteen perusteella artefakteja rakennetaan ja kehitetään edelleen suunnittelusykyklissä, rakentaen ja arvioiden kerta toisensa jälkeen. Syklejä toistetaan, kunnes ongelmaan on saatu tyydyttävä ratkaisu, tai tietämuskantaan lisäämisen vaatima tieteellinen täsmällisyys on saavutettu (Hevner 2007).

Tutkielman yhteydessä tehty suunnittelututkimus koskettaa jokaista edellä mainituista sykleistä. Ongelma-alueen kartoitus ja kuvailu käsitesynteesin avulla kuuluu relevanssi- ja suunnittelusykykeihin. Tutkielman ohjaajan kanssa suoritettujen esitetyn ratkaisumallin sisällöllisen ja rakenteellisen oikeellisuuden, esitystavan oikeellisuuden, sekä mallin ilmaisuvoiman ja yleisyyden arvioinnit ja arviointien pohjalta tehdyt korjaukset ja muutokset ovat iteraatioita suunnittelusykyklissä. Käsitesynteesin valmis esitys ja tutkielman ehdottama menettely ympäristövaikutusten tarkastelusta varaston näkökulmasta ovat täsmällisyssykykliin kuuluvia lisäyksiä tietämuskantaan suunnittelun ohjeina (meta-artefakteina) sovellusalueella tapahtuvaan myöhempään ongelmanratkaisuun ja esitetyn ratkaisun mahdollisiin myöhempään toteutuksiin erilaisissa ERP-ympäristöissä.

Hevnerin et al. suunnittelututkimusta ohjaava suositus 3 edellyttää, että ”Suunnitelluartefaktin hyödyllisyyden, laadun ja tehokkuuden on tultava täsmällisesti osoitetuiksi hyvin suoritettujen arviointimenetelmien avulla”. Tämän lisäksi arvioinnin menetelmien tulee olla hyvin valittuja, ja tarkoitukseensa sopivia (Hevner et al. 2004). Taulukko 2.2. esittää Hevnerin et al. yhteenvedon artefaktien arvioinnin menetelmistä.

Tutkielman laajuudessa rakennettavat artefaktit ovat kuvauksia käsitteistä, malleista ja metodeista, joita voidaan käyttää myöhempien toteutusten ohjeina. Koska ohjelmallista toteutusta ei tutkielman laajuudessa tehdä ja jalkauteta sovellusympäristöön, toteutusta ja sen käyttöä tai suoritusta arvioivat menetelmät rajautuvat oletusarvoisesti pois.

Staattinen analyysi ja arkkitehtuurianalyysi sen sijaan ovat arvioinnin menetelmiä, joita voidaan soveltaa myös toteuttamattoman mallin arviointiin. Simulaatio, eli keinotekoisien datan soveltaminen mallin suorituksen arvioinnissa on myöskin mahdollinen tutkielman esittämän ratkaisumallin arviointimenetelmä, ja voi olla osa staattista analyysiä mallin havainnollistajana ja arkkitehtuurianalyysissä arkkitehtuuriin sopivuuden perusteluna. Asiantunteva perustelu ja hyödyllisten skenaarioiden esittely eivät ole ainoastaan mahdollisia arvioinnin menettelyjä, vaan ehdottoman tarpeellisia tulevien toteutusten ja jatkotutkimuksen tavoittelun motivoinniksi.

Taulukko 2.2 Arvioinnin menetelmät

Tyyppi	Arviointimenetelmä
1. Havainnollinen	Tapaustutkimus: Artefaktin perusteellinen tutkiminen liiketoimintaympäristössä. Kenttätutkimus: Artefaktin käytön tarkkailu useissa projekteissa.
2. Analyttinen	Staattinen analyysi: Artefaktin rakenteen tarkastelu sen staattisten ominaisuuksien osalta (esim. kompleksisuus). Arkkitehtuurianalyysi: Arvio artefaktin sopivuudesta tekniseen tietojärjestelmäarkkitehtuuriin. Optimointi: Artefaktin luontaisten optimaalisten ominaisuuksien osoittaminen tai optimaalisuusrajojen osoittaminen artefaktin toiminnassa. Dynaaminen analyysi: Artefaktin tarkastelu käytössä sen dynaamisten ominaisuuksien osalta (esim. suorituskyky).
3. Kokeellinen	Kontrolloitu koe: Artefaktin tarkastelu kontrolloidussa ympäristössä erinäisten ominaisuuksien osalta (esim. Käytettävyys). Simulaatio: Artefaktin suorittaminen keinotekoista dataa käyttäen.
4. Testaava	Toiminnallinen (black box) testaus: Artefaktin rajapintojen suorittaminen puutteiden ja virheiden löytämiseksi. Rakenteellinen (white box) testaus: Artefaktin toteutuksen kattavuustestaus jollakin mittarilla (esim. suorituspolut) sen toteutuksessa.
5. Kuvailuva	Asiantunteva perustelu: Artefaktin hyödyllisyyttä puolustavan, vakuuttavan argumentin rakentaminen tietämuskantaa hyväksi käyttäen. Skenaario: Yksityiskohtaisten skenaarioiden rakentaminen artefaktin ympärille sen hyödyllisyyden osoittamiseksi.

Tutkielman yhteydessä suoritettavaa arviointia tehdään kaikin edellä mainituin, tutkielman tuotosten arviointiin sopivin keinoin. Arviointimenetelmien soveltaminen esitetään luvussa 3.

3 Tutkimusprosessi

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen tausta, suunnittelututkimuksen menetelmien valinnan perusteet ja niiden soveltaminen tutkimusprosessin asettelussa. Suunnittelumenetelmien kytkentä tehtyyn suunnittelutyöhön esitetään erillisenä kokonaisuutena, jotta ratkaisumallin tavoittelun kuvailussa luvuissa 4-7 voidaan keskittyä pääosin ongelma- ja sovel-lusalueeseen.

Tutkielman kirjoittaja ja tutkimuksen tekijä työskentelee tietojärjestelmäasiantunti-jana suomalaisessa huonekalualan yrityksessä ja on työssään ollut ERP-ylläpitäjä, -kehittäjä ja -prosessiomistaja, sisäisen ja ulkoisen raportoinnin kehittäjä sekä liiketoimintatiedon hallinta-alustan (business intelligence, BI) ylläpitäjä ja kehittäjä. Näissä tehtävissä toimiessaan tutkija on saanut mahdollisuuden tarkastella tuotannosta ja hankinnasta vähittäismyyntiin yltävien toimitusketjujen hallintaan, kuvailuun ja tehokkuuden mittaukseen liittyviä haasteita kahdeksan vuoden ajan. ERP- ja BI-järjestelmien ylläpidon ja kehityksen yhteydessä tutkija on saanut työskennellä syvällisesti tietokantojen ja perustiedon (master data) ylläpidon, sekä perustiedon alkioiden välisten suhteiden ylläpidon kanssa ERP-järjestelmissä.

Ympäristövaikutusten mallinnus ei ole kuulunut tutkijan työorganisaatiossa mallinnettavaan perustietoon. Kohdassa 1.1 asetettiin tutkimusta ohjaava kysymys: ”Miten tuotenimikkeen toimitusketjun ympäristövaikutuksia voitaisiin mallintaa yleisesti hyväksytyllä tavalla, joka olisi helposti saavutettavissa ja ylläpidettävissä, huomioiden mahdolliset muutokset tarkasteltavan tuotenimikkeen toimitusketjussa?”. Kysymyksen asettelu motivaatio on lähtöisin tutkijan ammatillisesta ja henkilökohtaisesta kiinnostuksesta, sekä toiveesta myöhemmin toteuttaa ratkaisuja ympäristövaikutusten seurantaan omassa työorganisaatiossaan.

Vastausta tutkimuskysymykseen etsitään luvussa 2 esitellyn tietojärjestelmien suunnittelututkimuksen menetelmin. Suunnittelutieteellinen lähestymistapa valittiin, koska sillä on kyky vastata tutkimuskysymyksen pelkistettyyn olemukseen: ”Onko olemassa menetelmiä, joiden avulla tutkimuskysymyksen asettama ongelma voidaan ratkaista, voisiko ongelman ratkaista tehokkaammin, ja jos ongelmaa ei ole ratkaistu, niin miten voidaan lähestyä uuden, innovatiivisen ratkaisun tavoittelua?” Suunnittelututkimuksen tavoite on nimenomaan ratkaista ongelmia tai kehittää tehokkaampia ratkaisuja jo ratkaisuihin ongelmiin (Hevner et al. 2004).

Tutkimusprosessi asetetaan noudattaen Hevnerin et al. (2004) esittämiä suosituksia suunnittelututkimusprosessin ja tutkimuksen tavoitteiden asettelussa. Suositukset on lisätty taulukossa 2.1. Seuraavissa kappaleissa esitettävässä tutkimusprosessin muodostuksessa viitataan näihin suosituksiin ja kytketään siten prosessin muodostus suunnittelutieteellisen tietämuskantaan.

Suunnittelutieteellinen etsimisprosessi, eli ongelma-alueen mahdollisuuksien ja rajoitteiden kartoitus (suositus 6) tehdään yhdistelmänä Paré:n et al. (2015) määrittelemiä narratiivi- ja scoping-tyylisiä kirjallisuuskatsauksia, joiden avulla pyritään selvittämään ongelma-alueen rajat, olemassa olevat ratkaisut ja mahdolliset aukot aiemmassa tutkimuksessa. Ongelma-alueen tarkastelu ja sen taustoittava kirjallisuuskatsaus esitetään luvussa 4.

Ongelma-alueen tarkastelun pohjalta todetaan, että tutkimuskysymyksen luonnehtimaa ongelmaa ei vielä ole ratkaistu tavalla, joka toteuttaisi kysymyksen ratkaisumallille asettaman hyväksyttävyyksivaatimuksen ja samalla yhdistäisi toimitusketjun mallinnuksen ERP-järjestelmissä LCA:n tapaan mallintaa ympäristövaikutuksia. Tästä seuraa, että suositusten 1 ja 4 edellytysten mukaisesti tutkimuksen on mahdollista tuottaa tuloksenaan toteutuskelpoinen artefakti (suositus 1), joka on luonteeltaan innovatiivinen ja tarjoaa selkeän ja todistettavan kontribuution suunnittelutieteen tietämuskantaan ja artefaktin sovel-lusalueelle (suositus 4). Luvussa 4 esitettävään ongelma-alueeseen kuuluvan LCA-tutkimuksen alueen laajuus ja LCA-menettelyn laaja levinneisyys ja standardointi on osoitus ongelman ja sen sovel-lusalueen relevanssista (suositus 2). Tutkimuksen tuloksena syntyvien artefaktien rakentamisen prosessi esitetään luvuissa 5-7, joissa suoritetaan ongelma-alueen tarkasteluun pohjautuva vaatimusmäärittely ja asetetaan suunnittelutehtävä. Suunnittelutyötä kuvailevassa osiossa muodostetaan ongelma-alueen osat yhdistävä käsitesyn-teesi, synteisiin pohjautuva tietomalli, ja mallin soveltamisen menetelmät.

Artefaktien arviointia suoritetaan Hevnerin et al. (2004) kuvailemin tietoteknisen artefaktin arvioinnin menetelmin (suositus 3), jotka esitetään tyypeittäin ryhmiteltyinä tau-lukossa 2.2. Näistä menetelmistä on valittu tutkielmassa sovellettaviksi vain rakennetta-vien artefaktien luonteeseen sopivat menetelmät (suositus 5). Seuraavat kappaleet kytke-vät sovelletut arvioinnin menetelmät suunnittelututkimuksen tietämuskantaan. Arviointi-menetelmiin viitataan tyypeittäin.

Tietoteknisen artefaktin rakentaminen on iteratiivinen prosessi, jonka jokaisen väli-vaiheen esittäminen ei välttämättä ole tutkimuksen kohdeyleisölle kiinnostavaa tai hyö-dyollistä. Luvussa 6 esitettävään käsitteistöön ja tietomalliin päästään iteratiivisen suun-nitteluprosessin tuloksena. Prosessin aikana mallia tarkastellaan sen staattisten ominai-suuksien osalta (tyyppi 2: staattinen analyysi), vaikka tarkastelu ei eksplisiittisesti esiinny luvussa 6. Analyysi suoritetaan tutkielman ohjaajan kanssa käytävässä dialogissa, jossa käsitteistön ja tietomallin oikeellisuutta ja täsmällisyyttä testataan esimerkkiaineistoja ja -skenaarioita vasten. Tutkielman kohdissa 7.4 ja 7.5 esitetään esimerkkien kautta ympä-ristövaikutusten laskenta (tyyppi 3: simulaatio) ja mallin soveltaminen ERP-ympäristössä (tyyppi 2: arkkitehtuurianalyysi).

Tutkimuskysymyksen asettelu ja ongelma-alueen tarkastelu kuvailevat skenaarion (tyyppi 5), jossa tutkielman esittämä malli on sovelluskelpoinen. Ratkaisun soveltuvuuden perustelu näissä skenaarioissa (tyyppi 5: asiantunteva perustelu) ja mallin puutteiden ja myöhempien kehitysmahdollisuuksien arviointi suoritetaan erikseen luvussa 8.

Tutkimuksen kohdeyleisö koostuu ensisijaisesti tietojärjestelmäasiantuntijoista, elinkaaritutkimuksen ammattilaisista, toimitusketjuja hallinnoivien yritysten operatiivisten toimintojen johtajista ja tietojärjestelmien suunnittelututkimuksen tiedeyhteisöstä. Tutkimus kuitenkin suoritetaan Tampereen yliopiston tietojenkäsittelyohjelmassa tehdyn pro gradu -tutkielman yhteydessä. Tästä syystä tutkimusprosessin asettelussa ja tutkielman kirjallisessa esitystavassa on huomioitu tutkielman luonne opinnäytetyönä ja ilmaisussa on pyritty täyttämään pro gradu -tutkielmalle ja opinnäytetyön tekijälle asetetut vaatimukset.

Ensisijainen kohdeyleisö on huomioitu tutkielman konstruktivistisessa esitystavassa; tutkielman kerronta rakentuu luku luvulta tavalla, joka ei oleta lukijakunnaltaan syvällistä ennakkotietämystä sovellettavista suunnittelutieteellisistä menetelmistä tai ongelma-alueesta. Sovellettujen menetelmien vahva kytkentä tutkimusprosessin kuvailuun ja rakennettujen artefaktien arviointiin palvelevat samaa tarkoitusta, samalla toimien osoituksena opinnäytteellisten velvoitteiden täyttymisestä pro gradu -tutkielmassa (Hevnerin et al. suositukset 5 ja 7).

4 Ongelma-alue ja sen aikaisempi tutkimus

Ongelma-alue kuvailee ympäristön, jossa suunnittelututkimuksessa tarkasteltava ongelma esiintyy ja jossa ongelman ratkaisua tullaan soveltamaan. Ongelma-alue pitää sisällään käsitteet ja menetelmät, joilla ratkaistavaa ongelmaa samalla kuvaillaan ja pyritään ratkaisemaan. Tässä luvussa kartoitetaan tutkimuksen kannalta kiinnostava ongelma-alue kirjallisuuskatsauksena, joka on tavoitteiltaan ja menetelmiltään yhdistelmä scoping- ja narratiivikatsauksia (Paré et al. 2015).

Tutkielman esittämän tutkimuskysymyksen asettelu kytkee kysymyksen kolmeen tutkimusalaan, jotka rajaavat tutkimuksen ongelma-alueen. Nämä alat ovat elinkaaritutkimus (LCA), toimitusketjujen hallinta (SCM) ja tietojärjestelmät (IS). Näihin kolmeen tutkimusalaan on viitattu jo tutkielman aiemmissa luvuissa, mutta lukijan kannalta on huomionarvoista todeta, että kohdassa 4.1 esitettävä kirjallisuuskatsaus kuvailee etsimisprosessin, jonka tuloksena nämä alueet tunnistetaan. Lisäksi on todettava, että tietojärjestelmäaspekti kytkeytyy tutkielmaan kahdella tavalla: Tietojärjestelmien suunnittelututkimuksen tietämuskantana sekä yläkäsitteenä toimitusketjuja mallintaville ERP-järjestelmille. Myöskin aiemmin mainittua toimitusketjun tuotannollista, ERP-järjestelmien mallinnuksen piiriin kuuluvaa osa-aluetta, tuotannonohjausta, ei käsitellä erikseen. Tuotannonohjaus (MRP) aihealueena sijaitsee käsitteellisesti toimitusketjun hallinnan tuotannollisen osuuden ja ERP-järjestelmien leikkauskohdassa, ja siihen liittyvää käsitteistöä tarkastellaan tutkielman ratkaisumallin vaatimilta osin näiden kahden alan näkökulmista.

Kohdassa 4.1 esitetään kirjallisuuskatsauksen vaiheet ja sen tekemisessä sovelletut ohjeet ja menetelmät. Ongelma-alueen tunnistamisen jälkeen luodaan yleiskatsaus ongelma-alueen rajaavilla aloilla tehtävän tutkimuksen vallitsevaan tilaan. Kohdassa 4.2 tarkastellaan LCA:n taustaa ja nykytilaa, sekä käydään läpi LCA:n keskeiset käsitteet ja menettelyt, joita sovelletaan ratkaisumallin tavoittelussa. Kohta 4.3 esittää toimitusketjujen hallinnan käsitteistön ja sen sovelluksen ERP-ympäristöissä. ERP-järjestelmien, LCA:n ja toimitusketjun hallinnan ympäristövaikutukset huomioivan osa-alueen leikkauskohtaa tarkastellaan myöskin kohdassa 4.3, samalla todeten tutkimuksen kontribuution mahdollisuudet ja rajoitteet, jotka osaltaan määräävät suunnittelututkimuksen ratkaisualan rajat.

4.1 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksella on useita rooleja tutkimuksen teossa. Sen avulla tehdyille tutkimukselle voidaan antaa historiallinen tausta ja viitekehys nykyajassa, kuvailla tutkimuksen aihealueen teoriaa ja käsitteistöä, nostaa esiin aiemman tutkimuksen rajoitteita sekä osoittaa tehdyn tutkimuksen merkitys aihealueellaan (Ridley 2012). Tämän tutkielman tapauksessa kaikki edellä luetellut aspektit ovat merkityksellisiä tehtävän suunnittelututkimuksen ongelma-alueen määrittämisessä.

Systemaattinen, kattava kirjallisuuskatsaus, jonka tulos on läpikotainen synteesi alan tutkimuksen aiheista ja kvantitatiivinen esitys aihealueiden laajuudesta ei ole tutkimuksen kannalta merkityksellinen. Paré:n et al. (2015) määrittelemistä kirjallisuuskatsauksen menetelmistä tutkielman ensimmäistä lähestymistapaa ongelma-alueen kirjallisuuteen kuvailee parhaiten scoping-katsaus. Scoping-katsauksen avulla pyritään tuottamaan ensimmäinen katsaus saatavilla olevan kirjallisuuden potentiaaliseen määrään ja luonteeseen tietyllä aihealueella ja mm. tunnistamaan puutteita olemassa olevassa tutkimuksessa. Scoping-katsauksen luonteeseen kuuluu tyypillisesti kattavan lopputuloksen tavoittelu, mutta Paré et al. toteavat, että samoja tarkoituksia palvelevia scoping-katsauksia tehdään ajallisten tai muiden resurssien puutteiden tapauksessa myös suppeammassa laajuudessa. Tutkielman tapauksessa scoping-katsauksen tarkoitus on tunnistaa termejä, joilla ympäristövaikutusten mallinnusta toimitusketjujen hallinnan yhteydessä käsittelevää tutkimusta kuvaillaan. Näitä termejä sovelletaan seuraavien hakukierrosten hakuehtoina.

Toinen Paré:n et al. (2015) määrittelemä katsaustyyppi, jonka elementtejä tehtävässä kirjallisuuskatsauksessa esiintyy, on narratiivikatsaus. Scoping-katsauksen tavoin narratiivikatsaus pyrkii tunnistamaan, minkälaista kirjallisuutta aiheesta on tarjolla, mutta ei pyri tekemään yleistyksiä tai koostamaan tietoa systemaattisella tavalla.

Narratiivikatsaus on luonteeltaan valikoiva ja sen tuloksiksi voidaan hyväksyä vain helposti saatavilla oleva aineisto. Tutkielman ongelma-alueen kartoituksen tapauksessa aineiston helppo saatavuus on hyve. Yksi tehtävän kirjallisuuskatsauksen tavoitteista on löytää tutkielman näkökulmasta kiinnostava ympäristövaikutusten mallinnuksen ja tarkastelun menetelmä, jonka valintakriteeri on yleinen hyväksyttävyyys ja helppo saavutettavuus. Aineiston helppo saatavuus puhuu näiden kriteerien täyttymisen puolesta.

Kirjallisuuskatsaus ei tavoittele kattavuutta, mutta kirjallisuuden tarkastelussa ja arvioinnissa sovelletaan systemaattisia kirjallisuuskatsauksen menetelmiä katsauksen tavoitteisiin sopivin osin. Lähestymistapa mukailee kirjallisuuskatsauksen suorittamisessa Okolin (2015) kahdeksan askeleen ohjetta sopivilta osin:

1. Tunnista katsauksen tarkoitus
2. Määritä käytäntö, jolla aineisto käsitellään ja arvioidaan
3. Suorita seulonta
4. Etsi kirjallisuutta ja kuvaile etsimisen prosessi selkeästi
5. Poimi tuloksista tarvittava tieto
6. Arvioi laatu
7. Suorita synteesi
8. Kirjoita katsaus

Seuraavissa kappaleissa esitetään kirjallisuuskatsauksen suorittaminen, peilaten rakenteessa Okolin ohjeistukseen. Tutkielman yhteydessä tehtävä kirjallisuuskatsaus tehdään kolmessa osassa. Ensimmäisen kierroksen tarkoitus on scoping-katsauksen tavoin tunnistaa ongelma-aluetta kuvailevan kirjallisuuden määrä ja luonne (1) ja tunnistaa alaa yleisesti kuvailevia artikkeleita ja muuta kirjallisuutta, joiden perusteella voidaan valita tarkennettuja hakusanoja seuraavaa hakukierrosta varten.

Ympäristöaspektin kytkeminen toimitusketjun hallintaan pyritään tekemään käyttämällä termiä ”kestävyys” yhtenä hakuhehtona. Ensimmäisellä hakukierroksella käytetään lauseita:

“sustainable” AND “supply chain management”

“green” AND “supply chain management”

“sustainability” AND “information systems”

Seulonnan käytäntö on seuraava: hakutulosten otsikon, avainsanojen ja tiivistelmän perusteella on voitava todeta löydetyn lähteen liittyvän hakusanoja vastaavasti ympäristölliseen kestävyteen ja toimitusketjun hallintaan tai tietojärjestelmiin (2 ja 3). Hakutulosten ajankohtaisuutta tavoitellaan rajaamalla hakutulosten julkaisuaikajankohta alkamaan vuodesta 1998, noin 20 vuotta ennen katsauksen tekohetkeä. Haut suoritetaan käyttäen Tampereen yliopiston kirjaston Andor-hakupalvelua, joka keskitetysti hakee tietoa useista kirjastolle lisensoiduista tietokannoista (4).

Hakutuloksiksi valikoituu mm. seulontaehdon täyttäviä, kestävästä toimitusketjunhallintaa käsitteleviä kirjallisuuskatsauksia, joiden pohjalta tunnistetaan uusia, ongelma-aluetta kuvailevia hakusanoja (5). Kirjallisuuskatsauksien ja muiden valittujen lähteiden relevanssia arvioidaan käyttämällä Google Scholar-viittaushakupalvelua (6), joka kertoo, kuinka usein haettuun lähteeseen on viitattu muussa tieteellisessä kirjallisuudessa. Saman palvelun avulla ensimmäisen kierroksen hakutuloksia lähtökohtana käyttäen edetään viitatusketjussa eteenpäin ajankohtaisempaan kirjallisuuteen.

Hakutuloksista nousee esille vahvasti, että tuotteen elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten selvittämistä ja mallinnusta kuvaileva aineisto liittyy usein elinkaaritutkimuksen aihealueeseen, LCA:han. Ympäristövaikutusten tarkastelua ja toimitusketjujen hallintaa samanaikaisesti tarkastelevaksi aihealueeksi tunnistetaan ”vihreä toimitusketjujen hallinta” (Green Supply Chain Management, GSCM/GrSCM). Hakutuloksista todetaan, että LCA, kestävä elinkaaritutkimus (Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA) ja GSCM -aihealueet osittain leikkaavat toisiaan ja alueilla tehdyistä tutkimuksista löytyy viittauksia toisiinsa.

Ensimmäisen hakukierroksen tuloksena todetaan myös, että tuotantoketjujen ympäristöllistä kestävyyttä ja ympäristövaikutusten seuranta tarkastellaan tuoreemmassa kirjallisuudessa usein kolmikantaisen kestävyuden (triple bottom line; Elkington 2013) näkökulman läpi. Toimitusketjujen hallinnan tapauksessa kestävyysnäkökulmasta tehty kirjallisuus (Sustainable Supply Chain Management, SSCM) on laajuudessaan ohittanut GSCM:n vuodesta 2010 eteenpäin (Rajeev et al. 2017).

Kolmikantaisessa näkökulmassa kestävyysajattelun taloudellista, yhteiskunnallista ja ympäristöllistä aspektia tarkastellaan samanaikaisesti (Joyce & Paquin 2016). Tutkielman kannalta kiinnostavia ovat vain ympäristöllinen ja taloudellinen aspekti, mutta kestävyuden aihealue huomioidaan seuraavan hakukierroksen hakuehdoissa, koska sen alaisuudesta todetaan voivan löytyä aiheeseen liittyvää, ajankohtaista kirjallisuutta.

Tietojärjestelmät ja kestävyuden yhdistäviä aineistoja löytyy useita, mutta tulokset valtaosin eivät liity toimitusketjujen hallintaan. Havainnon perusteella todetaan, että toisella hakukierroksella on tehtävä tarkemmin toimitusketjujen ohjelmalliseen mallinnukseen kohdistuvia hakuja.

Toisella kirjallisuushakukierroksella jatketaan scoping-menettelyä samoin tavoittein kuin ensimmäisellä kierroksella, mutta tarkennetuin hakuehdoin (1). Ongelma-alueen rajaaviksi alueiksi valitaan ympäristövaikutusten osalta LCA ja GSCM, sekä kestävyysnäkökulmasta tarkastellut kestävä elinkaaritutkimus (LCSA) ja kestävä toimitusketjujen hallinta (SSCM). Toimitusketjujen ohjelmallinen mallinnus ja tietojärjestelmäaspekti pyritään kytkemään hakuihin vahvemmin hakemalla ERP-järjestelmiä käsittelevää kirjallisuutta. Toisen hakukierroksen hakulause saa seuraavan muodon:

(“Life Cycle Assessment” OR LCA

OR “Life Cycle Sustainability Assessment” OR LCSA

OR “Green Supply Chain Management” OR GrSCM OR GSCM

OR “Sustainable Supply Chain Management OR SSCM

OR “Sustainability” OR “Sustainable”)

AND

(“Enterprise Resource Planning” OR ERP)

Hakupalveluna käytetään jälleen Andor-palvelua. Tarkennetun haun tulosten perusteella pyritään toteamaan, kuinka paljon ympäristövaikutusten mallinnuksesta ERP-järjestelmissä on olemassa tieteellistä kirjallisuutta, ja miten jo ensimmäisellä kierroksella

laajaksi ympäristövaikutuksia käsitteleväksi alueeksi todettu LCA kytkeytyy ERP-järjestelmiin (1).

Toisen hakukierroksen seulontaehto on hakulauseen asettamaa ehtoa tiukempi. Ehto edellyttää, että hakutulosten otsikon, avainsanojen ja tiivistelmän perusteella on voitava todeta lähteen liittyvän ympäristövaikutusten mallinnukseen ERP-järjestelmissä (2 ja 3). Hakutulosten perusteella tunnistetaan uusi tutkimuksen kannalta kiinnostava alue: kestävät ERP-järjestelmät (Sustainable ERP, S-ERP). Tulosten laatua arvioidaan samoin kuin ensimmäisellä kierroksella, käyttäen relevanssin arviointiin Google Scholar -palvelua.

LCA:n ja ERP-järjestelmät yhdistävää kirjallisuutta on vähän, ja erityisesti toteutuksia ohjaavia artikkeleja löytyy niukasti. Hilty et al. (2011) esimerkiksi käsittelevät LCA:n ja ERP-järjestelmien integroimisen haasteita, mutta eivät kuvaile toteutuskelpoisia ratkaisuja.

S-ERP -aihealueella käsitellään kestävyuden näkökulmasta myös ympäristövaikutusten mallintamista ERP-järjestelmissä, joka vahvasti liittyy tutkimuskysymyksen asetteluun. Aihealue on kuitenkin tuore, ja tästäkin aiheesta kirjallisuutta löytyy hyvin vähän. Alue ei myöskään ole vakiintunut, mutta löydettyssä kirjallisuudessa esitetään argumentteja alueen vakinaistamisen puolesta (Chofreh et al. 2014). Lisäksi LCA:ta ja ERP-järjestelmiä yhdistävää kirjallisuutta vastaavalla tavalla mm. Chofreh et al. (2018) kuvailevat ehdotettua S-ERP -konseptia hyvin yleisesti. Tehdyssä katsauksessa ei löydy käytännönläheisiä ehdotuksia operatiivisen toiminnan ympäristövaikutusten mallinnukseen ERP-järjestelmissä. Toisen kierroksen hakutulosten perusteella asetetaan seuraavat oletukset:

1. LCA on laajasti tunnistettu, laajasti hyväksytty ja helposti saatavilla oleva tapa mallintaa ympäristövaikutustietoa.
2. LCA-menettelyn kanssa yhteensopivaa tapaa mallintaa ympäristövaikutustietoa ERP-järjestelmissä ei ole laajasti käsitelty tieteellisessä kirjallisuudessa.

Edellä asetettuihin oletuksiin perustuen suunnittelututkimuksen tavoitteeksi asetetaan selvittää erityisesti LCA-yhteensopivan tiedon mallinnuksen mahdollisuuksia ERP-järjestelmissä toimitusketjun hallinnan yhteydessä, tutkimuskysymyksen asettamat hyväksyttävyyysvaatimukset huomioiden, kuten asia aiemmin on kuvailtu kohdassa 1.1.

Kirjallisuuskatsauksen kolmas kierros tehdään narratiivikatsauksena. Aiemmillä katsauksierroksilla tunnistettujen, ongelma-aluetta rajaavien aihealueiden kirjallisuudesta selvitetään valikoivalla tavalla, mikä on suunnittelututkimuksen kannalta kiinnostavaa. Kolmannen hakukierroksen tarkoitus on kolmijakoinen:

1. Löytää LCA-menettelyä kuvailevaa kirjallisuutta, joka on perustavanlaatuista, laajasti viitattua ja ajankohtaista. Kirjallisuuden perusteella on voitava tunnistaa LCA-menettelyn tavoitteet, metodiikka ja käsitteistö.
2. Löytää toimitusketjujen hallintaa kuvailevaa kirjallisuutta, joka on perustavanlaatuista ja kuvailee toimitusketjujen mallinnuksen tavoitteet ja käsitteistön.
3. Löytää toimitusketjut ja LCA:n yhdistävää kirjallisuutta, jonka avulla voidaan kuvailla tapaa mallintaa LCA-tietoa ERP-järjestelmissä.

Tehdyn narratiivikatsauksen tekotapa ei ole systemaattinen tai toistettava. Lähdemateriaaliksi hyväksytään lähdetietokantojen (mm. ScienceDirect) käyttöliittymissä esiintyvien suosittelujärjestelmien ehdottamia tuloksia siitä huolimatta, että tutkijalla ei ole mahdollisuutta tehdä toteamuksia suosittelujärjestelmän algoritmien toiminnan periaatteista. Kirjallisuutta etsitään myös seuraamalla viittausketjuja aiemmilla kierroksilla löydetyistä kirjallisuudesta eteenpäin käyttäen Google Scholar -palvelua.

Katsauksen päätteeksi LCA-menettelyn kuvailuun suunnittelututkimuksen ongelma-alueen määrittelevällä tavalla valitaan neljä pääasiallista lähdettä. Standardit ISO 14040:2006, ISO14044:2006 ja ISO 14044:2006/A1:2017 (International Organization for Standardization 2006a; 2006b; 2017) määrittelevät LCA-menettelyn reunaehdot ja käsitteet. Klöpfferin ja Grahlin (2014) LCA-käsikirja toimii suunnittelututkimuksen lähteenä LCA:n parhaille käytännöille ja tarjoaa esimerkkejä LCA-menettelyn soveltamisesta. Toimitusketjujen hallintaa taustoittaa Chopran (2019) perusteos.

Strukturoimaton haku tuottaa tuloksenaan Sirkan ja Junkkarin (2012) artikkelin, joka lähestyy toimitusketjun ympäristöllisen suorituskyvyn tarkastelua LCA-yhteensopivalla tavalla. Artikkelin on katsauksen tuloksena löydetyistä kirjallisuudesta ainoa, joka ottaa kantaa mallinnuksen toteutukseen. Sirkan ja Junkkarin artikkelin yleisellä, sovellusriippumattomalla tasolla esittämä mallinnustapa tukee yksittäisen fyysisen tuoteyksikön jäljitettävyyttä - ympäristövaikutusten seurantaan yhden tuoteyksikön toimitusketjun aikana.

Sirkan ja Junkkarin artikkeli antaa lähtökohdan tutkielman yhteydessä tehtävälle suunnittelututkimukselle. Artikkelin perusteella todetaan, että LCA-yhteensopivan ympäristövaikutustiedon kytkeä toimitusketjun mallinnukseen on tavoiteltu aiemminkin, mutta tutkimuskysymyksen asettamien vaatimusten tavoittelussa on tilaa uusille kontribuutioille: Tutkimuksen tuloksena voidaan tavoitella toteutuksen saavutettavuutta täydellisen jäljitettävyyden kustannuksella. Toteamuksen pohjalta suunnittelututkimukselle asetetaan uusi tavoite - kytkeä LCA-tiedon mallinnus osoitettavasti ERP-järjestelmissä esiintyvään käsitteistöön ja tietomallin, sekä pyrkiä ympäristötiedon mallinnustapaan, joka ei edellytä yksittäisen tuoteyksikön seurantaan fyysisessä maailmassa. Tämä tavoite

ja sen perustelut on esitetty tarkemmin kohdassa 1.1 (7,8). Kirjallisuuskatsauksen perusteella tunnistettua ongelma-aluetta tarkastellaan seuraavaksi aihealueittain kohdissa 4.2 ja 4.3.

4.2 Life Cycle Assessment (LCA)

Elinkaariarviointi, Life Cycle Assessment (LCA), on yksi laajimmin käytetyistä ja hyväksytyistä viitekehysistä tuotejärjestelmien (product system) ympäristövaikutusten tutkimiseen ja mallintamiseen (Jones & Azapagic 2016; Minkov et al. 2016). Nimensä mukaisesti elinkaariarviointi pyrkii kattamaan tuotteen koko elinkaaren raaka-aineen tuottamisesta lopputuotteen hävittämiseen.

Klöpffer & Grahl (2014) kertovat kirjassaan, että nykyaikaisen LCA:n kaltaisia tutkimuksia on tehty 1970-luvulta alkaen. Varhaiset proto-LCA -tutkimukset tehtiin tuotejärjestelmän raaka-ainekulutuksen ja päästöjen analyysinä, jotka nykyisessä LCA-menetelyssä tunnetaan life cycle inventory (LCI)-vaiheena. Samalla vuosikymmenellä on myöskin alettu tutkia LCI-vaiheen osana, tai sen rinnalla, esiintyvää tuotejärjestelmän kumulatiivista energiankulutusta (Cumulative Energy Demand, CED).

Elinkaaritutkimuksen kehitys siksi viitekehyyksi, joka LCA tänä päivänä on, alkoi 1990-luvun alussa, jolloin SETAC:in (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) Pohjois-Amerikan ja Euroopan yksiköt alkoivat määrätietoisesti kehittää, harmonisoida ja standardoida elinkaaritutkimuksen metodeja (Klöpffer & Grahl 2014). Tämä työ johti 1990-luvun lopulla LCA-tutkimuksen periaatteiden ja viitekehyyksen ISO-standardiin ISO 14040, jota on myöhemmin täydennetty myös LCA-tutkimuksen vaatimuksia ja suosituksia kuvailevilla standardeilla. Täydentävät standardit on myöhemmin yhdistetty edelleen voimassa olevaksi standardiksi ISO 14044. International Organization for Standardization (2006a; 2006b; 2017) määrittelee nykyisissä LCA:ta koskevissa standardeissaan LCA-tutkimuksen vaiheet, reunaehdot toteutustavoille ja täsmällisyysvaateet -arvioinnin tulosten kohderyhmät huomioiden.

4.2.1 LCA-tutkimuksen vaiheet

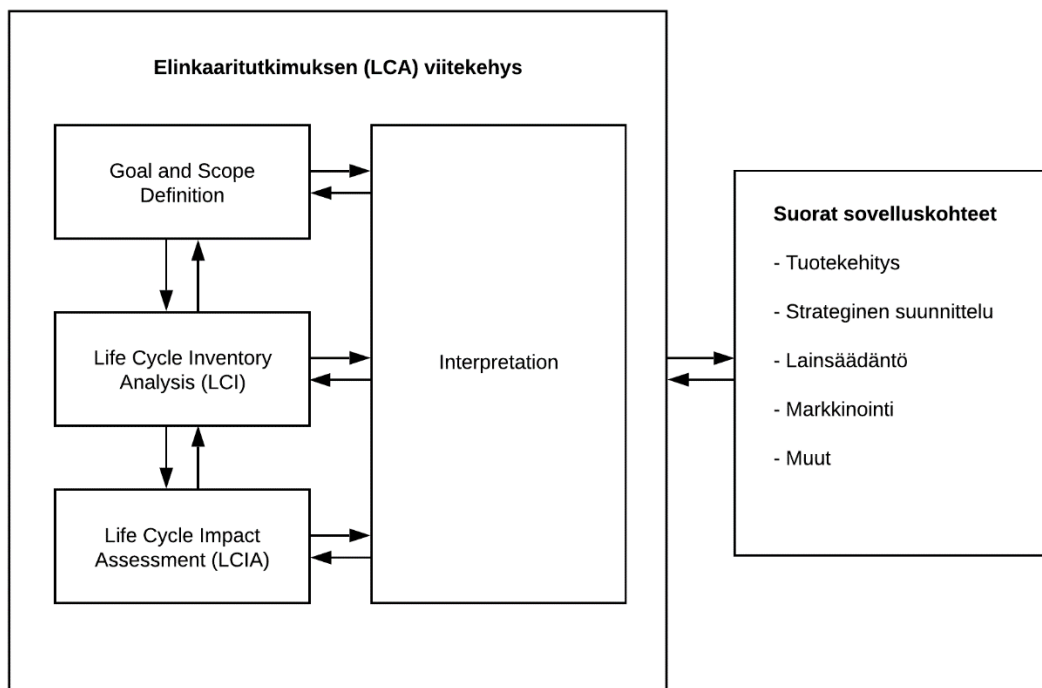
Tässä alakohdassa esitetään LCA-tutkimuksen vaiheet, sekä niihin liittyvät käsitteet ja menettelyt tutkielman esittämän ratkaisumallin vaatimalla yksityiskohtaisuus- ja tarkkuustasolla. Esiin nostettavan käsitteistön pohjalta muodostetaan LCA-käsitteistön ja ERP-järjestelmissä toimitusketjua kuvailevan käsitteistön synteesi luvussa 6.

ISO 14040 määrittelee LCA-tutkimuksen viitekehyyksen koostuvan neljästä vaiheesta:

1. Goal and scope definition (päämäärän ja laajuuden määrittely)
2. Life cycle inventory analysis (LCI, raaka-aine- ja energiakulutuksen sekä päästöjen luettelointi)
3. Life cycle impact assessment (LCIA, ympäristövaikutusten arviointi)
4. Interpretation (tulosten tulkinta)

Tutkielmassa viitataan LCA-tutkimuksen vaiheisiin ensisijaisesti niiden englanninkielisillä nimillä tai lyhenteillä, jotta LCA-tutkimuksen osa-alueet kytkeytyisivät vahvemmin ISO-standardin esitystapaan ja LCA:n alueella tehtyyn tutkimukseen. Elinkaaritutkimuksen ISO-standardoitu viitekehys esitetään kuvassa 4.1 (International Organization for Standardization 2006a) muilta osin suomeksi käännettynä.

Kuvasta 4.1 voidaan tulkita LCA-tutkimuksen olevan luonteeltaan iteratiivista. Tutkimuksen eri vaiheissa paljastuneet asiat lisäävät ymmärrystä tutkimuksen kohteesta, jolloin edellisen vaiheen oletuksia voi olla tarpeen muuttaa, jotta päästäisiin tarkempaan lopputulokseen. Seuraavaksi esitettävät LCA-tutkimuksen vaiheet kuvaillaan niiden oletetussa, edellä listatussa suoritusjärjestyksessä, palaamatta edellisiin vaiheisiin.



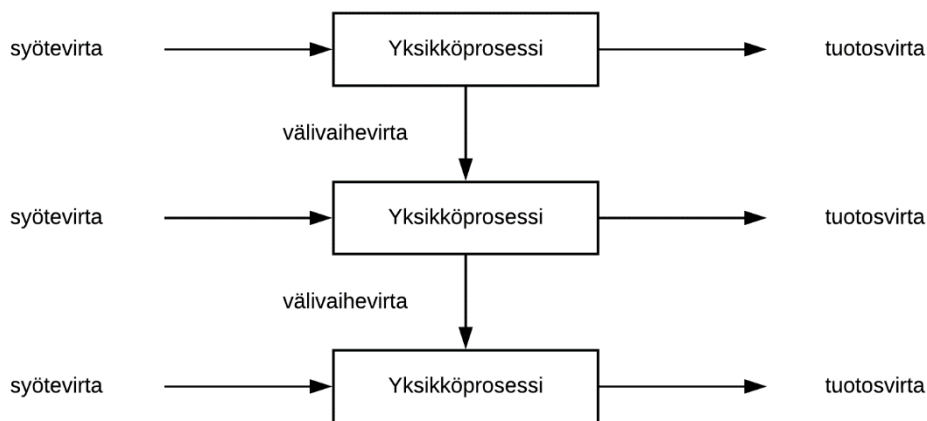
Kuva 4.1: LCA:n vaiheet ISO 14040:n mukaisesti

LCA-tutkimuksen Goal and scope definition -vaiheessa määritellään tehtävän LCA-tutkimuksen tarkoitus, tavoitteet ja kohdeyleisö. Tutkimuskysymyksen oletettaman skenaar-

rion tapausta esimerkkinä käyttäen kohdeyleisö jakautuisi julkishallintoon ja valmistettavan tuotteen asiakaskuntaan. Kummallekin taholle tulisi tässä tapauksessa voida tuottaa ympäristövaikutusraportointia. Tavoitteiden ja kohdeyleisön valinta ohjaa Goal and scope definition -vaiheessa myöskin tehtävää tutkimuksen laajuuden määrittelyä, jonka perusteella rajataan Life cycle inventory analysis -vaiheen kohdealue. Kohdealuetta kutsutaan tuotejärjestelmäksi.

Tuotejärjestelmä (product system) on kokoelma yksikköprosesseja (unit process), joiden suoritus tapahtuu jonkun määritellyn fyysisen ja ajallisen rajan sisällä (system boundaries; Klöpffer & Grahl 2014). Yksikköprosessit ovat suoritteita, joiden sarjan tuloksena raaka-aineet jalostuvat tuotteiksi. Ne vastaanottavat syötteinään (input) alkeisvirtoja (elementary flow) tai välivaihevirtoja (intermediate flow).

Alkeisvirroiksi nimitetään tuotejärjestelmän rajat ylittäviä materiaali- ja energiavirtoja, jotka eivät ole järjestelmään saapuessaan tai järjestelmästä lähtiessään läpikäyneet inhimillisen toiminnan aiheuttamaa muutosta (International Organization for Standardization 2006a). Välivaihevirratt ovat muiden yksikköprosessien tuotoksia (output), jo jalostettuja raaka-aineita, tuotekomponentteja tai energiaa. Yksikköprosessin tuotosvirrat ovat joko välivaihevirtoja tai valmiita tuotteita (product flow). Kuva 4.2 havainnollistaa yksikköprosessien keskinäisiä suhteita ISO 14040-standardia mukaillen.

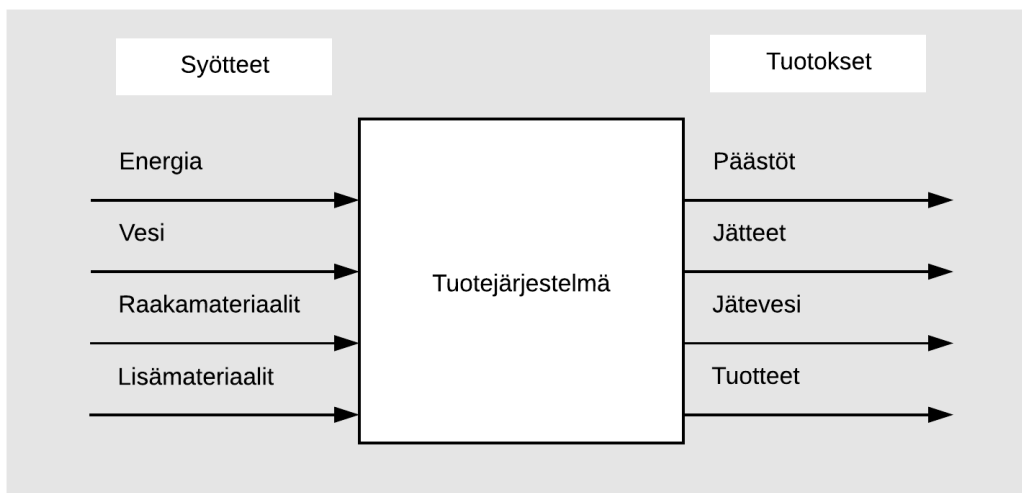


Kuva 4.2: Esimerkki sarjasta yksikköprosesseja

LCA-tutkimuksessa tarkastellaan viitteellistä tuotevirtaa (reference flow) tuotejärjestelmän rajojen sisällä. Sen lopputuotteen määrällinen laajuus on LCA-tutkimuksen Goal and scope definition -vaiheessa määriteltävä ns. toiminnallinen yksikkö (functional unit). LCA-tutkimuksessa määritetään toiminnallinen yksikkö yksittäisen tuotteen tarkastelun sijaan, jotta eri tuotejärjestelmissä tehtyjen tutkimusten tulokset olisivat laajemmin kes-

kenään vertailukelpoisia. Toiminnallinen yksikkö voi olla esimerkiksi 1000 litraa virvoitusjuomaa toimitettuna kuluttajamyyntiin sopivissa pakkauksissa. Tässä esimerkissä 2000 kpl 0,5 litran muovipulloja ja 1000 kpl 1,0 litran lasipulloja voisivat olla keskenään verrattavia toiminnallisia yksiköjä kahdessa eri tuotejärjestelmässä.

Life cycle inventory analysis (LCI) -vaiheen tarkoitus on tunnistaa ja kvantifioida tuotejärjestelmän syötteet ja tuotokset tarkastelun kohteena olevan viitteellisen tuotevirran koko elinkaaren aikana (kuva 4.3; mukailtu lähteestä Klöpffer & Grahl 2014). Yksikköprosessit muodostavat tuotejärjestelmän; tuotejärjestelmän syötteet ja tuotokset ovat yhtä kuin yksikköprosessien yhteenlaskettujen, järjestelmän rajat ylittävien syötteiden ja tuotosten summa.



Kuva 4.3: LCI-vaiheessa tehtävän tarkastelun kohteet

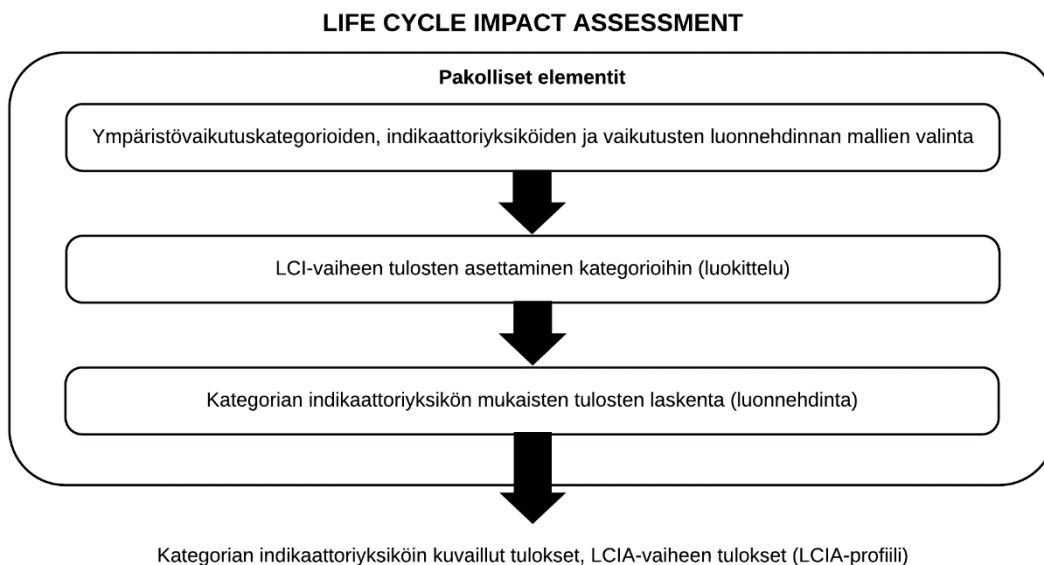
Kvantifioinnin tarkkuustaso, allokoinnin menettely ja vaatimukset kerättävän datan laadulle asetetaan jo Goal and scope definition -vaiheessa. LCI-vaiheessa kerättävä data pyrkii tarkimmalla tasolla kuvailemaan tuotejärjestelmään saapuvan materiaalin alkuaineina tai kemiallisina yhdisteinä, jotta myöhemmässä tulosten analysointivaiheessa yhteisten nimittäjien löytäminen ja tulosten kategorisointi olisi helpompaa. Tuotejärjestelmään saapuva materia voidaan kuvailla myös karkeammin raakamateriaaleina, esimerkiksi malmina tai puutavarana. Allokoinnilla tarkoitetaan LCI-vaiheen yhteydessä syötteiden ja tuotosten kohdistusta tiettyyn yksikköprosessiin.

Allokoinnissa on huomioitava, että tuotejärjestelmän yksikköprosessit voivat muodostaa syklisiä rakenteita, jos esimerkiksi yhden yksikköprosessin oheistuotteita hyödynnetään sarjassa aiemmin esiintyvän yksikköprosessin syötteinä. Tuotejärjestelmässä tarkasteltavan viitteellisen tuotevirran ja LCI-vaiheen tulosten kuvailussa kuitenkin usein

käytetään syklitöntä, suunnattua graafia, eli puuta. Sykliset rakenteet tuotevirrassa voidaan ”aprosimoida pois”, arvioimalla keskimäärin toteutuvien syklien vaikutus yksiköprosessien syötteisiin ja tuotoksiin viitevirran aikana (Klöppfer & Grahl 2014).

Life cycle impact assessment (LCIA)-vaiheen tarkoitus on arvioida tuotejärjestelmän viitteellisen tuotevirran vaikutukset ympäristöön. Arviointi tehdään hyödyntäen LCI-vaiheen tuloksia. ISO-standardista 14040 mukailtu ja suomen kielelle käännetty kuva 4.4 esittää standardissa vaaditut LCIA-vaiheen askeleet.

LCIA-vaiheessa LCI-vaiheen tuloksille annetaan ympäristövaikutuskategoriat ja vaikutuskategorioille indikaattoriyksiköt, jotka kuvaavat tuotejärjestelmän virtojen vaikutuksia ympäristöön. Esimerkkinä ympäristövaikutuskategoriasta voidaan käyttää ilmaston lämpenemistä, jonka alle luokiteltaisiin ne LCI-vaiheen tulokset, jotka ovat kasvihuonekaasupäästöjä ilmakehään. Indikaattoriyksikkönä tässä tapauksessa voitaisiin käyttää ilmaston lämpenemispotentiaalia 100 vuoden tarkasteluvälillä CO₂-verrannaislukuna ilmaistuna (GWP100). Kaikkien ei-hiilidioksidikaasujen CO₂-verrannainen lämpenemispotentiaali lasketaan tässä tapauksessa käyttäen muunnoskerrointa, jotta niitä voitaisiin luonnehtia samaa indikaattoriyksikköä käyttäen.



Kuva 4.4: Life cycle impact assessment-vaihe

International Organization for Standardization määrittelee standardeissaan (2006a; 2006b; 2017) LCA-tutkimuksen vaiheet, reunaehdot toteutustavoille ja täsmällisyysvaatteen, mutta jättää kuitenkin huomattavan vapausasteen kerätyn tiedon luokittelulle ympäristövaikutuskategorioihin ja tuotejärjestelmän ympäristövaikutusten luonnehdinnalle.

Ohjeistuksia kategorisointiin ovat pyrkineet tekemään mm. UNEP (United Nations Environment Programme) / SETAC Life Cycle Initiative ja Euroopan komission yhteinen tutkimuskeskus (Klöpffer & Grahl 2014). Vaikka LCA-tutkimusten tulokset usein jakautuvat samankaltaisiin vaikutuskategorioihin, ei yleistä ja täysin vertailukelpoista tapaa esittää arviointien tuloksia ole. ISO-standardi 14040 huomioi tämän ongelman, ja edellyttää LCIA-vaiheelta täsmällistä dokumentaatiota ja läpinäkyvyyttä, jotta tuloksia voitaisiin tulkita paremmin.

Tutkielman ehdottaman ratkaisumallin kannalta on huomionarvoista todeta, että jos LCI-vaihe on vastaavalla tavalla riittävän täsmällisesti dokumentoitu, LCIA-vaihe on mahdollista suorittaa uudelleen eri tavoin valituin perustein. Olettaen, että LCI-vaihe on tehty riittävällä tarkkuustasolla, yhden tuotejärjestelmän mallintamisen vastuun voi jakaa usean toimijan kesken.

LCA-tutkimuksen viimeinen vaihe on Interpretation, eli tulkinta. Interpretation-vaiheessa LCI- ja LCIA-vaiheen tulokset kootaan yhteen, ja niiden tuloksia tarkastellaan Goal and scope definition -vaiheessa asetettuja tavoitteita vasten. Löydösten perusteella annetaan tavoitteita vastaavasti suosituksia, jotka voivat olla esimerkiksi tuotejärjestelmään tehtäviä muutoksia, joiden avulla voidaan vähentää haitallisia vaikutuksia ympäristöön.

Interpretation-vaiheeseen liittyvät myös ISO-standardissa 14040 huomioidut lisävaiheet: Reporting (raportointi) ja Critical review (kriittinen tarkastelu). Nämä eivät varsinaisesti ole LCA-tutkimuksen vaiheita, mutta niillä on suuri merkitys LCA-tutkimuksen läpiviennissä. Kaikissa LCA-tutkimuksissa on jollakin tasolla dokumentoitava ja raportoitava sovelletut menettelyt ja niiden perustelut. Lisäksi menettelyjä on tarkasteltava ja arvioitava, päästiinkö tutkimukselle asetettuihin tavoitteisiin riittävällä tasolla. Interpretation-vaiheen muodollisuuden ja tarkkuuden aste on johdettavissa Goal and scope definition -vaiheessa asetetuista tavoitteista ja tarkkuusvaateista.

Kun tavoitteena on esittää LCA-tutkimuksen tuloksia kolmansille osapuolille, Reporting- ja Critical review -vaiheiden merkitys korostuu. Tässä tapauksessa tehdystä tutkimuksesta on ehdottomasti voitava täsmällisellä tavalla dokumentoidusti esittää LCIA-vaiheessa tehdyn kategorisoinnin perusteet, kuvaus LCI-vaiheessa kerätyn datan laadusta, indikaattoriyksiköiden perusteella luotu LCIA-profiili ja ympäristövaikutusten oletetut kohdealueet (category endpoints).

Critical review -vaiheessa tarkastelun kohteena ovat LCA-tutkimuksen vaiheet, niissä sovelletut menettelyt, sekä vaiheiden dokumentoinnin ja raportoinnin laatu. Tarkastelun tuloksena todetaan, että Interpretation -vaiheen oikeutetun suorituksen edellytykset ovat täyttyneet. Kun LCA-tutkimuksen tavoite on tuottaa organisaation sisäistä sovellusarvoa, tarkastelun voi suorittaa tutkimusta tekevän organisaation oma LCA-asiantuntija. Jotta

viranomaisraportoinnin tai muille kolmansille osapuolille tehtävän raportoinnin vaatimukset voidaan todeta täyttyneiksi, Critical review -vaiheen tarkastelun suorittaa asianomistajista koostuva paneeli, jonka puheenjohtaja on organisaation ulkopuolinen LCA-asiantuntija.

4.2.2 LCA-tutkimuksen saavutettavuus

Tutkimusalueen rajaaminen, alkeisvirtoihin liittyvä datan kerääminen, ympäristövaikutusten kategorisointi ja indikaattoreiden asettaminen vaativat LCA-asiantuntemuksen tuomaa arviointikykyä. Täsmällisen LCA-tutkimuksen tekeminen vaatii huomattavaa asiantuntemusta (Minkov et al. 2016) metodiikasta, standardeista, käytettävissä olevista viitearvoresursseista, kemiasta, matematiikasta ja ekosysteemien toiminnasta. Tämän tietämyksen soveltaminen tutkittavaan ympäristöön vaatii lisäksi syvällistä tietoa tuotejärjestelmän toimijoista, toiminnoista, tuotteista ja maantieteellisistä sijainneista, joissa tutkittavia toimintoja suoritetaan.

On todennäköistä, että useimmista organisaatioista ei löydy tarvittavaa asiantuntemusta ja tietämystä LCA-tutkimuksen tekoon ilman ulkoista apua, mikä osaltaan voi korottaa LCA-tutkimuksen tekemisen aloituskynnystä, mutta sama olettaus pätee yhtä lailla muitakin täsmällisen ympäristövaikutusselvityksen menettelyjä tavoitellessa. LCA-viitekehyksen soveltaminen ympäristövaikutusarviointia tehdessä on saavutettavuuden näkökulmasta joka tapauksessa suositeltavaa useasta syystä.

LCA-menettelyn ISO-standardin määrittelemän viitekehyksen kuvaus on edullisesti ostettavissa alkuperäisessä muodossaan. Lisäksi ISO-standardia tulkitsevaa ja täydentävää kirjallisuutta on tarjolla runsaasti erilaisten ohjeistusten ja käsikirjojen muodossa. Viitekehyksen laaja levinneisyys ja hyväksyntä tarjoavat parhaan mahdollisen pohjan arvioinnin tutkimuksen tulosten vertailukelpoisuudelle muiden toimijoiden kanssa, tulosten kategorisointiin ja kvantifiointiin liittyvistä haasteista huolimatta.

Kategorisoinnin ja indikaattoriyksiköiden valintaan on olemassa suosituksia, vaikka varsinaiset standardit uupuvatkin. UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2016), Euroopan komission yhteinen tutkimuskeskus (2010) ja OpenLCA-hanke (Aitor et al. 2017) julkaisevat tämänkaltaisia ohjeita kaikille avoimesti. Tämän lisäksi erityisesti ilmaston lämpenemiseen liittyvien LCI-tulosten kvantifiointiin ja indikaattoriyksiköiden valintaan on saatavilla WMO:n (World Meteorological Organization) ja Yhdistyneiden Kansakuntien hallitusten välisen ilmastonmuutospaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) tarkempia ehdotuksia (Klöpffer & Grahl 2014).

LCA-viitearvotietokantoja, joita voidaan hyödyntää LCA-tutkimuksen LCI-vaiheessa yksikköprosessin alkeisvirtojen määrittämisessä ja Interpretation-vaiheessa tulosten vertailuun, on saatavilla sekä ilmaiseksi että maksua vastaan. Veloituksetta viitetietokantaansa tarjoaa esimerkiksi Euroopan komission Life Cycle Data Network. Maksulli-

sia, kattavia ja hyvin ylläpidettyjä tietokantoja tarjoavat mm. ecoinvent ja GaBi. Tarkoitukseen sopivan viitetietokannan valinnassa auttaa OpenLCA-hankkeen verkkosivusto, OpenLCA Nexus, joka kokoaa yhteen erilaisia viitetietokantoja ja esittelee niiden ominaisuuksia.

Edellä mainittujen lähteitä käyttäen on mahdollista muodostaa standardin mukainen, vertailukelpoinen LCA-tutkimuksen runko. Datan keräämiseen liittyviin haasteisiin vaaditaan tuotejärjestelmäkohtaista asiantuntemusta, mutta menettely itsessään voidaan todeta helposti saavutettavaksi.

4.3 Toimitusketjun hallinta ja LCA:n tulosten mallinnus ERP-järjestelmissä

Toimitusketjuja tutkivan toimitusketjujen hallinnan (Supply Chain Management, SCM) tieteenalan kirjallisuus määrittelee toimitusketjujen tavoitteet, toimijat, toiminnot ja käsitteet, joilla toimitusketjuja kuvaillaan. Chopra (2019) esittää määritelmänsä toimitusketjusta seuraavasti: ”Toimitusketju on sarja prosesseja ja virtoja, jotka tapahtuvat eri vaiheiden aikana sekä niiden välillä, ja yhdessä täyttävät asiakkaan tuotetarpeen.”

Perinteisesti toimitusketjun tavoitteeksi katsotaan sen tuottaman nettoarvon maksimointi, jossa nettoarvo on lopputuotteen arvon asiakkaalle ja toimitusketjun aikaisten kulujen erotus (Chopra 2019), ja tuotettu arvo viittaa rahalliseen arvoon. Asiakkaat ja yhteiskunta vaativat kuitenkin nykyään enenevässä määrin tuotteiden valmistajien toiminnalta vastuullisuutta ja kestävyyttä, joka tuo taloudellisen aspektin lisäksi toimitusketjun tarkasteluun myös sosiaalisen ja ympäristöllisen näkökulman (Joyce & Paquin 2016). Näihin kolmeen näkökulmaan viitataan yhdessä kolmikantaisena kestävyyttenä, ja englanniksi termillä ”triple bottom line”, eli kolme pohjaviivaa - tuloslaskelman viimeistä riviä.

Tutkielman yhteydessä ei tarkastella kestävyuden sosiaalista aspektia, mutta kestävyuden ja toimitusketjujen hallinnan yhdistävä ala (Sustainable Supply Chain Management, SSCM) on silti tutkielman kannalta kiinnostava, koska se tuo yhteen myös ympäristöllisen ja taloudellisen näkökulman sosiaalisen rinnalla. Ympäristöllistä ja taloudellista aspektia yhdessä tarkastelee myös ”vihreän toimitusketjujen hallinnan” tutkimusala GSCM.

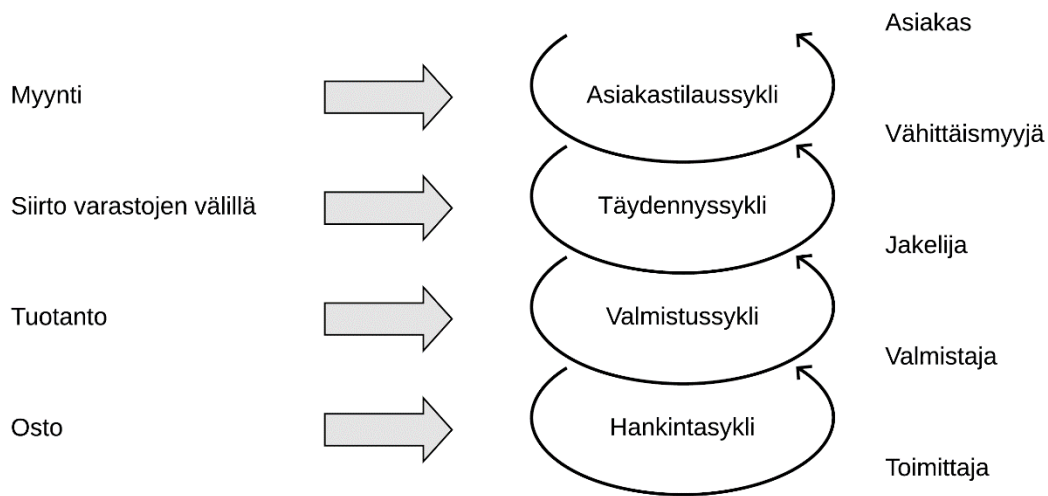
APICS Supply Chain Council ylläpitää yleisesti hyväksyttyä toimitusketjun arvioinnin SCOR-viitekehystä (Supply Chain Operations Reference). SCOR-viitekehyksen laajennus GreenSCOR (Cash & Wilkerson 2003) huomioi myös toimitusketjun ympäristövaikutukset. SCOR-viitekehyksen versiossa 12.0 ympäristövaikutukset huomioidaan kestävyuden näkökulmasta viitekehyksen SustainableSCOR-osiossa (www.apics.org, vierailltu maaliskuussa 2020). SCOR-viitekehys laajennuksineen asettaa mittarit myös toimitusketjun ympäristövaikutusten arviointiin ja tarjoaa ohjeistusta ympäristöllisesti tehokkaamman toimitusketjun tavoitteluun. Ohjeistus ei kuitenkaan kuvaile ympäristötiedon mallinnusta tietojärjestelmissä.

ERP-järjestelmät ovat liiketoiminnan hallinnointiin tarkoitettuja järjestelmiä, jotka kokoavat yhteen sovelluksia tai moduuleja ja integroivat liiketoiminnan eri osa-alueet (Helo & Szekely 2005). ERP-järjestelmien mallinnuksen piiriin kuuluvat mm. tuotteen toimitusketjuun liittyvät toiminnot. Integroidut ERP-järjestelmät ovat nykypäivänä olennainen yritystoiminnan komponentti (Fruth & Neacsu 2014) ja niitä käytetään toimitusketjujen mallinnukseen laajalti.

Tutkielman yhteydessä tehdyn kirjallisuuskatsauksen perusteella todetaan, että SSCM:n tai GSCM:n ja ERP-järjestelmissä tehtävän toimitusketjun mallinnuksen yhdistävästä kirjallisuudesta ei juurikaan löydy vahvoja viittauksia LCA-tiedon mallinnukseen ERP-järjestelmissä, eikä varsinkaan tietojärjestelmien suunnittelutieteellisestä näkökulmasta kiinnostavaa, tämänkaltaisen järjestelmän toteutusta ohjaavaa kirjallisuutta.

Kestävyyden kautta ympäristöllisen näkökulman ja ERP-järjestelmät yhdistävä S-ERP tutkimusala on vielä suppea, eikä myöskään vastaa LCA-tiedon mallinnuksen kysymykseen. Näiden havaintojen perusteella todetaan, että tutkimuskysymyksen asettaman ongelman ratkaisua tavoittelevan suunnittelututkimuksen on voitava tuloksenaan kytkeä LCA-tutkimuksen tulosten kuvaustapa toimitusketjun kuvaustapaan, jotta ympäristövaikutusten mallinnusta voitaisiin tehdä toimitusketjun mallinnuksen yhteydessä. Jotta näin voitaisiin tehdä, on ensin selvitettävä ovatko ERP/SCM-käsitteet ja LCA:n tapa kuvailla tuotejärjestelmää keskenään yhteensopivia.

Chopra (2019) kuvailee toimitusketjun neljänä prosessisyklinä (kuva 4.5): asiakastilaussykli, täydennyssykli, valmistussykli ja hankintasykli. Syklit esiintyvät kahden toimitusketjun peräkkäisen vaiheen rajapinnassa. Syklinen esitystapa viittaa tiedon kulkuun asiakkaan tarpeesta tuotteen vähittäismyyjälle, jakelijalle, valmistajalle ja hankkijalle sekä samaan aikaan materiaalin kulkuun samoissa sykleissä hankinnasta toimitukseen asiakkaalle. Jokainen mainituista sykleistä ei välttämättä kaikissa toimitusketjuissa toteudu (Chopra 2019), mutta syklien perusteella voidaan tunnistaa neljä toimintoa, joina toimitusketjun sisältämät prosessit voidaan esittää. Nämä toiminnot ovat myynti, siirto varastojen välillä, tuotanto ja osto. Tutkielmassa viitataan Chopran tapaan kuvailla toimitusketju APICS Supply Chain Councilin SCOR-mallin sijaan, koska SCOR-mallin ylimmän tason prosessikategorioihin kuuluu myös suoritteita, joiden merkitys on vähäinen tuotteen elinkaaren ympäristövaikutuksia tarkastellessa (Ntabe et al. 2015). Tutkielman kannalta SCOR-mallin relevantit prosessikategoriat ovat hankinta (source), valmistus (make), toimitus (deliver) ja palautus (return). Nämä kaikki tulevat käsitellyiksi Chopran syklisessä esitystavassa.



Kuva 4.5: Toimitusketjun prosessisyklit ja niitä vastaavat toiminnot ja toimijat

Jos LCA:ssa kuvailtavan tuotejärjestelmän mieltää toimitusketjuna, niin tuotejärjestelmän koostavat yksikköprosessit ovat kuvauksia näistä neljästä toiminnosta. Tuotejärjestelmässä virtaavat alkeis-, välivaihe- ja tuotevirrat ovat toimitusketjun raaka-aineita, tuotekomponentteja ja valmiita tuotteita.

ERP-järjestelmissä edellä mainittuja toimintoja mallinnetaan tilausotsikoina ja tilausrivinä. Vuonna 2017 tehdyn selvityksen mukaan (M2 Presswire 2017) maailman kymmenen suurimman ERP-järjestelmätoimittajan joukkoon kuuluvien SAP:n Oraclen ja Microsoftin käyttämässä terminologiassa (help.sap.com; docs.microsoft.com; docs.oracle.com, vierailtu tammikuussa 2020) toimintoja vastaavia tilauksia kuvailevia tietue-tyyppejä kutsutaan samoilla nimillä: myyntitilaus (sales order), ostotilaus (purchase order), tuotantotilaus (production order) ja siirto varastojen välillä (transfer order). Tilausrivit ja tuotenimikkeet (order line, line item) kytkevät tuotteet, raaka-aineet ja komponentit prosesseja mallintaviin tilauksiin. Kun ERP-järjestelmissä toimitusketjun prosessia mallintava tilaus rinnastetaan LCA:n yksikköprosessiin, tilausrivin tilaukseen kytkemä tuotenimike voidaan rinnastaa LCA:n yksikköprosessin syöte- ja tuotevirtoihin.

Tämän havainnon perusteella todetaan, että LCA:n tuotejärjestelmän ja ERP-järjestelmien käyttämän toimitusketjujen mallinnustavan kytkentä toisiinsa on mahdollista. Suunnittelututkimuksen tavoitteleman tietomallin oletetaan voivan allokoida LCI-vaiheen tulokset ja ympäristövaikutuskategoriat ERP-prosesseihin samalla tapaa kuin ne allokoidaan yksikköprosesseihin. Tämän oletuksen pohjalta suunnittelututkimuksen ratkaisumallin muodostusta lähestytään tekemällä LCA:n ja ERP:n käsitteistöjen synteesi luvussa 6. Käsitesynteesin pohjalta tavoitellaan tietomallia, joka mahdollistaa sekä LCI-

että LCIA-vaiheiden tulosten tallennuksen, allokoinnin ERP-prosessiin ja tulosten jatkuvan mallinnuksen ja ympäristövaikutusten laskennan, kun toimitusketjua ylläpidetään ERP-järjestelmälle ominaisella tavalla.

5 Ratkaisumallin muodostus

Ongelma-alueen tarkastelun pohjalta voidaan todeta, että tutkimuskysymyksen kuvailemaa ongelmaa ei vielä ole ratkaistu tavalla, joka vastaisi tutkimuskysymyksen asettamiin vaatimuksiin. Tarkastelun aikana tehtyihin huomioihin perustuen on mahdollista asettaa tutkimuksen tavoittelemalle ratkaisulle suunnittelua ohjaavat perusolettamukset, jotka rajaavat mahdollisen ratkaisualan mielekkäällä tavalla. Tämä raja, eli suunniteltavan ratkaisun vaatimusmäärittely, suoritetaan kohdassa 5.1 kertaamalla tiivistetysti ongelma-alueesta tehdyt havainnot ja peilaamalla niitä tutkimuskysymyksen asetteluun.

Kohta 5.2 edustaa suunnittelututkimuksen innovaatio-osuutta. Siinä esitetään vastaukset kohdassa 5.1 esitettyihin vaatimuksiin ja vastausten perustelut, joihin luvuissa 6 ja 7 esitettävien artefaktien rakentaminen pohjautuu.

5.1 Vaatimusmäärittely

Tutkimuskysymys asettaa suunnittelututkimuksen tulokselle yhden yleisen toiminnallisen vaatimuksen: rakennettavan artefaktin on mahdollistettava toimitusketjun ympäristövaikutusten mallinnus. Muut vaatimukset ovat laadullisia:

1. Ympäristövaikutustiedon hyväksyttävyyys
2. Mallinnusmenettelyn helppo saavutettavuus
3. Mallinnuksen helppo ylläpidettävyyys dynaamisen toimitusketjun tapauksessa

Dynaamisen toimitusketjun mallinnukseen on olemassa yleisesti hyväksytty, tehokas ja laajalle levinnyt menettely: Toimitusketjuja mallinnetaan ERP-järjestelmissä esiintyvien tietorakentein ja toiminnoin. Toimitusketjuissa esiintyvät prosessit kuvataan tietorakenteina, jotka koostuvat tilausotsikoista ja riveistä. Ongelma-alueen tarkastelu kuitenkin osoittaa, että ympäristövaikutustiedon mallinnusta ERP-järjestelmissä toimitusketjujen mallinnuksen yhteydessä on käsitelty vain vähän. Tämän perusteella asetetaan suunniteltava ohjaava vaatimus S1:

S1: Esitettävän ratkaisun tulee laajentaa ERP-tietorakenteita ja toiminnallisuuksia tavalla, joka mahdollistaa ympäristövaikutusten mallinnuksen samanaikaisesti toimitusketjun mallinnuksen kanssa.

Vaatimus S1 vastaa tutkimuskysymyksen vaatimukseen mallinnusmenettelyn helpposta saavutettavuudesta ja samalla ottaa kantaa vaatimukseen ympäristötiedon mallinnuksen helpposta ylläpidettävyydestä. Toimitusketjun mallinnukseen on jo olemassa tehokas menettely, jota ratkaisun on tarkoitus laajentaa. Suunnittelututkimuksen haaste on esittää tähän soveltuva ympäristötiedon kytkentätapa.

Ympäristövaikutustiedon hyväksyttävyyys saavutetaan soveltamalla tiedon kuvailussa LCA-menettelyn tapaa kuvailla ympäristövaikutuksia. Ongelma-alueen tarkastelussa on jo alustavasti todettu, että LCA:n tuotejärjestelmän ja ERP:n toimitusketjujen mallinnustapojen kytkentä toisiinsa on mahdollista. Asetetaan tämän perusteella vaatimus S2:

S2: Esitettävän ratkaisun tulee mallintaa ympäristövaikutukset LCA-tutkimuksen tulosten kanssa yhteensopivalla tavalla.

Ongelma-alueen tarkastelussa todetaan, että LCA-yhteensopivaa ympäristövaikutustietoa on aiemmin esitetty mallinnettavan tavalla, joka mahdollistaa yksittäisen fyysisen tuoteyksikön jäljitettävyyden. Jotta suunnittelun tulos voisi vastata tutkimuskysymyksen saavutettavuusvaatimukseen ja samalla olla uusi kontribuutio tietojärjestelmien suunnittelututkimuksen alalla, suunnittelutyön tulee painottaa erityisesti toteutuksen saavutettavuutta.

S3: Esitettävän ratkaisun tulee olla helposti saavutettava tilanteessa, jossa yksittäisen fyysisen tuoteyksikön seuranta ei ole mahdollista.

Vaatimukset S1-S3 asettavat ongelma-alueen ja ratkaisualueen rajat. Seuraavaksi tarkennetaan suunniteltavan artefaktin vaatimusmäärittelyä tarkastelemalla LCA-tiedon mallinnukseen liittyviä lisävaatimuksia.

LCA-tutkimuksen kohteena on tuotejärjestelmä, joka kuvailee yhden tuotteen toiminnallisen yksikön elinkaaren viitteellisenä tuotevirtana ”kehdestä hautaan”, alkaen ensimmäisistä tuotteen valmistusta varten kerätyistä ja kulutetuista luonnonvaroista ja päättyen tuotteen hävityksestä seuraaviin päästöihin takaisin luontoon. Elinkaaren aikana tuotteen jalostumisen vaiheita ja sen komponenttien fyysisiä liikkeitä arvioidaan LCA-tutkimuksen määrittelemän tuotejärjestelmän rajoissa, kun tuote ja sen komponentit kulkevat yksikköprosessien läpi arvioinnin kohteena olevassa viitteellisessä tuotevirrassa.

ERP-järjestelmissä esiintyvässä toimitusketjun mallinnustavassa ei tyypillisesti huomioida tuotteen kulutus-, käyttö- ja hävitysvaihetta. Muilta osin vastaavuudet LCA:n tuotejärjestelmässä esiintyville yksikköprosesseille voidaan kuitenkin löytää ostoon, myyntiin, tuotantoon ja logistiikkaan liittyvistä prosesseista.

S4: Esitettävän ratkaisun tulee voida osoittaa käsitteellinen yhteensopivuus ERP-prosessien ja LCA-yksikköprosessien välillä.

S5: Esitettävän ratkaisun tulee huomioida tuotteen koko elinkaaren tarkastelu.

LCA-tutkimuksen LCI-vaiheessa yksikköprosessien syötteet ja tuotokset, eli prosessien kuluttamat luonnonvarat ja prosessien aikaiset päästöt tunnistetaan, kvantifioidaan ja luetteloidaan alkeisvirtoina. LCIA-vaiheessa alkeisvirtaluettelossa esiintyvät syötteet ja tuotokset kategorisoidaan, kuvaillaan ja muunnetaan annetun kategorian indikaattoriyksikköä vastaavaksi vertailuluvuksi.

S6: Esitettävän ratkaisun tulee voida kuvailla sekä LCI-vaiheen alkeisvirtaluettelo, että LCIA-vaiheen ympäristövaikutusluettelo.

Jotta jo vakiintuneeseen dynaamisen toimitusketjun mallinnustapaan voitaisiin kytkeä LCA-tietoa tavalla, joka kestää muutokset toimitusketjun mallinnuksessa, on voitava esittää mekaniikka, joka sallii LCA-tutkimusten tulosten osittaisen uudelleenmallinnuksen tavalla, josta laskennallisesti voidaan johtaa uudet lopputulokset ja kohdistetut ympäristövaikutukset.

S7: Esitettävän ratkaisun tulee mahdollistaa dynaamisen toimitusketjun mallinnuksen ohella dynaaminen LCA, eli LCA-tiedon uudelleenmallinnus vain toimitusketjun muuttuneilta osin.

S8: Esitettävään ratkaisuun tulee sisältyä tapa laskea dynaamisen LCA:n lopputulokset.

Suunnittelututkimusta ohjaavat vaatimukset S1-S8 tiivistävät ongelma- ja ratkaisualueen muotoon, joiden pohjalta voidaan perustellusti ja kohdistetusti hakea ratkaisua tutkimuskysymyksen asettamaan ongelmaan.

5.2 Ratkaisuehdotus ja suunnittelutehtävä

Suunnittelututkimukselle ja suunnittelutyölle on luonteenomaista, että niiden käsittelemiin ongelmiin ei ole yhtä ainoaa oikeaa ratkaisutapaa. Ratkaisutavan oikeellisuutta voidaan ennalta arvioida vain peilaamalla ratkaisuehdotusta suunnittelutyölle asetettuihin vaatimuksiin.

Kohdassa 5.1 muodostettu, tiivistetty vaatimusmäärittely pyrkii esittämään tutkielman käsittelemän ongelman läpinäkyvällä tavalla, jonka perusteella voidaan todeta ehdotetun ratkaisun soveltuvuus. Tässä kohdassa ehdotetaan ratkaisuja, jotka täyttävät aiemmin asetetut, taulukossa 5.1 esitettävät suunnittelutehtävää ohjaavat vaatimukset. Näitä ratkaisuja tavoitellaan luvuissa 6 ja 7.

Taulukko 5.1: Suunnittelutehtävää ohjaavat vaatimukset

Vaatus	Vaatumuksen kuvaus
S1	Esitettävän ratkaisun tulee laajentaa ERP-tietorakenteita ja toiminnallisuuksia tavalla, joka mahdollistaa ympäristövaikutusten mallinnuksen samanaikaisesti toimitusketjun mallinnuksen kanssa.
S2	Esitettävän ratkaisun tulee mallintaa ympäristövaikutukset LCA-tutkimuksen tulosten kanssa yhteensopivalla tavalla.
S3	Esitettävän ratkaisun tulee olla helposti saavutettava tilanteessa, jossa yksittäisen fyysisen tuoteyksikön seuranta ei ole mahdollista.
S4	Esitettävän ratkaisun tulee voida osoittaa käsitteellinen yhteensopivuus ERP-prosessien ja LCA-yksikköprosessien välillä.
S5	Esitettävän ratkaisun tulee huomioida tuotteen koko elinkaaren tarkastelu.
S6	Esitettävän ratkaisun tulee voida kuvailla sekä LCI-vaiheen alkeisvirtaluetelo, että LCIA-vaiheen ympäristövaikutusluettelo.
S7	Esitettävän ratkaisun tulee mahdollistaa dynaamisen toimitusketjun mallinnuksen ohella dynaaminen LCA, eli LCA-tiedon uudelleenmallinnus vain toimitusketjun muuttuneilta osin.
S8	Esitettävään ratkaisuun tulee sisältyä tapa laskea dynaamisen LCA:n lopputulokset.

Seuraavaksi asetetaan suunnittelutehtävä ja sen tavoitteet. Suunnittelutehtävän tavoite on toimittaa kolme Hevnerin et al. (2004) määritelmien kanssa yhteensopivaa tietoteknistä artefaktia:

1. **Käsitteistö**, jonka avulla voidaan kuvailla ERP-järjestelmissä LCA-tutkimuksen tulosten kanssa yhteensopivaa ympäristövaikutustietoa esittävä mallinnustapa.
2. Semanttinen **tietomalli**, joka kuvailee käsitteistön perusteella muodostettavien entiteettityyppien välisiä suhteita ja toimii järjestelmäkohtaisen toteutuksen ohjeena.
3. Toimintalogiikka, eli kokoelma **menetelmiä** (algoritmeja ja käytäntöjä), joiden avulla esitetyn tietomallin mukaista ympäristövaikutustietoa voidaan pitää yllä ja laskea uudelleen mallinnettavan toimitusketjun muuttuessa.

Käsitteistö muodostetaan kohdassa 6.1 abstrahoimalla LCA- ja ERP-käsitteistöt yleiselle tasolle, jonka perusteella tietomalli muodostetaan. Yleisen käsitteistön yhteensopivuus LCA- ja ERP- käsitteistöjen kanssa osoitetaan suorittamalla käsittekartoitus (mapping) yleiskäsitteistöön kohdassa 6.2. Tietomallin muodostuksessa kohdassa 6.3 sovellettava käsitteistö on ERP:n ja LCA:n yhdistäviltä osin yleistetty, mutta käsitteistössä esiintyy myös yleistämättömiä, LCA:sta sellaisenaan sovellettuja käsitteitä, joiden avulla kuvaillaan LCI-vaiheen alkeisvirrat ja luonnehditaan niiden ympäristövaikutukset (S6). Luvussa 6 tehtävä käsitesynteesi kokonaisuudessaan vastaa suunnittelutehtävän vaatimukseen S1, S2 ja S4.

Suunnittelutehtävässä pyritään ratkaisuun, joka on saavutettavissa myös tapauksessa, jossa yksittäisen fyysisen tuoteyksikön seuranta ei ole mahdollista. Saavutettavuutta taivoitellaan laskemalla yksittäisen tuotenimikkeen keskimääräiset alkeisvirrat aina nimikkeen logistisen tilan muuttuessa, eli kun nimike siirtyy yksikköprosessiin tai pois yksikköprosessista.

Luvussa 7 kuvaillaan ratkaisuehdotus, jossa alkeisvirran keskimääräisen lähtöarvon määrittäminen yhdelle tuotenimikkeelle tapahtuu suorittamalla LCI-vaiheen syötteiden ja tuotosten kvantifionti tuotenimikkeelle siihen toimitusketjun kohtaan asti, jossa tuotenimike ensimmäisen kerran esiintyy. LCI-vaiheen tulokset allokoidaan yksikköprosesseihin LCA-menettelyn LCI-vaiheen määritelmän mukaisesti, ja esitettävässä ratkaisumallissa ne vastaavasti allokoidaan ERP:ssä mallinnettaviin prosesseihin. Ratkaisussa on huomioitava, että allokoitavat osuudet on muunnettava LCA-menettelyssä määritellyn toiminnallisen yksikön määrästä tuotenimikekohtaiselle yksikkötasolle.

Tuotenimikettä käsittelevän prosessin muuttuessa ratkaisussa on voitava suorittaa LCI-vaiheen tulosten uudelleenallokointi ja laskea prosessin tuotoksina (output) syntyville tuotteille alkeisvirtojen lista painotettuna keskiarvona. Ratkaisuehdotuksessa painotettua keskiarvoa tarkastellaan fyysisen sijainnin perusteella, joka ERP-järjestelmässä on varastopaikka, tai muu varastosijainti.

Painotettuun keskiarvolaskentaan perustuva alkeisvirtojen määrien tarkastelu varastosijainnin kautta vastaa saavutettavuusvaatimukseen S3. Luvussa 6 esitettävä tietomalli mahdollistaa LCA:n alkeisvirtojen allokoinnin, eli kytkennän ERP-prosessin mallinnukseen tavalla, joka mahdollistaa dynaamisen LCA:n suorittamisen toimitusketjun mallinnuksen ohella vaatimuksen S7 mukaisesti. Luvussa 7 esitettävät menetelmät kuvailevat toimitusketjun muutoksen jälkeisen LCA-lopputuloksen laskennan mekaniikan, joka vastaa vaatimukseen S8.

Tuotenimikkeeseen ja logistiseen sijaintiin sidottu tapa suorittaa LCA:ta dynaamisesti mahdollistaa rinnakkaisten LCA-tutkimusten teon samalle tuotenimikkeelle, kun se esiintyy eri sijainneissa haarautuvan tuotantoketjun loppupäissä. Rinnakkaisen LCA:n suorittamisen mahdollisuus on mallista nouseva ominaisuus, jolla voi olla huomattava sovellusarvo. Tämä ominaisuus edellyttää tutkimuksen ehdottaman ratkaisumallin hyväksyntää, mutta saattaa olla suunnittelututkimuksen mielenkiintoisin tulos jatkotutkimuksen kannalta.

ERP-järjestelmien käyttämä malli fyysisen tuotteen toimitusketjusta kuvaa järjestelmän, jossa tuotenimikkeet kulkevat prosessien läpi logistisesta tilasta toiseen. Järjestelmän raja voi alkaa ns. kehdosta luonnonvarojen keräämisenä raakamateriaalituotantoprosessissa, mutta järjestelmän loppupäässä raja ylittyy tuotteen omistuksen siirtyessä asiakkaalle.

On huomioitava, että LCA-tutkimus edellyttää tuotejärjestelmän mallinnukselta tuotteen elinkaaren loppuvaiheen, eli kulutuksen, käytön ja hävityksen ympäristövaikutusten arviointia ja dokumentointia samalla tapaa kuin tuotteen valmistusvaiheenkin. Tutkielman esittämä malli ei pyri jäljittämään tuotenimikkeen kulkua sen elinkaaren loppuvaiheessa, joka lähestulkoon poikkeuksetta olisikin mahdotonta, mutta mahdollistaa elinkaaren loppuvaiheen arvioitujen alkeisvirtojen ja ympäristövaikutusten esittämisen asiakkaalle alkeisvirtojen ja ympäristövaikutusten luettelona, eräänlaisena manifestina, kun tuote poistuu mallinnettavasta tuotejärjestelmästä. Jotta myös elinkaaren alkuvaihe tulisi katettua LCA:n edellyttämällä tavalla niissä tapauksissa, joissa elinkaarta mallintava organisaatio ei suorita itse raakamateriaalin keräystä tai ensimmäisiä jalostusvaiheita, tutkielman esittämä malli olettaa raakamateriaali- ja komponenttitoimittajien pystyvän tuottamaan samankaltaisen manifestin, tai että alkuvaiheen ympäristövaikutukset pystytään muilla tavoin arvioimaan riittävän tarkalla tavalla.

Ratkaisumallissa huomioidaan molemmat tapaukset mallinnettavan järjestelmän ulkopuolella syntyvän ympäristövaikutustiedon käsittelystä. Nämä tapaukset huomioimalla ratkaisumalli saavuttaa LCA:n tuotejärjestelmän mallia vastaavan kattavuuden. Lisäksi asiakkaalle luovutettava manifesti vastaa tutkimusongelman asettelua motivoineeseen tarpeeseen ympäristövaikutustiedon tuottamisesta asiakkaille, kuluttajille ja erilaisille julkisille tahoille (S5).

6 Käsitesynteesi

Tutkielman esittämän ratkaisumallin tarkoitus on mahdollistaa fyysisen tuotteen tunnistavan tuotenimikkeen keskimääräisten ympäristövaikutusten tarkastelu tuotteen toimitusketjun eri vaiheissa. Tarkastelun mahdollisuus saavutetaan tallentamalla toimitusketjun aikana kertyneet tuotenimikekohtaiset alkeisvirrat sekä syötteiksi seuraaviin prosesseihin että jälkitarkastelua varten.

Tämän luvun kohdassa 6.1 esitetään ratkaisun tietomallissa käytettävä yleiskäsitteistö. Kohdassa 6.2 suoritetaan käsitekartoitus, joka osoittaa, miten määriteltyä yleiskäsitteistöä voidaan soveltaa sekä tuotejärjestelmän että toimitusketjun kuvailuun. Yleiskäsitteistön määritelmät listataan taulukossa 6.1, jonka jälkeen käsitteistön soveltamista ja yksittäisten käsitteiden keskinäisiä suhteita kuvaillaan tarkemmin sanallisesti esimerkkien avulla. Määritellyn yleiskäsitteistön pohjalta luodaan tietomalli, joka esitetään kohdassa 6.3 kuvailemalla tietomallin entiteettityypit ja esittämällä niiden väliset suhteet ER-kaaviona.

6.1 Yleiskäsitteistön määrittely

Seuraavaksi määritellään ratkaisumallissa käytettävä yleistetty käsitteistö ja käsitteiden merkitykset. Taulukossa 6.1 esitettävä käsitteistö on muodostettu abstrahoimalla LCA:n tuotejärjestelmää ja ERP:n toimitusketjua kuvailevat käsitteistöt tasolle, joka auttaa tunnistamaan käsitteistöjen yhteiset sisällöt ja mahdollistaa käsitteistöjen yhdistämisen ERP-järjestelmissä.

Lukijan kannalta on huomionarvoista mainita, että abstrahointi on tehty suunnittelututkimuksen aikana kohdassa 6.2 esitettävään käsitekartoitukseen perustuen, sekä iteroiden käsitekartoituksen ja yleiskäsitteistön muodostuksen välillä. Valmiin käsitteistön esittäminen tulosten läpikäynnissä ensin kuitenkin havainnollistaa paremmin käsitteistöjen kytkeytymistä toisiinsa. Yleiskäsitteistöön viitataan tässä luvussa taulukoiden 6.1 ja 6.2 numeroinnin (K1-K12) mukaisesti.

Fyysisen maailman tuote tai tuotekomponentti on olio (K1), jolla on tietty joukko ominaisuuksia. Nimike (K2) määrittelee joukon ominaisuuksia, joiden perusteella voidaan tunnistaa olioita. Nimike voi viitata sekä loppuasiakkaalle toimitettavaan valmistuotteeseen tai tuotekomponenttiin. Huonekaluteollisuudesta poimittuna esimerkkinä valmistuotenimikkeestä käytetään jakkaraa, joka koostuu kolmesta erilaisesta komponenttinimikkeestä: istuimesta, jaloista ja ruuveista. Valmistuotteen komponenttirakenne kuvailaan käyttäen tuoterakennetta (K4), jossa valmistuote on vanhempi ja komponentit lapsia.

Taulukko 6.1: Tuotejärjestelmää ja toimitusketjua kuvailevat yleistetyt käsitteet

#	Käsite	Määritelmä
K1	Olio	Fyysinen tai abstrakti tunnistettava asia.
K2	Nimike	Käsite, joka määrittelee joukon ominaisuuksia, joiden perusteella voidaan tunnistaa olioita.
K3	Nimike-erä	Joukko samaan nimikkeeseen kuuluvia olioita, joita tarkastellaan yhdessä niiden ollessa suoritteen kohteena.
K4	Tuoterakenne	Käsite, joka määrittelee vanhempi- ja lapsinimikkeistä muodostuvan rakenteen, jossa vanhempi on suoritteen tuotosnimike ja lapset ovat suoritteen syötenimike-eriä.
K5	Prosessi	Ilmentymä prosessityyppiin kuuluvasta suoritteesta, joka kohdistuu yhteen tai useampaan nimike-erään. Prosessin vaiheiden läpikäynti muuttaa olioiden fyysisiä tai logistisia ominaisuuksia.
K6	Prosessityyppi	Prosessityyppi määrittelee prosessin ilmentämän suoritteen rajat ja fyysisen maailman operaatiot, jotka suoritteen aikana tapahtuvat.
K7	Fyysinen sijainti	Osoitteella tai osoittimella määritelty sijainti fyysisessä tilassa. Esim. Varastopaikka, -hylly tai rakennus mallinnettavassa järjestelmässä tai sen ulkopuolella.
K8	Logistisen tilan muutos	Monipaikkainen muuttuja, joka kuvailee nimike-erien siirtymiä prosessin ja fyysisen sijainnin välillä. <Nimike, Fyysinen sijainti, Prosessi, Suunta, Määrä>

Prosessi (K5) määritellään suoritteena, joka kohdistuu yhteen tai useampaan nimike-erään (K3), eli joukkoon olioita, jotka jakavat samat ominaisuudet ja joita kuvataan yhdellä nimikkeellä. Prosessityyppi (K6) kuvailee sen suoritteen, jonka ilmentymä prosessi on.

Prosessit muuttavat olioiden fyysisiä tai logistisia ominaisuuksia ja ovat esitettävässä ratkaisumallissa aina osallisina nimikkeiden fyysisten ja logististen ominaisuuksien muutoksissa. Fyysisen ominaisuuden muutoksesta voidaan käyttää esimerkkinä tuotantoprosessia, joka yhdistää esimerkkinä käytetyn jakkaran tuoterakenteessa esiintyvät komponentit - istuimen, jalat ja ruuvit - valmiiksi tuotteeksi. Prosessin syötenimikkeet kuvattaisiin tässä tapauksessa prosessi-ilmentymään kytkettävänä, kolmesta nimikkeestä koostuvana tuoterakenteena. Prosessista poistuva tuotos, koottu jakkara, kuvattaisiin uutena nimikkeenä. Jakkaran valmistuksen osasuoritteet määritellään prosessityypin avulla.

Logistisen tilan muutoksen (K8) perusteella voidaan paikallistaa nimike-eriä fyysisessä sijainnissa (K7) tai prosessissa. Nimikkeen logistinen tila tarkasteluhetkellä on johdettu ominaisuus, joka päätellään tarkastelemalla sarjaa nimikkeen tilan muutoksista. Logistisen tilan muutos fyysisessä maailmassa voi olla mm. komponentin siirto varastosta kokoamislinjastolle eli tuotantoprosessiin, tai valmistuotteen siirto tuotantolaitoksen valmistuotevarastosta myyjän tai jakelijan varastoon.

Fyysinen sijainti voi mallinnettavan järjestelmän varastopaikan lisäksi kuvata myös komponentti- tai raaka-ainetoimittajan varastoa tai asiakkaan toimitusosoitetta. Prosessit, jotka muuttavat tuotenimikkeen logistista tilaa tuotejärjestelmän tai toimitusketjun mallinnettavan osan rajojen yli sisään tai ulos kuvailevat näissä tapauksissa osto- ja myyntiprosesseja. Raaka-aineen tunnistava tuotenimike voidaan esitellä mallinnettavaan järjestelmään raaka-ainetuotantoprosessissa.

Taulukossa 6.1 esitetyt käsitteet K2-K8 ovat ERP- ja LCA-käsitteistöistä yleistettyjä käsitteitä, joiden avulla voidaan kuvailla toimitusketjua LCA:n tuotejärjestelmän kanssa yhteensopivalla tavalla. Seuraavaksi esitettävä laajennus yleiskäsitteistöön mahdollistaa ympäristövaikutusten mallinnuksen yleiskäsitteistön kuvailemassa toimitusketjussa. Taulukossa 6.2 esitettävät käsitteet K9-K12 ovat LCA:lle ominaisia, tai LCA-käsitteistöön perustuvia käsitteitä.

Taulukko 6.2: Ratkaisumallissa sovellettava LCA-käsitteistö

#	Käsite	Määritelmä
K9	Alkeisvirta	Kvantifioitavissa oleva prosessin materiaali- tai energiavirta, joka on LCA-yksikköprosessin syöte (input) tai tuotos (output). <i>LCA: alkeisvirta</i>
K10	Alkeisvirtaluettelo	Prosessiin kytkettävä joukko alkeisvirtoja. <i>LCA: Alkeisvirtaluettelo on LCI-vaiheen tulos. Kytkeä on LCI-vaiheessa tehtävän allokoimien tulos.</i>
K11	Alkeisvirtasaldo	Monipaikkainen muuttuja, jolla pidetään yllä nimikkeen alkeisvirtojen kertymää fyysisessä sijainnissa <Nimike, Fyysinen sijainti, Alkeisvirta, Määrä>
K12	Ympäristövaikutuskategoria	Ympäristövaikutuksia kuvaileva ryhmittelytekijä, jolla on yleiseen luokitteluun perustuva, kuvaava indikaattoriyksikkö. Esim. Kategoria: ilmaston lämpeneminen. Indikaattoriyksikkö: ilmaston lämpenemispotentiaali 100 vuoden tarkasteluvälillä CO ₂ -verrannaislukuna ilmaistuna (GWP ₁₀₀).

Alkeisvirta (K9) on LCA-tutkimuksen life cycle inventory -vaiheen tulos: yksittäinen, kvantifioitavissa oleva materiaalin tai energian virta ympäristön ja tuotejärjestelmän välillä. Alkeisvirrat kuvaillaan LCA:ssa erilaisina syöte- (input) ja tuotosvirtoina (output) yksikköprosesseihin ja niistä ulos. Virrat voidaan ilmaista energiana sopivaa yksikköä käyttäen, tai materiaana, kuten alkuaineina, molekyyleinä ja toissijaisina valmistuksen aikana kuluttavina materiaaleina. Alkeisvirta ei ole tuotevirta, eli tuote tai tuotekomponentti, eikä sen kuvaamia asioita esitetä nimikettä käyttäen. Yksikköprosessin tuotevirrat

ja välivaihevirratt käsitellään tutkielman esittämässä ratkaisumallissa nimikkeinä. Yksikköprosessiin liittyvistä alkeisvirroista pidetään kirjaa alkeisvirtaluettelona (K10), joka vastaa LCA:n Life Cycle Inventory -vaiheen tulosten yksikköprosessiin allokoitua osuutta (Klöpffer & Grahl 2014).

Alkeisvirtasaldo (K11) on ratkaisumallin tarpeita varten muodostettu, LCA-käsitteistöön perustuva monipaikkainen muuttuja, jonka avulla nimikkeen kerryttämiä keskimääräisiä alkeisvirtoja ja niiden ympäristövaikutuksia voidaan tarkastella sijaintikohtaisesti. Logistista tilaa vastaavasti myös alkeisvirtasaldo on johdettu ominaisuus, joka päätellään tarkastelemalla sarjaa nimikekohtaisia alkeisvirtakirjauksia. Alkeisvirtakirjaukset muodostetaan aina kun nimike kirjataan uuteen logistiseen tilaan, eli prosessiin tai varastoon. Kirjaukset tehdään prosessiin liittyvän alkeisvirtaluettelon sekä lähdevaraston nimikekohtaisten alkeisvirtasaldojen painotetun keskiarvon tai toimittajan alkeisvirtaluettelon (manifestin) perusteella. Kirjausmenettely ja siihen liittyvä laskenta esitetään tarkemmin luvussa 7.

Ympäristövaikutusten mielekäs tarkastelu ja tulosten vertailukelpoisuuden saavuttaminen edellyttää yksittäisten alkeisvirtojen ryhmittelyä ja muunnosta vertailun mahdollistavaan yksikköön LCA-tutkimuksen LCIA-vaiheen määrittelemällä tavalla. Ympäristövaikutuskategoriat (K12) kokoavat alkeisvirrat yhteen, kuvailevat niiden ympäristövaikutusten merkitsevimmän osa-alueen ja määrittelevät jokaiselle kategorialle indikaattoriyksikön, johon samaan osa-alueeseen kuuluvat alkeisvirrat voidaan muuntaa vertailun helpottamiseksi. Esimerkiksi sellaiset yksikköprosessin alkeisvirrat, jotka ovat kasvihuonekaasuja, voidaan kategorisoida ”ilmaston muutos”-kategorian alaisiksi, jolloin käytettävä indikaattoriyksikkö voi olla esimerkiksi GWP100, ilmaston lämpenemispotentiaali.

6.2 Käsitelkartoitus

Tässä kohdassa suoritetaan LCA- ja ERP-käsitteistöjen kartoitus kohdassa 6.1 määriteltyyn yleiskäsitteistöön. Käsitelkartoitus tehdään tarkastelemalla toimitusketjun ja tuotepjärjestelmän välistä suhdetta ja peilaamalla havaintoja yleiskäsitteistöön.

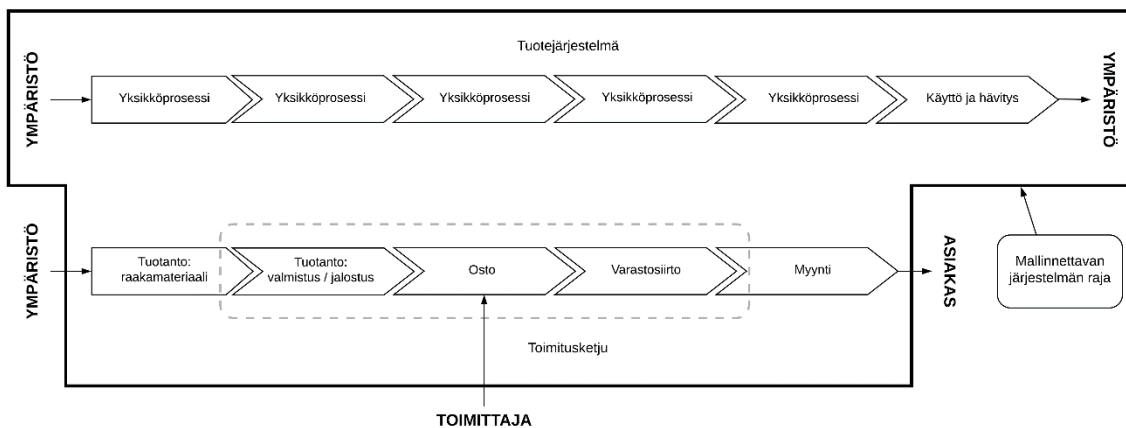
Tutkielman esittämän ratkaisumallin laajuudessa tehdään oletuksia toimitusketjun mallinnuksesta, jotka yksinkertaistavat ERP-järjestelmissä tehtävän mallinnuksen neljään prosessikategoriaan: myynti, osto, tuotanto ja varastosiiro. Tämä oletus on perusteltu, koska näillä neljällä prosessikategorialla voidaan yleisellä tasolla mallintaa valtaosa toimitusketjuista perustuen Chopran (2019) sykliseen toimitusketjun kuvaustapaan ja SCOR-mallin (Cash & Wilkerson 2003; Ntobe et al. 2015) prosessikategorioihin, jotka kuvailevat tuotteeseen liittyviä fyysisiä suoritteita. Uuden tai tarkennetun prosessin esittely ratkaisumalliin tai prosessikategorian tarkennus edellyttää uuden käsitelkartoituksen tekemistä.

Yleistetyn käsitteistön esitysjärjestys noudattaa konstruktivistista (bottom-up) lähestymistapaa, mutta käsitelkartoituksessa on luontevampaa purkaa valmis kokonaisuus

osiksi top-down -lähestymistapaa käyttäen. Tuotejärjestelmää ja toimitusketjua tarkastellaan kokonaisuuksina, jotka puretaan osiin käsiteläkartoituksen aikana. Osista havainnoidaan niiden väliset yhtäläisyydet, joiden perusteella todetaan, että tuotejärjestelmän ympäristövaikutuksia mallintavat elementit voidaan kytkeä toimitusketjun prosesseihin tavalla, joka vastaa LCI-vaiheessa tehtävää alkeisvirtojen allokointia.

LCA:n tuotejärjestelmä on kokoelma yksikköprosesseja – sarja suoritteita, joiden sarjan tuloksena raaka-aineet ja komponentit jalostuvat tuotteiksi. Lisäksi kattava LCA huomioi tuotteen elinkaareissa ne suoritteet, joiden kautta (1.) tuotteet päätyvät loppukäyttäjilleen, jotka (2.) tapahtuvat käytön aikana, ja jotka (3.) liittyvät tuotteen hävittämiseen käytön päätyttyä.

ERP:ssä mallinnetut toimitusketjut ovat tuotejärjestelmää vastaavasti sarja suoritteita, jotka kuvailevat tuotteiden jalostusta ja jakelua mutta tyypillisesti vain asiakasrajapintaan asti. Lisäksi toimitusketjut mallinnetaan vain niiltä osin, joissa tuote, sen komponentit ja sen jalostukseen tai logistiikkaan liittyvät suoritteet ovat toimitusketjua mallintavan organisaation hallinnassa tai omistuksessa. Jos valmiin tuotteen toimitusketjun osien omistajuutta ei huomioida, toimitusketjun ja tuotejärjestelmän mallinnuksen laajuuksissa on kaksi eroa: Tuotteen elinkaaren alkupäässä ympäristön huomioonpuute raakamateriaalituotannossa, sekä elinkaaren loppupäässä käyttö- ja hävitysvaiheessa. Mallinnuksen laajuuden ero esitetään kuvassa 6.1, jossa katkoviivalla rajatut toimitusketjun osat voivat esiintyä useita kertoja eri järjestyksissä.



Kuva 6.1: Tuotejärjestelmän ja toimitusketjun mallinnuksen rajat

Sekä ERP:n että LCA:n prosesseja voidaan kuvailla suoritteina, jotka muuttavat niissä esiintyvien olioiden fyysisiä ominaisuuksia tai logistista sijaintia. LCA:n yksikköprosesseille on aina asetettava fyysiset rajat (Klöpffer & Grahl 2014), ja prosessien syötteiden ja tuotosten liikkeisiin liittyy joko tuotejärjestelmän rajojen ylitys tai siirtymä toi-

seen yksikköprosessiin. ERP-prosesseissa fyysisiä olioita kuvailevat nimike-erät liikkuvat prosesseihin ja niistä ulos sekä mallinnettavan toimitusketjun ulkopuolisten toimijoiden että mallinnuksen piiriin kuuluvien sisäisten varastosijaintien välillä. Toimijat ja varastosijainnit voidaan kytkeä fyysisen maailman sijainteihin. Voidaan todeta, että käsitteet ”fyysinen sijainti” (K7) ja ”logistisen tilan muutos” (K8) sopivat sekä ERP:ssä että LCA:ssa kuvailtavien materiaalien liikkeiden kuvailuun.

Yhteisesti mallinnetuilta osin toimitusketjun ja tuotejärjestelmän prosessit ovat, tai ainakin voivat olla merkityksiltään samoja. Tämä edellyttää kuitenkin, että LCI-vaiheessa tehtävässä alkeisvirtojen allokoinnissa tunnistetaan tuotejärjestelmän yksikköprosessit toimitusketjun mallinnusta vastaavalla tavalla. Jos oletetaan, että toimitusketjun prosessien välissä ei ole aukkoja, eli mallintamattomia osia, voidaan katsoa toimitusketjun mallinnusalueen kattavan tuotejärjestelmän vastaava osa kuvan 6.1 mukaisesti.

Näiden oletusten toteutuessa voidaan todeta, että yleistetty käsite ”prosessi” (K5) yhdessä sen määrittelevän ”prosessityypin” (K6) kanssa sopivat kuvailemaan sekä LCA:n yksikköprosesseja että ERP:ssä esiintyviä prosessikategorioita. Lisäksi huomioidaan, että käyttö- ja hävitysvaiheen mallinnuksen puute ja raakamateriaalituotannossa ympäristön huomioinnin puute on käsiteltävä esitetystä ratkaisumallissa. Näihin puutteisiin vastataan luvussa 7. Samassa luvussa käsitellään myös toimitusketjun osien omistajuuden ongelmallisuus.

Yleiskäsitteistössä määritelty käsite ”olio” (K1) auttaa viittamaan fyysisessä maailmassa esiintyviin asioihin, jotka on tarkoitus tunnistaa. Tuotejärjestelmässä mallinnettavat oliot ovat tuotevirtoihin, välivaihevirtoihin ja alkeisvirtoihin kuuluvia alkioita, jotka liikkuvat prosessien välillä ja niiden läpi. ERP:ssä mallinnettavan toimitusketjun prosesseissa kulkeva olio on raaka-aineen, tuotekomponentin, tai valmiin tuotteen alkio, joka tunnistetaan nimikettä käyttäen. Välivaihevirratt koostuvat LCA-määritelmänsä mukaan mm. yksikköprosessien välillä liikkuvista ei-valmiista tuotteista, eli raaka-aineista tai tuotekomponenteista, ja tuotevirrat taas valmiista tuotteista. Välivaihevirrasta on huomioitava lisäksi, että se voi LCA:n kontekstissa kuvailla myös yksikköprosessien välillä liikkuva energiaa, mutta kaikki energia mallinnetaan ratkaisumallissa alkeisvirtoina.

Energian mallinnukseen liittyvän poikkeuksen käsittely huomioiden välivaihevirroille ja tuotevirroille voidaan löytää vastineet esitetystä yleiskäsitteistössä. Voidaan todeta, että käsite ”nimike” (K2) sopii kuvaamaan ERP-nimikkeen lisäksi myös LCA:n tuote- ja välivaihevirtojen sisältämiä olioita. Vastaavasti ”nimike-erä” (K3) sopii kuvaamaan useammasta saman nimikkeen yksiköstä koostuvaa joukkoa. ERP:ssä nimike-erää mallintaa tilausrivi, jolla nimike esiintyy. Nimike-erä voi olla myös tilausrivin perusteella tehty kirjaus varastopaikkaan tai prosessiin. Lisäksi voidaan todeta, että tuoterakenne (K4) nimike-eriä yhteen kokoavana rakenteena myöskin vastaa LCA:n välivaihe- ja tuotevirtojen joukkoa.

Alkeisvirrat (K9) ovat tuotejärjestelmän rajat ylittäviä materiaali- ja energiavirtoja. Alkeisvirta on käsite, jonka esittely ERP-käsitteistöön on ratkaisumalliin sisältyvä ehdotus, eikä sille siksi tarvitse löytää vastaavuutta. Alkeisvirrat kytkeytyvät LCA:ssa yksikköprosesseihin, ja ratkaisumallissa ne kytketään prosessityyppeihin (K6) alkeisvirtaluetteloina (K10) kohdassa 6.3 esitettävän tietomallin kuvailemalla tavalla. Prosessityypin kautta alkeisvirrat kytkeytyvät myös prosessin ilmentymiin.

Kohdassa 6.1 esitetty alkeisvirtasaldo (K11) mahdollistaa alkeisvirtojen keskiarvojen laskennan ja nimikekohtaisen, rinnakkaisen, dynaamisen LCA:n suorittamisen, kun nimike kulkee erilaisten fyysisten sijaintien läpi. Ympäristövaikutuskategoriat (K12) mahdollistavat alkeisvirtojen ympäristövaikutusten kuvailun LCA-menettelyn mukaisella, havainnollisella tavalla.

Taulukko 6.3: Käsitekartoituksen tulos

#	Yleiskäsite	LCA-käsite	ERP-käsite
K1	Olio	Tuotevirran alkio Välivaihevirran alkio Alkeisvirran alkio	Valmiin tuotteen alkio Tuotekomponentin alkio Raaka-aineen alkio
K2	Nimike	Tuotevirran alkion tyyppi Välivaihevirran alkion tyyppi	Valmiin tuotteen alkion tyyppi Tuotekomponentin alkion tyyppi Raaka-aineen alkion tyyppi
K3	Nimike-erä	Tuotevirta Välivaihevirta	Tilausrivi Kirjaus varastoon tai prosessiin.
K4	Tuoterakenne	Tuotevirta Välivaihevirta	Tuoterakenne
K5	Prosessi	Yksikköprosessi	Ilmentymä prosessityypin määrittelemästä prosessista.
K6	Prosessityyppi	Yksikköprosessi	Myyntitilaus Ostotilaus Tuotantotilaus Siirto varastojen välillä (Varastosiiro)
K7	Fyysinen sijainti	Yksikköprosessin määritelmän osa.	Varastosijainti (esim. rakennus, varastohylly, tai varastopaikka)
K8	Logistisen tilan muutos	Siirtymä yksikköprosessien välillä.	Kirjaus varastoon tai prosessiin.
K9	Alkeisvirta	Life cycle inventory (LCI) -vaiheen tulos. Materia- tai energiavirta.	<i>Tutkielman esittämä ERP-käsitteistön laajennus.</i>
K10	Alkeisvirtaluettelo	LCI-vaiheessa yksikköprosessiin allokoidut alkeisvirrat.	<i>Tutkielman esittämä ERP-käsitteistön laajennus.</i>
K11	Alkeisvirtasaldo	<i>Tutkielman esittämä ERP-käsitteistön laajennus.</i>	<i>Tutkielman esittämä ERP-käsitteistön laajennus.</i>
K12	Ympäristövaikutuskategoria	Alkeisvirtoja yhteen kokoava ryhmittelytekijä, joka kuvaa tuotejärjestelmän virtojen vaikutuksia ympäristöön.	<i>Tutkielman esittämä ERP-käsitteistön laajennus.</i>

Taulukko 6.3 esittää tehdyn käsittekartoituksen tuloksen. Kartoituksen perusteella voidaan todeta LCA- ja ERP-käsitteistöjen olevan yhteensopivia tutkielman esittämän ratkaisumallin edellyttämällä tavalla.

6.3 Semanttinen tietomalli

Tässä kohdassa esitetään tutkielman esittämän ratkaisun soveltama semanttinen tietomalli. Tietomalli rakennetaan kohdassa 6.1 esitetyn yleiskäsitteistön pohjalta, ja esitetään ER-kaaviona (entity-relationship; Chen, 1976), eli mallinnuksen kohteena olevia asioita kuvailevan datan entiteettityypeinä ja niiden välisinä suhteina.

ER-malli on käsitteellisen mallintamisen ja tietokantasuunnittelun apuväline, jonka avulla voidaan luoda tietokantatoteutusta tarkemmin kuvailevia tietokantakaavioita ja lopulta tietokantatoteutuksia. Tutkielmassa esitettävät ER-kaaviot havainnollistavat tiedon mallinnuksen tapaa esitetyssä ratkaisumallissa myös itseisarvoisena asiana.

Seuraavissa kappaleissa esitetään vaiheittain tietomallin keskeisten osien rakenteet. Valmis malli esitetään kuvassa 6.6. Tietomallin perusteella tehtyjä tietokantakaavioita ja niiden mukaan mallinnettua esimerkkidataa käsitellään luvussa 7, jossa esitetään ratkaisumallin sovelluksen logiikka.

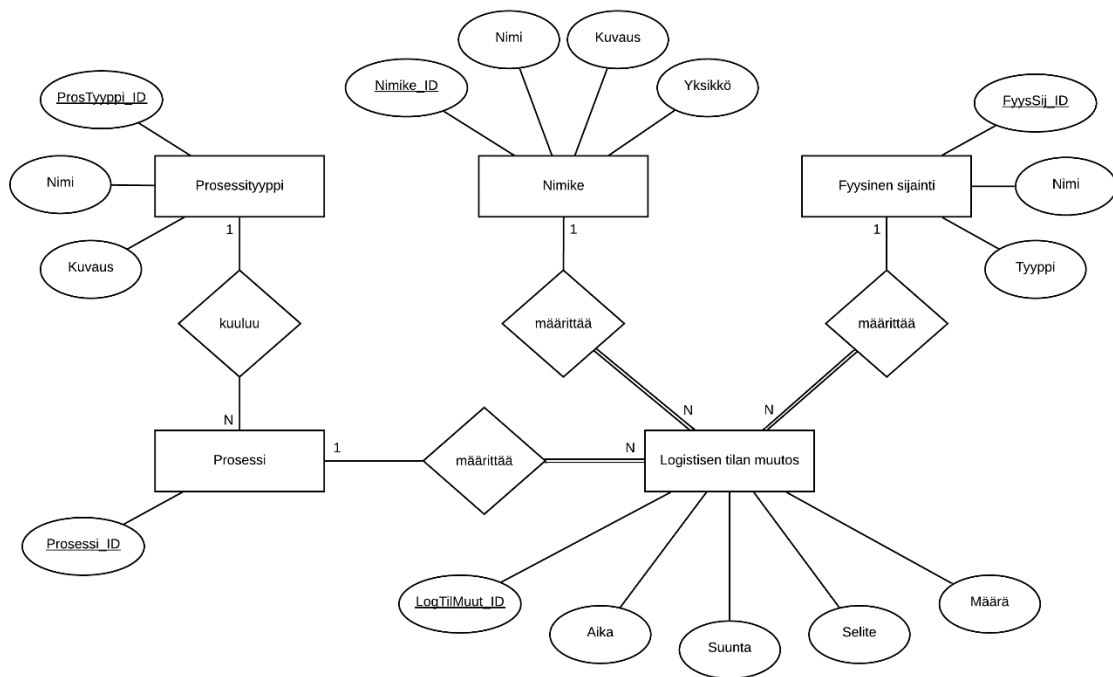
Logistisen tilan muutoksella on keskeinen rooli ratkaisumallissa. Kuvan 6.2 keskiössä oleva logistisen tilan muutos on vahva entiteettityyppi, joka edustaa nimikkeen fyysisen sijainnin ja fyysisten ominaisuuksien muutosta suoritteen seurauksena. Logistisen tilan muutosten sarjan perusteella voidaan päätellä, kuinka monta kappaletta tiettyä nimikettä esiintyy prosessissa tai varastopaikassa.

Yhteen logistisen tilan muutokseen osallistuu aina yksi nimike-, prosessi- ja fyysinen sijainti -entiteetti. Edellyttämällä näiden entiteettityyppien läsnäoloa logistisen tilan muutoksessa, prosessi osallistuu aina nimikkeen fyysisen sijainnin muutoksiin, käsitteen määrittelyn mukaisesti. Samalla prosessit liittyvät aina johonkin fyysiseen sijaintiin.

Prosessientiteetti vastaa ERP-järjestelmän tilausrivää. Se edustaa yhtä ilmentymää prosessista (esim. yksi jakkaran kokoonpanoerä) ja käsittelee yhtä nimike-erää. Prosessiin liittyy aina yksi prosessityyppi, joka määrittelee prosessin ilmentymän kuvailemat suoritteet. Sama prosessityyppi voi liittyä useampaan prosessi-ilmentymään.

Nimike-entiteettityyppi kuvailee nimike-erää, joka on suoritteen kohteena. Fyysinen sijainti on joko lähetävä tai vastaanottava sisäinen varastosijainti mallinnettavassa toimitusketjussa, tai piste, jossa nimikkeen omistus tai sen alkeisvirtojen mallinnuksen vastuu vaihtuu mallintajan ja kolmannen osapuolen välillä. Esimerkki tällaisesta pisteestä voi olla toimittajan tai asiakkaan varasto.

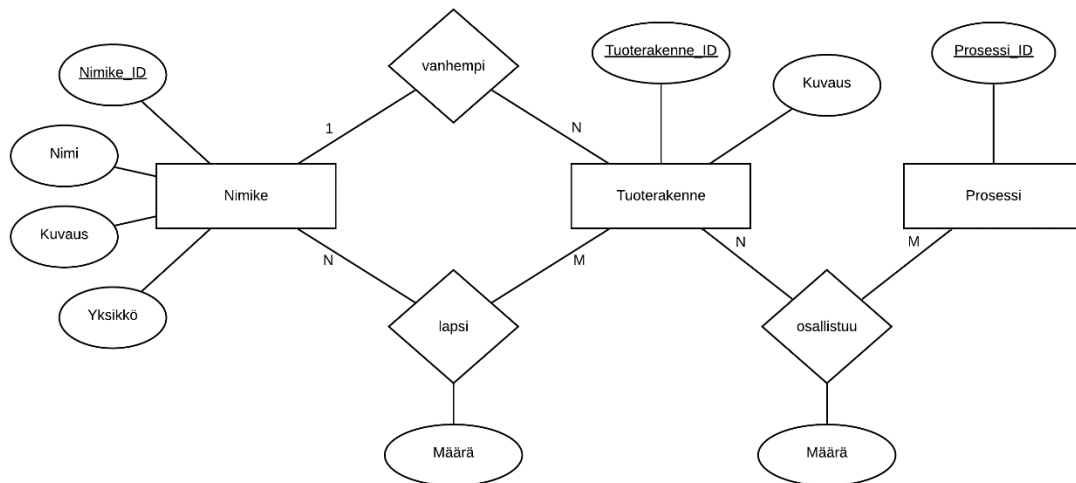
Logistisen tilan muutoksen suunta-attribuutti kertoo, onko sijainnin muutos varastosta prosessiin vai prosessista varastoon. Aika-attribuutin perusteella voidaan todeta sijaintia muuttavien tapahtumien järjestys, ja johtaa erilaiset varasto- ja prosessikohtaiset saldot (nimikkeiden määrät sijainneissa) laskennan aloitushetkestä eteenpäin.



Kuva 6.2: Logistisen tilan muutos ja sen määrittelevät entiteettityypit

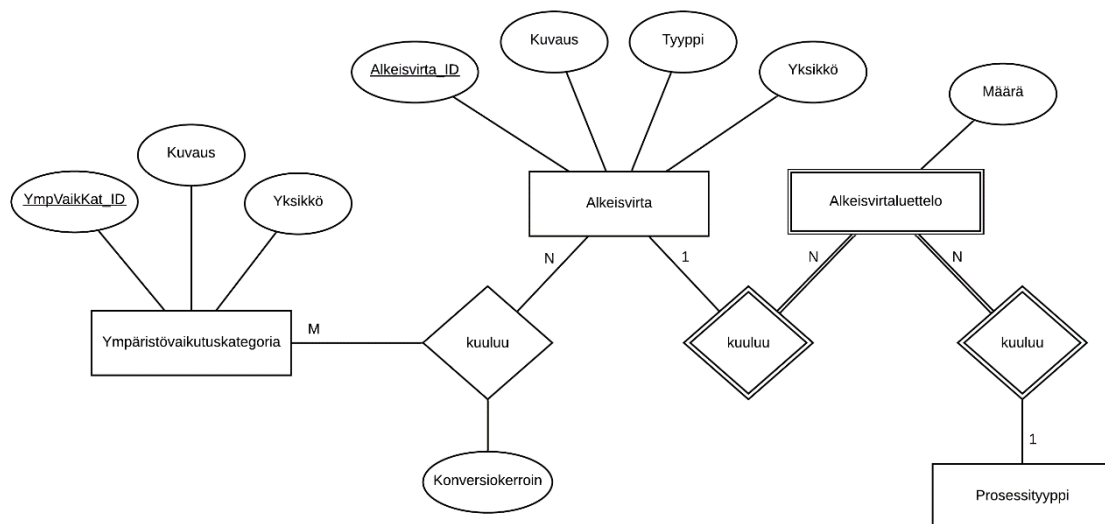
Kuvassa 6.3 esitettävä tuoterakenne määrittelee vanhempi- ja lapsinimikkeistä muodostuvan rakenteen, jossa vanhempi on suoritteiden tuotosnimike ja lapset ovat suoritteiden syötenimike-eriä. Tuoterakenteeseen liittyy yksi vanhempinimike ja yksi tai useampi lapsinimike. Vanhempinimikkeen lapset kytketään tuoterakenteeseen lapsi-suhteella, jonka määrä-attribuutti sisältää vanhempaan kuuluvien lapsinimikkeiden yksikkömäärän.

Tuoterakenne voi osallistua useaan prosessi-ilmentymään, jolloin osallistuu-suhde kertoo, kuinka monta kertaa tuoterakennetta käytetään prosessin syöteenä. Malli sallii myös useamman tuoterakenteen osallistumisen yhteen prosessi-ilmentymään.



Kuva 6.3: Tuoterakenne

Ratkaisumallin kyky mallintaa LCA-tutkimuksen tuloksia ERP-järjestelmissä edellyttää LCI-vaiheen tulosten, eli alkeisvirtojen ja niiden allokoinnin mallinnuksen esittelyä ERP-tietomalliin. LCIA-vaiheen tulosten mallinnus, eli alkeisvirtojen kategorisointi ja luonnehdinta ympäristövaikutuksina, edellyttää näiden kategorioiden mallinnusta ja alkeisvirtojen konversion mahdollisuutta. Entiteettityypit, joilla tämä mallinnus kuvaillaan, esitetään kuvassa 6.4.



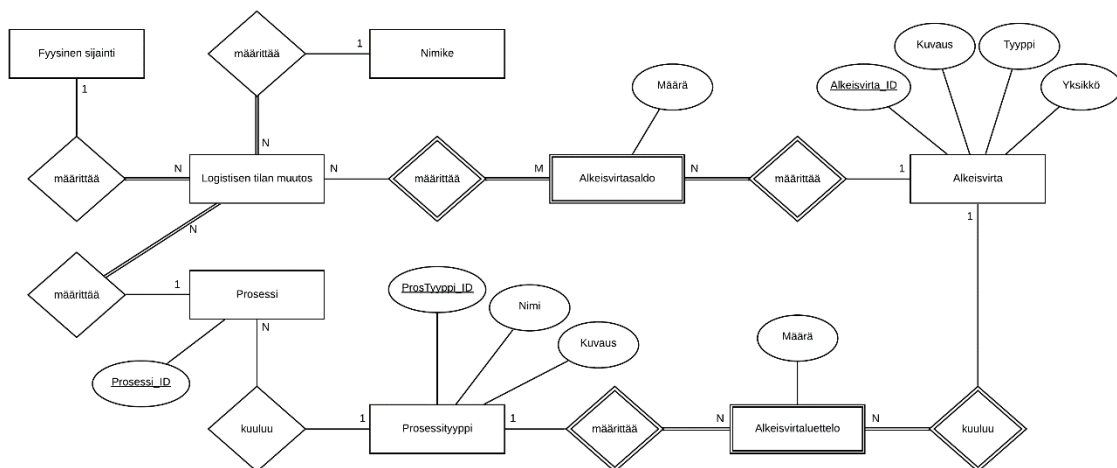
Kuva 6.4: Alkeisvirta, alkeisvirtaluettelo ja ympäristövaikutuskategoria

Alkeisvirtaentiteetillä kuvataan yhtä alkeisvirtaa, eli materiaa tai energiaa, joka ylittää tuotejärjestelmän rajat. Ympäristövaikutuskategoriaentiteetti sisältää sen informaation, jolla alkeisvirtojen ympäristövaikutuksia kuvaillaan. Yksi alkeisvirta voi kuulua useaan ympäristövaikutuskategoriaan, ja ympäristövaikutuskategoriaan voi kuulua useampi alkeisvirta. Ympäristövaikutuskategorian ja alkeisvirran välinen kuuluu-suhde sisältää kerroinattribuutin, jonka avulla alkeisvirrat voidaan konvertoida kategorian indikaattoriyksikköön.

Alkeisvirtaluettelo on heikko entiteettityyppi, jonka identifioivat vahvat entiteettityypit ”alkeisvirta” ja ”prosessityyppi”. Alkeisvirtaluettelon määrä-attribuutti edustaa prosessityypin prosessi-ilmentymän aikana syntyneen alkeisvirran määrää, kun prosessi on suoritettu yhdelle nimike-erän yksikölle.

Nimikkeen sijaintikohtainen alkeisvirtasaldo määritetään nimikkeitä käsittelevien prosessien alkeisvirtaluetteloiden ja niiden aiempien sijaintikohtaisten alkeisvirtasaldojen perusteella. Kuva 6.5 esittää heikon entiteettityypin ”alkeisvirtasaldo” ja ne entiteettityypit, jotka osallistuvat sen määrittelyyn.

Nimike- ja sijaintikohtainen alkeisvirtasaldo määritetään logistisen tilan muutoksiin perustuvien kirjausten perusteella. Yksi logistisen tilan muutos voi liittyä useaan alkeisvirtaan alkeisvirtasaldossa ja yksi alkeisvirta voi liittyä useaan logistisen tilan muutokseen. Nimikekohtainen alkeisvirtasaldo logistisessa sijainnissa on ominaisuus, joka johdetaan laskemalla yhteen määrä-attribuutit alkeisvirtasaldojen sarjassa.



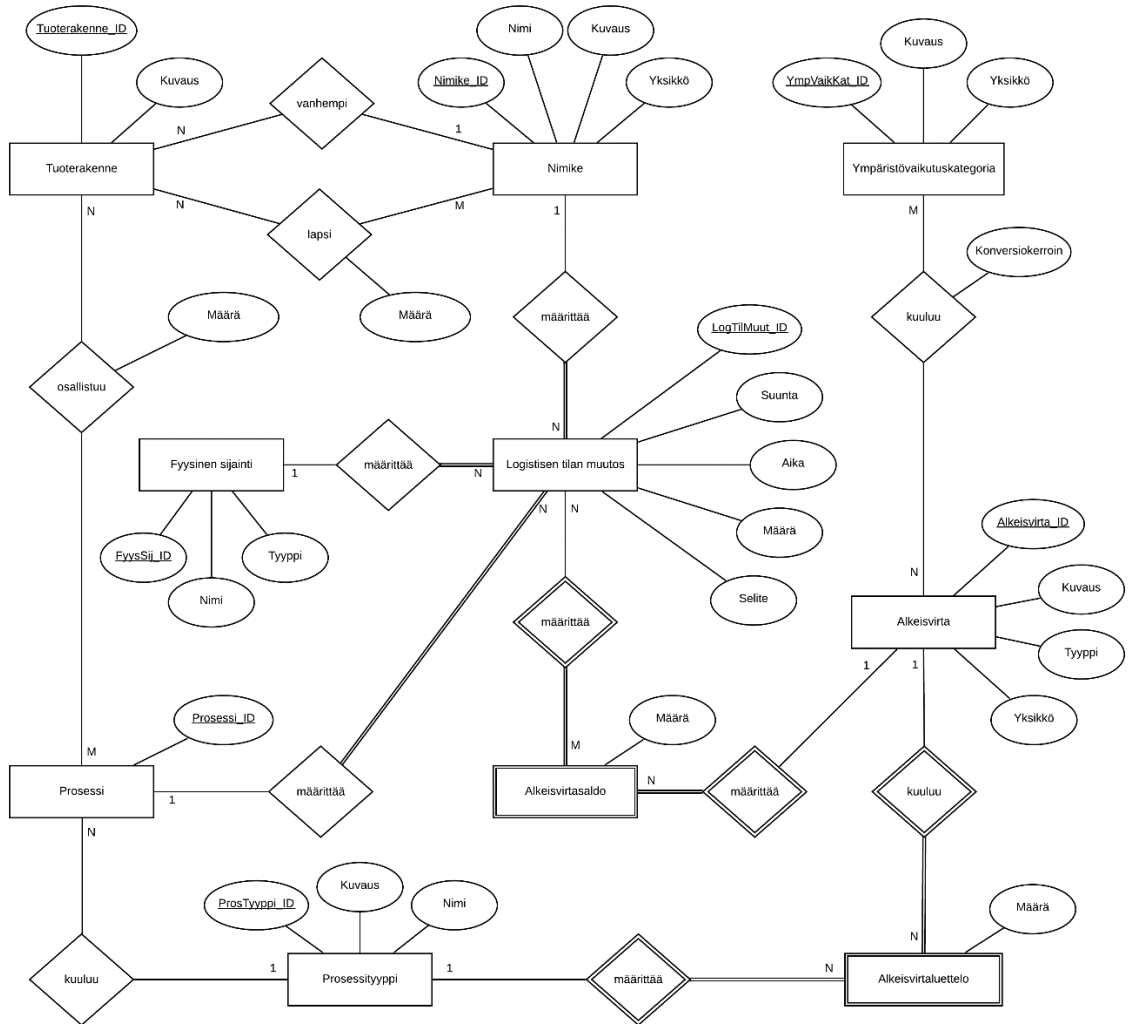
Kuva 6.5: Alkeisvirtasaldo

Nimikkeen logistisen tilan muuttuessa varastosta suoritteiden alaiseksi prosessiin, alkeisvirtasaldoa vähennetään lähettävässä varastopaikassa. Kun nimike poistuu suoritteesta ja logistisen tilan muutos kirjataan prosessista varastoon, prosessista poistuvalla nimikkeelle tehdään alkeisvirtasaldoa kasvattava kirjaus, joka huomioi suoritteeseen liittyvän alkeisvirtaluettelon alkeisvirrat sekä prosessiin kirjattujen nimikkeiden yhteenlasketut alkeisvirtasaldot.

Tutkielman esittämän ratkaisun semanttinen tietomalli esitetään kokonaisuudessaan kuvassa 6.6. Ratkaisumallissa on pyritty säilyttämään yleisyys, joka kuvailee ratkaisun ydinajatuksen ja pystyy osoittamaan sen toimivuuden havainnollistamalla nimikkeen kulkua prosessien ja varastosijaintien välillä, mutta jättää joustavuutta toteutukseen.

Esimerkki joustavuudesta on prosessientiteettityypin kuvailu ”prosessina”, vaikka sen voisi kuvailla ERP-järjestelmästä löytyvänä tilausrivinä. Ratkaisumallin esittämän prosessientiteetin voi kuitenkin kytkeä suoraan ERP-järjestelmän tilausriviin, jolloin prosessin tosimaailman suoritteet ja niihin kytkeytyvät alkeisvirrat määrittelee prosessityyppi. Jos prosessientiteetin sijaan olisi käytetty tilausriviä ratkaisumallin osana sellaisenaan, alkeisvirtojen kytkentä olisi pitänyt kytkeä niihin entiteettityyppeihin, jotka tarkastelun alaisessa ERP-järjestelmässä määrittelevät prosessiin liittyvät suoritteet.

Esitetyn mallin yleisyyden aste tekee mallista sovellettavamman erilaisiin ympäristöihin, mutta on tärkeää todeta, että sovellusympäristökohtaisia optimointeja on saavutettavissa pohtimalla prosessientiteetin tai tilausrivin suhdetta prosessin määrittelyyn ja alkeisvirtojen allokointiin ERP-järjestelmässä, jossa ratkaisua aiotaan soveltaa. Sovellusvaiheessa esitettävän mallin sovittaminen vallitsevaan ympäristöön on suositeltavaa ja erityisesti tutkielman esittämän kysymyksen luonteen mukaista.



Kuva 6.6: Käsitesynteesin pohjalta luotu tietomalli kokonaisuudessaan

7 Toimintalogiikka

Tässä luvussa kuvaillaan ratkaisumallin menetelmät, eli ne algoritmit ja käytännöt, joiden avulla luvussa 6 esitettyä tietomallia voidaan soveltaa dynaamisen LCA:n suorittamiseen. Esitettävät menetelmät ovat toteutusta ohjaavia tietoteknisiä artefakteja, jotka ovat osa suunnittelututkimuksen tulosta.

Ratkaisumallin käytäntöihin kuuluvat kohdassa 7.1. esitettävät oletukset ratkaisun sovellusympäristöstä ja sovelluksen laajuudesta, sekä ne käsitteet ja esitystavat, joilla mallia havainnollistetaan. Näihin esitystapoihin kuuluvat mallin toimintaa kuvaileva käsitteistö, kohdassa 7.2 esitettävä Sirkkan ja Junkkarin (2012) esitystavasta mukailtu jäljitettävyydsgraafi, sekä yleisen tietomallin pohjalta luotavat tietokantakaaviot. Tietokantakaaviot kuvaavat tietomallin relaatiotietokannan rakenteen tauluina ja niiden attribuutteina, joiden pohjalta muodostetaan esimerkkidataa mallin havainnollistamisen avuksi.

Kohdassa 7.4 esitetään esimerkkidataa käyttäen alkeisvirtojen allokointi prosessiin ja alkeisvirtojen luonnehdinta ympäristövaikutuskategorioina. Kohta 7.5 esittää alkeisvirtojen laskennan nimikkeeseen siirtyessä varastopaikasta prosessiin ja prosessista varastopaikkaan.

7.1 Oletukset ja esitystapa

Seuraavaksi asetetaan oletukset ratkaisumallin sovellusalueesta. ERP-järjestelmät voivat kattaa erilaisilla ohjelmamoduuleillaan valtavan määrän erilaisia liiketoiminnallisia funktioita myös toimitusketjun hallinnan ulkopuolella. Tutkielman oletus on, että ratkaisua tullaan soveltamaan vain fyysisen tuotteen toimitusketjua mallintavissa toiminnoissa. Lisäksi rajataan tarkasteltavat toiminnot neljään prosessikategoriaan: myynti, osto, tuotanto ja siirto varastojen välillä.

Prosessien kategorisointi on ERP-järjestelmässä tavalla tai toisella esiintyvä asia. Prosessikategorioihin jakautuminen voi tapahtua erilaisin tavoin, mutta esimerkiksi kohdassa 4.3 todettiin kolmen suuren ERP-järjestelmätoimittajan mallintavan prosessikategorioita kuvailevien tilausten otsikot- ja rivit omina tietuetyypeinään. Toisin sanoen myynti-, osto-, varastosiirto- ja tuotantotilausotsikot ovat rakenteellisesti omanlaisiaan, vaikka jokainen kuvailee jonkinlaista fyysistä suoritetta.

Tutkielmassa oletetaan prosessikategorioihin jaon tapahtuvan tilausotsikoiden tietuetyyppien perusteella. Jatkossa oletetaan ERP-järjestelmissä esiintyvien tilausotsikoiden ja niihin liittyvien rivien edustavan samoja tietuetyyppejä tai luokkia prosessikategorioista riippumatta. Silloin ratkaisun tietomallin prosessientiteettityyppi voidaan aina kytkeä ERP-järjestelmässä esiintyvään ”yleiseen” tilausriviin. Lisäksi oletetaan, että prosessin suorituksen etenemistä ERP:ssä kuvaa aina tilauksen status.

Prosessin kytkentä tilausriviin on sovellusympäristöriippuvainen asia, mutta kytkennän perusteet voidaan silti kuvailla tapauksittain. Myynnin yhteydessä tapahtuvaan prosessiin liittyvä alkeisvirtaluettelo sisältää nimikkeeseen toimituksesta aiheutuvat alkeisvirrat,

sekä nimikkeen käyttöön ja hävitykseen liittyvät alkeisvirrat. Käyttö- ja hävitysvaiheen alkeisvirrat arvioidaan LCA-tutkimuksessa todennäköisen käytön ja hävityksen skenaarion mukaisesti.

Kytkemällä käyttö- ja hävitysvaiheen alkeisvirrat myynnin prosessiin, saadaan käsiteltä LCA:n tuotejärjestelmän ja toimitusketjun välinen ero mallinnuksen laajuudessa (kuva 6.1). Tieto käyttö- ja hävitysvaiheen alkeisvirroista ja niiden ympäristövaikutuksista voidaan luovuttaa edelleen asiakkaalle.

Ostoon kytkettävän prosessin tyyppiin liittyvän alkeisvirtaluettelon tulee sisältää ne alkeisvirrat, jotka aiheutuvat nimikkeen saavuttamisesta omaan varastoon, sekä ne alkeisvirrat, jotka ovat jo kertyneet ostettavalle nimikkeelle sen toimitusketjun aiemmissa vaiheissa. LCA-tutkimuksessa kertyneet vaikutukset joko mitattaisiin tai arvioitaisiin perustuen saatavilla olevaan dataan, mukaan lukien LCA-tietokannoista löytyviin vastaaviin viitteellisiin tuotevirtoihin. Näin voi tehdä myös tutkielman ratkaisumallia soveltaessa. Jos toimittajan on mahdollista toimittaa tuotteestaan tarkempi alkeisvirtaluettelo, joka vastaa ratkaisumallissa asiakkaalle luovutettavaa alkeisvirtaluetteloa, voidaan ostoprosessiin liittyvä alkeisvirtaluettelo muodostaa sen perusteella.

Siirto varastojen välillä on prosessi, jonka alkeisvirtaluettelon tulee sisältää ne alkeisvirrat, jotka aiheutuvat nimikkeen siirrosta varastosijainnista toiseen. Kaikki prosessityypit voivat pitää sisällään tämänkaltaisen fyysisen suoritteen. Tutkielman esittämä ratkaisumalli ei ota kantaa suoritukseen liittyvän prosessityypin kytkemiseen, mutta mahdollinen avain logistiikkaan liittyvien prosessien kytkemiseen automaattisesti voi löytyä lähettävän sijainnin ja vastaanottavan sijainnin välisestä etäisyydestä, toimitustavasta, nimikkeen painosta ja nimikkeen tilavuudesta. Suorittamalla kytkettävän prosessin valinta edellä listattuihin ominaisuuksiin perustuen, voitaisiin tarkemmalla tasolla huomioida lähetyiskohtaiset poikkeavat toimitustavat ja kuljetuskapasiteetin käyttöaste.

Tuotantoprosessiin liittyvä alkeisvirtaluettelo voidaan kytkeä valmistettavan nimikkeen reittiin. Tuotannon reitti kuvailee ne työpisteet ja suoritteet, joiden kautta nimikkeen komponentit kulkevat tuotantoprosessin aikana. Viitteen sovellettavaan prosessiin voi kytkeä nimikekohtaisen reitin otsikkotietueeseen.

Sovellusympäristöön liittyvien oletusten asettamisen lisäksi on määriteltävä keskeisten ratkaisun kuvailussa käytettyjen käsitteiden merkitys. Logistisen tilan ja alkeisvirtasaldon laskennan perusteet, kirjaukset, ovat tietueiden syöttöjä tietokantaan - riippumatta tiedon syötön lähteestä. Kirjaus voidaan tehdä manuaalisesti tai automaattisesti ohjelmiston vallitsevassa toimintalogiikassa. Automaattinen kirjaus voi syntyä esimerkiksi manuaalisen tilauksen statuksen muutoksen seurauksena. Esimerkiksi tuotantotilauksen statuksen merkitseminen valmiiksi aiheuttaisi tuotannosta valmistuvan nimikkeen kirjauksen suunniteltuun vastaanottavaan varastosijaintiin. Automaattisesti tehtäviin ja manuaalisiin kirjauksiin viitataan alkeisvirtojen laskennan esittelyssä, kohdassa 7.5.

Prosessien suoritteisiin osallistuvat toimijat ovat fyysisessä maailmassa kone- ja henkilöresursseja, mutta niitä ei mallinneta tutkielman esittämässä ratkaisumallissa. Kone- ja henkilöresurssit, sekä niistä aiheutuvat alkeisvirrat huomioidaan LCI-vaiheen tuloksissa ja niiden allokoinnissa prosesseihin.

Fyysiset sijainnit ovat ne toimijat ja ympäristöt, jotka kiinnittävät ratkaisumallin prosessit paikkoihin, osoitteisiin ja koordinaatteihin fyysisessä maailmassa. On intuitiivista käsittää erilaiset varastopaikat (mm. rakennukset, hyllyt, hyllypaikat) fyysisiksi sijainneiksi, mutta ratkaisumallissa myös asiakkaita ja toimittajia käsitellään sijainteina. Asiakkaalla ja toimittajalla oletetaan olevan osoite tai toimitusosoite, joka kytkee sen fyysisen maailman sijaintiin.

7.2 Toimitusketjun prosessien kuvaus jäljitettävyyssgraafina

Tutkielman esittämän ratkaisumallin toimitusketjujen kuvailuun käytetään mukaelmaa Sirkan ja Junkkarin (2012) esittämästä jäljitettävyyssgraafista. Jäljitettävyyssgraafi on hyödyllinen apuväline prosessien välisten nimike-erien havainnollistamiseen, sekä yhden toimitusketjun tunnistavan polun määrittelyyn dynaamisessa toimitusverkostossa, eli samassa järjestelmässä mallinnettavien toimitusketjujen joukossa. Esimerkki tästä esitetään kuvassa 7.1, jossa solmuun G1 liittyvän toimitusketjun osat on väritetty.

Jäljitettävyyssgraafin esittelyn ohessa voidaan todeta, että tutkielman esittämä nimike- ja varastopaikkatasoa tarkasteleva ratkaisumalli on Sirkan ja Junkkarin skaalautuvan jäljitettävyyssmallin kanssa yleisellä tasolla ominaisuuksiltaan yhteensopiva.

Tutkielman esittämää mallia kuvaavaa graafia muokataan prosessien välisten nimikeerien kulkua esittäviltä osin. Eriäväisyyksien tarkastelulla havainnollistetaan tutkielman ratkaisumallin tapaa tarkastella alkeisvirtoja erityisesti varastonäkökulmasta, kun seurattavan nimikkeen logistinen tila muuttuu.

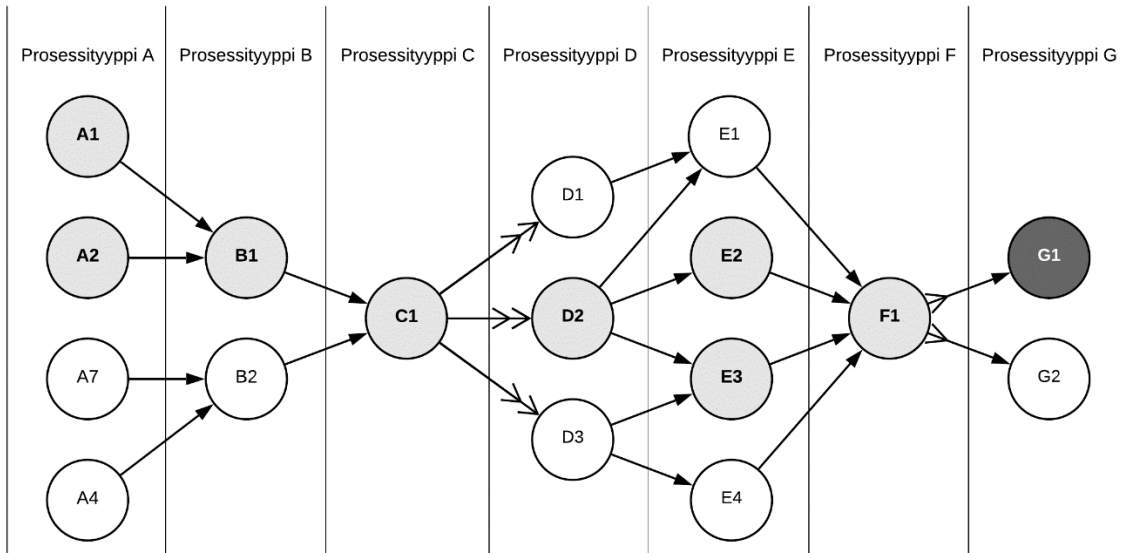
Seuraavaksi esitetään tiivistetysti kuvan 7.1 jäljitettävyyssgraafi Sirkan ja Junkkarin (2012) määritelmän mukaisesti.

Jäljitettävyyssgraafi mallintaa fyysisten tuotteiden toimitusprosesseja ja päästöjä, jotka liittyvät tuotteisiin ja niiden komponentteihin. Graafilla on kyky käsitellä prosessin ominaisuuksia ja allokoida niitä tuotteisiin, joita prosessissa käsitellään.

Graafi voidaan esittää solmuina ja kaarina, sekä niiden ominaisuuksina. Solmu kuvaa toimitusketjun prosessia ja kaari edustaa prosessien välistä tuotevirtaa. Prosessit voidaan ryhmitellä prosessityyppeihin, jolloin yksi prosessi on ilmentymä yhdestä prosessityypistä, joka määrittelee prosessin ominaisuudet. Graafin esittämän toimitusketjun ensimmäinen solmu kuvailee pisteen, jossa tarkasteltava olio luodaan, tai saapuu mallinnettavalle alueelle.

Sirkan ja Junkkarin jäljitettävyyssgraafissa (kuva 7.1) esiintyy kolmenlaisia nuolia, joilla kuvataan prosessissa käsiteltävien olioiden liikkeitä prosessien välillä. Olio voi liik-

kuu prosessien välillä muuttumattomana (tavallinen nuoli), useampi olio voi yhdistyä prosessissa (monikantainen nuoli), tai prosessin tuotoksena voi syntyä useampi olio kuin prosessiin saapui (kaksipäinen nuoli). Prosessin ominaisuudet tallennetaan relaatiotietokantaan, joka kytketään jäljitettävyyssgraafiin sen solmuihin liittyvillä relaatioilla.



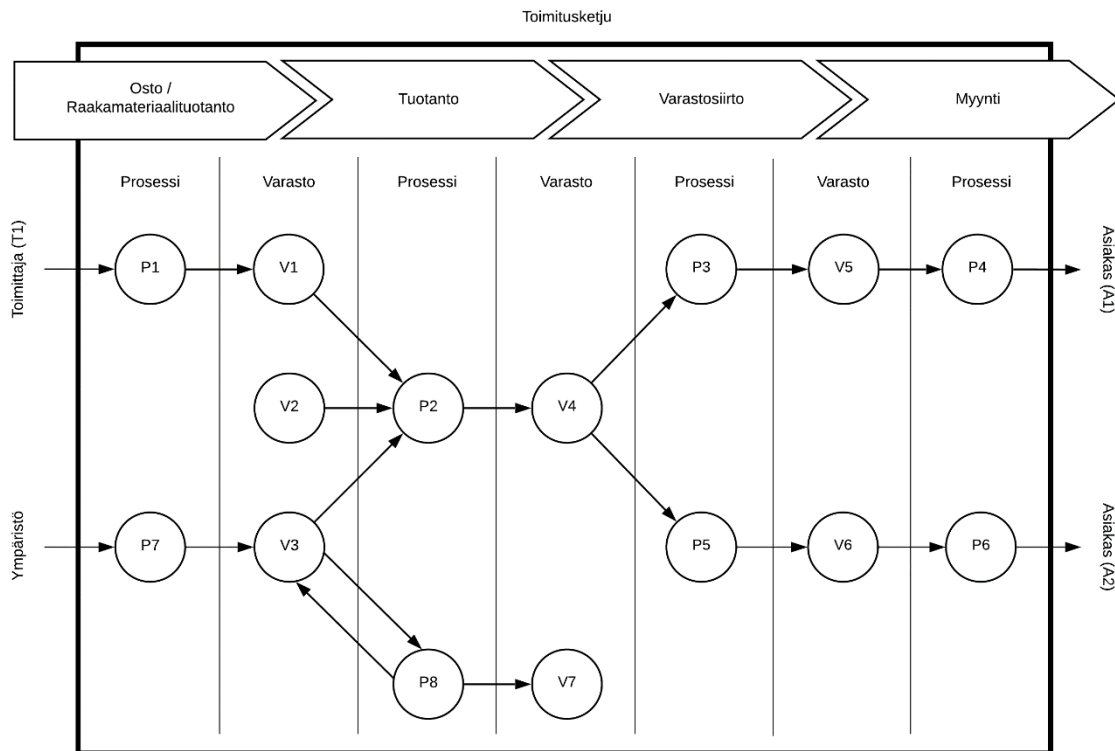
Kuva 7.1: Sirkan ja Junkkarin jäljitettävyyssgraafi

Edellä esitetyt Sirkan ja Junkkarin jäljitettävyyssgraafin ominaisuudet liittyvät graafin visuaaliseen esitykseen ja tapaan kytkeä graafi relaatiotietokantaan, jossa prosessien ympäristövaikutukset kuvaillaan. Samat ominaisuudet voidaan havainnoida myös tutkielman esittämästä ratkaisumallista ja mukailusta jäljitettävyyssgraafista.

Seuraavaksi tarkastellaan kuvan 7.2 esittämää mukailtua jäljitettävyyssgraafia, joka on istutettu tutkielman oletettaman ERP-toimitusketjurakenteen määrittelemään viitekehukseen, jatkaen kuvan 6.1 esitystapaa. Tutkielman tarkastelemat ERP-prosessikategoriat kehystävät kuvassa esiintyvät prosessityyppien ilmentymien esimerkit esimerkkien tulkitsemisen helpottamiseksi, mutta eivät ole olennainen osa graafia.

Prosessi-ilmentymät muodostuvat kohdassa 6.3 esiteltävien prosessityyppien perusteella. Prosessityypin perusteella prosessi kytketään alkeisvirtoihin. Tämä rakenne on sama kuin Sirkan ja Junkkarin mallissa. Selkeästi havaittava ero on varastopaikan eriyttäminen omaksi solmutyypikseen. Tällä korostetaan tarkkailtavan nimike-erän mahdollisuutta pysähtyä prosessien välillä, sekä saman nimikkeen esiintymisen mahdollisuutta eri sijainneissa.

Mukaillun jäljitettävyyssgraafin solmu kuvaa ratkaisun tietomallissa esitettyä logistista tilaa prosessin tai varastopaikan näkökulmasta tarkasteltuna. Kaaret vastaavat nimike-erien liikkeitä varastojen ja prosessien välillä. Nimike-erät paikallistetaan graafin kaaren edustamien logistisen tilan muutosten kirjauksiin perustuen. Varastosolmun ja prosessisolmun välinen kaari kuvailee siis yhden nimike-erän logistisen tilan muutoksen kirjauksen varastosta prosessiin tai prosessista varastoon.



Kuva 7.2: Mukailtu jäljitettävyyssgraafi ERP-toimitusketjun viitekehyksessä

Sirkan ja Junkkarin jäljitettävyyssgraafia vastaavasti oliota aletaan mallintaa, kun toimitusketjun ensimmäinen logistisen tilan kirjaus tapahtuu, eli toimitusketjun ensimmäisessä solmussa. Kuvassa 7.2 esitetään mallinnettavan järjestelmän rajat mustana suorakulmiona, jotta voidaan kuvallisesti havainnollistaa toimijoita mallinnuksen rajojen ulkopuolella.

Tietomallin kuvailussa luvussa 6 määriteltiin, että prosessi osallistuu aina logistisen tilan kirjaukseen. Tästä voidaan päätellä, että kuvan 7.2 jäljitettävyyssgraafi ei esitä varastossa V2 sijaitsevan nimikkeen koko toimitusketjua alusta saakka, koska kuvan tilanne olettaa nimikkeen olevan jo varastossa. Täydellinen jäljitettävyyssgraafin esitys ylittäisi jokaisen komponentin osalta mallinnettavan toimitusketjun alkuun.

ERP:n prosessi-ilmentymä, eli tilausrivi, pitää sisällään tiedon prosessin ilmentymissä käsiteltävistä nimikkeistä. Oletetaan, että kuvan 7.2 esittämän tuotantoprosessin P2

tapauksessa ERP:n prosessityyppi kuvaa prosessin, jossa jakkara kootaan istuimesta, jaloista ja ruuveista. Kaaret $V1 \rightarrow P2$, $V2 \rightarrow P2$ ja $V3 \rightarrow P2$ kuvaavat vastaavassa järjestyksessä istuimen liikettä varastosta V1, ruuvien liikettä varastosta V2 ja jalkojen liikettä varastosta V3 tuotantoprosessiin P2, jossa jakkara kootaan. Kaari $P2 \rightarrow V4$ kuvaa tässä tapauksessa valmiin jakkaranimikkeen kirjaamista vastaanottavaan varastopaikkaan. Sirkkan ja Junkkarin graafissa edellä esitettyä prosessia kuvattaisiin kahden prosessityypin välisellä monikantaisella nuolella, kuten kuvan 7.1 kaassa $F1 \rightarrow G1$.

Tuotantoprosessi P8 tuottaa kahta valmistuvaa nimikettä varastopaikkoihin V7 ja V3. Tämän Sirkka ja Junkkari esittäisivät kaksipäisenä nuolena (kuva 7.1, $C1 \rightarrow D1$), koska heidän esittämässään mallissa vastaanottavia varastopaikkoja ei kuvata erillisinä soluina. Jos tuotteita valmistuisi useampi samaan varastopaikkaan, mukaillussa jäljitettävyyso- graafissa (kuva 7.2) kaaria olisi oltava vastaavasti yhtä monta kuin valmistumisia kuvaavia logistisen tilan muutoksen kirjauksia, eli nimike-eriä.

Oletetaan kuvan 7.2 prosessien P3 ja P5 olevan varastojen välisiä siirtoja, jotka siirtävät samaa nimikettä varastosta V4 varastoihin V5 ja V6. Koska siirrot varastoihin V5 ja V6 edellyttävät erilaisia fyysisiä suoritteita, esimerkiksi toisen varaston sijaitessa Keski-Euroopassa ja toisen Aasiassa, prosessien P3 ja P5 tyypit tulee määrittellä eri tavoin. Lisäksi niihin tulee allokoida erilaiset alkeisvirtaluettelot, joiden perusteella prosessista poistuvan nimikkeen alkeisvirtasaldot lasketaan vastaanottavassa varastopaikassa. Laskennassa huomioidaan myös prosessiin saapuneiden nimikkeiden kerryttämät aiemmat alkeisvirtasaldot.

Samaa nimikettä käsittelevät myyntiprosessit P4 ja P6 tuottaisivat logistisen tilan muutoksessa prosessista asiakkaalle erilaiset alkeisvirtasaldojen kirjaukset perustuen myytävälle nimikkeelle kirjattuihin alkeisvirtasaldoihin varastopaikoissa V5 ja V6. Tähän perustuu ratkaisumallin kyky muodostaa markkina-aluekohtaista, asiakaskohtaista raportointia tuotenimikkeen alkeisvirroista ja niiden ympäristövaikutuksista.

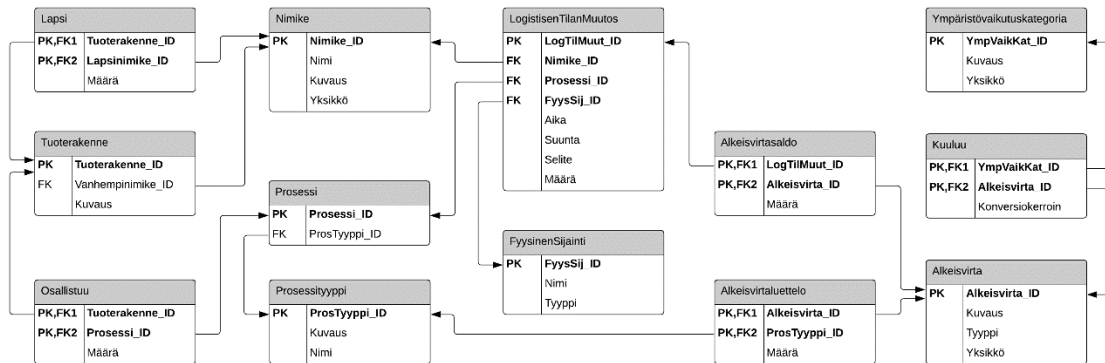
7.3 Tietokantakaavio ja esimerkkidatan muodostus

Kuva 7.3 esittää tietokantakaavion, joka kuvaa semanttisen tietomallin pohjalta luodun tietokannan rakenteen tauluina ja niiden välisinä relaatioina. Tässä kohdassa luodaan esimerkeissä käytettävä lähtödata perustuen kuvan 7.3 tietokantakaavioon. Esimerkkidatan avulla kuvailaan alkeisvirtojen allokointi kohdassa 7.4 ja suoritetaan esimerkki alkeisvirtasaldon ja ympäristövaikutusten laskennasta kohdassa 7.5.

Kohdan 7.5 esimerkin suoritus perustuu ERP-järjestelmässä tapahtuvan tilauksen suoritukseen. Suorituksessa ratkaisun esittämä tietomalli on kytketty ERP:ssä tilausta mallintavaan tilausotsikon ja -rivin muodostamaan rakenteeseen. Tämä kytkentä esitetään kuvassa 7.4.

Kuvan 7.3 tietokantakaavio on muodostettu kuvassa 6.6 esitettävän tietomallin pohjalta, seuraavaksi esitettävien sovitusten. Tietomallin entiteettien nimet on muutettu tilaa

säästävempään ja ohjelmallista käsittelyä helpottavaan CamelCase-kirjoitusasuun, eli niistä on poistettu välilyönnit ja sanojen alkukirjaimet on kirjoitettu isoilla kirjaimilla.



Kuva 7.3: Tietomallin pohjalta luotu tietokantakaavio

Esimerkkitapausten laskennassa käytetään taulukoissa 7.1-7.9 esitettävää esimerkkiaineistoa, jonka perusteella asetetaan esimerkkien kuvailun lähtötilanne. Esimerkkiaineiston muodostuksessa pyritään tuottamaan arvoja, jotka luonteeltaan muistuttavat huonekaluteollisuudessa esiintyvää jakkaran toimitusketjua, mutta eivät pyri todellista tilannetta vastaavaan tarkkuustasoon datan määrässä tai oikeellisuudessa. Aineiston tarkoitus on kuvailla esimerkki toimitusketjun etenemisestä, ympäristövaikutusten laskennasta ja esitettävän ratkaisumallin kytkennästä ERP-ympäristöön.

Taulukko 7.1 esittää jakkaratuotantoprosessissa valmistuvan nimikkeen ja sen komponenttinimikkeet.

Taulukko 7.1: Nimike

Nimike_ID	Nimi	Kuvaus	Yksikkö
N1000	Jakkara	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	kpl
N1001	Jakkaran istuin	Koivua. h. 3 cm d. 40 cm	kpl
N1002	Ruuvi	Sinkitty teräs 4,5 mm x 50 mm	kpl
N1003	Jakkaran jalka	Koivua h. 41 cm	kpl

Jakkaranimikkeen N1000 komponenttirakenne esitetään vanhempina ja lapsina, jossa tuotantoprosessissa valmistuva nimike on rakenteen vanhempi ja komponentit lapsia. Taulukon 7.2 esittämä esimerkkilaskennassa prosessiin kytkettävä tuoterakenne TR1 määrittelee nimikkeen N1000 olevan tuoterakenteen vanhempi. Taulukon 7.3 esittämä lapsi-relaatio määrittelee jakkaran N1000 tuoterakenteen TR1 koostuvan yhdestä istuimesta, 16 ruuvista ja neljästä jalasta. Fyysiset sijainnit, jotka esitetään taulukossa 7.4, kuvailevat fyysisiä sijainteja, jotka esimerkeissä suhtautuvat toisiinsa kuten jäljitettävyygraafin solmut kuvassa 7.2.

Taulukko 7.2: Tuoterakenne

Tuoterakenne_ID	VanhempiNimike_ID	Kuvaus
TR1	N1000	Tuotannon tuoterakenne: Koivujakkara

Taulukko 7.3: Lapsi

Tuoterakenne_ID	LapsiNimike_ID	Määrä
TR1	N1001	1
TR1	N1002	16
TR1	N1003	4

Taulukko 7.4: FyysinenSijainti

FyysSij_ID	Nimi	Tyyppi
V1	Valmiskomponenttivarasto – tehdas Helsinki FI	Varastopaikka
V2	Tarvikevarasto – tehdas Helsinki FI	Varastopaikka
V3	Puutavara- ja komponenttivarasto – tehdas Helsinki FI	Varastopaikka
V4	Valmistuotevarasto – tehdas Helsinki FI	Varastopaikka
V5	Logistiikkakeskus - Freiburg, DE	Varastopaikka
V6	Logistiikkakeskus - Tokio, JP	Varastopaikka
V7	Puutavara- ja komponenttivarasto – tehdas Helsinki FI	Varastopaikka
A1	Asiakkaan jakelukeskus – Freiburg, DE	Asiakkaan varasto
A2	Asiakkaan vähittäismyyntiliike - Tokio, JP	Asiakkaan varasto
T1	Komponenttitoimittajan varasto – Lahti, FI	Toimittajan varasto

Taulukossa 7.5 listataan esimerkeissä esiintyvät prosessityypit. Taulukon 7.6 tiedueet ovat esimerkkejä prosessityyppien ilmentymistä. Seurattavuuden helpottamiseksi Prosessi_ID:t on valittu kuvien 7.2 ja 7.5 solmujen nimiä vastaavasti. Lisäksi ProsTyyppi_ID sisältää sekä prosessikategorian, johon prosessin tyyppi kuuluu, että tarkasteltavan prosessin ilmentymän Prosessi_ID:n.

Taulukko 7.5: ProsessiTyyppi

ProsTyyppi_ID	Nimi	Kuvaus
TUOTANTO_P2	Jakkaran kokoonpano	4-jalkaisen jakkaran kokoonpano tehdas Helsinki FI, pintakäsittely-osasto.
MYYNTI_P4	Kuljetus asiakkaalle sijaintiin A1	Kuljetus Freiburgin logistiikkakeskuksesta (V5) asiakkaan jakelukeskukseen (A1) Freiburgissa.
MYYNTI_P6	Kuljetus asiakkaalle sijaintiin A2	Kuljetus Tokion logistiikkakeskuksesta (V5) asiakkaan vähittäismyyntiliikkeeseen (A2) Tokiossa.
OSTO_P1	Nouto toimittajan sijainnista T1	Nouto toimittajan varastosta Lahdesta (T1) Helsingin tehtaan valmiskomponenttivarastoon (V1).
SIIRTO_P3	Varastosiiro V4-V5	Siiro tehtaalta Helsinki FI (V4) Freiburgin logistiikkakeskukseen (V5).
SIIRTO_P5	Varastosiiro V4-V6	Siiro tehtaalta Helsinki FI (V4) Tokion logistiikkakeskukseen (V6)

Taulukko 7.6: Prosessi

Prosessi_ID	ProsTyyppi_ID
P1	OSTO_P1
P2	TUOTANTO_P2
P3	SIIRTO_P3
P4	MYYNТИ_P4
P5	SIIRTO_P5
P6	MYYNТИ_P6

Taulukossa 7.7 esitetään alkeisvirrat, jotka esiintyvät esimerkkiallokoinnissa ja alkeisvirtasaldon laskennan esimerkeissä. Alkeisvirtoihin liittyvät ympäristövaikutukset, sekä niiden kategorisointi esitetään taulukoissa 7.8 ja 7.9.

Esimerkkinä käytettyjen alkeisvirtojen määrä pyritään pitämään suppeana, jotta esimerkkilaskennan laajuus ei kasvaisi vaikeasti seurattavaksi. Valituilla alkeisvirroilla voidaan kuitenkin esittää alkeisvirtasaldon allokointi, kertymä ja useamman alkeisvirran luonnehdinta samalla ympäristövaikutuskategoriolla.

Taulukko 7.7: Alkeisvirta

Alkeisvirta_ID	Kuvaus	Tyyppi	Yksikkö
AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO ₂)	Päästöt ilmakehään	kg
AV2	Metaanipäästöt (CH ₄)	Päästöt ilmakehään	kg
AV3	Sähköenergian kulutus	Alkuperä varmistamaton	kWh
AV4	Puutavara, koivu	Raakamateriaali	m ³

Taulukko 7.8: Ympäristövaikutuskategoria

YmpVaikKat_ID	Kuvaus	Yksikkö
GWP100	Ilmaston lämpenemispotentiaali 100 v. tarkasteluvälillä. Endpoint: Globaali	kg of CO ₂ equivalent
MAA1	Maapinta-alan käyttö puutavaran kasvattamiseen. Endpoint: Keski-Suomi	m ²
CEDFI1	Kumulatiivinen energiankulutus. Endpoint: Helsinki, Suomi	kWh

Taulukko 7.9: Kuuluu-relaatio (Alkeisvirta kuuluu ympäristövaikutuskategoriaan)

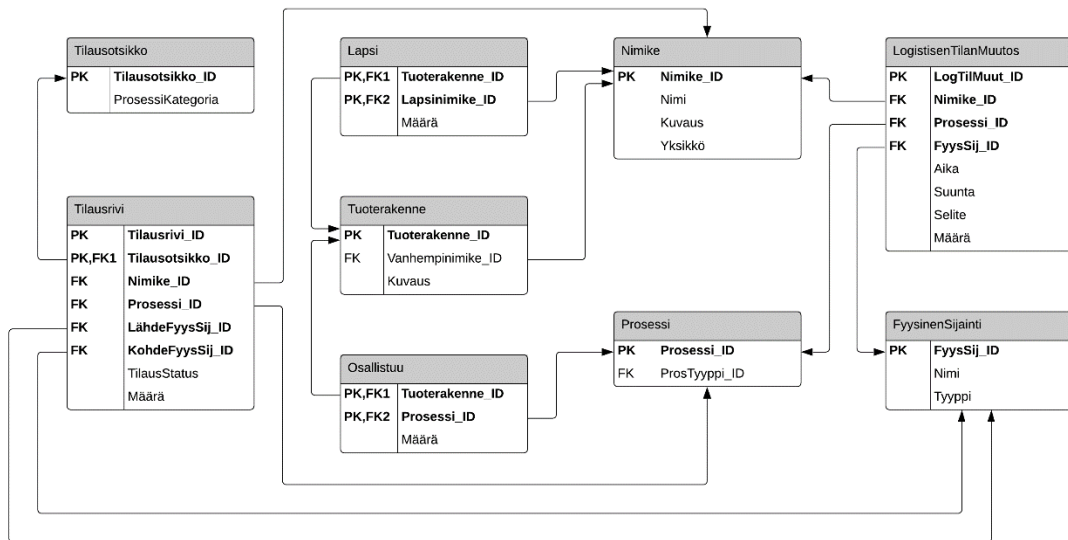
YmpVaikKat_ID	Alkeisvirta_ID	Konversiokerroin
GWP100	AV1	1
GWP100	AV2	25
GWP100	AV3	0,264
MAA1	AV4	0,0007
CEDFI1	AV3	1

Taulukoiden 7.1-7.9 lisäksi ERP-kytkennän havainnollistamiseksi on esitettävä tilausotsikosta ja tilausrivistä koostuva rakenne. Kuvassa 7.4 esitettävä tilausotsikkotietue määrittelee ERP-prosessin kategorian, ja tilausrivi vastaa nimike-erää käsittelevää prosessia. Tilausrivin statuksen perusteella voidaan havainnoida prosessin suorituksen etenemistä ja suorittaa prosessiin liittyvien logististen tilojen muutosten kirjaukset.

Tilauusrivi määrittelee prosessin kohde- ja tarvittaessa lähdesijainnit, joiden perusteella voidaan päätellä logistisen tilan muutokseen liittyvä fyysinen sijainti, kun tehdään kirjaus prosessiin (LähdeFyysSij_ID) ja prosessista varastoon (KohdeFyysSij_ID). Sekä lähde- että kohdesijaintia tarvitaan myynnin, oston ja varastosiirron tapauksessa.

LähdeFyysSij_ID voi esimerkeissä olla myös NULL-arvoinen, kun tilaus on tuotantotilauksena, jonka valmistuvalla nimikkeellä on komponenteista koostuva tuoterakenne. Tuoterakenteen avulla päätellään esimerkkinä käytetyssä jakkaran kokoamista kuvaavassa tuotantoprosessissa valmistuvaan nimikkeeseen kuuluvat komponentit.

Lähdesijainnin valintaa ei käsitellä esimerkkilaskennassa tuoterakenteen osallistuessa prosessiin. Lähdesijainnin valinnan oletetaan olevan jo ERP-järjestelmissä ratkaistu ongelma. Lähdesijainnin määrittely tyypillisesti esiintyy ERP-järjestelmätoteutuksissa tilausrivin rakenneriveissä tai nimikkeen oletuslähdesijaintina.

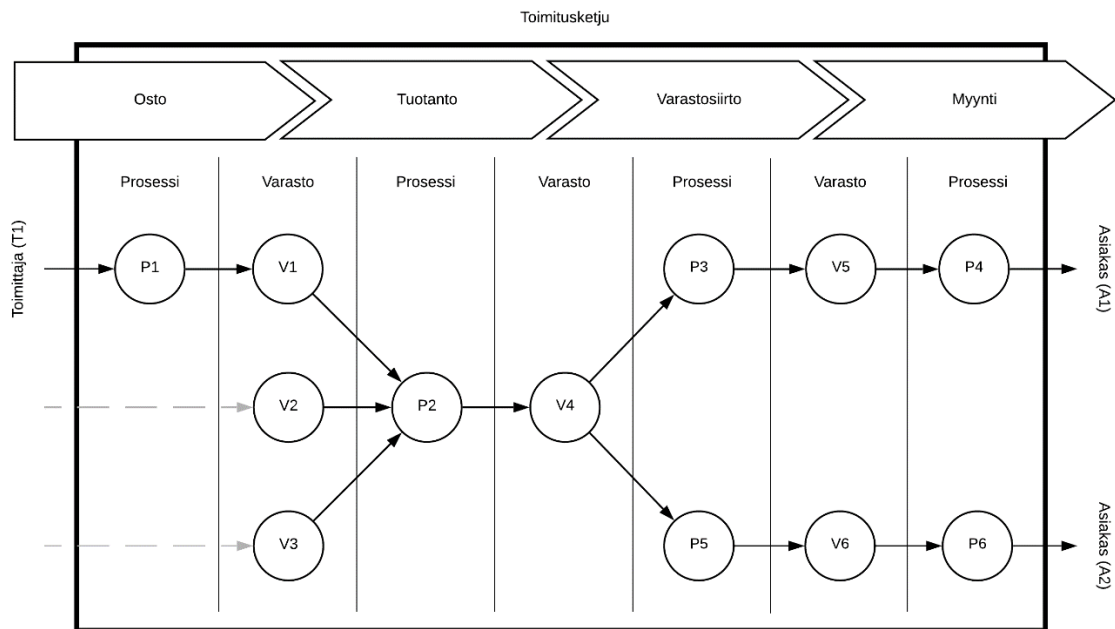


Kuva 7.4: Tilaustrukenteen kytkentä tietomalliin

Tässä kohdassa esitetty esimerkkiaineisto kuvaa lähtötilanteen, jossa alkeisvirtoja ei vielä ole allokoitu prosesseihin, eikä alkeisvirtasaldoja ole syntynyt. Seuraavassa kohdassa esitetään allokointi, jonka perusteella luodaan tarkasteltavien prosessien alkeisvirtaluettelot ja tehdään alkeisvirtasaldokirjaukset. Alkeisvirtaluettelon, alkeisvirtasaldon ja logistisen tilan muutoksen kirjauksen esimerkkiaineistot esitetään allokointien ja tehtävien kirjausten yhteydessä.

7.4 Alkeisvirtojen allokointi

Esimerkkilaskennassa tarkastellaan kuvan 7.5 prosesseja P1-P6. Näille prosesseille suoritetaan kuvan tilannetta vastaava lähtöalkeisvirtojen allokointi.



Kuva 7.5: Esimerkkiprosessit jäljitettävyyssgraafissa

Taulukko 7.10 kuvailee tarkastelun alaiset prosessit sanallisesti. Nämä prosessit valittiin tarkasteluun, koska niiden avulla voidaan havainnollistaa kaikki tutkielman ratkaisumallin rajauksen piiriin kuuluvat ERP-prosessikategoriat. Mallinnettavan järjestelmän rajojen ylitys käsitellään sekä oston (P1) että myynnin (P4 ja P6) prosesseissa.

Varastosiirot P3 ja P5 mahdollistavat erilaisten alkeisvirtojen allokoinnin samaa nimikettä käsitteleville, samankaltaisille suoritteille. Saman nimikkeen myynti tapauksissa P4 ja P6 mahdollistaa nimikkeelle kertyneiden alkeisvirtasaldojen tarkastelun toimitusketjun eri päätepisteissä.

Tuotantoprosessi P2 esittää alkeisvirtojen laskennan tapauksessa, jossa prosessin syötteenä on useampi nimike useammasta varastopaikasta. Tarkasteltavat esimerkit kattavat mallin esitystarpeet, koska niiden perusteella voidaan johtaa muut tarvittavat mallinnustilanteet. Tästä syystä varastosijainneissa V2 ja V3 olevien nimikkeiden toimitusketjujen alkua ei esitetä, vaan nimikkeille suoritetaan alkusaldojen asettaminen ilman niihin liittyvien prosessien suorituksen tarkastelua.

Taulukko 7.10: Esimerkkiprosessit

Prosessi	Prosessin kuvaus	Syötenimikkeet	Tuotosnimikkeet
P1	Ostoprosessi $T1 \rightarrow V1$ (Jakkaran istuimen osto)		Istuin N1001
P2	Tuotantoprosessi $V1 \rightarrow V4, V2 \rightarrow V4, V3 \rightarrow V4$ (Jakkaran kokoaminen)	Istuin N1001 Ruuvi N1002 Jalka N1003	Jakkara N1000
P3	Varastosiirtoprosessi $V4 \rightarrow V5$ (Helsinki FI - Freiburg DE)	Jakkara N1000	Jakkara N1000
P4	Myyntiprosessi $V5 \rightarrow A1$	Jakkara N1000	Jakkara N1000
P5	Varastosiirtoprosessi $V4 \rightarrow V6$ (Helsinki FI - Tokio JP)	Jakkara N1000	Jakkara N1000
P6	Myyntiprosessi $V6 \rightarrow A2$	Jakkara N1000	Jakkara N1000

Esimerkkitapauksissa jätetään käsittelemättä myöskin prosessien hyvitykset ja palautukset, koska niitäkin mallintavat prosessit ovat johdettavissa. Palautuksen tarkoitus on palauttaa nimike edelliseen vaiheeseen, eli tehdä sille käänteinen suorite. Määritellään palautukset käänteisinä prosesseina seuraavasti:

1. Myynti – Myynnin palautus
2. Osto – Oston palautus
3. Siirto varastojen välillä – Siirron palautus
4. Tuotanto – Tuotannon palautus

Jos myynti (1), osto (2) ja siirto varastojen välillä (3) ovat prosesseja, joihin liittyy tuotenimikkeen logistiikkaan liittyviä ympäristövaikutuksia, niin tuotenimikkeen palautukset synnyttävät lähtökohtaisesti samat logistiikkaan liittyvät ympäristövaikutukset. Ainoastaan tuotenimikkeen lähettävä ja vastaanottava sijainti vaihtuvat.

Tapauksessa, jossa tuotannon (4) palautus olisi käänteinen prosessi, esimerkiksi purkaminen, sen voisi mallintaa tuotannon prosessina. Jos tuotannon prosessin tarkoitus on palauttaa valmistunut nimike toimitusketjussa aiemmin esiintyneeseen sijaintiin, voidaan käyttää varastosiirtoa.

Hyvityssuorituksen tarkoitus on mitätöidä tehty suorite kirjausvirheen takia. Silloin suorite käsitellään samoin tavoin kuin alkuperäinen prosessi, mutta negatiivisin yksikköarvoin.

Seuraavaksi suoritetaan alkeisvirtojen allokointi prosessityyppeihin, eli muodostetaan niille alkeisvirtaluettelot. Alkeisvirtaluettelot esitetään taulukossa 7.11, jossa tummalla värillä otsikoidut sarakkeet eivät kuulu tauluun, vaan ovat vierasattribuutteja taulusta Alkeisvirta.

Prosessityypissä OSTO_P1 asetetaan prosessin alkeisvirtaluetteloon ostettavan komponentin noutoon liittyvät päästöt, sekä toimittajan toimittama alkeisvirtaluettelo ostettavan nimikkeen N1001 (istuin) toimitusketjun aiemmista vaiheista. Prosessityyppiin TUOTANTO_P2 allokoidaan sähköenergian kulutusta ja hiilidioksidipäästöjä, jotka liittyvät kokoamissuoritteeseen. SIIRTO_P3 ja SIIRTO_P5 kuvaavat päästöjä, jotka aiheutuvat saman nimikkeen yhden yksikön siirrosta eri etäisyyksien yli. MYYNTI_P4 ja MYYNTI_P6 kuvaavat toimitusketjun kahta eri päätä, jossa nimike ylittää mallinnettavan järjestelmän rajat.

Taulukko 7.11: Allokoidut alkeisvirtaluettelot

Alkeisvirta_ID	Kuvaus	ProsTyyppe_ID	Määrä	Yksikkö
AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	OSTO_P1	0,01	kg
AV2	Metaanipäästöt (CH4)	OSTO_P1	0,001	kg
AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	TUOTANTO_P2	0,02	kg
AV3	Sähköenergian kulutus	TUOTANTO_P2	0,003	kWh
AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	SIIRTO_P3	2	kg
AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	SIIRTO_P5	4	kg
AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	MYYNTI_P4	0,02	kg
AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	MYYNTI_P6	0,1	kg

Esimerkissä oletetaan, että varastoissa V2 ja V3 on jo nimikkeitä, joita tarvitaan prosessissa P2. Nämä nimikkeet ovat N1002 (ruuvi) varastossa V2 ja N1003 (jalka) varastossa V3. Näillä nimikkeillä on esimerkkilaskennan alkaessa jo logistisen tilan muutoksen kirjauksia ja alkeisvirtasaldoja. Taulukossa 7.12 asetetaan logistisen tilan muutoksen alkutilanne varastoissa V2 ja V3.

Taulukko 7.12: Logistisen tilan muutos, lähtötilanne varastoissa V2 ja V3

LogTil-Muut_ID	Prosessi_ID	Nimike_ID	Fyys-Sij_ID	Aika	Suunta	Selite	Määrä
0	X1	N1002	T2	2020-1-1 12:00	Prosessiin	Ruuvitäydennys	1500
1	X1	N1002	V2	2020-1-2 9:00	Varastoon	Ruuvitäydennys	1500
2	X2	N1003	T3	2020-1-7 15:00	Prosessiin	Jalkatäydennys	200
3	X2	N1003	V3	2020-1-10 11:00	Varastoon	Jalkatäydennys	200

Alkeisvirtasaldojen alkutilanne asetetaan taulukossa 7.13, jossa tummilla otsikoilla varustetut sarakkeet ovat vierasattribuutteja. Alkeisvirtaluetteloita ei esitetä lähtötilanteessa varastossa oleville nimikkeille.

Taulukko 7.13: Alkeisvirtasaldo, lähtötilanne

LogTilMuut_ID	Suunta	Alkeisvirta_ID	Kuvaus	Määrä	Yksikkö
0	Prosessiin	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	30	kg
0	Prosessiin	AV3	Sähköenergian kulutus	4,5	kWh
1	Varastoon	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	30	kg
1	Varastoon	AV3	Sähköenergian kulutus	4,5	kWh
2	Prosessiin	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	10	kg
2	Prosessiin	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	20	kg
2	Prosessiin	AV3	Sähköenergian kulutus	1	kWh
2	Prosessiin	AV4	Puutavara, koivu	0,2	m3
3	Varastoon	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	10	kg
3	Varastoon	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	20	kg
3	Varastoon	AV3	Sähköenergian kulutus	1	kWh
3	Varastoon	AV4	Puutavara, koivu	0,2	m3

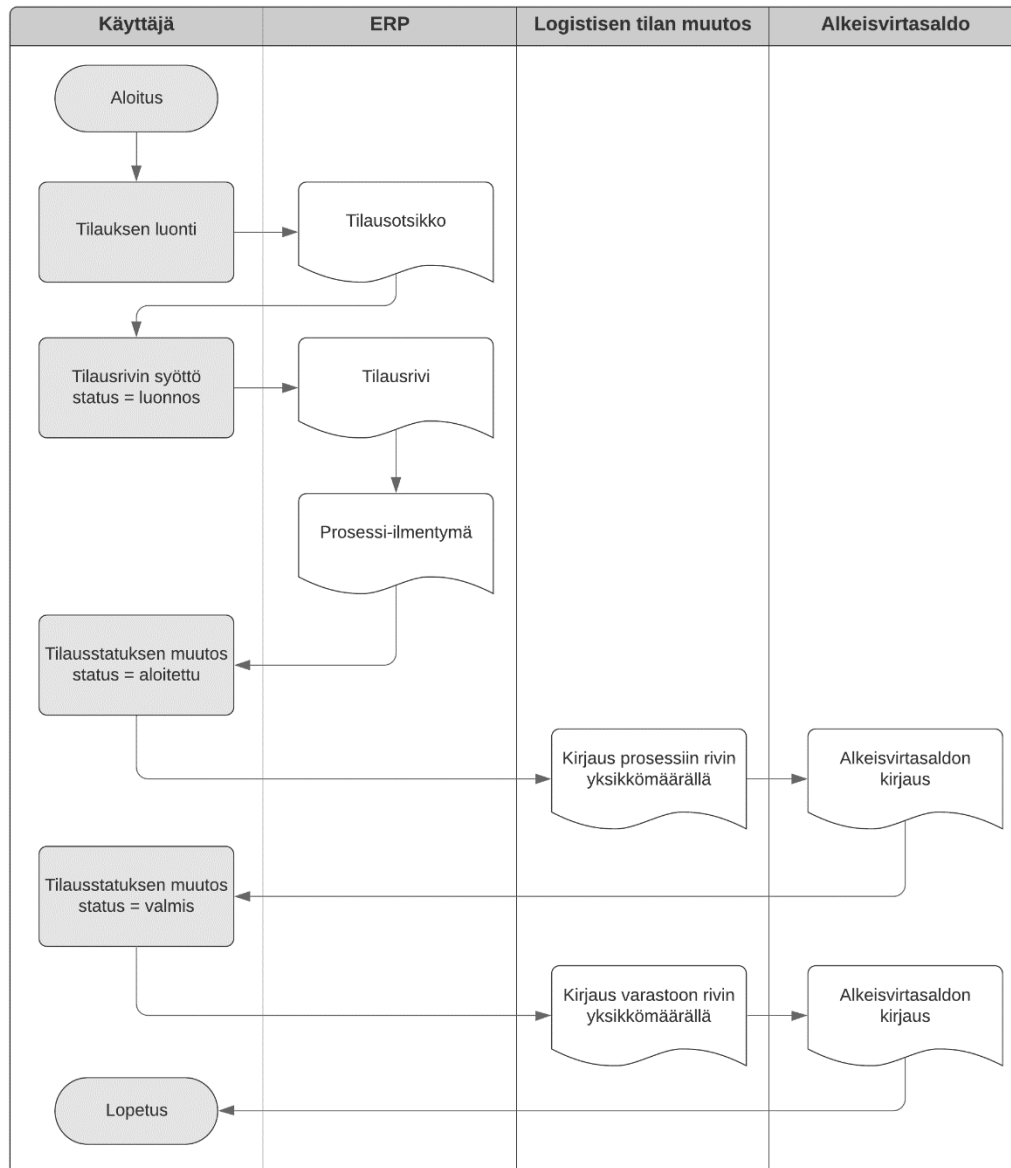
7.5 Alkeisvirtojen laskenta ja ympäristövaikutusten luonnehdinta

Tässä kohdassa esitetään ratkaisumallin sovellus ja sen suhde ERP:ssä käytettävän tilauksen etenemiseen. Tarkastelun alaisena on kaksi toimitusketjua, joissa esimerkkinä käytettävä sama jakkaranimike poistuu mallinnettavasta järjestelmästä kahdessa eri toimitusketjun loppupäässä.

Toimitusketjun eteneminen kuvaillaan käyttämällä eri prosessikategorioihin kuuluvia tilauksia. Tilausten edetessä suoritetaan kuhunkin prosessiin liittyvät logistisen tilan muutoksen kirjaukset, sekä niiden perusteella tehtävät alkeisvirtakirjaukset. Lopuksi lasketaan alkeisvirtasaldot nimikkeen toimitusketjun eri päissä ja suoritetaan ympäristövaikutusten luonnehdinta.

Esimerkkilaskennan Transact-SQL -lauseina kuvailtu osuus suoritetaan Microsoftin SQL Express-tietokannassa, käyttäen taulukoissa esitettyä esimerkkitietoa. Kyselyt ajetaan Microsoftin SQL Server Management Studio sovelluksen versiossa 18.4.

ERP-järjestelmissä prosessia mallintavaan tilaukseen liittyy tapa seurata suorituksen etenemistä. Esimerkeissä etenemistä kuvaillaan seuraavin tilausstatuksin: luonnos, aloitettu ja valmis. Kuva 7.6 esittää tilauksen käsittelyn etenemisen vuokaaviona, sekä tehtävien kirjausten suhteen tilausstatuksen muutokseen.



Kuva 7.6: Vuokaavio tilauksen etenemisestä

Kaikkia prosessikategorioita kuvailevat tilaustyypit etenevät pääpiirteissään kuvan 7.6 vuokaavion mukaisesti. Tilauksen luonnos on suunnitelma suoritteesta, ja tilauksen tilauksen korottaminen aloitetuksi kertoo suoritteiden alkamisesta. Silloin nimikkeen logistinen tila siirtyy prosessin alaiseksi. Tilauksen tilauksen muutos valmiiksi kertoo suorituksen päättyneen, jolloin prosessin tuotokset voidaan kirjata varastoon. Esimerkeissä käytettävät logistisen tilan muutoksen suunnat ovat ”Prosessiin” ja ”Varastoon”, jossa asiakkaiden ja toimittajien sijainnit tulkitaan varastosijainneiksi.

Alkeisvirtasaldon kirjaukset suoritetaan välittömästi logistisen tilan muutoksen kirjausten jälkeen. Prosessin suuntaan kirjattavat alkeisvirtasaldot perustuvat lähdessijainnista prosessiin kirjattavien nimikkeiden alkeisvirtasaldoihin tai toimittajan manifestiin.

Varaston suuntaan kirjattavat alkeisvirtasaldot perustuvat prosessissa oleviin alkeisvirtasaldoihin, sekä prosessi-ilmentymän prosessityyppiin liittyvään alkeisvirtaluetteloon.

Tarkasteltavat esimerkkitapaukset toimitusketjuista ovat kuvassa 7.5 ja taulukossa 7.10 esitettyjen prosessien seuraavat sarjat:

Toimitusketju 1: $P1 \rightarrow P2 \rightarrow P3 \rightarrow P4$

Toimitusketju 2: $P1 \rightarrow P2 \rightarrow P5 \rightarrow P6$

Nämä kaksi toimitusketjua käyvät samojen prosessien läpi ja kerryttävät lopuksi järjestelmästä poistuvalla jakkaranimikkeelle samat alkeisvirtasaldot varastoon V4 asti.

Taulukko 7.14: Ostoprosessi P1

Prosessi P1: Ostoprosessi	
Aika	Tapahtuma
0	Luodaan ostotilausotsikko. ProsessiKategoria: Osto
1	Luodaan ostotilausrivi. Nimike_ID: N1001 LähdeFyysSij_ID: T1 KohdeFyysSij_ID: V1 TilausStatus: Luonnos Määrä: 50 kpl
2	Luodaan prosessi-ilmentymä P1 prosessityypillä OSTO_P1.
3	Kytetään P1 tilausriviin. Prosessi_ID: P1
4	Toimittaja vahvistaa tilauksen. Aloitetaan tilaus. TilausStatus: aloitettu
5	Luodaan kirjaus logistisen tilan muutoksesta. FyysSij_ID: T1 Määrä: 50 kpl Suunta: Prosessiin
6	Luodaan kirjaus alkeisvirtasaldosta prosessiin toimittajan manifestin (taulukko 7.16) mukaisesti. Toimittajan manifesti sisältää lähetettävän nimike-erän kaikki alkeisvirrat yhteensä.
7	Tilattu tuote on noudettu varastoon, lopetetaan tilaus TilausStatus: Valmis
8	Luodaan kirjaus logistisen tilan muutoksesta Määrä: 50 kpl Suunta: Varastoon
9	Luodaan kirjaus alkeisvirtasaldosta prosessiin kirjattujen alkeisvirtojen perusteella, sekä prosessityypin OSTO_P1 alkeisvirtaluettelon (taulukko 7.17) perusteella. Luettelon yksikkökohtaiset alkeisvirrat kerrotaan yksikkömäärällä 50 (kpl) varastoon kirjattavan nimikkeen määrän mukaan.

Edellä mainitusta syystä tarkastellaan ensin logistisen tilan muutoksia prosessin P2 loppuun, varastoon V4, käyttäen taulukoissa 7.1-7.9 sekä 7.11-7.13 esitettyjä lähtöarvoja. Muilta osin oletetaan, että logistisen tilan muutuskirjauksia tai alkeisvirtasaldokirjauksia ei ole vielä tehty.

Prosessi P1 on ostoprosessi, jossa ostetaan nimikettä N1001 (istuin) toimittajalta T1. Sen suoritus kuvaillaan taulukossa 7.14. Prosessin P1 suorituksen perusteella tehdään kirjaukset taulukoiden 7.15 – 7.18 mukaisesti.

Taulukko 7.15: Ostoprosessin P1 logistisen tilan muutuskirjaukset

LogTil-Muut_ID	Prosessi_ID	Nimike_ID	FyysSij_ID	Aika	Suunta	Selite	Määrä
4	P1	N1001	T1	2020-1-10 11:30	Prosessiin	Istuintäydennys	50
5	P1	N1001	V1	2020-1-11 15:00	Varastoon	Istuintäydennys	50

Taulukko 7.16: Ostoprosessiin P1 sovellettava toimittajan manifesti

Alkeisvirta_ID	Kuvaus	Määrä	Yksikkö
AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	2,00	kg
AV3	Sähköenergian kulutus	5,00	kWh
AV4	Puutavara, koivu	0,25	m3

Taulukko 7.17: Ostoprosessiin P1 sovellettava alkeisvirtaluettelo

Alkeisvirta_ID	Kuvaus	ProsTyyppi_ID	Määrä	Yksikkö
AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	OSTO_P1	0,01	kg
AV2	Metaanipäästöt (CH4)	OSTO_P1	0,001	kg

Taulukko 7.18: Logistisen tilan muutoksen perusteella tehdyt alkeisvirtasaldokirjaukset

LogTilMuut_ID	Suunta	Alkeisvirta_ID	Kuvaus	Määrä	Yksikkö
4	Prosessiin	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	2,00	kg
4	Prosessiin	AV3	Sähköenergian kulutus	5,00	kWh
4	Prosessiin	AV4	Puutavara, koivu	0,25	m3
5	Varastoon	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	2,5	kg
5	Varastoon	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	0,05	kg
5	Varastoon	AV3	Sähköenergian kulutus	5	kWh
5	Varastoon	AV4	Puutavara, koivu	0,25	m3

Taulukossa 7.18 Alkeisvirran AV1 kirjaus prosessin alkeisvirtasaldoon on muodostettu täysin toimittajan manifestin perusteella. Saman alkeisvirran kirjaus varastoon noudattaa kaavaa:

$$\begin{aligned} & AV1:n määrän summa prosessissa P1 + \\ & (AV1:n määrä/yksikkö prosessin P1 alkeisvirtaluettelossa * \\ & Nimikkeen logistisen tilan muutoksen yksikkömäärä) = Kirjattava määrä \\ & \rightarrow 2,00 \text{ kg} + (0,01 \text{ kg} * 50) = 2,5 \text{ kg} \end{aligned}$$

Muiden alkeisvirtojen kirjausten muodostus noudattaa samaa logiikkaa.

Taulukossa 7.19 esitetään tuotantoprosessin P2 suoritus. Tuotantoprosessissa kootaan jakkara kolmesta eri varastopaikasta saatavista komponenteista. Esimerkkilaskennassa ei käsitellä komponenttien lähdevarastopaikan valintaa, mutta komponenttien lähdevarastopaikat valitaan seuraavasti: N1001 – V1, N1002 – V2, N1003 – V3.

Varastoon kirjataan alkeisvirtasaldoa valmistuvalle nimikkeelle N1000. Sovellettava alkeisvirtaluettelo sisältää tuotannon tapauksessa tuotannon prosessiin liittyvät alkeisvirrat ja sitä sovelletaan suorituksen päätyttyä.

Taulukko 7.19: Tuotantoprosessi P2

Prosessi P2: Tuotantoprosessi	
Aika	Tapahtuma
0	Luodaan tuotantotilausotsikko. ProsessiKategoria: Tuotanto
1	Luodaan tuotantotilausrivi. Nimike_ID: N1000 LähdeFyysSij_ID: NULL KohdeFyysSij_ID: V4 TilausStatus: Luonnos Määrä: 40 kpl
2	Luodaan prosessi-ilmentymä P2 prosessityypillä TUOTANTO_P2. Kytetään prosessiin tuoterakenne TR1 (taulukko 7.22).
3	Kytetään P2 tilausriviin. Prosessi_ID: P2
4	Siirretään komponentit kokoamislinjastolle. Aloitetaan tilaus. TilausStatus: aloitettu
5	Luodaan kirjaukset logistisen tilan muutoksesta perustuen tuotannon tuoterakenteeseen (taulukot 7.2 ja 7.3) ja valmistettavan nimike-erän yksikkömäärään (taulukko 7.22). FyysSij_ID: V1 Nimike_ID: N1001 Määrä: 40 kpl Suunta: Prosessiin FyysSij_ID: V2 Nimike_ID: N1002 Määrä: 640 kpl Suunta: Prosessiin FyysSij_ID: V3 Nimike_ID: N1003 Määrä: 160 kpl Suunta: Prosessiin
6	Luodaan kirjaus alkeisvirtasaldosta prosessiin komponenttien N1001, N1002 ja N1003 alkeisvirtasaldojen perusteella.
7	Tuotteet on koottu ja valmistunut nimike-erä vastaanotetaan varastoon. Lopetetaan tilaus. TilausStatus: Valmis
8	Luodaan kirjaus logistisen tilan muutoksesta. FyysSij_ID: V4 Nimike_ID: N1000 Määrä: 40 kpl Suunta: Varastoon
9	Luodaan kirjaus alkeisvirtasaldosta prosessityypin TUOTANTO_P2 alkeisvirtaluettelon perusteella, sekä prosessiin kirjattujen komponenttien alkeisvirtasaldojen perusteella. Luettelon yksikkökohtaiset alkeisvirrat kerrotaan yksikkömäärällä 40 (kpl) varastoon kirjattavan nimikkeen määrän mukaan.

Taulukko 7.20: Tuotantoprosessin P2 logistisen tilan muutoskirjaukset

LogTil-Muut_ID	Prosessi_ID	Nimike_ID	FyysSij_ID	Aika	Suunta	Selite	Määrä
6	P2	N1001	V1	2020-1-12 8:30	Prosessiin	Jakkaran kokoaminen	40,00
7	P2	N1002	V2	2020-1-12 8:30	Prosessiin	Jakkaran kokoaminen	640,00
8	P2	N1003	V3	2020-1-12 8:30	Prosessiin	Jakkaran kokoaminen	160,00
9	P2	N1000	V4	2020-1-12 9:30	Varastoon	Jakkaran valmistuminen	40,00

Taulukko 7.21: Tuotantoprosessiin P2 sovellettava alkeisvirtaluettelo

Alkeisvirta_ID	Kuvaus	ProsTyyppi_ID	Määrä	Yksikkö
AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	TUOTANTO_P2	0,02	kg
AV3	Sähköenergian kulutus	TUOTANTO_P2	0,003	kWh

Taulukko 7.22: Osallistuu (Tuoterakenne osallistuu prosessiin)

Tuoterakenne_ID	Prosessi_ID	Määrä
TR1	P2	40

Taulukko 7.23: Logistisen tilan muutoksen perusteella tehdyt alkeisvirtasaldokirjaukset

LogTilMuut_ID	Suunta	Alkeisvirta_ID	Kuvaus	Määrä	Yksikkö
6	Prosessiin	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	2,00	kg
6	Prosessiin	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	0,04	kg
6	Prosessiin	AV3	Sähköenergian kulutus	4,00	kWh
6	Prosessiin	AV4	Puutavara, koivu	0,20	m3
7	Prosessiin	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	12,80	kg
7	Prosessiin	AV3	Sähköenergian kulutus	1,92	kWh
8	Prosessiin	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	8,00	kg
8	Prosessiin	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	16,00	kg
8	Prosessiin	AV3	Sähköenergian kulutus	0,80	kWh
8	Prosessiin	AV4	Puutavara, koivu	0,16	m3
9	Varastoon	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	23,60	kg
9	Varastoon	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	16,04	kg
9	Varastoon	AV3	Sähköenergian kulutus	6,84	kWh
9	Varastoon	AV4	Puutavara, koivu	0,36	m3

Seuraavaksi esitetään esimerkki prosessiin kirjattavan alkeisvirtasaldon laskennasta nimike- ja varastopaikkakohtaisten alkeisvirtasaldojen perusteella. Tarkastellaan alkeisvirtaa AV1, jolle suoritetaan prosessiin kirjattavan alkeisvirtasaldon laskenta, kun nimike on N1001 ja lähettävä varastopaikka V1. Tämän esimerkkilaskennan perusteella suoritetaan taulukon 7.23 kirjaus, jossa LogTilMuut_ID = 6 ja Alkeisvirta_ID = AV1.

Soveltamalla vastaavaa laskentatapaa kaikille prosessiin kirjattaville nimikkeille ja niiden varastopaikkakohtaisille alkeisvirtasaldoille, saadaan muodostettua kaikki taulukon 7.23 kirjaukset, joissa Suunta = ”Prosessiin”.

1. Lasketaan nimikekohtainen varastosaldo lähettävässä varastopaikassa. Laskenta esitetään sarjana Transact-SQL-lauseita, jotka kohdistuvat tauluun LogistisenTilanMuutos ja laskentaa havainnollistaviin muuttujiin.

```
-- Alustetaan muuttujat
declare
    @N1001_kirjaukset_varastoon_V1 decimal(18,10)
    ,@N1001_kirjaukset_varastosta_V1 decimal(18,10)
    ,@N1001_varastosaldo decimal(18,10)

SELECT @N1001_kirjaukset_varastoon_V1 =
ISNULL(SUM(LogistisenTilanMuutos.Määrä),0)
FROM LogistisenTilanMuutos
WHERE
    LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID = 'N1001' AND
    LogistisenTilanMuutos.Suunta = 'Varastoon' AND
    LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID = 'V1' AND
    LogistisenTilanMuutos.LogTilMuut_ID <= 5

SELECT @N1001_kirjaukset_varastosta_V1 =
ISNULL(SUM(LogistisenTilanMuutos.Määrä),0)
FROM LogistisenTilanMuutos
WHERE
    LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID = 'N1001' AND
    LogistisenTilanMuutos.Suunta = 'Prosessiin' AND
    LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID = 'V1' AND
    LogistisenTilanMuutos.LogTilMuut_ID <= 5

SELECT @N1001_varastosaldo =
    @N1001_kirjaukset_varastoon_V1 - @N1001_kirjaukset_varastosta_V1

-- @N1001_varastosaldo = 50 - 0 = 50 (kpl)
```

2. Lasketaan nimike- ja alkeisvirtakohtainen alkeisvirtasaldo lähettävässä varastopaikassa. Suoritetaan laskenta sarjana Transact-SQL -kyselyjä tauluun, joka on Alkeisvirtasaldo-taulun ja LogistisenTilanMuutos -taulun liitos:

```
declare
    @N1001_AV1_kirjaukset_varastoon_V1 decimal(18,10)
    ,@N1001_AV1_kirjaukset_varastosta_V1 decimal(18,10)
    ,@N1001_AV1_saldo_V1 decimal(18,10)

SELECT @N1001_AV1_kirjaukset_varastoon_V1 =
ISNULL(SUM(Alkeisvirtasaldo.Määrä),0)
FROM LogistisenTilanMuutos
JOIN Alkeisvirtasaldo ON
    LogistisenTilanMuutos.LogTilMuut_ID = Alkeisvirtasaldo.LogTilMuut_ID
WHERE
    LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID = 'N1001' AND
    LogistisenTilanMuutos.Suunta = 'Varastoon' AND
    LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID = 'V1' AND
    Alkeisvirtasaldo.Alkeisvirta_ID = 'AV1' AND
    LogistisenTilanMuutos.LogTilMuut_ID <= 5
```

```
SELECT @N1001_AV1_kirjaukset_varastosta_V1 = ISNULL(SUM(Alkeisvirtasaldo.Määrä),0)
FROM LogistisenTilanMuutos
JOIN Alkeisvirtasaldo ON
(LogistisenTilanMuutos.LogTilMuut_ID = Alkeisvirtasaldo.LogTilMuut_ID)
WHERE
LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID = 'N1001' AND
LogistisenTilanMuutos.Suunta = 'Prosessiin' AND
LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID = 'V1' AND
Alkeisvirtasaldo.Alkeisvirta_ID = 'AV1' AND
LogistisenTilanMuutos.LogTilMuut_ID <= 5
```

```
SELECT @N1001_AV1_saldo_V1 =
@N1001_AV1_kirjaukset_varastoon_V1-@N1001_AV1_kirjaukset_varastosta_V1
```

```
-- @N1001_AV1_saldo_V1 = 2,5 - 0 = 2,5 (kg)
```

3. Muodostetaan prosessiin P2 kirjattava alkeisvirtasaldo kertomalla nimikkeeseen N1001 yksikköalkeisvirtasaldo prosessiin suuntautuvan logistisen tilan muutoksen määrällä 40 (kpl):

```
declare
@N1001_osuus_kirjattavasta_saldosta decimal(18,10)
```

```
SELECT @N1001_osuus_kirjattavasta_saldosta =
@N1001_AV1_saldo_V1 / @N1001_varastosaldo * 40
```

```
-- @N1001_osuus_kirjattavasta_saldosta = 2,5 / 50 * 40 = 2,0 (kg)
```

Vastaavasti saadaan AV1-arvot nimikkeelle N1002 varastosta V2 (640 kpl), sekä nimikkeelle N1003 varastosta V3 (160 kpl), kun oletetaan seuraavaksi käytettävät muuttujat alustetuiksi, ja niiden arvot lasketuiksi samalla tavalla kuin edellä esitettyssä laskennassa:

```
SELECT @N1002_osuus_kirjattavasta_saldosta =
@N1002_AV1_saldo_V2 / @N1002_varastosaldo * 640
```

```
-- @N1002_osuus_kirjattavasta_saldosta = 30 / 1500 * 640 = 12,8 (kg)
```

```
SELECT @N1003_osuus_kirjattavasta_saldosta =
@N1003_AV1_saldo_V3 / @N1003_varastosaldo * 160
```

```
-- @N1003_osuus_kirjattavasta_saldosta = 10 kg / 200 * 160 = 8 (kg)
```

Tällöin kirjattava saldo yhteensä saadaan laskemalla osuudet yhteen:

```
@N1001_osuus_kirjattavasta_saldosta +
@N1002_osuus_kirjattavasta_saldosta +
@N1003_osuus_kirjattavasta_saldosta
```

```
→ 2 kg + 12,8 kg + 8 kg = 22,8 kg
```

Vastaava laskenta suoritetaan myös muille prosessiin liittyville alkeisvirroille, kun suoritetaan alkeisvirtasaldon kirjaus prosessiin.

Alkeisvirtasaldon kirjaus prosessista P2 varastoon V4 tehdään kuten prosessin P1 tapauksessa – laskemalla yhteen prosessissa olevat alkeisvirtasaldot ja prosessiin liittyvän alkeisvirtaluettelon arvot kerrottuna kirjattavan nimikkeen logistisen tilan muutoksen yksikkömäärällä. Tarkastellaan esimerkkinä alkeisvirtaa AV1, kun kirjataan nimike N1000 varastoon prosessista P2:

$$\begin{aligned} & AV1:n\ määrän\ summa\ prosessissa\ P2\ + \\ & (AV1:n\ määrä/yksikkö\ prosessin\ P2\ alkeisvirtaluettelossa\ * \\ & Nimikkeen\ logistisen\ tilan\ muutoksen\ yksikkömäärä\) = Kirjattava\ määrä \\ & \rightarrow 22,8\ kg + 0,02kg * 40 = 23,6\ kg \end{aligned}$$

Tämän esimerkkilaskennan perusteella suoritetaan taulukon 7.23 kirjaus, jossa LogTilMuut_ID = 9 ja AlkeisVirta_ID = AV1. Samaa laskennan logiikkaa sovelletaan myös muiden alkeisvirtojen tapauksessa.

Taulukossa 7.24 käydään läpi varastosiirtoprosessin P3 suoritus ja taulukossa 7.25 tarkastellaan prosessin P4 suoritusta. Kummankin prosessin tapauksessa prosessiin kirjattavien alkeisvirtojen laskenta suoritetaan prosessia P2 vastaavasti, mutta sekä prosessiin että varastoon kirjattava nimike on sama. Prosessien P5 ja P6 suoritukset vastaavat täysin prosessien P3 ja P4 suorituksia, mutta eri lähtöarvoilla. Tästä syystä niiden suorituksia ei läpikäydä erikseen. Taulukossa 7.26 listataan prosesseihin P3-P6 liittyvät logistisen tilan muutokkirjaukset ja taulukko 7.27 esittää niiden perusteella tehdyt alkeisvirtasaldokirjaukset.

Taulukko 7.24: Varastosiirtoprosessi P3

Prosessi P3: Varastosiirtoprosessi	
Aika	Tapahtuma
0	Luodaan siirtotilausotsikko. ProsessiKategoria: Varastosiirto
1	Luodaan siirtotilausrivi. Nimike_ID: N1000 LähdeFyysSij_ID: V4 KohdeFyysSij_ID: V5 TilausStatus: Luonnos Määrä: 10 kpl
2	Luodaan prosessi-ilmentymä P3 prosessityypillä SIIRTO_P3.
3	Kytetään P3 tilausriviin. Prosessi_ID: P3
4	Aloitetaan tilaus. Nimike kerätään varastosta ja lastataan kuljettavaan ajoneuvoon. TilausStatus: aloitettu
5	Luodaan kirjaukset logistisen tilan muutoksesta prosessiin. FyysSij_ID: V4 Nimike_ID: N1000 Määrä: 10 kpl Suunta: Prosessiin
6	Luodaan kirjaukset alkeisvirtasaldoista prosessiin, perustuen nimikkeeseen N1000 alkeisvirtasaldoihin lähettävässä varastopaikassa V4.
7	Tuotteet on kuljetettu vastaanottavaan varastopaikkaan. Lopetetaan tilaus. TilausStatus: Valmis
8	Luodaan kirjaus logistisen tilan muutoksesta. FyysSij_ID: V5 Nimike_ID: N1000 Määrä: 10 kpl Suunta: Varastoon
9	Luodaan kirjaus alkeisvirtasaldosta prosessityypin SIIRTO_P3 alkeisvirtaluettelon perusteella, sekä prosessiin kirjatun nimikkeeseen N1000 alkeisvirtasaldojen perusteella.

Taulukko 7.25: Myyntiprosessi P4

Prosessi P4: Myyntiprosessi	
Aika	Tapahtuma
0	Luodaan myyntitilausotsikko. ProsessiKategoria: Myynti
1	Luodaan myyntitilausrivi. Nimike_ID: N1000 LähdeFyysSij_ID: V5 KohdeFyysSij_ID: A1 TilausStatus: Luonnos Määrä: 10 kpl
2	Luodaan prosessi-ilmentymä P4 prosessityypillä MYYNTI_P4.
3	Kytetään P4 tilausriviin. Prosessi_ID: P4
4	Aloitetaan tilaus. Nimike kerätään varastosta ja lastataan kuljettavaan ajoneuvoon. TilausStatus: aloitettu
5	Luodaan kirjaukset logistisen tilan muutoksesta prosessiin. FyysSij_ID: V5 Nimike_ID: N1000 Määrä: 10 kpl Suunta: Prosessiin
6	Luodaan kirjaukset alkeisvirtasaldoista prosessiin, perustuen nimikkeen N1000 alkeisvirtasaldoihin lähetävässä varastopaikassa V5.
7	Tuotteet on kuljetettu asiakkaan varastopaikkaan. Lopetetaan tilaus. TilausStatus: Valmis
8	Luodaan kirjaus logistisen tilan muutoksesta asiakkaan varastoon. FyysSij_ID: V5 Nimike_ID: N1000 Määrä: 10 kpl Suunta: Varastoon
9	Luodaan kirjaus alkeisvirtasaldosta prosessityypin MYYNTI_P4 alkeisvirtaluettelon perusteella, sekä prosessiin kirjatun nimikkeen N1000 alkeisvirtasaldojen perusteella.

Taulukko 7.26: Prosesseihin P3-P6 liittyvät logistisen tilan muutoskirjaukset

LogTil-Muut_ID	Prosessi_ID	Nimike_ID	FyysSij_ID	Aika	Suunta	Selite	Määrä
10	P3	N1000	V4	2020-1-12 14:00	Prosessiin	Jakkaran siirto FI-DE	10,00
11	P3	N1000	V5	2020-1-19 11:00	Varastoon	Jakkaran siirto FI-DE	10,00
12	P4	N1000	V5	2020-1-20 9:00	Prosessiin	Jakkaran myynti DE-DE	10,00
13	P4	N1000	A1	2020-1-20 11:00	Varastoon	Jakkaran myynti DE-DE	10,00
14	P5	N1000	V4	2020-1-22 14:00	Prosessiin	Jakkaran siirto FI-JP	30,00
15	P5	N1000	V6	2020-2-24 15:00	Varastoon	Jakkaran siirto FI-JP	30,00
16	P6	N1000	V6	2020-2-25 9:00	Prosessiin	Jakkaran myynti JP-JP	25,00
17	P6	N1000	A2	2020-2-25 14:00	Varastoon	Jakkaran myynti JP-JP	25,00

Taulukko 7.27: Prosesseihin P3-P3 liittyvät alkeisvirtasaldokirjaukset

LogTilMuut_ID	Suunta	Alkeisvirta_ID	Kuvaus	Määrä	Yksikkö
10	Prosessiin	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	5,90	kg
10	Prosessiin	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	4,01	kg
10	Prosessiin	AV3	Sähköenergian kulutus	1,71	kWh
10	Prosessiin	AV4	Puutavara, koivu	0,09	m3
11	Varastoon	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	25,90	kg
11	Varastoon	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	4,01	kg
11	Varastoon	AV3	Sähköenergian kulutus	1,71	kWh
11	Varastoon	AV4	Puutavara, koivu	0,09	m3
12	Prosessiin	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	25,90	kg
12	Prosessiin	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	4,01	kg
12	Prosessiin	AV3	Sähköenergian kulutus	1,71	kWh
12	Prosessiin	AV4	Puutavara, koivu	0,09	m3
13	Varastoon	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	26,10	kg
13	Varastoon	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	4,01	kg
13	Varastoon	AV3	Sähköenergian kulutus	1,71	kWh
13	Varastoon	AV4	Puutavara, koivu	0,09	m3
14	Prosessiin	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	17,70	kg
14	Prosessiin	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	12,03	kg
14	Prosessiin	AV3	Sähköenergian kulutus	5,13	kWh
14	Prosessiin	AV4	Puutavara, koivu	0,27	m3
15	Varastoon	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	137,70	kg
15	Varastoon	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	12,03	kg
15	Varastoon	AV3	Sähköenergian kulutus	5,13	kWh
15	Varastoon	AV4	Puutavara, koivu	0,27	m3
16	Prosessiin	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	114,75	kg
16	Prosessiin	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	10,03	kg
16	Prosessiin	AV3	Sähköenergian kulutus	4,28	kWh
16	Prosessiin	AV4	Puutavara, koivu	0,23	m3
17	Varastoon	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	117,25	kg
17	Varastoon	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	10,03	kg
17	Varastoon	AV3	Sähköenergian kulutus	4,28	kWh
17	Varastoon	AV4	Puutavara, koivu	0,23	m3

Tarkastelemalla kaikkia logistisen tilan muutoksen kirjauksia (taulukot 7.12, 7.15, 7.20 ja 7.26), alkeisvirtasaldokirjauksia (taulukot 7.13, 7.18, 7.23 ja 7.27) ja aiemmin asetettuja esimerkkilaskennan lähtöarvotauluja, voidaan sopivilla tietokantakyselyillä päätellä varastosaldot, alkeisvirtasaldot ja ympäristövaikutuskategorioiden konvertoidut alkeisvirrat (ympäristövaikutukset) joko kuluvasa tai aiemmissa ajanhetkissä. Tarkasteluhetken voi määrittellä asettamalla tarkasteltavalle logististen tilojen sarjalle rajausehdon, esim.

```
WHERE LogistisenTilanMuutos.Aika <= CAST('2020-01-11 15:00:00.000' as datetime)
```

Seuraavaksi esitetään esimerkit edellä mainituista laskennan tapauksista. Esimerkit kuvaillaan Transact-SQL -kyselyinä, joiden jälkeen esitetään kyselyn tulos taulukkona.

1. Nimikkeen varastosaldo kuluvalle ajanhetkellä

```
SELECT
  LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID
  ,LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID
  ,Nimike.Kuvaus
  ,SUM(
    CASE
      WHEN Suunta = 'Varastoon' THEN LogistisenTilanMuutos.Määrä
      ELSE -1 * LogistisenTilanMuutos.Määrä
    END
  ) as [Varastosaldo]
FROM LogistisenTilanMuutos
JOIN Nimike ON LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID = Nimike.Nimike_ID
GROUP BY
  LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID
  ,LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID
  ,Nimike.Kuvaus
```

Taulukko 7.28: Nimikkeen varastosaldot

FyysSij_ID	Nimike_ID	Kuvaus	Varastosaldo
A1	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	10,00
A2	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	25,00
T1	N1001	Koivua. h. 3 cm d. 40 cm	-50,00
T2	N1002	Sinkitty teräs 4,5 mm x 50 mm	-1500,00
T3	N1003	Koivua h. 41 cm	-200,00
V1	N1001	Koivua. h. 3 cm d. 40 cm	10,00
V2	N1002	Sinkitty teräs 4,5 mm x 50 mm	860,00
V3	N1003	Koivua h. 41 cm	40,00
V4	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	0,00
V5	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	0,00
V6	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	5,00

2. Nimikkeen alkeisvirtasaldo kuluvalle ajanhetkellä

```
SELECT
  LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID
  ,LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID
  ,Nimike.Kuvaus
  ,Alkeisvirtasaldo.Alkeisvirta_ID
  ,Alkeisvirta.Kuvaus
  ,SUM(
    CASE
      WHEN Suunta = 'Varastoon' THEN Alkeisvirtasaldo.Määrä
      ELSE -1 * Alkeisvirtasaldo.Määrä
    END
  ) as [Sum_of_Alkeisvirta.Määrä]
  ,Alkeisvirta.Yksikkö
FROM LogistisenTilanMuutos
JOIN Nimike ON LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID = Nimike.Nimike_ID
JOIN Alkeisvirtasaldo ON
  LogistisenTilanMuutos.LogTilMuut_ID = Alkeisvirtasaldo.LogTilMuut_ID
JOIN Alkeisvirta ON
  Alkeisvirtasaldo.Alkeisvirta_ID = Alkeisvirta.Alkeisvirta_ID
GROUP BY
  LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID
  ,LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID
  ,Nimike.Kuvaus
  ,Alkeisvirtasaldo.Alkeisvirta_ID
  ,Alkeisvirta.Kuvaus
  Alkeisvirta.Yksikkö
```

Taulukko 7.29: Nimikkeen varastopaikkakohtainen alkeisvirtasaldo

Fyys Sij_ID	Nimike_ID	Kuvaus	Alkeisvirta_ID	Kuvaus	Sum_of_Alkeisvirta_Määrä	Yksikkö
A1	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	26,10	kg
A1	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	4,01	kg
A1	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV3	Sähköenergian kulutus	1,71	kWh
A1	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV4	Puutavara, koivu	0,09	m3
A2	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	117,25	kg
A2	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	10,03	kg
A2	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV3	Sähköenergian kulutus	4,28	kWh
A2	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV4	Puutavara, koivu	0,23	m3
T1	N1001	Koivua. h. 3 cm d. 40 cm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	-2,00	kg
T1	N1001	Koivua. h. 3 cm d. 40 cm	AV3	Sähköenergian kulutus	-5,00	kWh
T1	N1001	Koivua. h. 3 cm d. 40 cm	AV4	Puutavara, koivu	-0,25	m3
T2	N1002	Sinkitty teräs 4,5 mm x 50 mm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	0,00	kg
T2	N1002	Sinkitty teräs 4,5 mm x 50 mm	AV3	Sähköenergian kulutus	0,00	kWh
T3	N1003	Koivua h. 41 cm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	0,00	kg
T3	N1003	Koivua h. 41 cm	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	0,00	kg
T3	N1003	Koivua h. 41 cm	AV3	Sähköenergian kulutus	0,00	kWh
T3	N1003	Koivua h. 41 cm	AV4	Puutavara, koivu	0,00	m3
V1	N1001	Koivua. h. 3 cm d. 40 cm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	0,50	kg
V1	N1001	Koivua. h. 3 cm d. 40 cm	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	0,01	kg
V1	N1001	Koivua. h. 3 cm d. 40 cm	AV3	Sähköenergian kulutus	1,00	kWh
V1	N1001	Koivua. h. 3 cm d. 40 cm	AV4	Puutavara, koivu	0,05	m3
V2	N1002	Sinkitty teräs 4,5 mm x 50 mm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	17,20	kg
V2	N1002	Sinkitty teräs 4,5 mm x 50 mm	AV3	Sähköenergian kulutus	2,58	kWh
V3	N1003	Koivua h. 41 cm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	2,00	kg
V3	N1003	Koivua h. 41 cm	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	4,00	kg
V3	N1003	Koivua h. 41 cm	AV3	Sähköenergian kulutus	0,20	kWh
V3	N1003	Koivua h. 41 cm	AV4	Puutavara, koivu	0,04	m3
V4	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	0,00	kg
V4	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	0,00	kg
V4	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV3	Sähköenergian kulutus	0,00	kWh
V4	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV4	Puutavara, koivu	0,00	m3
V5	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	0,00	kg
V5	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	0,00	kg
V5	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV3	Sähköenergian kulutus	0,00	kWh
V5	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV4	Puutavara, koivu	0,00	m3
V6	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV1	Hiilidioksidipäästöt (CO2)	22,95	kg
V6	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV2	Metaanipäästöt (CH4)	2,00	kg
V6	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV3	Sähköenergian kulutus	0,85	kWh
V6	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	AV4	Puutavara, koivu	0,04	m3

Taulukon 7.28 varastosaldojen ja taulukon 7.29 alkeisvirtasaldojen perusteella voidaan todeta, että asiakkaille A1 ja A2 päätyneiden, samaan nimikkeeseen kuuluvien tuotteiden yksikkökohtaiset alkeisvirtasaldot ovat kehittyneet eri tavoin alkaen varastosta V4. Tarkastellaan alkeisvirtaa AV1:

Nimikkeen N1000 AV1-saldo asiakkaan A1 varastopaikassa / nimikkeen varastosaldo asiakkaan A1 varastopaikassa = 26,10 kg / 10 kpl

→ 2,61 kg / kpl

Nimikkeen N1000 AV1-saldo asiakkaan A2 varastopaikassa / nimikkeen varastosaldo asiakkaan A2 varastopaikassa = 117,25 kg / 25 kpl

→ 4,69 kg / kpl

Esimerkin perusteella voidaan todeta, että ratkaisumalli mahdollistaa nimike- ja varastopaikkakohtaisen alkeisvirtojen laskennan, eli vaatimusmäärittelyn mukaisen dynaamisen LCA-mallinnuksen suorittamisen. Seuraavaksi suoritetaan nimikkeen N1000 alkeisvirtasaldoille esimerkkiluonnehdinta ympäristövaikutuskategorioina asiakkaiden A1 ja A2 varastopaikoissa. Tarkastellaan erityisesti kirjauksia, jotka ovat syntyneet myyntiprosessien P4 ja P6 suorituksen seurauksina.

3. Nimikkeen N1000 ympäristövaikutukset varastosijainneissa A1 ja A2

```
SELECT
  LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID
  ,LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID
  ,Nimike.Kuvaus
  ,Ympäristövaikutuskategoria.Kuvaus
  ,SUM(
    CASE
      WHEN Suunta = 'Varastoon'
      THEN Alkeisvirtasaldo.Määrä * Kuuluu.Konversiokerroin
      ELSE -1 * Alkeisvirtasaldo.Määrä * Kuuluu.Konversiokerroin
    END
  ) as Sum_of_Ympäristövaikutus
  ,Ympäristövaikutuskategoria.Yksikkö
FROM LogistisenTilanMuutos
JOIN Nimike ON LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID = Nimike.Nimike_ID
JOIN Alkeisvirtasaldo ON
  LogistisenTilanMuutos.LogTilMuut_ID = Alkeisvirtasaldo.LogTilMuut_ID
JOIN Kuuluu ON Alkeisvirtasaldo.Alkeisvirta_ID = Kuuluu.AlkeisVirta_ID
JOIN Ympäristövaikutuskategoria ON
  Kuuluu.YmpVaikKat_ID = Ympäristövaikutuskategoria.YmpVaikKat_ID
JOIN Alkeisvirta ON Alkeisvirtasaldo.Alkeisvirta_ID = Alkeisvirta.Alkeisvirta_ID
WHERE
  (LogistisenTilanMuutos.Prosessi_ID = 'P4' AND
  LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID = 'A1')

OR

  (LogistisenTilanMuutos.Prosessi_ID = 'P6' AND
  LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID = 'A2')
GROUP BY
  LogistisenTilanMuutos.FyysSij_ID
  ,LogistisenTilanMuutos.Nimike_ID
  ,Nimike.Kuvaus
  ,Ympäristövaikutuskategoria.Kuvaus
  ,Ympäristövaikutuskategoria.Yksikkö
```

Taulukko 7.30: Nimikkeen N1000 ympäristövaikutukset varastosijainneissa A1 ja A2

Fyys Sij_ID	Nimike_ID	Kuvaus	Kuvaus2	Sum_of Ympäristövaikutus	Yksikkö
A1	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	Ilmaston lämpenemispotentiaali 100 v. tarkasteluvälillä. Endpoint: Globaali	126,80144	kg of CO2 equivalent
A1	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	Kumulatiivinen energiankulutus. Endpoint: Helsinki, Suomi	1,71	kWh
A1	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	Maapinta-alan käyttö puutavaran kasvattamiseen. Endpoint: Keski-Suomi	0,000063	m2
A2	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	Ilmaston lämpenemispotentiaali 100 v. tarkasteluvälillä. Endpoint: Globaali	369,12992	kg of CO2 equivalent
A2	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	Kumulatiivinen energiankulutus. Endpoint: Helsinki, Suomi	4,28	kWh
A2	N1000	Istuin ja jalat koivua. h.44 cm d. 40 cm	Maapinta-alan käyttö puutavaran kasvattamiseen. Endpoint: Keski-Suomi	0,000161	m2

Taulukon 7.30 tulokset eivät muuttuisi esimerkkitietoa käyttäessä, vaikka prosesseja P4 ja P6 ei erityisesti rajattaisi tarkasteluun. WHERE-ehdon lisääminen kyselyyn alleviivaa mahdollisuutta tarkastella ympäristövaikutuksia myös tilauskohtaisesti.

Tämänkaltaisella kyselyllä voidaan muodostaa asiakkaalle luovutettava ympäristövaikutusmanifesti, kun nimikkeen myynnin prosessityypin alkeisvirtaluetelossa on huomioitu nimikkeen käytön ja hävityksen aikaiset ympäristövaikutukset. Kun ympäristövaikutusmanifesti sisältää edellä mainitut asiat, voidaan todeta mallinnuksen kattavan koko tuotteen elinkaari.

8 Pohdinta

Ratkaisumallin muodostukseen johtanut suunnittelututkimus täyttää suunnittelututkimukselle asetettavat vaatimukset Hevnerin et al. (2004) määrittelemässä viitekehyksessä. Suunniteltu artefakti on toteuttamiskelpoinen, tarkoituksenmukainen ja sovellusalueellaan relevantti. Se on muodostettu huolellisen etsimisprosessin tuloksena. Ratkaisun muodostus kytkeytyy vahvasti LCA:n teoriapohjaan, jota vasten mallinnettavan asian - tuotteen elinkaaren ympäristövaikutusten - oikeellisuutta tulee tämän tutkimuksen yhteydessä pääasiallisesti arvioida.

Suunnittelututkimuksen tulos tarjoaa uuden tavan lähestyä ympäristövaikutusten mallinnusta ja tarkastelua tuotenimikekohtaisesti varastopaikan näkökulmasta. Tuotenimikkeen ja varastosijainnin pari kytkeytyy fyysiseen maailmaan luonnollisella ja havainnollisella tavalla. Toimitusketjun salliessa samalla tuotenimikkeellä seurattavan tuotteen poistumisen tuotejärjestelmästä useammasta fyysisestä sijainnista, eri toimitusketjun vaiheisiin liittyvien toimintojen aiheuttamat ympäristövaikutukset voidaan intuitiivisesti ja helposti todeta erisuuriksi rajan ylityskohdissa. Saman tuotenimikkeen kuvaileman tuotteen komponentit ja raaka-aineet, sekä itse valmis tuote voivat kulkea hyvin erilaisten polkujen läpi hankinnan, valmistuksen ja logistiikan eri vaiheissa.

Suunnittelututkimuksen tuloksena rakennettu artefakti on täsmällisesti määritelty, se on esitelty formaalilla tavalla ja sen esitys on sisäisesti johdonmukainen, vaikka ratkaisun esimerkkitapausten muodostuksen aikana mallissa joudutaankin tekemään sovellusympäristöä yleistäviä oletuksia. Näihin oletuksiin kuuluu mm. tilausotsikko- ja tilausrivimallin käsittely yleistapauksena jokaiseen prosessikategoriaan kuuluvan tilaustyypin erillisen käsittelyn sijaan.

Esitetyn ratkaisun arvioinnin selkeä puute on, että mallia ei jalkautettu olemassa olevaan ERP-toteutukseen. Vastavuoroisesti esitetyn mallin yleisyys tekee tutkimuksesta kiinnostavan laajemmalle yleisölle.

Mallin yleisyyden säilyttäminen on harkinnan tuloksena tehty päätös. Tutkimuksen tuloksen esittelyn aikana kuitenkin todetaan, että sovellusympäristökohtaisia ratkaisun optimointeja on saavutettavissa mallia soveltamalla sopivin osin. Esimerkiksi logistisen tilan muutosta vastaavia varastotapahtumia lähes varmasti pidetään yllä tavalla tai toisella kaikissa ERP-järjestelmissä, jolloin rinnakkaisen logistisen tilan muutoksia seuraavan taulun ylläpito ei välttämättä ole kannattavaa.

Artefaktin hyödyllisyyden laajempi arviointi vaatii ratkaisumallin jalkautusta olemassa olevaan ERP-ympäristöön, sen käytönaikaista tarkastelua ja LCA-ammattiyhteisön arviointia. Esimerkkilaskentaa varten muodostetun tietomallin SQL-tietokantatoteutuksen perusteella voidaan kuitenkin todeta ensimmäisen hyödyllisyyskriteerin täyttyvän: mallia voidaan käyttää sen suunniteltuun tarkoitukseen. Näin ollen tutkielman ehdottama ratkaisumalli onnistuu vastaamaan tutkimuskysymyksen asettamaan ongelmaan.

Suunnittelututkimuksen esittämisen tapaan on tärkeää kiinnittää huomiota, jotta tutkimus löytäisi kohdeyleisönsä. Tutkielman rakenne etenee ongelma-alueen esittelystä artefaktin esittelyyn konstruktivistisella tavalla, joka edellyttää vain vähän pohjatietämystä. Lisäksi tutkielman rakenne on pidetty modulaarisena, jotta yksittäisiä osia olisi helppo käyttää uudelleen ammatinharjoittajille suunnatuissa referaateissa.

Tutkielman esittämä ratkaisumalli on muodostettu usean suunnittelututkimuksen viitekehukseen kuuluvan rakenna-arvioi -syklin iteraation kautta, kun ensimmäisiä ratkaisuehdotuksia on tarkasteltu ja muotoiltu uudestaan palvelemaan tavoiteltua tarkoitusta paremmin. Tutkielmassa esitellyn ratkaisumallin esimerkkilaskentaa suorittaessa mallista kuitenkin havaittiin ominaisuuksia, joihin on mahdollista hakea parannuksia.

Jatkotutkimuksen suorittajalle, mallin soveltajalle tai mallia eteenpäin kehittäjälle olisi suotavaa keskittyä logistisen tilan muutoksen käytännöllisempään esitystapaan. Käytännöllisyyttä logistisen tilan muutoksen kirjaukseen voisi saada tuomalla entiteettityyppiin lähde- ja kohdesijainnit selkeiksi omiksi suhteikseen.

Prosessin tuotoksena syntyvien useampien nimikkeiden tapaus jää mallin esittelyssä käsittelemättä. Useamman tuotosnimikkeen tapauksen voisi käsitellä esimerkiksi laajentamalla tuoterakenteen käsittelyn koskemaan myös tuotoskirjauksia ja lisäämällä tuoterakenteeseen attribuutin, joka ohjaa tuoterakenteen soveltamista logistisen tilan muutoksen suunnan mukaan.

Komponenttinimikkeiden poisto prosessista jää myöskin käsittelemättä. Komponenttien poistoon liittyvä ongelma voitaisiin ratkaista sallimalla logistisen tilan muutoksen poistaa prosessiin kirjattu nimike prosessista, kun se ei siirry toimitusketjussa seuraavaan varastopaikkaan – kuten esimerkissä käsitellyn tuotantotilauksen tapauksessa. Tähän ratkaisuna toimisi esimerkiksi uuden suunnan lisääminen logistisen tilan muutokseen (pois prosessista) ja tämän tapauksen käsittely toimintalogiikassa, kun lasketaan prosessikohtaista nimikkeen varasto- ja alkeisvirtasaldoa.

Toimittajan manifestin mallinnus ja käsittely tulisi ottaa huomioon tarkemmalla tasolla. Nykyisellään ratkaisumalli ei kuvaile tarkasti, miten toimittajalta saatava manifesti käsitellään ostoprosessin mallinnuksessa. Manifestin ongelman mahdollinen ratkaisu on sallia useamman alkeisvirtaluettelon kytkentä yhteen prosessityyppiin ja lisäämällä luetteloon attribuutti, joka ohjaa luettelon soveltamista eri suuntaisten kirjausten tapauksissa.

Tutkielman lähtöolettaimus, joka motivoi tutkimuksessa LCA-tiedon mallinnuksen kytkentää ERP-järjestelmän tapaan mallintaa toimitusketjua, on ERP-järjestelmien vaikiintuneisuus ja pitkälle kehittynyt kyky mallintaa toimitusketjuja. Yksi kiinnostavimmista jatkotutkimuksen alueista olisikin tästä syytä toimitusketjuun liittyvien ERP-prosessien läpikäynti yksityiskohtaisella tasolla ja luontevimpien ratkaisumallin kytkentätapojen tunnistaminen.

9 Johtopäätökset

Tutkielman ehdottama ratkaisumalli tarjoaa tavan mallintaa LCA-tutkimuksen tuloksia ja kytkeä tulokset ERP-järjestelmissä yleisesti esiintyvään toimitusketjua kuvailevaan tietomalliin. Ympäristövaikutusten laskennan esimerkit osoittavat, että tutkimuskysymyksen asettelussa mainittavaan tarpeeseen aluekohtaisesta ympäristövaikutusraportoinnista voidaan vastata ratkaisumallia soveltamalla.

Tutkimus tarjoaa kaksi selkeää kontribuutiota tietojärjestelmien suunnittelututkimuksen alaan. Ensimmäinen kontribuutio on käsitesynteesi LCA:n ja ERP:n välillä. Käsitesynteesi on hyödyllinen väline myöhempien LCA-tulosten mallinnusta ERP-järjestelmissä tavoittelevien tutkimusten tekemiseen. Käsitesynteesin pohjalta rakennettava tietomalli osoittaa LCA:n ympäristövaikutusten mallinnustavan olevan yhteensopiva ERP-tietomallin kanssa, kun LCA:n yksikköprosessit rajataan ERP-prosesseja vastaavalla tavalla.

Toinen tutkimuksen merkityksellinen kontribuutio on ympäristötiedon mallinnuksen ja tarkastelun näkökulma. Varastosijaintinäkökulma ympäristövaikutusten seurantaan on kiinnostava, koska varastohyllyt, -paikat ja -rakennukset ovat usein fyysisen maailman toimitusketjujen solmukohtia, ja sellaisina myös mallinnettuja ERP-järjestelmissä. Tuotanimikkeiden polut toimitusketjun läpi kulkevat erilaisten prosessien kautta ja on tyypillistä, että nimike pysähtyy varastosijainnissa ollessaan kahden prosessin välissä, niin kuvaannollisesti kuin fyysisessä maailmassakin.

Varastosijaintia tarkastelevasta lähestymistavasta tekee erityisen kiinnostavan sen tarjoama mahdollisuus dynaamisen LCA:n suorittamiseen. Kun toimitusketjuun kuuluva prosessi muuttuu, mutta prosessi käsittelee samaa fyysisen maailman oliota kuvailevaa nimikettä, voidaan prosessityyppiä muuttamalla saada aikaan ympäristövaikutusten muutos samaan toimitusketjuun kuuluvissa, myöhemmissä varastosijainneissa. Esitetty ratkaisumalli myöskin tukee rinnakkaisten toimitusketjujen LCA-mallinnusta.

Tutkimuksen yhteydessä tehty ongelma-alueen kartoitus ei tuottanut tuloksenaan yhtään lähdettä, joka olisi viitannut nimike- ja varastosijaintikohtaiseen ympäristövaikutusten tarkasteluun. Kirjallisuuskartoituksen perusteella vaikuttaa siltä, että tutkimuksen esittämä varastopaikkakohtainen ympäristövaikutusten laskenta on aiemmin esittämätön lähestymistapa.

Viiteluettelo

- Aitor P., Acero, C. R., & Ciroth A. 2017. LCIA methods: Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories, Version 1.5.6. GreenDelta GmbH.
- Carvalho, J. A. 2000. Information system? which one do you mean? In: Falkenberg E. D., Lyytinen K. & Verrijn-Stuart A. A. (eds.), *Information System Concepts: An Integrated Discipline Emerging*. Springer, 259-277.
- Cash, R., & Wilkerson, T. 2003. GreenSCOR: Developing a green supply chain analytical tool. *LOGISTICS MANAGEMENT INST MCLEAN VA*. (No. LMI-LG101T4).
- Chen, P. P. 1976. The entity-relationship model—toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, 1(1), 9-36.
- Chofreh, A. G., Goni, F. A., & Klemeš, J. J. 2018. Evaluation of a framework for sustainable enterprise resource planning systems implementation. *Journal of Cleaner Production* 190, 778-786.
- Chofreh, A. G., Goni, F. A., Shaharoun, A. M., Ismail, S., & Klemeš, J. J. 2014. Sustainable enterprise resource planning: imperatives and research directions. *Journal of Cleaner Production* 71, 139-147.
- Chopra, S. 2019. *Supply chain management: Strategy, Planning, and Operation (7th edition)*. Pearson.
- Elkington, J. 2013. Enter the triple bottom line. In: Henriques, A., Richardson, J. (eds.), *The Triple Bottom Line: Does It All Add Up?*. Routledge, 23-38.
- Falkenberg, E. D., Hesse, W., Lindgreen, P., Nilsson, B. E., Han Oei, J. L., Rolland, C., Van Assche F. J. M., Verrijn-Stuart A. A., & Voss, K. 1997. FRISCO-A framework of information systems concepts. In: *International Federation for Information Processing (IFIP) WG (Vol. 8)*.
- Fruth, A., & Neacsu, M. N. 2014. Aspects regarding ERP information systems, cloud based or on premise, with influence upon elaboration of appropriate marketing strategies. *Calitatea*, 15(S2), 186-194.

- Helo, P., & Szekely, B. 2005. Logistics information systems: an analysis of software solutions for supply chain co-ordination. *Industrial Management & Data Systems*, 105(1), 5-18.
- Hevner, A. R. 2007. A three cycle view of design science research. *Scandinavian Journal of Information Systems* 19(2), 4.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. 2004. Design science in information systems research. *MIS Quarterly* 28(1), 75-105.
- Hevner, A., & Chatterjee, S. 2010. Introduction to design science research. In: Hevner A., & Chatterjee S. (eds.), *Design research in information systems: Theory and practice*. Springer, 1-8.
- Hilty, L., Severith, M., Pillmann, W., Schade, S., & Smits, P. 2011. Integrating ERP and environmental information systems—the case of life cycle inventories. In: *EnviroInfo 2011 – 25th Symposium Informatics for Environmental Protection – Innovations in Sharing Environmental Observations and Information (Part 2)*, 659-668.
- Iivari, J. 2007. A paradigmatic analysis of information systems as a design science. *Scandinavian Journal of Information Systems* 19(2), 5.
- Iivari, J. 2010. Twelve theses on design science research in information systems. In: Hevner A., & Chatterjee S. (eds.), *Design research in information systems: Theory and practice*. Springer, 43-62.
- Iivari, J. 2017. Information system artefact or information system application: that is the question. *Information Systems Journal*, 27(6), 753-774.
- International Organization for Standardization 2006a. Environmental management: Life cycle assessment; Principles and framework. ISO 14040:2006.
- International Organization for Standardization 2006b. Environmental management: Life cycle assessment; Requirements and guidelines. ISO 14044:2006.
- International Organization for Standardization 2017. Environmental management: Life cycle assessment; Requirements and guidelines. Amendment 1. ISO 14044:2006/Amd 1:2017.
- Jones, M., & Azapagic, A. 2016. Background document supplementing the “Roadmap for Sustainability Assessment in European Process Industries”, MEASURE survey

- results, Version 1.0. *An initiative from the European Community's framework programme for research and innovation H2020 [H2020/20014-2020] under grant agreement no. 636816 (MEASURE)*.
- Joyce, A., & Paquin, R. L. 2016. The triple layered business model canvas: A tool to design more sustainable business models. *Journal of cleaner production*, 135, 1474-1486.
- Klöpffer, W., & Grahl, B. 2014. *Life cycle assessment: A guide to best practice*. Wiley-VCH.
- Lee, A. S., Thomas, M., & Baskerville, R. L. 2015. Going back to basics in design science: From the information technology artifact to the information systems artifact. *Information Systems Journal*, 25(1), 5-21.
- March, S. T., & Smith, G. F. 1995. Design and natural science research on information technology. *Decision support systems*, 15(4), 251-266.
- Matook, S., & Brown, S. A. 2017. Characteristics of IT artifacts: a systems thinking-based framework for delineating and theorizing IT artifacts. *Information Systems Journal*, 27(3), 309-346.
- Minkov, N., Finkbeiner, M., Sfez, S., Dewulf, J., Manent, A., Rother, E., Weyell P., Kralisch D., Schowanek D., Lapkin A., Jones M., & Azapagic A. 2016. Background document supplementing the “Roadmap for Sustainability Assessment in European process Industries”, Current State of LCSA, Version 1.0. *An initiative from the European Community's framework programme for research and innovation H2020 [H2020/20014-2020] under grant agreement no. 636816 (MEASURE)*.
- M2 Presswire 2017. Global enterprise resource planning (ERP) software market 2017 share, trend, segmentation and forecast to 2022. Normans Media Ltd.
- Ntabe, E. N., LeBel, L., Munson, A. D., & Santa-Eulalia, L.A. 2015. A systematic literature review of the supply chain operations reference (SCOR) model application with special attention to environmental issues. *International Journal of Production Economics*, 169, 310-332.
- Okoli, C. 2015. A guide to conducting a standalone systematic literature review. *Communications of the Association for Information Systems*, 37, 43.

- Paré, G., Trudel, M., Jaana, M., & Kitsiou, S. 2015. Synthesizing information systems knowledge: A typology of literature reviews. *Information & Management*, 52(2), 183-199.
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. 2007. A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45-77.
- Rajeev, A., Pati, R. K., Padhi, S. S., & Govindan, K. 2017. Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. *Journal of Cleaner Production* 162, 299-314.
- Ridley, D. 2012. *The literature review: A step-by-step guide for students*. Sage.
- Silver, M. S., Markus, M. L., & Beath, C. M. 1995. The information technology interaction model: A foundation for the MBA core course. *MIS Quarterly* 19,3, 361-390.
- Sirkka, A., & Junkkari, M. 2012. Multidimensional analysis of supply chain environmental performance. In: Hu, W., Kaabouch, N. (eds.), *Sustainable ICTs and management systems for green computing*. IGI Global, 231-250.
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. 2016. Global guidance for life cycle impact assessment indicators Volume 1. *United Nations Environment Programme*.

Liite 1: Sanasto

Alkuperäinen termi (termin käännös)	Termin selite
Life cycle assessment, LCA (Elinkaaritutkimus)	ISO-standardoitu menettely tuotteen elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten tutkimiseen.
Product system (Tuotejärjestelmä)	Kokoelma yksikköprosesseja, joiden sarjan tuloksena raaka-aineet jaostuvat tuotteiksi. LCA-tutkimuksen tarkastelun kohde.
Unit process (Yksikköprosessi)	Tuotejärjestelmään kuuluva suorite.
System boundaries (Tuotejärjestelmän rajat)	Tuotejärjestelmälle määritellyt fyysiset ja ajalliset rajat.
Elementary flow (Alkeisvirta)	Tuotejärjestelmän rajat ylittävä materiaali- tai energiavirta, joka ei ole järjestelmään saapuessaan tai järjestelmästä lähtiessään läpikäynyt inhimillisen toiminnan aiheuttamaa muutosta.
Intermediate flow (Välivaihevirta)	Yksikköprosessin tuotos. Kuvaa jalostettua raaka-ainetta, tuotekomponenttia tai energiaa.
Product flow (Tuotevirta)	Yksikköprosessin tuotos, joka on valmis tuote.
Functional unit (Toiminnallinen yksikkö)	Viitteellinen määrä tuotejärjestelmässä valmistettavaa tuotetta, joka on määritelty sen käyttötarpeen täyttämisen kautta vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi.
Reference flow (Viitteellinen tuotevirta)	Tuotejärjestelmän prosessien tuotosvirrat, jotka vaaditaan toiminnallisen yksikön valmistamiseen.
Goal and scope definition	Elinkaaritutkimuksen vaihe. Päämäärän ja laajuuden määrittely.
Life cycle inventory analysis, LCI	Elinkaaritutkimuksen vaihe. Tuotejärjestelmän raaka-ainekulutuksen, energiakulutuksen ja päästöjen luettelointi.
Life cycle impact assessment, LCIA	Elinkaaritutkimuksen vaihe. LCI-vaiheen tulosten luonnehdinta ja ympäristövaikutusten arviointi.
Interpretation	Elinkaaritutkimuksen vaihe. Tulosten tulkinta.
Reporting	Elinkaaritutkimuksen vaihe. Tulosten raportointi.
Critical review	Elinkaaritutkimuksen vaihe. Tulosten ja tutkimuksen kriittinen tarkastelu.
Allocation (Allokointi)	Elinkaaritutkimuksen LCI-vaiheen yhteydessä tehtävä syötteiden ja tuotosten kohdistus yksikköprosessiin.
Category endpoint (Ympäristövaikutusten kohdealue)	Elinkaaritutkimuksen ympäristövaikutusten oletetut kohdealueet
Enterprise resource planning, ERP (Toiminnanohjausjärjestelmä)	Tietojärjestelmä, joka koostuu integroiduista liiketoimintaa mallintavista ohjelmamoduuleista.

Supply chain management, SCM (Toimitusketjun hallinta)	Toimitusketjuja tutkiva tieteenala.
Supply chain operations reference, SCOR	APICS Supply Chain Councilin ylläpitämä toimitusketjun kuvailun ja arvioinnin viitekehys.
Information systems design research (Tietojärjestelmien suunnittelutiede)	Tieteenala ja ongelmanratkaisuparadigma, joka pyrkii tuottamaan tietoa ja ymmärrystä suunnitteluongelmasta ja sen ratkaisusta rakentamalla artefakteja, soveltamalla niitä käytäntöön ja arvioimalla niitä.
IT artifact (Tietotekninen artefakti)	Yläkäsite suunnittelutieteellisen tutkimuksen tuloksille.
Design artifact (Suunnitteluartefakti)	Suunnittelutieteellisen tutkimuksen tulos, joka on tietojärjestelmän suunnittelun apuväline, mutta ei toteutettavan tietojärjestelmän osa.
Construct (Käsitteistö)	Tietotekninen artefakti. Sanastot ja symbolit, joilla tunnistetaan tietojärjestelmän tietoalkioita.
Model (Malli)	Tietotekninen artefakti. Abstraktiot ja esitykset, joilla kuvaillaan tietoalkioita ja niiden välisiä suhteita
Method (Menetelmä)	Tietotekninen artefakti. Algoritmit ja käytännöt, joiden avulla mallinnettua tietoa voidaan manipuloida, ja joiden avulla tietojärjestelmän sisältämästä tiedosta voidaan saada sovellusarvoa.
Instantiation (Toteutus)	Tietotekninen artefakti. Valmiit tai prototyypivaiheessa olevat tietojärjestelmät ja niiden osat.
Better design theory (Parannus suunnittelutieteelliseen teoriaan)	Tietotekninen artefakti. Suunnittelutieteellinen artefakti. Lisäys suunnittelutieteellisen tutkimuksen tietämyskantaan.
Build-evaluate (Rakenna-arvioi)	Suunnittelutieteellinen lähestymistapa tietoteknisten artefaktien rakentamiseen ja arviointiin.
Develop-justify (Kehitä-todista)	Käyttätymistieteellinen lähestymistapa uuden teorian kehittämiseen ja todistamiseen.
