

**Maanmittaustieteiden laitos**

# Asuinalueen rakentamisessa syntyvien hiilipäästöjen hybridi-LCA- mallinnus

**Antti Säynäjoki, Jukka Heinonen, Seppo Junnila**

# Asuinalueen rakentamisessa syntyvien hiilipäästöjen hybridi-LCA-mallinnus

**Antti Säynäjoki, Jukka Heinonen, Seppo Junnila**

Aalto-yliopiston julkaisusarjat  
**TIEDE + TEKNOLOGIA** 1/2011

© Author

ISBN 978-952-60-4022-6 (pdf)

ISSN-L 1799-487X

ISSN 1799-4888 (pdf)

Aalto Print  
Helsinki 2011

**Author**

Antti Säynäjoki, Jukka Heinonen, Seppo Junnila

**Name of the publication**

Residential construction project's carbon dioxide emissions

**Publisher** School of Engineering**Unit** Department of Surveying**Series** Aalto University publication series SCIENCE + TECHNOLOGY 1/2011**Field of research** Real Estate Business**Abstract**

Global warming is considered as one of mankind's most severe challenges in the future. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is the most significant greenhouse gas released to the atmosphere by people. In order to slow down global warming mankind has to find information about the sources of CO<sub>2</sub>-emissions in order to make informed decisions how to minimize them.

Buildings, during their life cycle, are responsible of a large part of mankind's CO<sub>2</sub>-emissions. The research evaluates the CO<sub>2</sub>-emissions caused by the residential construction project. The research method is a hybrid-LCA-tool that is based on the life cycle assessment. Input-output method EIO-LCA forms the basis of the tool which is enhanced with current and local process data.

The case area of the research consists of 54 hectares of land and is planned to accommodate approximately 600 persons. Budget for construction project is about 76.5 million euro.

Total CO<sub>2</sub>-emissions caused by the construction project are approximately 60 500 tons. The buildings' share of this amount is about 91 percent and infrastructure's share about 9 percent. The most essential sources of the CO<sub>2</sub>-emissions are concrete, steel and energy that are used in the construction project. These combined cause approximately 23 percent of the total CO<sub>2</sub>-emissions.

The results of the study may be applied to the evaluations of similar constructions projects. The research method may also be used in future research as well as in development of hybrid-LCA-methods.

**Keywords** Hybrid-LCA, EIO-LCA, Life Cycle Assessment, CO<sub>2</sub>-emissions, new residential areas

**ISBN (printed)****ISBN (pdf)** 978-952-60-4022-6**ISSN-L** 1799-487X**ISSN (printed)** 1799-487X**ISSN (pdf)** 1799-4888**Pages** 51**Location of publisher** Espoo**Location of printing** Helsinki**Year** 2011

**Tekijä(t)**

Antti Säynäjoki, Jukka Heinonen, Seppo Junnila

**Julkaisun nimi**

Asuinalueen rakentamisessa syntyvien hiilipäästöjen hybridi-LCA-mallinnus

**Julkaisija** Insinööritieteiden korkeakoulu**Yksikkö** Maanmittaustieteiden laitos**Sarja** Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 11/2011**Tutkimusala** Kiinteistöliiketoiminta**Tiivistelmä**

Ilmaston lämpenemistä pidetään yhtenä ihmiskunnan lähitulevaisuuden suurimmista haasteista. Hiilidioksidi on merkittävin ihmisen aiheuttamista, ilmastonmuutosta edistävästä kasvihuonekaasuista ja hiilidioksidipäästöjen lähteistä on saatava tietoa, jotta perustellut valinnat ja päätökset näiden päästöjen vähentämiseen tähtäävien toimenpiteiden suhteen ovat mahdollisia.

Rakennukset aiheuttavat elinkaarensa aikana merkittävän osan kaikista hiilidioksidipäästöistä. Opinnäytetyössä selvitetään Espooseen rakennettavan asuinalueen rakentamisessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen määrä elinkaarinäkökulmaa hyödyntävällä hybridi-LCA-mallinnusmenetelmällä. Tutkimusmetodi pohjautuu panos-tuotos-elinkaarimenetelmiin lukeutuvaan EIO-LCA-mallinnukseen, jota tarkennetaan ajankohtaisella ja paikallisella prosessidatalla tärkeimpien kohteiden osalta.

Tutkimuksen asuinalueen koko on noin 54 hehtaaria ja sinne rakennetaan rivi- ja paritaloasuntoja noin 600 henkilön tarpeisiin. Asuinalueen rakentamisen kustannukset ovat yhteensä noin 76,5 miljoonaa euroa.

Tutkimuksen asuinalueen rakentamisessa syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat noin 60 500 tonnia. Rakennusten rakentamisen osuus näistä päästöistä on noin 91 ja infrastruktuurin osuus noin 9 prosenttia. Oleellisimpia hiilidioksidipäästöjen aiheuttajia ovat rakentamisessa käytettävä betoni, teräs sekä energia. Näiden yhteenlaskettu osuus koko asuinalueen rakentamisen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä on noin 23 prosenttia.

Tutkimuksen metodiin liittyy elinkaarimallinnuksessa tehtäviin valintoihin liittyviä epävarmuuksia. EIO-LCA-mallinnuksessa tehtävillä sektorivalinnoilla on suuri vaikutus elinkaarimallinnuksen lopputuloksiin. Prosessidatan suhteen erityisesti käytettävän energian tuotannon aiheuttamiin hiilidioksidipäästöjen arviointeihin liittyy epävarmuustekijöitä.

Tutkimuksen tuloksia voidaan soveltaa samankaltaisten asuinalueiden rakentamisessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen arvioimiseen. Opinnäytteen hybridi-LCA-sovellusta voidaan myös hyödyntää tulevassa tutkimuksessa ja hybridi-LCA-menetelmien kehittämisessä.

**Avainsanat** Hybridi-LCA, EIO-LCA, elinkaarimallinnus, hiilidioksidipäästöt, uudet asuinalueet**ISBN (painettu)****ISBN (pdf)** 978-952-60-4022-6**ISSN-L** 1799-487X**ISSN (painettu)** 1799-487X**ISSN (pdf)** 1799-4888**Sivumäärä** 51**Julkaisupaikka** Espoo**Painopaikka** Helsinki**Vuosi** 2011

# Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	1
2. Ympäristödatan merkitys, Suomen kansantalous ympäristönäkökulmasta ja elinkaarilaskentamenetelmien esittely .....	3
2.1 Ympäristöä koskevan tiedon keruu ja käyttö .....	3
2.2 Suomen kansantalouden erityispiirteitä ympäristönäkökulmasta.....	5
2.3 Elinkaarilaskentamenetelmien esittely.....	6
2.3.1 Panos-tuotos-LCA.....	7
2.3.2 Prosessi-LCA.....	9
2.3.3 Hybridi-LCA .....	13
3. Käytetty LCA-malli ja tutkimuksen eteneminen .....	18
3.1 Case-alue.....	18
3.1.1 Case-alueen kalliolämpöjärjestelmä .....	18
3.2 Tutkimuksen elinkaarimalli .....	21
3.3 Rakentamisen EIO-LCA-mallinnus .....	23
3.4 Case-alueen hybridi-LCA-mallinnus.....	25
3.5 Kalliolämpöjärjestelmän EIO-LCA-mallinnus.....	30
4. Tulokset.....	32
4.1 EIO-LCA-mallinnus.....	32
4.2 Hybridi-LCA-mallinnus .....	34
4.3 Kalliolämpöjärjestelmän EIO-LCA-mallinnus .....	35
5. Herkkyystarkastelu .....	37
5.1 EIO-LCA-mallinnus.....	37
5.2 Hybridi-LCA-mallinnus .....	43
5.3 Kalliolämpöjärjestelmän EIO-LCA-mallinnus.....	46
6. Johtopäätökset.....	47
7. Lähteet.....	51

# 1. Johdanto

Viimeaikaisten tutkimusten mukaan ilmastonmuutos vaarantaa ihmiskunnan hyvinvoinnin tulevaisuudessa (The Sixth Environment Action Programme of the European Community 2002 – 2012, UN on Climate Change). Ilmastonmuutoksen voimistumisesta kertoo se, että 15 lämpimintä mitattua vuotta on eletty viimeisen 20 vuoden aikana. Näistä 11 on vuoden 1995 jälkeisiä. Luonnossa ilmaston lämpeneminen näkyy muun muassa vuoristojäätiköiden vetäytymisenä. Useat trooppisten alueiden vuoristojäätiköt ovat menettäneen 80 prosenttia massastaan sadan viime vuoden aikana. Lämpötila arktisen ikiroidan pinnassa on alkanut nousta 1980-luvulta lähtien jopa kolme astetta ja ikirouda on alkanut sulamaan. Monet eliölajit ovat aloittaneet siirtymisen napoja kohti ja keväiset ilmiöt kuten lintujen muutto tapahtuvat yhä aiemmin. Vaikka lämpötilan nousut vaikuttavat pieniltä, voidaan niitä verrata 20 000 vuotta sitten vallinneeseen viime jääkauden huipun keskilämpötilaan. Lämpötila oli vain yhdeksän astetta matalampi, mutta riitti peittämään Suomen yli kahden kilometrin paksuisella mannerjäällä. (ilmasto.org)

YK perusti vuonna 1988 poliittisen päätöksenteon avuksi ilmastotieteen johtavista asiantuntijoista koostuvan hallitustenvälisen ilmastopaneelin IPCC:n, jonka toimintaan osallistuu yli 2000 tutkijaa. IPCC tuli jo vuonna 2007 siihen tulokseen, että 90 prosentin varmuudella ilmastonmuutos johtuu ihmisten toimista aiheutuvien kasvihuonekaasujen seurauksena (Climate Change 2007: Synthesis Report). Ihmisen aiheuttamat kasvihuonekaasut toimivat ilmakehässä samoin kuin lasi kasvihuoneessa eli päästävät auringon säteilyä lävitseen mutta eivät kaikkea maapallon lämpösäteilyä avaruuteen (ilmasto.org).

Ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasuista merkittävin on hiilidioksidi. Sen osuus kaikista kasvihuonekaasuista on 68 prosenttia. Hiilidioksidia syntyy kaikessa palamisessa ja sitä pidetään ihmiskunnan merkittävimpänä jätetuotteena. Vaikka hiilidioksidin osuus ilmakehästä on vielä pieni, sen fysikaaliset ominaisuudet tekevät siitä merkittävän ilmastonmuutoksen kannalta (ilmasto.org). Ongelman ja sen syiden tunnistaminen, ennaltaehkäisy ja vaikutusten minimointi ovatkin ihmiskunnalle lähitulevaisuuden suurimpia haasteita (Heinonen & Junnila 2010, s. 2).

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan tavaran tai palvelun elinkaaren aikana syntyneitä kasvihuonepäästöjä esimerkiksi massaa tai muuta tuoteyksikköä kohti. Hiilijalanjäljen määrittäminen perustuu elinkaariarviointiin ja siinä käsitellään ilmastonmuutosta ainoana vaikutusluokkana (Seppälä et al.

2009, s. 72). Aikaisempi tutkimus mainitsee suurimman osan kuluttajien hiilijalanjäljestä liittyvän voimakkaasti asumisen energiaan, rakentamiseen sekä liikkumiseen liittyvään infrastruktuuriin ja sijoittumiskysymyksiin (Junnila et al. 2006, Sharrard et al. 2008, Heinonen & Junnila 2010). Näiden hiilidioksidipäästöjen määrien ja aiheuttajien selvittäminen on välttämätöntä pyrittäessä pienentämään ihmisten aiheuttamaa hiilijalanjälkeä ja ilmastonmuutoksen hillinnässä.

Elinkaariarviointia LCA (life cycle assessment)-menetelmillä käytetään kohteiden ja toimintojen ympäristövaikutusten kokonaisvaltaiseen arvioimiseen. Menetelmillä saadaan selvitettyä kohteiden tai toimintojen suorien ympäristövaikutusten lisäksi niiden välilliset ympäristövaikutukset raaka-aineiden hankinnasta loppusijoitukseen asti. Aikaisemmassa tutkimuksessa on käytetty LCA-menetelmiä muun muassa tuotteiden, rakennusten sekä palveluiden ympäristövaikutusten arvioimiseen. LCA-menetelmillä on vertailtu esimerkiksi eri materiaali- ja tuotevaihtoehtojen elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia (Joshi 2000, Hendrickson et al. 2006, Sasnauskaite et al. 2006, Soukka et al. 2010), rakentamisen ja rakennusten aiheuttamia ympäristökuormia (Asif et al. 2005, Junnila et al. 2006, Sharrard et al. 2008) sekä hiilidioksidipäästöjä aiheuttavia toimintoja ja niiden osuuksia yhteiskunnissa (Weber et al. 2007, Seppälä et al. 2009, Heinonen & Junnila 2010). Osa LCA-tutkimuksesta on keskittynyt eri LCA-menetelmien vertailuun (Treloar et al. 1999, Junnila 2006, Bilec et al. 2006).

Yksittäisten rakennusmateriaalien elinkaarten aikaisista ympäristökuormista löytyy runsaasti tutkimusta (esimerkiksi Lounamaa 2010, Rakennustietosäätiö RTS). Vaikka yksittäisten rakennusten elinkaaren aikana aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä on tutkittu sekä Suomen että muiden maiden tapauksissa, kokonaisten asuinalueiden rakentamisessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen mallintamisesta ei ole juuri tutkimusta, etenäkään Suomesta.

Case-tutkimuksen kohteena on Espooseen rakennettavan pientaloalueen rakentamisessa syntyvät hiilidioksidipäästöt eri LCA-menetelmillä. Lisäksi tutkimuksessa arvioidaan case-alueelle sijoitettavan kalliolämpöjärjestelmän rakentamisessa syntyvät hiilidioksidipäästöt sekä kalliolämpöjärjestelmän käytöstä aiheutuneet hiilidioksidipäästöt suoraan sähkölämmitykseen verrattuna.

Tutkimuksen tuloksista saadaan arvio asuinalueen rakentamisessa syntyville hiilidioksidipäästöille. Lisäksi tutkimuksen avulla voidaan arvioida eri LCA-menetelmien soveltuvuutta erilaisten rakennuskohteiden



arviointiin sekä saadaan kahdesta eri LCA-menetelmästä rakennettu mallinnustyökalu, jota voidaan käyttää ja kehittää tulevassa tutkimuksessa. Tutkimuksen tulokset antavat myös suuntaa kalliolämpöjärjestelmän hiilidioksidipohjaiselle takaisinmaksuajalle suoraan sähkölämmitykseen verrattuna.

## **2. Ympäristödatan merkitys, Suomen kansantalous ympäristönäkökulmasta ja elinkaarilaskentamenetelmien esittely**

### **2.1 Ympäristöä koskevan tiedon keruu ja käyttö**

Ympäristön varjelemiseen tähtäävästä toiminnasta on tullut merkittävä malli toimia ympäri maailman. Ihmiset kiinnostuvat vuosi vuodelta enemmän nykyisestä sekä tulevasta ympäristön tilasta ja tämä vaikuttaa monien elämäntyyliin. Yritystenkin odotetaan raportoivan toiminnastaan sekä tuotteidensa ympäristövaikutuksista. Julkiset tahot eri valtioissa ovat myös huolissaan ympäristöressurssiensa riittävydestä ja perustavat säännöksiä niiden kuluttamisen suhteen. Tällaisten säännösten suunnitteluun ja käyttöönottoon tarvitaan yksityiskohtaista informaatiota ympäristön nykytilasta sekä tämänhetkisistä kehityssuunnista.

Toimivien ympäristöstrategioiden luomiseksi päättäjät tarvitsevat runsaasti tiiviissä muodossa olevaa tietoa. Vaatimukset tiedon tarkkuuden ja ajankohtaisuuden suhteen ovat korkeat. Ympäristön kantokyvyn selvittäminen fyysisten, kemiallisten ja biologisten prosessien ja näiden yhteisvaikutusten kautta on kriittisen tärkeää, jotta pystytään tekemään ympäristön kannalta perusteltuja päätöksiä (Huang et al. 2003, s. 1).

Ympäristötietoa kerätään ja julkaistaan alueittain. Kansallisella tasolla Suomessa ympäristötietoa tarjoaa esimerkiksi Tilastokeskus, joka kerää myös paljon muuta tilastotietoa, jota käytetään laajasti ympäristön tilan arvioinneissa ja tutkimuksessa. Tilastokeskuksen Internet-sivujen mukaan ”Kioton pöytäkirjan mukaisten kasvihuonekaasujen vuosittainen raportointi YK:n ilmastopimukselle sisältää määrämuotoisen päätöslaskennan (CRF-taulukot) ja niihin liittyvän taustaraportin (National Inventory Report)”. Tilastokeskus toimii Suomen kansallisena inventaariyksikkönä. Inventaari perustuu Tilastokeskuksen ja asiantuntijalaitosten (Suomen ympäristökeskus, Metsäntutkimuslaitos sekä Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus) väliseen työnjakoon.

Inventaari valmistuu vuosittain joulukuussa ja sen aikasarjat alkavat vuodesta 1990, joka on Kioton pöytäkirjan mukainen perusvuosi.

Euroopan Unionin tasolla ympäristötietoa kerää ja julkaisee European Environment Agency (EEA). Esimerkiksi kasvihuonekaasujen kohdalla EEA julkaisee ”Greenhouse gas emissions and projections in Europe”-julkaisua, jossa analysoidaan menneitä ja ennakoituja tulevia kasvihuonekaasupäästöjä suuntauksia Euroopassa. Siinä myös seurataan nykyisten EU-maiden, EU-ehdokkaiden sekä EEA:n jäsenvaltioiden nykyisiä ja ennustettuja edistysaskeleita kohti Kioton ja EU:n 2020 tavoitteita. Julkaisun tiedot perustuvat EEA-jäsenmaiden antamiin tietoihin kasvihuonekaasupäästöistään. Kaikki EEA-jäsenmaat paitsi Unkari, Turkki, Islanti, Liechtenstein ja Puola antoivat päivitettyä tietoa vuoden 2009 päästöennusteista ja kansallisista ohjelmistaan (European Environment Agency 2009, s. 8).

Yhdysvalloissa ympäristötietoa tarjoaa esimerkiksi Energy Information Administration (EIA), joka on itsenäinen tilastoja ylläpitävä toimisto U.S. Department of Energy sisällä. EIA:n tarkoituksena on tarjota luotettavaa ja vääristymätöntä (unbiased) tietoa energiasta. EIA kerää, analysoi ja jakaa itsenäistä ja puolueetonta energiatietoa edistääkseen perusteltua (sound) päätöksentekoa, tehokkaita markkinoita ja yleistä ymmärrystä energia-asioista sekä niiden yhteydestä kansantalouteen ja ympäristöön. (Energy Information Administration).

Maailmanlaajuisesti ympäristöasioita valvoo ja raportoi esimerkiksi United Nations Environment Programme (UNEP). UNEP:n tehtävänä on tarjota johtajuutta (leadership) ja edesauttaa yhteistyötä ympäristöstä huolehtimiseen innostamalla, tiedottamalla ja mahdollistamalla kansoja ja ihmisiä parantamaan elämänlaatuun vaarantamatta tulevien sukupolvien mahdollisuuksia samaan (United Nations Environment Programme).

Valtiot solmivat keskenään kansainvälisiä sopimuksia päästöjen vähentämisestä hidastaakseen ilmastonmuutosta globaalisti. Kööpenhaminassa 2010 järjestetyssä ilmastokokouksessa useat kehitysmaat sitoutuivat päästövähennyksiin. Ben Blockin 2010 julkaistun artikkelin ”More Accurate Emissions Data Needed Worldwide, U.S. Researchers Say” mukaan useiden teollisuusmaiden edustajistot eivät vakuuttuneet, että näitä vähennyksiä pystyttäisiin koskaan todistamaan.

Päästöjen havainnointi sekä todentaminen asettavat haasteita niiden valvonnalle. Viime aikoina tapahtuneet tekniset edistysaskeleet ovat mahdollistaneet fossiilisista polttoaineista lähtöisin olevien

hiilidioksidipäästöjen tarkemman arvioimisen. U.S. National Research Councilin raportin mukaan erityisesti muita kasvihuonekaasuja (GHG) koskevaa itsenäistä dataa ei kuitenkaan ole vielääkään saatavilla, riippumatta maan vaurausasteesta (Block, 2010).

National Research Councilin johtajan Stephen Pacalan mukaan olisi ensiarvoisen tärkeää, että jokainen maa pystyisi valvomaan omia päästöjään sekä tarjoamaan muille valtioille mahdollisuuden tarkastaa toistensa todenmukaiset päästölukemat, mikäli kansainvälisiä kasvihuonepäästöjä rajoittavia sopimuksia halutaan saada aikaiseksi. Pacalan mukaan tämä saisi aikaan tilanteen, jossa valtiot luottaisivat, että heidän naapurinsa toimivat sitoumuksiensa mukaisesti (National Research Council, 2010).

## **2.2 Suomen kansantalouden erityispiirteitä ympäristönäkökulmasta**

Suomen luonnonvarojen kulutus henkeä kohden on Euroopan ympäristöviraston (EEA 2003) tilastojen perusteella EU-maiden korkein. Tämä pätee myös, vaikka tarkastelun ulkopuolelle jätettäisiin Suomessa vientiin tuotetut tuotteet. Luonnonvarojen käytön on ajateltu ilmentävän karkeasti aiheuttamiemme ympäristövaikutuksia ja tulos onkin havahduttanut ympäristöväen sekä poliittisen päättäjät.

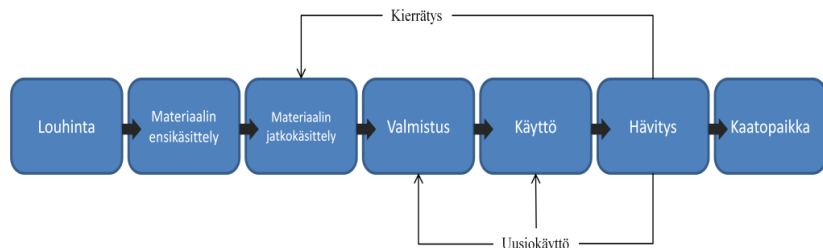
Kestävän kehityksen kannalta on oleellista tunnistaa eniten ympäristöä rasittavat tai luonnon kantokyvyn ylittävät materiaalivirrat ja kohdentaa toimenpiteet näiden materiaalivirtojen ympäristövaikutusten vähentämiseen. Muun muassa uusiutuvien ja uusiutumattomien luonnonvarojen käytön eroavaisuuksista johtuen materiaalivirtoihin liittyy kuitenkin ympäristönäkökohtia, joiden perusteella aineiden tonnimäärät eivät ole samanarvoisia (Seppälä et al. 2009, s. 9).

Suomen vientiteollisuuden materiaali- ja energiaintensiivisyyden vuoksi sen ympäristövaikutukset eivät rajoitu ainoastaan kotimaahan. Weberin et al. (2007, s. 4875) mukaan esimerkiksi Yhdysvaltojen kotitalouksien aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä 30 prosenttia aiheutui Yhdysvaltojen ulkopuolella vuonna 2004. Suomen vientiteollisuuden vahvuutena globaaleihin kilpailijoihin nähden on, että pystymme valmistamaan samat tuotteet pienemmin materiaalipanoksien ja vähemmän ympäristöä rasittaen tuotteiden koko elinkaari huomioon ottaen. Tuotteiden ja palveluiden ympäristövaikutuksia materiaalmäärien sijaan tarkastelemalla päästään kattavampaan ekotehokkuuden arviointiin. Vientiteollisuutemme ekotehostumisen lisäksi myös Suomen kulutuksen aiheuttamien materiaalivirtojen ympäristövaikutusten vähentäminen on tärkeää, sillä

ympäristönsuojelun investoinnit asukasta kohden ovat Suomessa maailman kärkeä (Seppälä et al. 2009, s. 9).

### 2.3 Elinkaarilaskentamenetelmien esittely

Lähes kaikissa kehittyneissä maissa pyritään parantamaan ympäristön tilaa sekä säilyttämään luonnonvaroja myös tuleville sukupolville. Elinkaarilaskentaa voidaan hyödyntää näiden tavoitteiden saavuttamiseksi. Muun muassa Hendricksonin et al. (2006, s. 3-4) sekä Asifin et al. (2005, s. 1391) mukaan elinkaarilaskenta on menetelmä, jossa tutkitaan tuotteiden ympäristövaikutuksia koko tuotteen elinkaaren ajalta raaka-aineiden hankinnasta, tuotteen valmistuksen ja käytön kautta aina tuotteen hävitykseen saakka. Tuotteen tyyppinen elinkaari on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1 Tuotteen elinkaari (mukaillen Hendrickson et al. 2006, s. 4.)

Tuotteet ja palvelut aiheuttavat usein ympäristövaikutuksia myös varsinaisen tuotantovaiheen ulkopuolella. Esimerkiksi kuljetukset tuotantovaiheiden välillä aiheuttavat ympäristöpäästöjä, jotka eivät selviä ainoastaan tuotantovaiheita tarkastelemalla. Elinkaarilaskentamenetelmät ovat käyttökelpoinen väline muun muassa materiaalivalintojen avuksi. Usein materiaalivalintoja tehdään tuntemuksen perusteella, vaikka elinkaarimenetelmien kaltaiset työkalut antaisivat varmempaa tietoa. Hendricksonin et al. (2006, s. 3) kertoo tutkijoiden osoittaneen, että luonnonmukaisilta vaikuttavat vaihtoehdot kuten paperikassi muovikassin sijaan tai pahvikuppi vaahтомуovikupin sijaan eivät aina ole välttämättä parempia ympäristön kannalta vaan data-analyysiä tulisi käyttää materiaalivalintoja tehdessä.

Toinen esimerkki elinkaarimenetelmien sovelluksista on hankalasti mallinnettavien, esimerkiksi toimintojen epäsuorien, ympäristövaikutusten selvittäminen. Junnila (2006) on tutkinut palvelusektorin aiheuttamia ympäristöpäästöjä. Palvelusektorin ajatellaan olevan ”vihreä toimiala”, sillä suurin osa sektorin aiheuttamista ympäristöpäästöistä ei aiheudu palvelujen tuottamispaikalla vaan ovat epäsuoria (Junnila 2006, s. 7070). Elinkaarimenetelmät ovatkin yksi työkalu epäsuorien ympäristövaikutusten arvioimiseen palvelusektorin tyyppisissä tilanteissa.

### 2.3.1 Panos-tuotos-LCA

Panos-tuotos eli IO-LCA (input-output life cycle assessment) on toinen elinkaarilaskennan eniten käytetyistä malleista. IO-LCA-menetelmä perustuu toimintoihin käytettyjen rahapanosten ja niistä aiheutuneiden ympäristöpäästöjen yhdistämiseen. IO-LCA-menetelmällä voidaan arvioida eri toimintojen ympäristövaikutuksia, kun tiedetään niihin käytetyn rahan määrä. IO-LCA-malleissa tarvittava data on kerättävä erikseen jokaiselle kansantaloudelle, joten IO-LCA-malleja on olemassa vain muutamia erilaisia (Sharrard et al. 2008, s. 328). IO-LCA-mallien tärkeimmät vahvuudet ovat suorittamisessa tarvittavien lähtötietojen hyvä saatavuus, helppo- ja nopeakäyttöisyys sekä koko kansantalouden kattava mallinnusketju.

IO-LCA:sta on olemassa useita eri sovelluksia. Yksi tunnetuimmista on Nobelin taloustieteen palkinnon voittaneen Wassily Leonthiefin 1970-luvulla suunnittelema ja kehittänyt EIO-LCA (economic input-output life cycle assessment). EIO-LCA mallintaa Yhdysvaltojen kansantaloudessa eri toimintoihin tarvittavat resurssit ja energiamäärät sekä niistä aiheutuneet päästöt (Carnegie Mellon-yliopisto). Leonthief ansaitsi Nobelin taloustieteen palkinnon aikaisemmasta, 1930-luvulta alkaneesta, työstään panos-tuotossovellusten parissa. Carnegie Mellon-yliopiston Green Design Instituten tutkijat ottivat EIO-LCA-menetelmän käyttöön 1990-luvun puolivälissä kun reaaliajassa tapahtuviin, suuriin matriisilaskentoihin tarvittava tietokoneiden laskentateho tuli laajasti saataville.

Carnegie Mellon-yliopiston Internet-sivuilla saatavilla oleva EIO-LCA-sovellus muuntaa Leonthiefin kehittänyt EIO-LCA-menetelmän käyttäjäystävälliseksi verkkosovellukseksi, jolla pystytään nopeasti ja helposti arvioimaan tavaran tai hyödykkeen elinkaarikustannuksia sekä päästöjä. Sovellus mallintaa Yhdysvaltojen lisäksi useita muita kansantalouksia. Jokainen sovellus on muodostettu julkisista, kansallisista panos-tuotos-taulukoista sekä päästödatasta. Carnegie Mellon-yliopiston mukaan ensimmäisen, Yhdysvaltojen vuoden 1995 mallin jälkeen menetelmää on sovellettu Yhdysvaltojen kansantalouden tulevien vuosien mallintamiseen sekä Saksan, Espanjan, Kanadan ja Kiinan kansantalouksiin.

Hendrickson (2006, s. 16) kertoo EIO-LCA-menetelmän vahvuuksista. EIO-LCA-mallinnukset ovat nopeita suorittaa. Niihin kulunut aika voidaan usein laskea muutamissa päivissä tai jopa tunneissa. EIO-LCA-menetelmä on myös edullinen. Mallinnussovellus sijaitsee Internetissä ja sen käyttö on maksutonta. EIO-LCA-menetelmä huomioi toimitusketjut koko

kansantalouden laajuisesti ja tekee subjektiivisesti määritellyt mallinnuksen rajat tarpeettomiksi. EIO-LCA-mallinnus on siten muita elinkaarimallinnusmenetelmiä perinpohjaisempi.

Bilec (2007, s. 22) käyttää auton tuotantoa esimerkkinä EIO-LCA:n vahvuuksiin kuuluvasta rajojen määrittelyn tarpeettomuudesta. Autonvalmistuksen suorat komponentit sisältävät materiaaleja kuten terästä, alumiinia, renkaita, muovia ja maalia. Elinkaarimallinnuksessa on laskettava ympäristövaikutuksia aiheuttavat toiminnot jokaiselle näistä komponenteista. Tämä tarkoittaa toimitusketjujen seuraamista sekä menneisyyteen että tulevaisuuteen kunnes määritetty raja saavutetaan. Muissa elinkaarimenetelmissä mallintaja on yleensä määritellyt mallinnuksen rajat suorien vaikutusten ympärille, kun taas EIO-LCA-mallinnuksessa pystytään huomioimaan vaikutusten kaikki komponentit.

Yhdysvaltojen kansantaloudelle tarkoitettua EIO-LCA-mallia sovelletaan laajasti myös Yhdysvaltojen ulkopuolisiin kansantalouksiin. Euroopan komission ”Integrated Product Policy”, jonka tarkoitus on tunnistaa ympäristöystävällisyyden kannalta potentiaalisimmat elektroniikan tuotteet, on valinnut Yhdysvaltoihin perustuvan panos-tuotos-sovelluksen tuotteiden elinkaarten ympäristövaikutusten laskemiseen Eurooppalaisen sijaan. Syynä tähän on Yhdysvaltojen kansantalouden mallin suuri sektorimäärä, josta seuraa parempi yksityiskohtaisuus sekä datan pienempi kasautuneisuusaste (level of aggregation) (Junnila 2006, s. 7070).

Hendricksonin et al. (2006, s. 10) mukaan EIO-LCA-menetelmään sisältyy kaksi oleellista yksinkertaistusta. Ensiksi, mikäli yhden tuotantopaikan tuotos kasvaa 10 prosentilla, myös kaikkien panosten on kasvettava 10 prosentilla. Toiseksi, kaikki tuotteita ja palveluita tarjoavat tahot on jaoteltu suunnilleen 500 sektoriin. Mallin sektorin keskimääräinen koko on 27 miljardia dollaria. Jotkut niistä, kuten sähkön tuotanto ovat huomattavasti laajempia (213 miljardia dollaria) ja jotkut merkittävästi keskimääräistä pienempiä, kuten esimerkiksi puussa kasvavien pähkinöiden viljely (tree nut farming) (2 miljardia dollaria). Nämä yksinkertaistukset mahdollistivat panos-tuotos-taulukoiden muodostamisen Yhdysvaltojen kansantaloudelle Department of Commercen toimesta.

EIO-LCA-menetelmän suurin heikkous on kertymädatan käyttö sektoreittain yksityiskohtaisen, eri prosesseille kuuluvan datan sijaan (Hendrickson et al. 2006, s. 25, Suh et al. 2004, s. 659, Junnila 2006, 7070). Esimerkiksi Yhdysvaltojen EIO-LCA malli ei pysty erottamaan sähköntuotantoa 50-vuoden ikäisen hiilivoimalan ja uuden, teknisesti kehittyneen voimalaitoksen välillä. Vanhempi voimalaitos saattaa

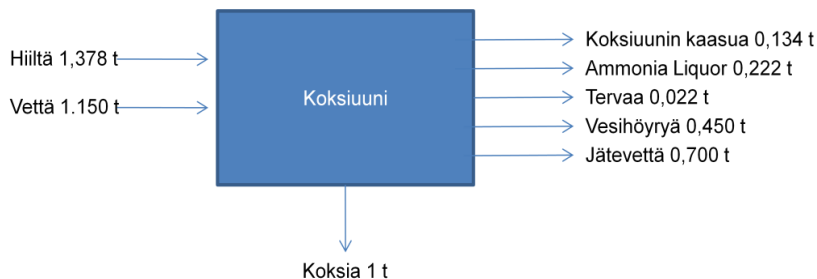
todellisuudessa tuottaa kymmenkertaiset päästöt uudempaan verrattuna. Muilla LCA-menetelmillä pystyttäisiin vertailemaan eri sähköntuotantoprosesseja voimalaitosten välillä tutkimuksen vaatimalla tarkkuudella.

EIO-LCA-mallinnuksen heikkoutena on myös, ettei se huomioi käyttö- sekä hävitysvaiheita, joiden suhteen tarvitaan usein lisädatan yhdistämistä mallinnukseen (Bilec 2007, s. 22). Lisäksi EIO-LCA-mallin muilla kansantalouksilla kuin Yhdysvalloilla ei ole yhtä suurta sektorivalikoimaan käytettävissään. EIO-LCA-menetelmän tarkkuus ylittää maksimissaan panos-tuotos-taulukoiden tarkkuuteen, joten se ei sovi lopulliseksi työkaluksi yksityiskohtaisessa ympäristösuunnittelussa (Junnila 2006, s. 7070).

### **2.3.2 Prosessi-LCA**

International Standard (1997, s. 10) määrittelee yksikköprosessin (unit process) tuotejärjestelmän pienimpänä osana, josta kerätään dataa elinkaariarviointeja suoritettaessa. Prosessit koostuvat materiaalivirroista, panoksista, tuotoksista, raaka-aineista sekä jätteistä. Materiaalivirtoihin kuuluu ihmisen käsittelemättömät materiaalit sekä materiaalit tai energia, joka siirtyy prosessista ympäristöön ilman jälkikäsitteilyä. Panoksiin kuuluvat materiaalit tai energia, jotka viedään sisään prosessiin, esimerkiksi raaka-aineet ja tuotteet. Tuotokset koostuvat prosessista poistuvista materiaaleista tai energiasta kuten raaka-aineista, puolivalmisteista, tuotteista, päästöistä ja jätteistä. Raaka-aineisiin kuuluvat suorat tai välilliset (primary or secondary) tuotteen valmistuksessa käytetyt raaka-aineet. Prosessin jätteet koostuvat mistä tahansa prosessin tuotoksista, jotka hävitetään.

Hendrickson et al. (2006, s. 22) käyttää koksiiuunin polttoprosessia esimerkkinä prosessimallista. Koksiiuunin polttoprosessi on esitetty kuvassa 2. Koksi on eräs teräksen valmistuksessa tarvittavista aineksista. Kuvan 2 tapauksessa koksi on ensisijainen tuote. Hiili ja vesi ovat panosmateriaaleja. Koksiiuunin kaasu, ammonia liquor, terva, vesihöyry ja jätevesi ovat prosessin sivutuotteina syntyviä päästöjä. Koksiiuunin prosessikuvauksessa jätetään huomioimatta energiapanokset sekä kaasupäästöjen koostumus.



Kuva 2 Koksiuunin prosessimalli (mukaillen Hendrickson et al. 2006, s. 23.)

Prosessimallien oleellinen ominaisuus on panosten ja tuotosten massojen yhtäsuuruus. Kuvan 2 koksiuunin prosessissa panosten massa vastaa tuotosten massaa. Massojen tasapainolaskelmat mahdollistavat prosessin materiaalivirtojen tai yksittäisten, havainnoimattomien päästöjen todentamisen.

Elinkaarimallinnukset prosessi-LCA-menetelmällä koostuvat yhdestä prosessimallista tai useamman prosessimallin yhdistelmästä.

Elinkaaripohjaisten ympäristövaikutusten mallintamiseen tarvitaan Hendricksonin et al. (2006, s. 23) mukaan yleensä lukuisia prosessimalleja. Esimerkiksi koksiuunin välilliset vaikutukset sisältäisivät hiilen louhinnan ja pesun, vesi-infrastruktuurin, kuljetukset, tervan ja sivutuotteiden kemiallisen palauttamisen sekä kuuman koksien ulkoisen jäädyttämisen. Prosessipohjainen elinkaarimallinnus laskee yhteen välillisten vaikutusten summat sekä tarkasteltavan prosessin tulokset.

Prosessien rajaukset ja eri prosessien yhdistämiset toisiinsa osoittautuvat usein haasteelliseksi. Vaikutusten yhteen laskeminen hankaloituu, kun prosessimalleihin sisältyy jatkumoa kuten koksiuunin kaasun talteen kerääminen ja uudelleen polttaminen. Käytännössä uunin panoksena toimivaa kaasun määrää ei tiedetä ennen kuin tiedetään prosessin tuotoksena syntyneen kaasun määrä. Hendricksonin et al. (2006, s. 23) mukaan prosessimallinnuksen ja EIO-LCA mallinnuksen yhdistelmällä voidaan ratkaista tämän tyyppisiä ongelmia. Toinen tutkijoiden usein suosima vaihtoehto on tulosten approksimointi tai jatkumoprosessien huomiotta jättäminen.

Prosessi-LCA-menetelmällä saadaan useimmiten tarkimmat laskentatulokset, etenkin monimutkaisilla toimialoilla kuten rakennusteollisuudessa. Hendrickson et al. (2006, s. 16) mainitsee että prosessimalleilla voidaan myös huomioida erikseen käytettävät materiaalit tai yksittäiset prosessit, kun EIO-LCA-menetelmässä käytetään tuotosta kansantalouden sektorilta. Vaikka EIO-LCA-menetelmässä on saatavilla



satoja sektoreita, tutkijat haluaisivat usein pystyä jakamaan mallin sektoreita pienempiin osiin kuten muovinvalmistuksen erilaisten muovityyppien mukaan. Prosessimallit kykenevät lisäksi huomioimaan myös epälineaarisia vaikutuksia. Prosessi-LCA-menetelmä on tehokas myös heterogeenisillä aloilla, joilla keskiarvotaulukot saattavat antaa hyvinkin virheellisen kuvan.

Prosessi-LCA-mallinnuksissa syntyvät virheet johtuvat usein mallinnuksen rajojen määrittelystä. Koska prosessi-LCA-mallinnuksessa syntyvät virheet saattavat olla suuria ja LCA-mallinnuksen rajanvedoille ei ole olemassa tieteellistä pohjaa, pelkän prosessi-LCA-menetelmän käyttö teknisenä työvälineenä on kyseenalaista (Suh et al. 2004, s. 657). Rajanvetojen määrittely on International Standard ISO 14041:n mukaan iteratiivista. Ensinnäkin valitaan tietty raja mallinnukselle ja rajoja määritellään uudelleen LCA-tutkimuksen edetessä kun mallinnettavaa kohdetta ymmärretään tiedon lisääntyessä paremmin. ISO 14041 määrittelee: "On päätettävä mitkä ympäristöpäästöt arvioidaan ja näiden arviointien yksityiskohtaisuus. Monissa tapauksissa alustavia järjestelmän rajoja muutetaan jälkepäin esiselvityksistä saatavien tulosten perusteella." sekä lisäksi "Kaikki päätökset koskien elinkaaren vaiheiden, prosessien tai syötteiden/tuotosten pois jättämistä on kirjattava selkeästi ja perusteltava. Järjestelmän rajojen asettamisessa käytetyt kriteerit sanelevat luotettavuusasteen, jolla varmistetaan, että selvityksen tuloksissa ei ole kompromisseja ja että selvityksen tavoitteet saavutetaan" (International Standard 14041, s. 14). Mikäli joitain prosesseja jätetään huomioimatta, perustelut tulee sisällyttää LCA-analysiin. Bilec (2007, s. 22) huomauttaa, että käytännössä on kuitenkin hankalaa määrittellä, millä prosesseilla on merkittäviä ympäristövaikutuksia ennen datanhankintavaiheen alkamista ja elinkaari-inventaarin (life cycle inventory) kokoamista.

Mallinnuksen rajojen määrittelemiseksi on useita menetelmiä. ISO käyttää muutamia kriteereitä prosessiin sisällytettävien syötteiden valitsemiseen, kuten esimerkiksi massa, energia ja ympäristöllinen merkittävyys (International Standard 14041, s. 16). Suh et al. (2004, s. 658) kuvailee kolme ongelmaa näiden kriteerien suhteen. Ensinnäkin massaan tai energiaan perustuva päätös sisällyttää prosessi tarkasteluun tai jättää se tarkastelun ulkopuolelle ei perustu sellaiseen teoreettiseen tai empiiriseen metodiin, joka takaisi vähäpätöisten ympäristövaikutusten pois jättämisen. Toiseksi ympäristövaikutusten suuruus ei välttämättä riipu massasta tai energiasta. Kolmanneksi rajojen määrittelyn ulkopuolelle jäävät prosessit eivät välttämättä ole merkittäviä verrattuina muihin prosesseihin, mutta kaikkien pois jätettyjen prosessien summa saattaa olla merkittävä. Ketjujen

katkaisemisen seuraukset mallinnuksen rajaamiseksi saattavat olla erityisen tärkeitä kun vertaillaan kahta prosessia tai tuotetta.

Aikaisemmassa elinkaarimenetelmiin keskittyvässä tutkimuksessa vertaillaan usein prosessi-LCA-menetelmän sekä panos-tuotosmenetelmien eri sovellusten ominaisuuksia. Näiden elinkaarimallien välisessä vertailussa keskitytään usein mallinnuksen rajojen määrittelyyn. Prosessi-LCA-menetelmällä mallintaja määrittelee mallinnuksen rajat. Panos-tuotos-mallien rajat perustuvat kansantalouden sektorimallin kasautumiseen. Esimerkiksi EIO-LCA-sovelluksella ei ole mahdollista arvioida yksittäistä tuotetta, sillä tuotteet kasautuvat sektoreihin. Yksittäisen panos-tuotos-mallin kehittäminen tiettyyn rajaan asti jatkettulla prosessi-LCA-mallien ketjuilla on mahdollista. Bilec (2007, s. 24) esittää tutkimuksessaan esimerkin Ford Focusin ja Honda Civicin vertailusta, jota ei ole mahdollista suorittaa EIO-LCA-menetelmällä, sillä kyseisessä mallissa Yhdysvaltojen kansantalouteen kuuluu ainoastaan yksi henkilöautosektori. Tästä syystä yksilöllisiä eroja materiaalivalinnoissa ja valmistusprosesseissa ei pystytä tunnistamaan. Lisäksi prosessien parannusmahdollisuuksien havainnointi on haastavaa, sillä yksittäisten tuotteiden mallinnus on mahdotonta. Panos-tuotos- ja prosessianalyysiä pystytään käyttämään systeemianalyysissä. Esimerkkinä Bilec (2007, s. 24) mainitsee Yhdysvaltojen teoreettisen kannustimen asumiseen, jossa asumissektorin kasvamisen seurauksena tapahtuva suorien ja epäsuorien sektorien kasvaminen olisi mahdollista mallintaa näillä menetelmillä. Panos-tuotos-menetelmällä asumissektorin kasvaminen johtaisi samalla puutavaran, LVI-materiaalin sekä sekoitettavan betonin kysynnän kasvuun.

Yksi prosessi-LCA-menetelmän heikkouksista on mallinnuksessa tarvittavien lähtötietojen huono saatavuus. Dataa ei välttämättä ole olemassa tai datan omistava yritys ei ole halukas jakamaan sitä. Junnila (2006, s. 7070) kertoo, että prosessi-LCA-menetelmää käytettäessä lähtötiedot tulisi olla ilmoitettu energian tai massan yksiköinä (esimerkiksi MJ, kWh, kg, jne.). Käytännössä yritykset kuitenkin keräävät ja julkaisevat materiaali- ja energiapanoksena sekä tuotoksensa julkaisuihin rahamääräisinä yksiköinä. Lisäksi panokset kuten ostetut palvelut sekä tuotantohyödykkeet (capital goods) ovat yleensä lisätty ainoastaan rahamääräisin yksiköin yritysten tietokantoihin (company records).

Hendrickson et al. (2006, s. 16) mainitsee, että prosessi-LCA-mallinnuksissa käytettävä ohjelmisto ostetaan yleensä sadoilla tai tuhansilla dollareilla konsultointiyrityksiltä. Lisäksi työn paljoudesta johtuen prosessi-LCA-mallinnus on EIO-LCA-mallinnusta huomattavasti

kalliimpaa (Junnila 2006, s. 7070). Edellä mainittuja prosessi- ja EIO-LCA-menetelmien vahvuuksia ja heikkouksia on koottu taulukkoon 1.

	Prosessimallit	EIO-LCA
<b>Vahvuudet</b>	Valittujen prosessien yksityiskohtaiset analyysit Tuotteiden vertailumahdollisuus Prosessien parantamismahdollisuudet	Rajana koko kansantalous Kansantalouden laajuinen LCA-järjestelmä Julkisesti saatavilla oleva data Toistettavissa olevat tulokset
<b>Heikkoudet</b>	Subjektiiivinen rajojen määrittely Perusteellisen datan puute monissa tapauksissa Aika- ja kustannusintensiivinen Lähtödata usein omistettua Epävarmuus	Kasautunut data Prosessien parantamismahdollisuudet hankalasti havaittavissa Tuontiin suhtaudutaan US-valmisteisina tuotteina Epävarmuus Yhdysvaltojen ulkopuolinen data rajoittunutta Käytön ja hävityksen huomioiminen puuttuu

Taulukko 1 Prosessi- ja EIO-LCA-menetelmien vertailu (mukailien Bilec 2007, s. 23.)

### 2.3.3 Hybridi-LCA

Hybridi-termiä on käytetty panos-tuotos-analyyseissä kahdessa eri yhteydessä: toinen on sekä fyysisten että taloudellisten yksiköiden käyttö ja toinen on sektori- ja prosessidatujen yhdistäminen. Tässä tutkimuksessa viitataan jälkimmäiseen hybridimallin määritelmään.

Hybridi-LCA-malleissa yhdistetään yleensä prosessi- sekä panos-tuotos-dataa toisiinsa. Prosessidatan yhdistämistä sektoritason panos-tuotos-analyysiin on alun perin käytetty energiantuotannon panos-tuotos-analyyseissä, jotka ovat olleet laajasti käytössä öljykriisistä lähtien. Panos-tuotos-analyysillä pystytään muodostamaan tietoa tyypillisistä tuotteista ja prosesseista, jotka ovat hyvin edustettuina panos-tuotos-kategorioissa. Muut tuotteet ja prosessit mallinnetaan prosessianalyysillä. Bullard et al. (1978, s. 1-47) oli ensimmäinen, joka yhdisti panos-tuotos- ja prosessianalyysin kehittämällä hybridimetodin energia-analyysiin. Hänen tutkimusmenetelmänsä venyttää merkittävästi analyysin rajoja säilyttäen kuitenkin prosessitarkkuuden (Suh et al. 2004, s. 660).

LCA-mallinnuksesta hybridimenetelmillä alettiin keskustella tieteellisissä julkaisuissa ja kansainvälisissä sovelluksissa kuten Society of

Environmental Toxicology and Chemistryssä (SETAC) sekä ISO:ssa vasta 1990-luvun alussa. Yksityiskohtaiset prosessimallinnukset olivat alun perin elinkaarianalyysin pääfokus ja 1970-luvulta lähtöisin olevat hybridipohjaisen energiamallinnuksen ominaisuudet (virtues) eivät päässeet merkittävään rooliin LCA-käytännöissä. Eräs varhainen poikkeus oli Moriguchi et al. (1993), joka analysoi moottoriajoneuvon hiilidioksidipäästöjä käyttäen hybridimallinnusta. Hybridimallinnusta ei sisällytetty mukaan LCA-mallinnuksien valtavirtaan (mainstream) edes Moriguchin et al. (1993) tutkimuksen jälkeen. Erilaisia hybridimallinnuksen versioita on sittemmin tuotu esille yksitellen 1990-luvun lopusta lähtien.

Hybridi-LCA-mallinuksista on tehty paljon aikaisempaa tutkimusta ja hybridi-LCA malleista on rakennettu useita erilaisia versioita. Suh et al. (2004) on tutkinut rajanvetoaasteita ja integroitua panos-tuotos malleja. Joshi (1998) on kehittänyt eriyttämistapoja (disaggregation) panos-tuotos-malleille. Cano Ruiz (2000) tuo ilmi panos-tuotos-mallin perusrakenteen. Lin ja Polenske (1998) ovat kehittäneet panos-tuotos-malleja suuryritysten tarpeisiin.

Hybridi-LCA-malli yhdistää EIO-LCA-menetelmän kattavuuden sekä prosessi-LCA-menetelmän tarkkuuden. Prosessimallinuksilla parannetaan ja tarkennetaan EIO-LCA-mallia. Toisaalta EIO-LCA-menetelmä yksinkertaistaa mallinnusta sekä edesauttaa prosessi-LCA-mallinnuksen läpäisevyys- (truncation) ja rajanvetokysymyksissä (boundary definition) (Hendrickson et al. 2006, s. 21). Hybridi-LCA-mallinuksissa on tarkoituksena hyödyntää kummankin mallin parhaat puolet.

Hybridi-LCA-mallinuksista on olemassa useita eri versioita. Mallit ovat eroteltuja toisistaan, mutta kaikki yhdistävät panos-tuotos- sekä prosessianalyysin jollain tavalla ja eroavat pääasiassa panos-tuotos- ja prosessidatan keskinäisessä suhteessa. Kerrostettu (tiered), panos-tuotos-hybridit (I-O based hybrid), integroitu (integrated) ja laajennettu prosessipohjainen (augmented process-based) analyysi ovat neljä esimerkkiä, jotka kuvaavat hybridi-LCA-menetelmien sovelluskenttää. Eri hybridimenetelmillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa ja käytettävä menetelmä tulisi valita useita tekijöitä huomioiden. Suh et al. (2005, s. 661) mainitsee näistä esimerkiksi datavaatimukset, vaatimukset ajan ja resurssien suhteen, tuonnin merkityksen kansantaloudelle ja kansallisten panos-tuotos-tilukoiden kasautumisen asteen.

Tässä tutkimuksessa käytetään sovellettua kerrostettua (tiered) hybridianalyysiä. Alkuperäisessä kerrostetussa hybridi-LCA-mallinnuksen

sovelluksessa suorat ja tulevaisuudessa toteutuvat vaiheet (direct and downstream requirements) (esimerkiksi rakentaminen, käyttö, ylläpito ja hävitys) sekä muutamat tärkeimmät jo tapahtuneet tuotteen elinkaaren vaiheet mallinnetaan yksityiskohtaisella prosessianalyysillä kun jäljelle jääneet tuotteiden elinkaarten vaiheet (esimerkiksi materiaalien hankinta ja raaka-aineiden jalostus) mallinnetaan panos-tuotos-analyysillä. Mallinnusmenetelmien rajat sekä vertailukelpoisuus prosessi- sekä panos-tuotos-analyysin välillä riippuu yleensä datan saatavuudesta, yksityiskohtaisuuden ja tarkkuuden vaatimustasoista sekä resurssien kuten ajan, työn määrän sekä kustannusten rajallisuudesta (Suh et al. 2004, s. 660).

Esimerkiksi Hondo et al. (1996) käytti tutkimuksessaan kerrostettua hybridianalyysiä. Koska panos-tuotos-taulukot kattavat yleensä vain yhden maan kansantalouden tai kansallisen tason, näiden ulkopuolisia prosesseja ei pystytä mallintamaan panos-tuotos-menetelmällä. Tutkimuksessa käytettiin prosessianalyysiä joidenkin tuontituotteiden mallintamiseen ja yhdistettiin nämä tulokset panos-tuotos-kokonaismääriin (inventory). Tämä hybridimallinnuksen sovellus saattaa olla sopiva etenkin niiden maiden osalta, jotka tuovat tärkeitä materiaaleja ulkomailta (Suh et al. 2004, s. 660). Myös Architectural Institute of Japan suosittelee sen käyttöä rakennuksille LCA-ohjeissaan.

Panos-tuotos-pohjaisissa hybridimalleissa tärkeät panos-tuotos-sektorit on purettu tapauksissa, joissa sektoreille on saatavilla tarkempaa taloudellista dataa. Joshin (1999) tutkimuksessa ainoastaan yksi sektori on purettu käytettävissä olevista sektoreista. Tutkimuksessa tutkittiin erilaisia polttoainetankkeja elinkaarianalyysin avulla purkamalla vertailtavien tuotteiden valmistuksen panos-tuotos-sektori. Suhin et al (2004, s. 660) mukaan näin pystyttiin käyttämään tehokkaasti yksityiskohtaista prosessidataa ilman tuplalaskemisen vaaraa. On kuitenkin huomionarvoista, että kansalliset panos-tuotos-taulukot kuvaavat ainoastaan kansallisen talouden elinkaaren vaiheita ennen tuotteen siirtymistä kuluttajalle (Suh et al. 2004, s. 660). Tuotteen käyttö- ja hävitysvaihe tulisikin lisätä tuloksiin hajotetusta panos-tuotos-taulukosta.

Vaikka hybridi-LCA-menetelmät pystyvät yleistäen vähentämään mallintajan määrittelemästä rajanvedosta johtuvaa katkaisemisiongelmaa, prosessi- ja panos-tuotos-osioiden välisen rajan määrittely jää ratkaistavaksi. Yksi mahdollisuus on käyttää prosessidataa ainoastaan yhteen prosessiin ja täyttää loput prosessin panokset panos-tuotos-datalla. Tuloksena syntyvä LCI (life cycle inventory) saattaa olla hyvin erilainen

kuin hybridianalyysissä, jonka prosessiosiossa on käytetty satoja prosessianalyysijä. Ainoastaan muutamia prosesseja mallintavan hybridi-LCA-mallinnuksen tulokset ovat hyvin samankaltaisia panos-tuotos-LCA:n tulosten kanssa, mutta malli tarkentuu kun prosessiosion laajuus kasvaa ja prosessidatalla korvataan panos-tuotos-dataa. On kuitenkin huomioitava, että prosessiosion laajentaminen johtaa myös suurempiin lähtödatavaatimuksiin ja rajanvetokysymyksissä olisikin syytä pyrkiä tasapainoon prosessi- ja panos-tuotos-osioiden välillä (Suh et al. 2004, s. 661). Menetelmän jatkuvana vahvuutena on kuitenkin laskelman täydellisyys toimitusketjujen suhteen.

Hybridilaskelmissa panos-tuotos-osion kasautunutta dataa korvataan juoksevasti sopivalla sekä yksityiskohtaisella prosessidatalla tärkeimpien elinkaaren prosessien osalta. Näin mallin inventaari tulee askel askeleelta luotettavammaksi ja tarkemmaksi. Mikäli prosessidatan ja resurssien saatavuus on huonoa tai tarkkuuden tarvittava taso on saavutettu, prosessimallinnus voidaan katkaista ja korvata jäljelle jääneet toiminnot panos-tuotos-analyysillä. Rajojen määrittely voidaan näin räätälöidä sopivaksi yksityiskohtaisuuden, tarkkuuden, kustannusten tai työn määrän vaatimusten mukaan. Taulukko 2 esittelee yhteenvetona eri hybridi-LCA-mallien ominaisuuksia.

Menetelmä	Vahvuudet	Heikkoudet
Kerrostettu hybridimalli (tiered hybrid)	Helppokäyttöinen	Tuplalaskemisen ongelmat
Panos-tuotos-pohjainen hybridimalli	Hyvin dokumentoidut kirjallisuus, tietokannat ja case-tutkimukset  Tuplalaskennan välttäminen  Prosessiosa ja panos-tuotos-osa ovat esitetty johdonmukaisesti runkorakenteessa	Toistuvat virrat eivät ole riittävän hyvin kuvailtuja prosessivirtadiagrammissa  Käyttö- ja hävitysvaiheet liitetään ulkoisina pääarakenteeseen  Toistuvat päärakenteen ja käyttö- sekä hävitysvaiheen väliset virrat eivät ole riittävän tarkasti kuvailtuja  Pitää yhdistää muiden menetelmien kanssa, mikäli kansantalous on paljolti riippuvainen tuonnista
Integroitu hybridimalli	Johdonmukainen, matemaattinen runkorakenne koko elinkaarelle  Tuplalaskennan välttäminen  Analyyttisten työkalujen lisäämisen helppous	Käyttö suhteellisen monimutkaista  Suuret vaatimuksen datan ja ajankäytön suhteen

Taulukko 2 hybridimallien vahvuudet ja heikkoudet (mukaillen Suh et al.2004, s. 662.)

# 3. Käytetty LCA-malli ja tutkimuksen eteneminen

## 3.1 Case-alue

Tutkimuksen case-alue on Espooseen rakennettava, noin 500–600 asukkaan pientaloalue. Alueelle rakennetaan noin 70–160 neliömetrin kokoisia rivitalo- ja paritaloasuntoja sekä erillistaloja. Alueen kehitystyö alkoi kaavoituksella ja erilaisilla selvityksillä vuonna 2004 (Kuronen 2009). Alueen asemakaavasuunnittelun tavoitteena on mahdollistaa omaleimaisen pientaloalueen rakentaminen hyvien kulkuyhteyksien varrelle huomioiden alueen luonnonolot sekä tarvittava meluntorjunta. Tiiviistä yhdyskuntarakenteesta huolimatta aluetta ei ole aikaisemmin asemakaavoitettu.

Suunnittelualue on jaettu korttelisuunnitelmassa neljään suurkortteliin. Näiden muodostamisperusteina ovat ensisijaisesti sijainnit katuverkostossa, mutta suurkortteleiden välillä löytyy myös yhdistäviä tekijöitä kuten maastonmuodot sekä meluntorjunnasta johtuvat ratkaisut. Alueelle on tarkoitus luoda yhteinen yleisilme, mutta toisaalta myös muodostaa tonteittain toisistaan eroavia rakennuskokonaisuuksia.

Case-alueen kaupunkikuvallisen yleisilmeen muodostavat selkeäpiirteiset, värikkäät harjakattoiset pientalot, jotka nousevat maastonmuotoja myötäillen rinteille. Alueelle luodaan yhteistä yleisilmettä julkisivumateriaaleilla, julkisivujen sävyillä sekä kattomateriaaleilla ja –väreillä. Alueen tavoitteena on olla kaupunkikualtaan lämminhenkinen ja –sävyinen pientaloalue.

YIT Rakennus Oy:n arvion mukaan case-alueen rakennusten kustannusarvio on työ mukaan lukien noin 69,5 miljoonaa euroa. Työn osuus kustannuksista on noin 26,4 miljoonaa euroa. Ramboll Oy:n arvion mukaan case-alueen infrastruktuurin rakentamisen kokonaiskustannukset ovat noin 7 miljoonaa euroa. Koko rakentamisprojektin kustannukset ovat siis noin 76,5 miljoonaa euroa.

### 3.1.1 Case-alueen kalliolämpöjärjestelmä

Sasnauskaiten et al. (2007, s. 143-144) mukaan energiatehokkaita rakennuksia rakennettaessa oikeat päätökset tulee tehdä jo suunnitteluvaiheessa. Kylmän ilmaston maissa lämmitysjärjestelmät kuluttavat suuren osan rakennusten energiantarpeesta. Näiden järjestelmien suunnittelulla voidaankin vaikuttaa koko rakennuksen energiatehokkuuteen (Sasnauskaite et al. 2007, s. 143–144).



Asuntojen sekä julkisen sektorin rakennusten lämmitys aiheuttaa 18 prosenttia vuosittaisista hiilidioksidipäästöistä (Soukka et al. 2010, s. 1). Rakennusten lämmityksen suhteen tehtyjen ratkaisujen vaikutukset ovat merkittäviä ilmastonmuutoksen vaikutusten lieventämiseksi.

Soukka et al. (2010) on tutkinut artikkelissaan ”Carbon footprint of heating options for a new residential area” viittä erilaista asuinalueen lämmitysratkaisua case-alueella Penttilänrannassa, Joensuussa. Alue rakennetaan vuosina 2012–2037, joten pitkä ajanjakso hankaloittaa lämmitysenergian tarpeen arvioimista. Näin ollen energiankulutukselle muodostettiin maksimi- ja minimiskenaariot ja energiankulutusmalli rakennettiin omaksumaan eri kulutustasoja näiden välillä. Lämmitysvaihtoehtoja arvioitiin niiden merkittävimpien prosessien elinkaarimallinnuksella.

Soukan et al. (2010) tutkimuksessa neljä viidestä lämmitysratkaisusta perustui kaukolämpöön ja yksi matalalämpöverkkoon (low temperature network) sekä rakennuskohtaisiin lämpöpumppuihin. Ensimmäinen kaukolämpöratkaisu oli olemassa oleva, keskitetty CHP-voimalaitos kulutuspiikki- (peak load) sekä varmuusboilereilla (back up). Toisessa käytettiin biomassapohjaista tuplaboilerijärjestelmää kulutuspiikki- sekä varmuusboilerilla. Kolmannessa ratkaisussa oli biomassapohjainen pien-CHP-voimalaitos piikkikulutus- ja varmuusboilereilla. Neljäs eli viimeinen kaukolämpöön perustuvista ratkaisuista oli lämpöpumppu, jolla tuotetaan kaukolämpöä läheiseltä vedenpuhdistamolta virtaavasta vedestä. Matalalämpöverkkoon perustuvassa lämmitysratkaisussa rakennuskohtaiset lämpöpumput hyödynsivät samaa vesivirtausta vedenpuhdistamolta sillä erolla, että lämpö otettiin talteen jätevedestä lämmönsiirtimellä ja siirrettiin case-alueelle matalalämpöverkkoa hyödyntäen. (Soukka et al. 2010, s. 1.)

Soukan et al. (2010) tutkimuksen mukaan Penttilänrannan case-alueen vaihtoehtoista pienimmän hiilijalanjäljen muodosti pien-CHP-voimalaitos puista biomassaa käyttämällä. Se oli myös kallein vaihtoehto suurten investointi- ja ylläpitokustannustensa vuoksi. Sähköstä saadut tulot pienensivät muuttuvia kustannuksia, mutta ne eivät riittä tekemään voimalaitosta taloudellisesti kannattavaksi (feasible) vaihtoehdoksi. (Soukka et al. 2010, s. 2.)

Biomassaan perustuva lämmöntuotantolaitos oli toiseksi paras vaihtoehto hiilijalanjäljen suhteen. Tämä vaihtoehto oli taloudellisesti mahdollinen, mutta ei edullisin. Suhteellisen kalliit investointi- ja ylläpitokustannukset nostivat hieman kokonaiskustannuksia. (Soukka et al. 2010, s. 2.)

Vedenpuhdistamon vesivirtaamaa käytettiin lämmönlähteenä kahdessa eri vaihtoehdossa. Tutkimuksessa havaittiin kaukolämmön tuottamisen keskitetyllä lämpöpumpulla johtavan kulutuksesta riippumatta alhaisimpiin kokonaiskustannuksiin. Hiilijalanjäljen osalta vaihtoehto liittyy pitkälti käytetyn sähkön aiheuttamiin päästöihin. Suomen vuosittaisen päästökertoimen keskiarvoa (annual average emission factor) käyttämällä lämmitysratkaisu sijoittui kolmanneksi parhaaksi hiilijalanjäljen suhteen. Lämmitysratkaisun päästöt olivat merkittävästi suuremmat kuin biomassaan perustuvien vaihtoehtojen ja vain hieman matalammat kuin rakennuskohtaisia lämpöpumppuja hyödyntävät ratkaisut. (Soukka et al. 2010, s. 2.)

Rakennuskohtaisia lämpöpumppuja käytettiin toisessa vedenpuhdistamon vesivirran lämpöä hyödyntävässä ratkaisussa. Veden kierrättämiseen tarkoitettujen pumppujen energiankulutus oli huomattavasti suurempaa kuin kaukolämpöratkaisuissa matalalämpöverkon ominaisuuksista johtuen. Seurauksena oli korkeampi energian kokonaiskulutus verrattuna vedenpuhdistamoaa hyödyntävään kaukolämpöratkaisuun. Myös rakennuksessa ylläpidettävät lämpötilat vaikuttivat järjestelmän suorituskykyyn. (Soukka et al. 2010, s. 2.)

Keskitetty CHP-voimalaitos kulutuspiikki- ja varmuusboilereilla aiheutti suurimman hiilijalanjäljen, vaikka lähes 60 prosenttia kokonaispolttoaineidenkulutuksesta oli peräisin uusiutuvista energianlähteistä. Elinkaaren kustannukset laskettiin nykyisistä lämmöntarjoajien hinnastoista. (Soukka et al. 2010, s. 2.)

Tutkimuksen case-alueen lämmitysratkaisuna on tarkoitus käyttää kalliolämpöä. Tekniikka & Talous-lehden ”Fortum tekee kalliolämmöstä monopolin”-artikkelin mukaan hankkeen tavoitteena on alueen lämmöntuotanto ympäristöystävällisesti ja kannattavasti. Fortum lämpöliiketoiminnan myyntijohtajan Jussi Ojasen mukaan ratkaisulla päästään tehokkaampaan lämmöntuotantoon perinteiseen maalämpöön verrattuna.

Kalliolämpöjärjestelmät perustuvat syvällä kalliassa olevan geolämmön hyödyntämiseen porakaivojen avulla. Kallioperän lämpötila on suhteellisen vakio jo 15 metrin syvyydessä. Sadan metrin syvyydessä Suomen kallioperässä lämpötila on noin seitsemästä kahdeksaan astetta, 1450 metrin syvyydessä 22 astetta ja 2500 metrin syvyydessä 40 astetta. Kalliolämmön hyödyntämiseksi porattavien kaivojen syvyys on yleensä 100–200 metriä. (GeoFoorumi 2008, s. 8.)

Kalliolämmön kantajana käytetään vettä, jota kalliomassa lämmittää kaivoreiässä. Vesi luovuttaa lämpöä kaivossa olevaan lämmönkeruuputkistoon ja putkiston sisältämä etanoli-vesiliuos kierrätetään ylös luovuttamaan lämpöä lämpöpumpulle. Viilentynyt liuos kierrätetään takaisin kaivoon lämpenemään.

Vaikka lämpötilaerot eivät ole kovin suuret, muutamankin asteen ero riittää sähköllä toimivalle lämpöpumpulle. Lämpöpumppu puristaa lämmön etanoliliuoksesta ja tuottaa näin lämpöä sekä viilentää sivutuotteena vettä. Lämmitys kalliolämmöllä ei ole kokonaisuudessaan uusiutuvaa energiaa, koska se tarvitsee sähköä. Se on ennemminkin keino hyödyntää uusiutuvaa energiaa tehokkaasti ja pienellä sähkönkulutuksella. Yleensä järjestelmän pyörittämiseen menee noin kolmannes siitä energiamäärästä, jota järjestelmä kokonaisuudessaan tuottaa. Kaksi kolmasosaa on siis ilmaista energiaa. Tällöin kalliolämmityksen lämpökerroin on kolme.

Kalliolämpöjärjestelmän lämpökerroin on vielä parempi suurissa rakennuskohteissa, kuten ostoskeskuksissa, liiketaloissa tai sairaaloissa, joissa on sekä lämmitys- että viilennystarvetta. Kalliolämmitystä voidaan käyttää molempiin toimintoihin, jolloin lämpökerroin paranee. Viilennys toimii kun vettä käytetään kalliokaivosta suoraan ilman lämpöpumppua. Veden lämpötila on tällöin korkeintaan kymmenen astetta, joten se sopii hyvin viilennykseen. Viilennyksen jälkeen lämmennyt vesi pumpataan takaisin kaivoon ja se lämmittää kallioperää tavallaan ”ladaten” sitä seuraavaa lämmitystarvetta varten. Mikäli rakennuksen eri tiloissa tarvitaan yhtä aikaa sekä viilennystä että lämmitystä, toisista rei’istä otetaan lämpöä kalliosta lämpöpumpun kautta ja toisista otetaan kylmää vettä viilennykseen. Ihanteellinen paikka energiakaivoille suurissa kohteissa on pysäköintialueen alapuoli (GeoFoorumi 2008, s. 8-9.). Näin tumma asfaltti tehostaa kesällä aurinkoenergian imeytymistä ja talvella toimii jäähtymistä hidastavana kantena.

### **3.2 Tutkimuksen elinkaarimalli**

Tutkimuksessa käytettävät tutkimusmenetelmät ovat IO-LCA sekä hybridi-LCA, jotka lukeutuvat Creswellin (2009) määrittelemään mixed methods-tutkimusmetodikategoriaan. Case-alueen rakentamisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt mallinnetaan ensin panos-tuotos-menetelmällä karkean arvion saamiseksi. Carnegie Mellon-yliopiston mukaan EIO-LCA-verkkosovellus sopii hyvin hiilidioksidipäästöjen nopeaan mallintamiseen. Junnilan (2006) mukaan Yhdysvaltojen kansantaloutta mallintava EIO-LCA-menetelmä sekä prosessi-LCA-menetelmä sopivat myös Eurooppalaisten palvelualan yritysten ympäristön kannalta tärkeimpien

toimintojen selvittämiseen. Junnilan (2006) mukaan olisi myös mielenkiintoista selvittää miten hyvin menetelmät sopivat muiden alojen aiheuttamien päästöjen mallintamiseen.

EIO-LCA-sovelluksesta käytetään vuoden 2002 Yhdysvaltojen kansantaloudelle tarkoitettua versiota. Junnilan et al. (2006) tutkimuksen mukaan EIO-LCA:n Yhdysvaltojen vuoden 1997 kansantaloudelle tarkoitettun mallin hiilidioksidiprofiili on melko samanlainen Suomen kansantalouden sektorien hiilidioksidiprofiilien kanssa. Yhdysvalloille tarkoitettu vuoden 1997 malli on hyvin samankaltainen vuoden 2002 mallin kanssa, joten myös se soveltuu rakennusprojektin päästöjen karkeaan arviointiin. Heinosen ja Junnilan (2010) tutkimuksessa vedotaan Yhdysvaltojen ja Suomen kansantalouden riittävän suureen samankaltaisuuteen, jotta Yhdysvaltojen kansantaloudelle suunniteltua mallinnustyökalua voidaan käyttää myös Suomessa.

EIO-LCA-mallinnuksen lisäksi case-alueen rakentamisen hiilidioksidipäästöt mallinnetaan hybridi-LCA-menetelmällä, jolla pystytään yhdistämään sekä EIO-LCA- että prosessi-LCA-menetelmien vahvuudet. Tutkimuksessa käytettävä hybridi-LCA-menetelmän tyyppi on kerrostetun hybridianalyysin sovellettu versio (modified tiered hybrid analysis). EIO-LCA US 2002 Industry Benchmark Model muodostaa hybridimenetelmän pohjan, sillä Heinosen ja Junnilan (2010) mukaan mallin sektorivalikoima on vähiten kasautunut (most disaggregated). Lisäksi Heinosen ja Junnilan (2010) perusteella se soveltuu hyvin Suomen kansantalouden kuvaamiseen, sillä yli 50 prosenttia sekä yksityisestä, että julkisesta kulutuksesta on tuontipohjaista (Statistics Finland, [www.stat.fi](http://www.stat.fi) (15.12.2009))

Valuuttakurssit sekä inflaatio liittyvät vuoden 2002 Yhdysvaltojen kansantalouteen tarkoitettun mallinnustyökalun käyttämiseen Suomessa vuonna 2010. Heinosen ja Junnilan (2010) mukaan inflaatiolla ja valuuttakursseilla ei kuitenkaan ole suurta vaikutusta mallin sisällä. Tutkimuksessa käytetään International Comparison Programin (ICP) ostovoimapariteettitaulukkoa vuodelta 2005 (purchasing power parity, PPP) tulosten muuntamiseksi Suomen kansantaloutta vastaaviksi. ICP:n mukaan USA – Suomi PPP-luku on 0,98 (International Comparison Program). Muun muassa Weber et al. (2007) on käyttänyt ostovoimapariteettia mallinnustulostensa käsittelyssä.

Tutkimuksessa käytettävässä hybridimallissa korvataan EIO-LCA-menetelmällä selvitettyt tärkeimmät sektorit prosessidatalla. Kuten Heinosen ja Junnilan (2010) tutkimuksessa, myös tässä tutkimuksessa on

tarkoitus hyödyntää mahdollisimman hyvin EIO-LCA-menetelmän vahvuuksia. Siksi hybridimalli pohjautuu vahvasti EIO-LCA-menetelmään.

Case-alueelle suunnitellun kalliolämpöjärjestelmän rakentamisen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen mallintamisessa käytetään EIO-LCA-sovellusta, sillä lähtötietojen tarkkuus on hyvin karkea. Lisäksi haastatteluun perustuvia järjestelmän rakentamisen kustannuslukuja ei pystytä jaottelemaan eri toiminnoille tai rakennusmateriaaleille. EIO-LCA-menetelmällä pystytään kuitenkin arvioimaan kalliolämpöjärjestelmän aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen suuruusluokka järjestelmän rakentamiseen tarvittavan investointiarvion suuruuden perusteella.

### **3.3 Rakentamisen EIO-LCA-mallinnus**

Rakennusprojektin EIO-LCA-mallinnuksen lähtötietoina toimii YIT Rakennus Oy:n arvioima kustannusdata. Rakennusten rakennusprojektin kustannusdata oli arvioitu lähtötiedoissa euromääräisesti sekä toimintojen että rakennusmateriaalien ja palveluiden perusteella. Case-alueen rakennusten rakentamisen kustannukset ovat YIT Rakennus Oy:n arvion mukaan yhteensä 69,39 miljoonaa euroa. Infrastruktuurin rakentamisen kustannusarvio saatiin toiminnoittain jaoteltuna Ramboll Finland Oy:ltä. Infrastruktuurin rakentamisen kustannukset ovat yhteensä 6,93 miljoonaa euroa. Yhteensä case-alueen rakentamisen kustannukset ovat siis noin 76,32 miljoonaa euroa. (YIT Rakennus Oy, Ramboll Finland Oy)

Rakennusprojektin EIO-LCA-mallinnus eteni kolmessa vaiheessa. Infrastruktuurin rakentaminen mallinnettiin erikseen. Rakennusten rakentamisessa luotiin ensin karkea malli vain yhtä EIO-LCA-sektoria käyttäen. Mallista tehtiin tarkempi jakamalla kustannustiedot rakennusmateriaalien perusteella omiin sektoreihinsa.

Ensimmäinen tutkimuksen EIO-LCA-mallinnuksista suoritettiin rakennustoimintojen perusteella. Lähtötietojen toimintojen tarkkuus huomioiden vuoden 2002 EIO-LCA-työkalu tarjoaa kustannuksille ainoastaan yhden toimivan sektorin: ”residential permanent site single- and multi-family structuresin”. Sektori mallintaa asuinrakennusten rakentamistoimintaa yleisesti ja siihen kuuluu EIO-LCA-työkalun kuvauksen mukaan muun muassa asuinrakennusten rakentaminen, asuntojen muutosrakentaminen (residential remodelers), maaston muokkaus, perustusten rakentaminen, teräsrakenteiden ja betonielementtien rakennus, kehystys ja laudoitus, lasitus, kattojen rakentaminen, sähkötyöt, LVI-työt, maalaus, laatoitus ja muuraus sekä rakennustyömaalla tehtävät valmistelut (Carnegie Mellon-yliopisto). Lisäksi sektoriin kuuluu paljon infrastruktuurin rakentamista. Tällä EIO-

LCA-mallinnuksella saatiin yleiskuva case-alueen rakennusten rakentamisesta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen mittakaavasta. Tilanteissa, joissa tarkempaa kustannusdatan jaottelua ei ole saatavissa, joudutaan usein käyttämään ainoastaan yhtä sektoria. Tutkimuksen tavoitteiden kannalta on oleellista tietää kuinka hyvin pelkkä EIO-LCA:n asuinrakennusten rakentamiseen tarkoitettu sektori pärjää vertailussa tarkemmin sektoreittain jaotellulle EIO-LCA-mallinnukselle.

Tutkimuksen toinen EIO-LCA-mallinnus perustui materiaalien mukaan jaotelluille rakennusprojektin kustannuksille. YIT Rakennus Oy arvioi case-alueen rakennusprojektin kahdentoista tärkeimmän rakennusmateriaalin kustannukset sekä palveluiden eli työn kokonaiskustannukset. Kokonaiskustannusten ja YIT Rakennus Oy:ltä saatujen, eriteltyjen kustannusten erotus sijoitettiin muut-kategoriaan. Tärkeimpien materiaalien ja palveluiden kustannusmäärien perusteella mallinnusta pystyttiin jakamaan huomattavasti tarkemmin eri EIO-LCA-sektoreille. Muiden kustannusten aiheuttamat hiilidioksidipäästöt mallinnettiin yleisellä asuinrakennussektorilla ”residential permanent site single- and multi-family structures”, jota käytettiin ensimmäisessä EIO-LCA-mallinnuksessa koko rakennusten rakentamisprojektin mallintamiseen. Materiaaleittain eriteltyt kustannustiedot on esitetty taulukossa 3.

<b>Materiaali</b>	<b>M€</b>
Puutavara	4,96
Betoni	3,68
Teräs	3,16
Muuraus (tiilet + laasti)	2,22
LVI-materiaali	2,72
Sähkömateriaali	1,92
Ikkunat ja ovet	1,88
Kalusteet	0,97
Vedeneristeet	0,71
Kodinkoneet	0,59
Muoviputket ja kaivot	0,51
Lämmöneristeet	0,47
Palvelujen osuus hankkeelle (ei sis. työn johtoa)	26,40
Energia	1,2
Muut	18,00
<b>Yhteensä</b>	<b>69,39</b>

Taulukko 3 Materiaaleittain eriteltyt kustannustiedot

Energian käytöllä on suuri vaikutus rakennusprojektien hiilidioksidipäästöihin. YIT Rakennus Oy:n arvion mukaan case-alueen rakennusten kustannuksista sähköenergian osuus on noin 1,2 miljoona

euroa. Tämä osuus vähennettiin muut-kategoriasta ja mallinnettiin sektorilla ”power generation and supply”. Käytettävän energian erottaminen muista kustannuksista paransi huomattavasti EIO-LCA-mallin tarkkuutta. Lopullisessa rakennusten rakentamisen EIO-LCA-mallissa on 12 eri rakennusmateriaalia jaoteltuina omille sektoreilleen. Lisäksi energian sekä palvelujen osuus on jaoteltu niille tarkoitettuihin sektoreihin. Näihin 14 sektoriin kuulumattomien rakennuskustannusten toimintojen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt on mallinnettu ”residential permanent site single- and multifamily structures-sektorilla”.

Case-alueen infrastruktuurin EIO-LCA-mallinnus suoritettiin Ramboll Finland Oy:ltä saatujen kustannustietojen mukaan. Kustannukset oli jaoteltu eri infrastruktuurikohteisiin tarkoitettujen materiaalien sekä palveluiden suhteen. Yhteensä case-alueen infrastruktuurin rakentamiskustannukset ovat noin 6,93 miljoonaa euroa. Johtuen infrastruktuurin materiaalikustannusten pienestä suhteellisesta kokonaissummasta koko case-alueen rakennusprojektiin verrattuna, mallinnettiin kaikki rakennusmateriaalit vesihuolto ja puistoraitteja lukuun ottamatta ”nonresidential maintenance and repair-sektorilla”. Palvelut jaettiin kolmeen eri kategoriaan. Mallinnuksessa kustannukset on jaoteltu eri toimintojen perusteella niille sopiviin EIO-LCA-sektoreihin.

### **3.4 Case-alueen hybridi-LCA-mallinnus**

Case-alueen hiilidioksidipäästöjen hybridi-LCA-mallinnukseen käytettiin sovellettua kerrostettua hybridi-LCA-mallia, jota kuvailtiin tutkimusmenetelmä-kappaleessa. Mallin pohjan muodostaa EIO-LCA-menetelmä ja hiilidioksidipäästöjen mukaan tärkeimmät sektorit korvataan tarkemmalla prosessidatalla.

Hybridimallinnuksen ensimmäinen vaihe oli mallin rakenteen suunnittelu. Käytettävä tutkimusmetodi eli sovellettu kerrostettu hybridi-LCA-mallinnus perustuu EIO-LCA-pohjaan, jonka sektoreista mallinnustuloksen kannalta tärkeimpiä korvataan paikallisella ja ajankohtaisella prosessidatalla.

Rakennusprojektin EIO-LCA-mallinnuksen perusteella hiilidioksidipäästöjen osalta oleellisimpia sektoreita ovat teräs, energia sekä betoni. Teräksen osuus rakennusten rakentamisen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä on EIO-LCA-mallinnuksen mukaan noin kymmenen prosenttia, energian noin 17 prosenttia ja betonin noin 11 prosenttia. Yhdessä nämä kolme sektoria kattavat EIO-LCA-mallinnuksen perusteella noin 37 prosenttia rakennusten rakentamisesta aiheutuvista

hiilidioksidipäästöistä ja 34 prosenttia koko case-alueen rakentamisesta aiheutuvista hiilidioksidipäästöistä.

Rakennusprojektissa tarvittavan sähköenergian kokonaismäärä laskettiin kustannusten ja ostohinnan perusteella. YIT Rakennus Oy:n arvion mukaan verolliset nimelliset kokonaishinnat (siirto- ja energiahinnat) ovat keskimäärin 102 €/MWh. Rakennusprojektissa tarvittava sähköenergian määrä on siis rakennusten osalta:

$$1\,200\,000\text{ €} / 102\text{ €/MWh} \approx 11\,765\text{ MWh}$$

Tutkimuksessa oletetaan Espoossa käytettävän sähköenergian tulevan Fortumin Suomenojan voimalaitoksesta. Suomenojan voimalaitos tuottaa sähköä ja lämpöä yhteistuotantona. Suomenojan voimalaitoksen lähialueella tarvittavan kaukolämmön tuotanto syntyy sähköntuotannon sivutuotteena. Sähköenergian tarpeen kasvaessa ylimääräinen lämpö käytetään hyväksi jäähdytykseen ”kaukokylmä-menetelmällä” tai johdetaan mereen. Tutkimuksessa oletetaan, että Espoossa käytetään Fortumin Suomenojan voimalaitoksen päästöprofiilin mukaista sähköenergiaa. Heinonen ja Junnila (2010) ovat käyttäneet tutkimuksensa case-tapauksissa samaa olettamusta.

Energiaa Uudellamaalla-työryhmän verkkosivujen mukaan Fortumin Suomenojan voimalaitos tuottaa kaukolämpöä Espoon, Kauniaisten ja Kirkkonummen asukkaille sekä sähköä valtakunnan verkkoon. Voimalaitoksen yhteistuotanto kattaa nykyään noin 80 prosenttia Espoon tarvitsemasta kaukolämmöstä. Pääosa Espoon kaukolämmöstä tuotetaan Suomenojalla hiiltä ja maakaasua käyttävissä yhteistuotantolaitoksissa. Suomenojan voimalaitoksen kaukolämpöteho on noin 560 MW ja sähköteho noin 350 MW. (Energiaa Uudellamaalla)

Fortumin julkaisun ”Emissions into air from Fortum's plants in 2009” mukaan Suomenojan voimalaitos tuotti vuonna 2009 yhteensä 817000 tonnia hiilidioksidipäästöjä. Fortumin Power and heat production at Fortum's plants in 2009 mukaan Suomenojan voimalaitos tuotti vuonna 2009 1022 MWh sähköä ja 1692 MWh lämpöä. Yhteensä Suomenojan voimalaitos tuotti siis 2714 GWh sähköä ja lämpöä. Tuotannon hiili-intensiteetti saadaan laskemalla hiilidioksidipäästöjen ja energiantuotannon suhde:

$$817\,000\text{ t} / 2714\text{ GWh} \approx 301\text{ t} / \text{GWh} = 301\text{ kg} / \text{MWh} = 301\text{ g} / \text{kWh}$$

Case-alueen rakennusten rakentamisessa tarvittavan betonin sekä teräksen valmistuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt selvitettiin RT-



Ympäristöselosteiden avulla. Rakennussäätiö RTS:n mukaan: ”RT- Ympäristöselosteet noudattavat kansainvälisiä standardeja ja sisältävät vertailukelpoista ympäristötietoa rakennustuotteista. RT- Ympäristöselosteiden tarkoituksena on edistää rakentamista, joka perustuu elinkaariominaisuuksiltaan kestäviin ja ekologisesti toimiviin ratkaisuihin. RT-Ympäristöselosteet ovat vapaaehtoisia ja julkisia dokumentteja, joista löytyy rakennusten käyttäjille, suunnittelijoille ja rakentajille keskenään vertailukelpoista ja puolueetonta tietoa rakennusmateriaalien ympäristövaikutuksista ja elinkaariominaisuuksista” (Rakennustietosäätiö RTS).

”RT-Ympäristöseloste perustuu standardien ISO 14020:n ja ISO 14040:n mukaiseen kansalliseen menetelmäohjeeseen (Menetelmä rakennustuotteiden ympäristöselosteiden laadintaan ja rakennusten ympäristövaikutusten arviointiin). Menetelmäohjeen laadinnassa on otettu myös huomioon standardiluonnos ISO CD 21930. Ohje on kehitetty yhteistyössä Rakennusteollisuus RT ry:n, Rakennustietosäätiö RTS:n, Valtion Tieteellisen Tutkimuskeskuksen (VTT) sekä rakennusalan yritysten kanssa.” (Rakennustietosäätiö RTS)

”Rakennustuotteen ympäristöselosteessa eritellään tuotteen ympäristövaikutuksia kuvaavia ominaisuuksia, joita ovat mm. energian käyttö, päästöt ilmaan ja veteen sekä luonnon resurssien käyttö. Tuotteiden ja rakenteiden ympäristöominaisuuksien vertailun tulee perustua samaan toiminnalliseen yksikköön. Kulloinkin käytettävää yksikköä ei ole esitetty ympäristöselosteissa, vaan se valitaan erikseen. Ympäristöselosteiden ympäristökuormitustietoja käytetään ensisijassa koko rakennuksen elinkaarilaskennassa ja rakenteiden ympäristöprofiilien laadinnassa.” (Rakennustietosäätiö RTS)

RT-Ympäristöselosteiden tiedot kattavat tuotteiden elinkaarten vaiheet raaka-ainehankinnasta tuotteiden valmistaneiden tehtaiden portille. RT- Ympäristöselosteiden tiedoista hyödynnettiin hybridi-LCA-mallinnuksessa rakennusmateriaalien tiheyttä sekä hiilidioksidipäästöjä valmistettua painoyksikköä kohden. YIT Rakennus Oy:ltä saaduissa lähtötiedoissa rakennusten rakentamisessa tarvittava betonin määrä oli ilmoitettu tilavuudessa sekä tarvittavan teräksen massa.

Lähtötiedoissa betoni oli jaoteltu seinäelementteihin, ontelo- ja kuorilaattoihin; palkkeihin, pilareihin ja jännebetonipalkkeihin; harkkoihin, valmisbetoniin sekä pihakiviin. Jokaiselle näille löytyi RT- Ympäristöselosteiden joukosta sopiva seloste. Voimassa olevat RT-

Ympäristöselosteet ovat saatavilla Internetissä osoitteessa  
<http://www.rts.fi/ymparistoseloste/voimassaolevatympselosteet.htm>.

Seinäelementtien valmistuksen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen laskemiseen käytettiin ei-kantavan Sandwich elementin ympäristöselostetta, joka on laadittu Parma Oy:n, Mikkelin Betoni Oy:n ja Lujabetoni Oy:n ja tiedoista. YIT Rakennus Oy:n tietojen mukaan case-alueen rakennusten rakentamisessa käytetään 6262,3 m<sup>3</sup> seinäelementtejä. RT-Ympäristöselosteen mukaan seinäelementtien tiheys on 2400 kg/m<sup>3</sup> ja CO<sub>2</sub>-päästöt 250 g/kg. Rakennusten rakentamisessa tarvittavien seinäelementtien valmistuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat siis:

$$6262,3 \text{ m}^3 \times 2400 \text{ kg/m}^3 \times 250 \text{ g/kg} = 3\,757\,380\,000 \text{ g} = 3757,38 \text{ t}$$

Ontelo- ja kuorilaattojen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt on laskettu ontelolaatan ympäristöselosteen perusteella, joka on laadittu Parma Oy:n ja Lujabetoni Oy:n tiedoista. YIT Rakennus Oy:n mukaan rakennusten rakentamisessa tarvitaan yhteensä 2419,1 m<sup>3</sup> ontelo- ja kuorilaattoja. RT-Ympäristöselosteen mukaan 265mm ontelolaattojen tiheys on 360 kg/m<sup>2</sup> ja CO<sub>2</sub>-päästöt 140 g/kg. Ontelo- ja kuorilaattojen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat siis:

$$2419,1 \text{ m}^3 \times (360 \text{ kg/m}^2 / 0,265 \text{ m}) \times 140 \text{ g/kg} \approx 460\,085\,434 \text{ g} \approx 460,09 \text{ t}$$

Palkkien, pilarien ja jännebetonipalkkien aiheuttamat hiilidioksidipäästöt on laskettu jännebetonipalkin ympäristöselosteen perusteella, joka on laadittu Parma Oy:n, Lujabetoni Oy:n ja Betsset Oy:n tiedoista. YIT Rakennus Oy:n mukaan rakennusten rakentamisessa tarvitaan yhteensä 81 m<sup>3</sup> palkkeja, pilareita ja jännebetonipalkkeja. Jännebetonipalkin tiheys on RT-Ympäristöselosteen mukaan 2520 kg/m<sup>3</sup> ja CO<sub>2</sub>-päästöt 220 g/kg. Palkkien, pilareiden sekä jännebetonipalkkien aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat:

$$81 \text{ m}^3 \times 2520 \text{ kg/m}^3 \times 220 \text{ g/kg} = 4\,490\,640 \text{ g} \approx 44,91 \text{ t}$$

YIT Rakennus Oy:n arvion mukaan case-alueen rakennusten rakentamisessa tarvitaan yhteensä 877,5 m<sup>3</sup> harkkoja. Harkkojen valmistuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt on laskettu H+H Siporex Oy:n valmistaman raudoittamattoman Siporex-höyrykarkaistun kevytbetoniharkon RT-Ympäristöselosteen avulla. Höyrykarkaistun kevytbetoniharkon tilavuuspaino on 400 kg/m<sup>3</sup> ja hiilidioksidipäästöt 265 g/kg. Harkkojen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat:

$$877,5 \text{ m}^3 \times 400 \text{ kg/m}^3 \times 265 \text{ g/kg} = 93\,015\,000 \text{ g} \approx 93,02 \text{ t}$$

Valmisbetonin valmistuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt on laskettu Lohja Rudus Oy Ab:n, Lujabetoni Oy:n ja Betsset Oy:n tiedoista muodostetun Valmisbetoni K35:n RT-Ympäristöselosteen avulla. YIT Rakennus Oy:n mukaan case-alueen rakennusten rakentamisessa tarvitaan 6427 m<sup>3</sup> valmisbetonia. Ympäristöselosteen mukaan Valmisbetoni K35:n tiheys on 2400 kg/m<sup>3</sup> ja CO<sub>2</sub>-päästöt 110 g/kg. Valmisbetonin valmistuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat siis:

$$6427 \text{ m}^3 \times 2400 \text{ kg/m}^3 \times 110 \text{ g/kg} = 1\,696\,728\,000 \text{ g} \approx 1696,73 \text{ t}$$

Viimeiset case-alueen rakennusten rakentamisessa tarvittavat betonimateriaalit ovat pihakivet. Laskennassa käytetty Betonisten Pihakivien RT-Ympäristöseloste on laadittu Abetoni Oy:n ja Lemminkäinen Oy:n tiedoista. YIT Rakennus Oy:n mukaan projektissa tarvitaan 257,6 m<sup>3</sup> pihakiviä. Pihakivien tiheys on ympäristöselosteen mukaan 2239 kg/m<sup>3</sup> ja CO<sub>2</sub>-päästöt 120 g/kg. Case-alueen rakennusten rakentamisessa tarvittavien pihakivien valmistuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat:

$$257,6 \text{ m}^3 \times 2239 \text{ kg/m}^3 \times 120 \text{ g/kg} = 69\,211\,968 \text{ g} \approx 69,21 \text{ t}$$

Teräs oli jaoteltu YIT Rakennus Oy:ltä saaduissa tiedoissa betoniteräksiin, pelti- ja muotolevyihin sekä teräsputkipalkkeihin, paaluihin ja profiileihin. Betoniteräksien lähtötietoihin on sisällytetty betonielementeissä olevat teräkset, joiden valmistuksessa syntyvät hiilidioksidipäästöt on jo huomioitu betonielementtien RT-Ympäristöselosteessa.

Betonielementeissä olevien terästen massa täytyi laskea, jottei niiden aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä huomioitaisi kahteen kertaan. Lounamaan (2010) mukaan Sandwich-seinäelementin (Sandwich-wall) yhdessä kuutiometrissä on yhteensä 28 kg vahvennusterästä (reinforcements), 12 kg ruostumatonta terästä ja 9 kg muita teräksiä. Yhteensä 6262,3 m<sup>3</sup>:ssä seinäelementtejä on terästä:

$$6262,3 \text{ m}^3 \times (28 \text{ kg} + 12 \text{ kg} + 9 \text{ kg}) = 306\,852,7 \text{ kg}$$

Ontelolaatoissa olevien teräsrakenteiden massa on myös laskettu Lounamaan (2010) tietojen mukaan. Lounamaan (2010) perusteella ontelolaatan (hollow-core slab) yhdessä kuutiometrissä on yhteensä 27 kg jänneterästä ja 2 kg muita teräksiä. Yhteensä 2419,1 m<sup>3</sup>:ssä ontelo- ja kuorilaattoja on terästä:

$$2419,1 \text{ m}^3 \times (27 \text{ kg} + 2 \text{ kg}) = 70\,153,9 \text{ kg}$$

Yhteensä betonielementeissä on terästä:

$$306\,852,7\text{ kg} + 70\,153,9\text{ kg} = 377\,006,6\text{ kg}$$

YIT Rakennus Oy:n mukaan case-alueen rakennusten rakentamisessa tarvitaan 869781,2 kg betoniterästä. Betonielementeissä niistä on 377 006,6 kg ja niiden valmistuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt on jo laskettu betonielementtien yhteydessä. Jäljelle jäävien terästen massa on:

$$869\,781,2\text{ kg} - 377\,006,6\text{ kg} = 492\,774,6\text{ kg} = 492,7746\text{ t}$$

Betoniterästen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen laskemiseen on käytetty Outokummun Cold Rolled 1.4301 Stainless Steelin ympäristöraporttia, joka kattaa tuotteen elinkaaren vaiheet raaka-aineiden hankinnasta valmiiseen tuotteeseen saakka. Ympäristöraportin mukaan terästonnin valmistus tuottaa 6400 kg hiilidioksidia. Rakennusten rakentamisessa tarvittavien betoniterästen valmistuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat siis:

$$492,7746\text{ t} \times 6400\text{ kg/t} = 3\,153\,757,44\text{ kg} \approx 3\,153,76\text{ t}$$

Rakennusten rakentamisessa tarvittavien pelti- ja muotolevyjen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen laskemisessa käytettiin Rautaruukki Oyj:n Maalipinnoitettujen teräksisten rakennustuotteiden RT-Ympäristöselostetta. Sen mukaan maalipinnoitettujen teräksisten rakennustuotteiden valmistaminen tuottaa 1150 g CO<sub>2</sub>-päästöjä teräskiloa kohden. YIT Rakennus Oy:n mukaan rakennusprojektissa tarvittavien pelti- ja muotolevyjen massa on 347 652,4 kg. Rakennusprojektissa tarvittavien pelti- ja muotolevyjen valmistuksessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen määrä on:

$$347\,652,4\text{ kg} \times 1150\text{ g/kg} = 399\,800\,260\text{ g} \approx 399,80\text{ t}$$

YIT Rakennus Oy:n mukaan case-alueen rakennusten rakentamisessa tarvitaan yhteensä 55435,5 kg teräsputkipalkkeja, -paaluja ja -profiileita. Niiden valmistamisessa aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen laskemiseen käytettiin Rautaruukki Oyj:n Teräsputkipalkkien, -paalujen ja -profiilien RT-Ympäristöselostetta. Sen mukaan teräsputkipalkkien, -paalujen ja -profiileiden valmistuksessa syntyy kiloa kohden 1070 g hiilidioksidipäästöjä. Rakennusten rakentamisessa syntyy näiden rakennustuotteiden valmistuksen kautta hiilidioksidipäästöjä:

$$55\,435,5\text{ kg} \times 1070\text{ g/kg} = 59\,315\,985\text{ g} \approx 59,32\text{ t}$$

### 3.5 Kalliolämpöjärjestelmän EIO-LCA-mallinnus

Case-alueelle rakennettavan kalliolämpöjärjestelmän EIO-LCA-mallinnuksen teoreettiset lähtötiedot saatiin haastattelemalla YIT Rakennus Oy:n hankekehityspäällikköä Matti Kurosta.

Kalliolämpöjärjestelmän rakennuksen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen mallinnuksessa selvitettiin ensin hankkeen kustannukset.

Case-alueelle on tulossa rakennusoikeutta noin 35400 m<sup>2</sup>. Matti Kuronen esitti case-alueen kalliolämpöjärjestelmän suhteen kaksi mahdollista skenaariota. Skenaariossa A liittymismaksu on alhaisempi, mutta kiinteä tehomaksu on suurempi kuin skenaariossa B. Energiamaksut ovat kummassakin ratkaisussa suunnilleen samansuuruiset ja niitä ei lasketa investointiin mukaan, koska niillä oletetaan katettavan kalliolämpöjärjestelmän toiminnassa tarvittava sähköenergia.

Skenaariossa A Kuronen arvioi case-alueen kalliolämpöjärjestelmän liittymismaksuksi kokonaisuudessaan noin 600 000 euroa. Tällöin tehomaksu olisi noin 14 500 euroa vuodessa. Skenaariossa B liittymismaksu olisi noin 878 000 euroa ja tehomaksu 10 600 euroa vuodessa.

Liittymismaksun ja tehomaksun kautta laskettiin kalliolämpöjärjestelmän investointikustannukset käyttäen 14 prosentin korkokantaa. Liittymismaksu oletettiin maksettavan heti ja tehomaksut diskontattiin nykyhetkeen. Eri skenaarioiden välillä päästiin samaan kokoluokkaan eli noin 1,63 miljoonaan euroon 40 vuoden investointiajalla. Investoinnin suuruudeksi koko case-alueella tuli siis noin 46 euroa kerrosneliometriä kohden. Kurosen mukaan kalliolämpöjärjestelmän ylläpitokustannusten osuus ei ole suuruudeltaan merkittävä investointilaskelman kannalta.

Kalliolämpöjärjestelmän rakentamisen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen määrä mallinnettiin kokonaisuudessaan infrastruktuurin rakentamiseen suunnatulla EIO-LCA-sektorilla ”nonresidential maintenance and repair”, koska yksityiskohtaisempaa kustannusjaottelua ei ollut saatavilla.

## 4. Tulokset

### 4.1 EIO-LCA-mallinnus

Asuinalueiden rakentamiselle suunnatulla EIO-LCA-sektorilla ”residential permanent site single- and multifamily structures” mallinnettaessa saadaan case-alueen rakennusten rakentamisen aiheuttamiksi hiilidioksidipäästöiksi yhteensä 45 700 tonnia. Lähtötiedot sekä eri toimintojen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt on esitetty taulukossa 4.

Materiaali	EIO-LCA-sektori	M€	EUR-jak. %	Yht. t CO2e	CO2-jak. %
Maa- ja pohjarakennus	Residential permanent site single- and multi-family structures	13,38	19 %	8820	19 %
Perustukset	Residential permanent site single- and multi-family structures	3,00	4 %	1980	4 %
Runko-, julkisivu- ja yläpohjarakenteet	Residential permanent site single- and multi-family structures	21,31	31 %	14000	31 %
Sisäpuoliset täydentävät rakenteet	Residential permanent site single- and multi-family structures	1,84	3 %	1210	3 %
Sisäpuoliset pintarakenteet	Residential permanent site single- and multi-family structures	6,16	9 %	4060	9 %
Kalusteet, varusteet ja laitteet	Residential permanent site single- and multi-family structures	2,35	3 %	1550	3 %
Konetekniset työt	Residential permanent site single- and multi-family structures	9,28	13 %	6120	13 %
Työmaatekniikka	Residential permanent site single- and multi-family structures	12,08	17 %	7960	17 %
<b>Yhteensä</b>		<b>69,39</b>	<b>100 %</b>	<b>45700</b>	<b>100 %</b>

Taulukko 4 Rakennusprojektin kustannukset jaoteltuna toimintojen mukaan

YIT Rakennus Oy:n arvioimien, rakennusmateriaaleittain eriteltyjen kustannustietojen pohjalta suoritettiin tarkennettu EIO-LCA-mallinnus. Tarkemmalla sektorijaottelulla saatiin rakennusten rakentamisen aiheuttamiksi hiilidioksidipäästöiksi 66 970 tonnia. Lähtötiedot, sektorivalinnat sekä eri materiaalien ja toimintojen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt on esitetty taulukossa 5.

Materiaali	EIO-LCA-sektori	M€	EUR-jak. %	Total t CO2e	CO2-jak. %
Puutavara	Sawmills and Wood Preservation	4,96	7,1 %	3650	5,5 %
Betoni	Concrete pipe, brick and block manufacturing	3,68	5,3 %	7060	10,5 %
Teräs	Iron, steel pipe and tube manufacturing from purchased steel	3,16	4,6 %	6420	9,6 %
Muuraus (tiilet + laasti)	Brick and Structural Clay Tile Manufacturing	2,22	3,2 %	4460	6,7 %
LVI-materiaali	Air conditioning, refrigeration, and warm air heating equipment	2,72	3,9 %	1580	2,4 %
Sähkömateriaali	Miscellaneous electrical equipment manufacturing	1,92	2,8 %	729	1,1 %
Ikkunat ja ovet	Wood Window and Door Manufacturing	1,88	2,7 %	1120	1,7 %
Kalusteet	Nonupholstered Wood Household Furniture Manufacturing	0,97	1,4 %	475	0,7 %
Vedeneristeet	Paint and Coating Manufacturing	0,71	1,0 %	763	1,1 %
Kodinkoneet	Household Refrigerator and Home Freezer Manufacturing	0,59	0,9 %	460	0,7 %
Muoviputket ja kaivot	Plastics Pipe and Pipe Fitting Manufacturing	0,51	0,7 %	716	1,1 %
Lämmöneristeet	Industrial Process Furnace and Oven Manufacturing	0,47	0,7 %	237	0,4 %
Palvelujen osuus hankkeelle (ei sis. työn johtoa)	Other nonresidential structures	26,40	38,0 %	16200	24,2 %
Energia	Power generation and supply	1,20	1,7 %	11200	16,7 %
Muut	Residential permanent site single- and multi-family structures	18,00	25,9 %	11900	17,8 %
<b>Yhteensä</b>		<b>69,39</b>	<b>100,0 %</b>	<b>66970</b>	<b>100,0 %</b>

Taulukko 5 Rakennusprojektin kustannukset ja päästöt jaoteltuina materiaalien ja toimintojen mukaan

Case-alueen infrastruktuurin rakentamisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt mallinnettiin Ramboll Finland Oy:ltä saatujen lähtötietojen mukaan. Infrastruktuurin rakentamiskustannukset jaoteltiin toiminnoittain. Infrastruktuurin rakentamisen aiheuttamat päästöt ovat yhteensä 5275 tonnia. Toiminnoittain jaotellut lähtötiedot sekä hiilidioksidipäästöt on esitetty taulukossa 6.

Toiminto	EIO-LCA-sektori	M€	EUR-jak. %	Total t CO2e	CO2-jak. %
Rakennusosat muut	Nonresidential maintenance and repair	3,66	52,8 %	2280	43,2 %
Rakennusosat puistoraitit	Museums, historical sites, zoos and parks	0,32	4,6 %	157	3,0 %
Vesihuollon hankeosat	Water, sewage and other systems	1,17	16,9 %	2090	39,6 %
Urakoitsijan kustannukset	Residential permanent site single- and multi-family	0,89	12,9 %	589	11,2 %
Suunnittelutehtävät	Architectural and engineering services	0,42	6,0 %	77,9	1,5 %
Rakennuttamis- ja omistajatehtävät	Management of companies and enterprises	0,47	6,8 %	80,7	1,5 %
<b>Yhteensä</b>		<b>6,93</b>	<b>100,0 %</b>	<b>5275</b>	<b>100,0 %</b>

Taulukko 6 Infrastruktuurin rakentamisen aiheuttamat kustannukset sekä päästöt

Kokonaisuudessaan case-alueen rakentamisessa aiheutuneet hiilidioksidipäästöt ovat EIO-LCA-menetelmällä laskettuna noin 72245 tonnia. Rakennusten rakentamisen osuus tästä on noin 93 prosenttia ja infrastruktuurin osuus noin seitsemän prosenttia.

International Comparison Programin vuoden 2005 ostovoimapariteettitaulukon mukaan USA – Suomi luku on 0,98, joten EIO-LCA-mallinnuksen lopputulokseksi saadaan:

$$0,98 \times 72\,245 \text{ t} \approx 70\,800 \text{ t}$$

## 4.2 Hybridi-LCA-mallinnus

Hybridi-LCA-mallinnuksen perustana toimivat EIO-LCA-mallinnuksen tulokset, joista korvataan prosessidatalla energian, teräksen sekä betonin osuudet. Taulukossa 7 on esitetty hybridimallinnuksen EIO-LCA-perusta.

Materiaali	EIO-LCA-sektori	M€	EUR-jak. %	Total t CO2e	CO2-jak. %
Puutavara	Sawmills and Wood Preservation	4,96	8,1 %	3650	8,6 %
Muuraus (tiilet + laasti)	Brick and Structural Clay Tile Manufacturing	2,22	3,6 %	4460	10,5 %
LVI-materiaali	Air conditioning, refrigeration, and warm air heating equipment	2,72	4,4 %	1580	3,7 %
Sähkömateriaali	Miscellaneous electrical equipment manufacturing	1,92	3,1 %	729	1,7 %
Ikkunat ja ovet	Wood Window and Door Manufacturing	1,88	3,1 %	1120	2,6 %
Kalusteet	Nonupholstered Wood Household Furniture Manufacturing	0,97	1,6 %	475	1,1 %
Vedeneristeet	Paint and Coating Manufacturing	0,71	1,2 %	763	1,8 %
Kodinkoneet	Household Refrigerator and Home Freezer Manufacturing	0,59	1,0 %	460	1,1 %
Muoviputket ja kaivot	Plastics Pipe and Pipe Fitting Manufacturing	0,51	0,8 %	716	1,7 %
Lämmöneristeet	Industrial Process Furnace and Oven Manufacturing	0,47	0,8 %	237	0,6 %
Palvelujen osuus hankkeelle (ei sis. työn johtoa)	Other nonresidential structures	26,40	43,0 %	16200	38,3 %
Muut	Residential permanent site single- and multi-family structures	18,00	29,3 %	11900	28,1 %
<b>Yhteensä</b>		<b>61,34</b>	<b>100,0 %</b>	<b>42290</b>	<b>100,0 %</b>

Taulukko 7 Hybridimallinnuksen EIO-LCA-perusta

### International Comparison Programin vuoden 2005

ostovoimapariteettitaulukon USA – Suomi luvulla kerrottuna saadaan case-alueen rakennusprojektin hybridi-LCA-mallinnuksen EIO-LCA-osan suuruudeksi:

$$0,98 \times 42\,290 \text{ t} = 41\,444,2 \text{ t}$$

Energian osuus case-alueen rakennusten rakentamisesta aiheutuvista hiilidioksidipäästöistä laskettiin Fortumin Suomenojan voimalaitoksen hiilidioksidiprofilia hyödyntäen YIT Rakennus Oy:ltä saatujen energiantarvearvion mukaan. Energiantuotannon hiili-intensiteetti oli 301 kg / MWh ja tarvittava energiamäärä oli 11 765 MWh. Rakennusprojektissa käytettävän energian tuotannon aiheuttamat suorat hiilidioksidipäästöt ovat siis:

$$301 \text{ kg} / \text{MWh} \times 11\,765 \text{ MWh} = 3\,541\,265 \text{ kg} \approx 3541 \text{ t}$$

Rakennusprojektissa tarvittavan energian tuotannon hiilidioksidipäästöt elinkaarinäkökulmasta saadaan selville kun yhdistetään energiantuotantoprosessissa aiheutuneet hiilidioksidipäästöt EIO-LCA-menetelmällä selvitettyihin muun elinkaaren päästöihin. EIO-LCA-mallinnuksen tulos ilman ”power generation and supply”-sektoria on 653 tonnia. Kun tähän lisätään energiantuotantoprosessin aiheuttamat päästöt 3541 tonnia, saadaan hybridimallin energiantuotannon



hiilidioksidipäästöiksi noin 4194 tonnia. Energiatuotantoprosessin ulkopuoliset toiminnot aiheuttavat siis noin 16 prosenttia rakennusprojektissa tarvittavan energian tuotannon kokonaispäästöistä.

Rakennusten rakentamisessa tarvittavien betonisten rakennusaineiden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat RT-Ympäristöselosteiden mukaan yhteensä:

$$(3757,38 + 460,09 + 44,91 + 93,02 + 1696,73 + 69,21) \text{ t} = 6121,34 \text{ t}$$

Rakennusten rakentamisessa tarvittavien teräksisten rakennusmateriaalien valmistuksesta aiheutuu Outokummun ympäristöraportin sekä RT-Ympäristöselosteiden mukaan hiilidioksidipäästöjä yhteensä:

$$(3153,76 + 399,80 + 59,32) \text{ t} = 3612,88 \text{ t}$$

Infrastruktuurin osalta hybridi-LCA-malli ei eroa EIO-LCA-mallista. Case-alueen infrastruktuurin rakentamisesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat yhteensä 5275 tonnia. ICP:n vuoden 2005 ostovoimapariteettitaulukon mukaan USA – Suomi lukua 0,98 käyttäen, infrastruktuurin rakentamisen aiheuttamiksi hiilidioksidipäästöiksi saadaan:

$$0,98 \times 5275 \text{ t} = 5169,5 \text{ t}$$

Hybridi-LCA-menetelmällä laskettuna case-alueen rakentamisesta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt ovat:

$$(41444,2 + 4194 + 6121,34 + 3612,88 + 5169,5) \text{ t} \approx 60542 \text{ t}$$

### 4.3 Kalliolämpöjärjestelmän EIO-LCA-mallinnus

Matti Kurosen haastattelun ja sen perusteella suoritettun investointilaskelman tuloksena kalliolämpöjärjestelmän rakentamiskustannuksiksi arvioitiin noin 1,63 miljoonaa euroa. Rakentamiskustannusten tarkkuus on karkea johtuen investointilaskelman lähtötietojen epävarmuustekijöistä. EIO-LCA-mallinnuksessa käytettiin sektoria ”nonresidential maintenance and repair”. EIO-LCA-sovelluksella saadaan case-alueen kalliolämpöjärjestelmän rakentamisen aiheuttamiksi hiilidioksidipäästöiksi yhteensä 1020 tonnia. International Comparison Programin ostovoimapariteettitaulukon USA – Suomi lukua 0,98 käyttämällä lopputulokseksi saadaan noin 1000 tonnia.

Kalliolämpöjärjestelmän hyötyjä hiilidioksidipäästöjen näkökulmasta on mielekästä vertailla esimerkiksi suoraan sähkölämmitykseen.

Kalliolämpöjärjestelmän rakentaminen aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä, joita suoran sähkölämmityksen käyttöönotosta ei koidu. Rakennuksissa olevat

laitteistot oletetaan hiilidioksidipäästöjen osalta kummassakin lämmitysvaihtoehdossa samanlaiseksi, joten niitä ei oteta mallinnuksessa huomioon.

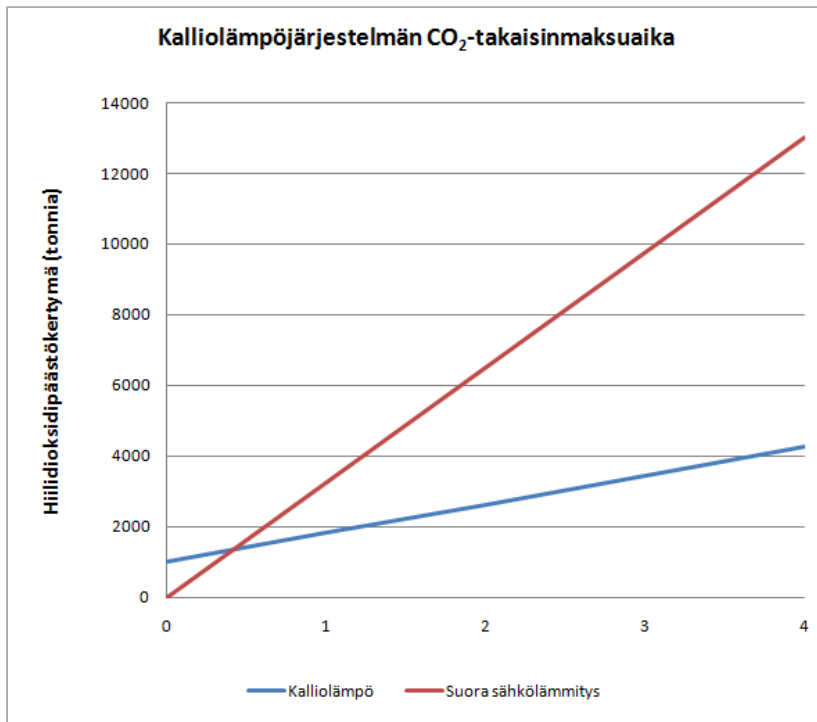
Sekä kalliolämmölle että suoralle sähkölämmitykselle saatiin energiakustannusarviot Matti Kurosen haastattelun perustella. Kurosen arvioi case-alueen vuotuisten energiakustannusten olevan suoralla sähkölämmityksellä noin 355 000 euroa. Lämmitysenergian tuottamisen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen mallintamiseen käytettiin EIO-LCA-sektoria ”power generation and supply”. 355 000 euron vuosittaisilla kustannuksilla saadaan EIO-LCA-mallinnuksen tuloksena suoran sähkölämmityksen aiheuttamiksi vuotuisiksi hiilidioksidipäästöiksi noin 3320 tonnia. Internation Comparison Programin vuoden 2005 ostovoimapariteettitaulukon USA – Suomi luvulla 0,98 kerrottuna EIO-LCA-mallinnuksen lopputulokseksi saadaan:

$$0,98 \times 3320 \text{ t} \approx 3254 \text{ t}$$

Matti Kurosen haastattelun perusteella case-alueelle rakennettavan kalliolämpöjärjestelmän hyötysuhde on noin neljä. Suoran sähkölämmityksen hyötysuhde on yksi. Lämmön tuottamisessa kalliolämpöjärjestelmän avulla aiheutuu siis vuodessa noin neljännes suoran sähkölämmityksen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä eli:

$$0,25 \times 3254 \text{ t} \approx 814 \text{ t}$$

Kalliolämpöjärjestelmän rakentamisessa aiheutui EIO-LCA-mallinnuksen perusteella yhteensä noin 1000 tonnia hiilidioksidipäästöjä. Toisaalta kalliolämpöjärjestelmän käyttö aiheuttaa vuosittain noin 2400 tonnia vähemmän hiilidioksidipäästöjä suoraan sähkölämmitykseen verrattuna. Näin ollen suoran sähkölämmityksen aiheuttama hiilidioksidikertymä ohittaa kalliolämpöjärjestelmän hiilidioksidikertymän noin puolen vuoden kuluttua käyttöönotosta. Kalliolämmön ja suoran sähkölämmityksen käytön aiheuttamat hiilidioksidipäästökertymät on esitetty kuvassa 3.



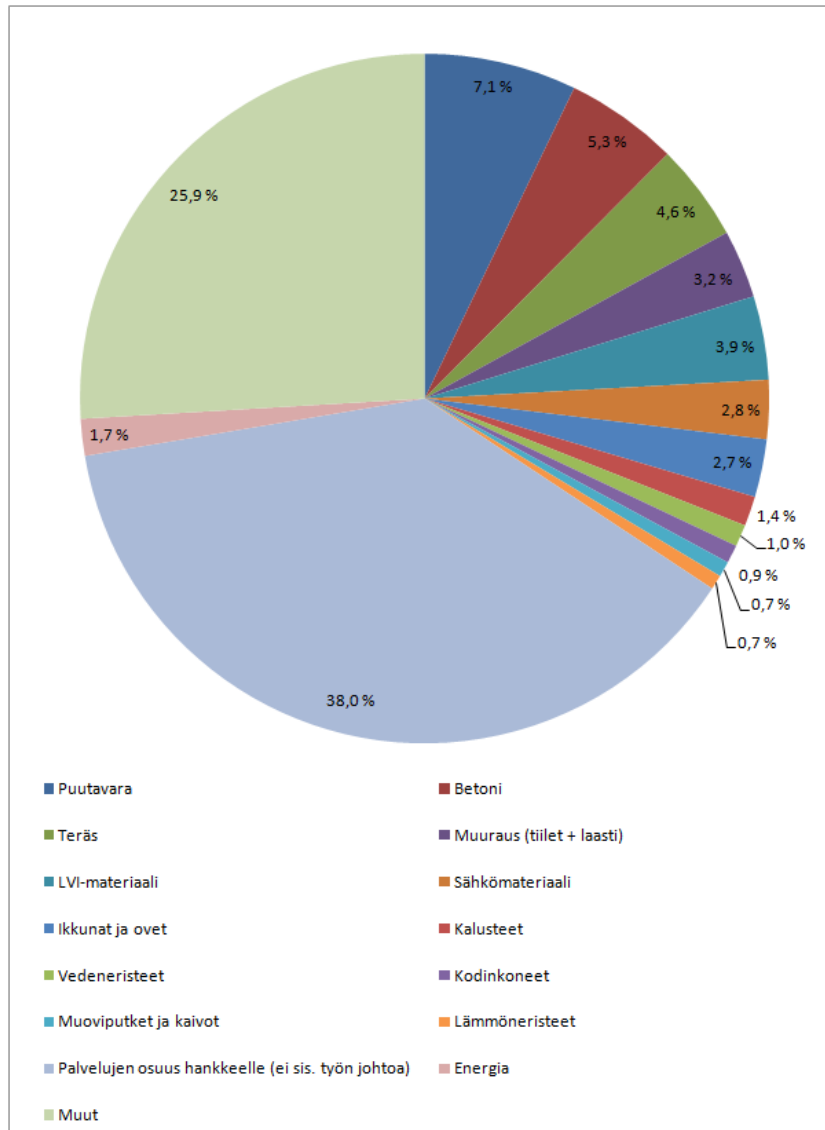
Kuva 3 Kalliolämpöratkaisun takaisinmaksuaika hiilidioksidinäkökulmasta (vuosia)

## 5. Herkkyystarkastelu

### 5.1 EIO-LCA-mallinnus

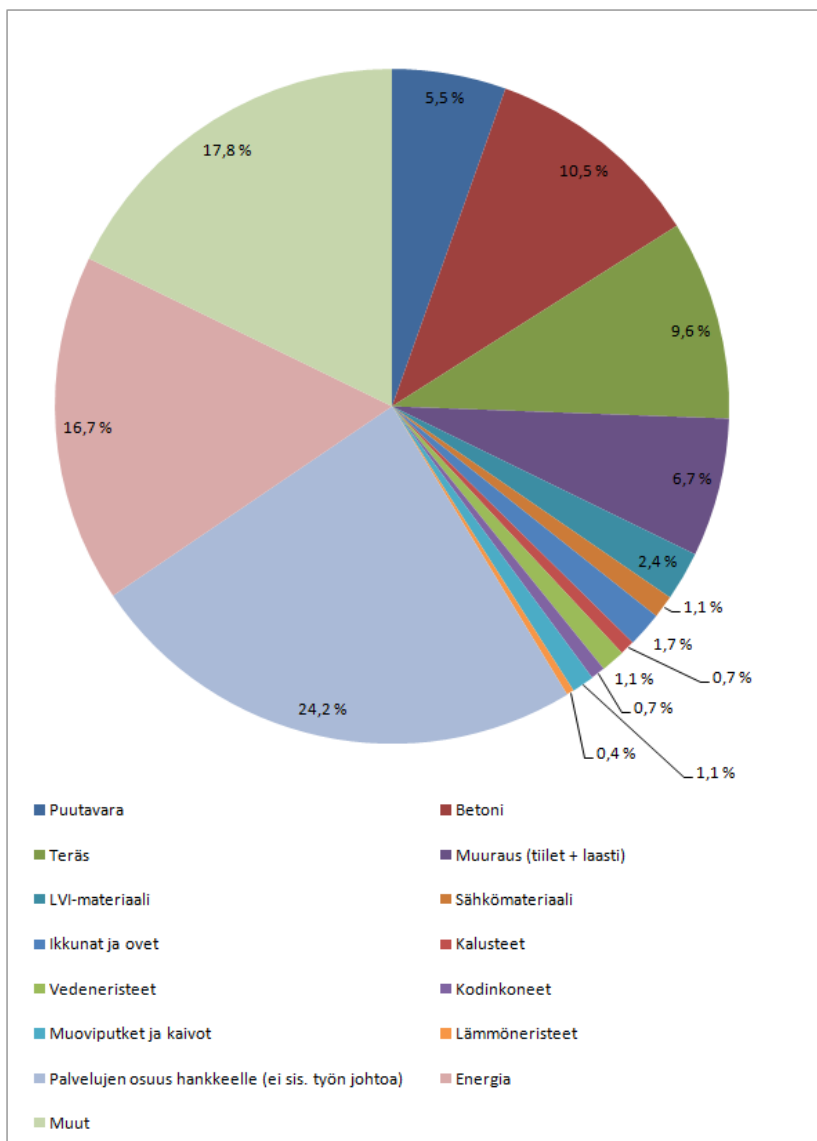
EIO-LCA-mallinnuksessa tehtävillä sektorivalinnoilla on erittäin merkittävä vaikutus mallinnuksen lopputulokseen. Carnegie Mellon-yliopiston EIO-LCA-sovelluksessa asuinalueiden rakentamiseen on tarjolla sektori ”residential permanent site single- and multifamily structures”. Sektori koostuu muun muassa erilaisten asuinrakennusten rakentamisesta, teollisuuden ja kaupallisten rakennusten rakentamisesta, rakennusten muuntelusta ja korjaamisesta. Lisäksi sektorissa on mukana viemäreiden, voimalinjojen ja teiden rakentaminen sekä tontin maatyöt (site preparation) ja perustukset. Sektori käsittää myös rakennuksissa tehtävät toimenpiteet kuten maalaaminen, katon asentaminen, lattian rakentaminen ja sähkö- sekä LVI-työt. EIO-LCA-mallinnuksen tuloksena saatiin rakennusprojektin kokonaishiilidioksidipäästöiksi 45700 tonnia, kun koko rakennusprojektin kustannukset eli 69,39 miljoonaa euroa sijoitettiin ”residential site single and multifamily structures”-sektoriin.

Mallinnuksen tulos tarkentuu, jos kustannuksia jaetaan pienempiin osiin materiaalien tai toimintojen mukaan ja sijoitetaan nämä kustannuserät omille EIO-LCA-sektoreilleen. EIO-LCA-mallinnuksen tarkentamiseksi case-alueen rakentamisprojektin kustannukset jaoteltiin YIT Rakennus Oy:n arvioiden mukaan 15 eri kategoriaan rakennusmateriaalien ja toimintojen mukaan. Muut-kategoriaan kuuluu muihin kategorioihin kuulumattomat rakennusmateriaalit. Rakennusprojektin kokonaiskustannukset ovat YIT Rakennus Oy:n arvion mukaan noin 69,39 miljoonaa euroa. Kustannukset jakautuvat eri kategorioihin kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 4 Rakennusprojektin kustannusten osuus kategorioittain

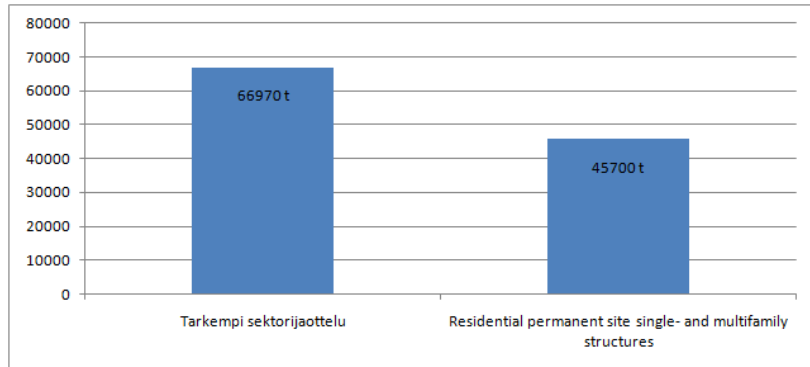
Kun eri rakennusmateriaalit, palvelut sekä energia jaetaan eri sektoreille, saadaan EIO-LCA-mallinnuksella rakennusprojektin kokonaishiilidioksidipäästöiksi 66 970 tonnia. EIO-LCA-menetelmällä mallinnetut rakennusprojektin hiilidioksidipäästöt jakautuvat eri kategorioihin kuvan 5 mukaisesti.



Kuva 5 Rakennusprojektin aiheuttamat hiilidioksidipäästöt kategorioittain

EIO-LCA-mallinnuksen tulokset ovat tarkemmalla, materiaaleittain jaotellulla sektorivalinnalla 21 270 tonnia suuremmat kuin yksittäistä ”residential permanent site single- and multifamily structures”-sektoria käyttämällä. Rakentamiskustannusten jakaminen omille EIO-LCA-

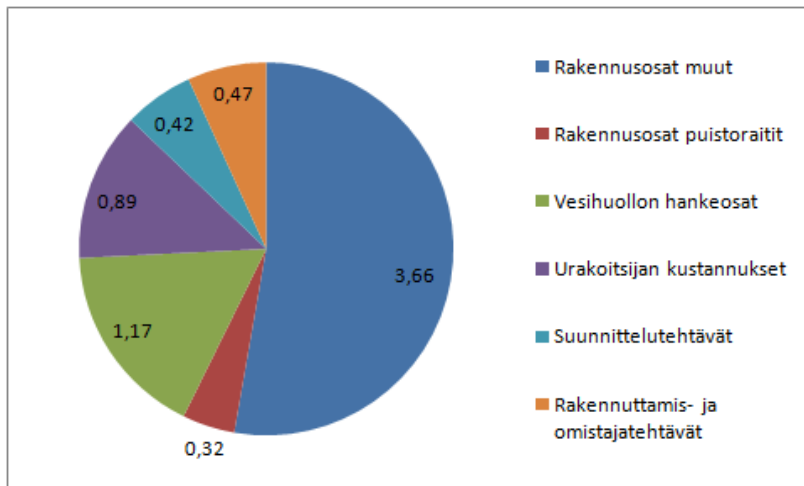
sektoreille materiaalien ja toimintojen mukaan johtaa yleensä tarkempaan lopputulokseen. Eri sektorivalintojen vaikutukset rakennusprojektin hiilidioksidipäästöjen EIO-LCA-mallinnuksen tuloksiin on esitetty kuvassa 6. Tarkemmin sektoreittain jaotellulla EIO-LCA-mallinnuksella saadaan rakennusten rakentamiselle noin 47 prosenttia suuremmat hiilidioksidipäästöt.



Kuva 6 Rakennusprojektin EIO-LCA-tulokset eri sektorivalinnoilla

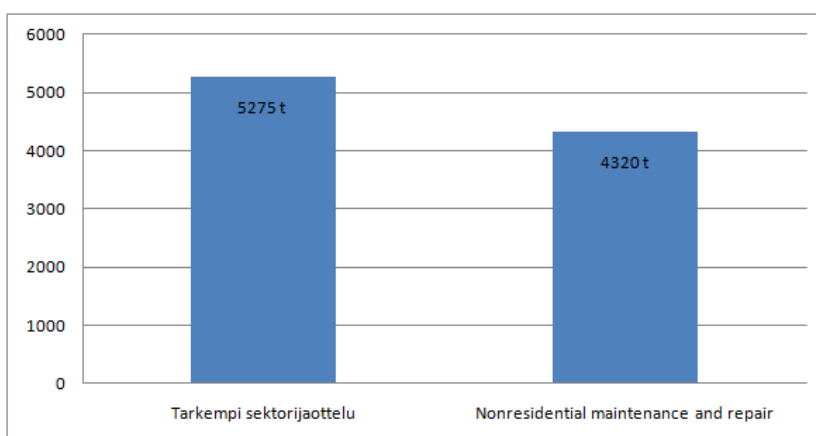
Myös case-alueen infrastruktuurin rakentamisessa syntyvien päästöjen mallinnuksessa tehtiin samankaltaisia sektorivalintoja. EIO-LCA-sovelluksessa parhaiten asuinalueen infrastruktuurin rakentamiseen soveltuva sektori on ”nonresidential maintenance and repair”. Sektoriin kuuluu muun muassa teiden ja siltojen rakentaminen, maatyöt ja perustusten rakentaminen, muut raskaat rakennustyöt ja viemärien, sähkölinjojen sekä tietoliikenneyhteyksien rakentaminen. Sektorissa on paljon samoja toimintoja rakennusprojekteihin suunnatun ”residential permanent site single- and multifamily structures”-sektorin kanssa. Ramboll Finland Oy:n arvion mukaan case-alueen infrastruktuurin rakentamisen kokonaiskustannukset ovat noin 6,93 miljoonaa euroa. Mikäli näiden kustannusten perusteella suoritetaan EIO-LCA-mallinnus käyttäen ainoastaan ”nonresidential maintenance and repair”-sektoria, saadaan case-alueen infrastruktuurin rakentamisen aiheuttamiksi hiilidioksidipäästöiksi yhteensä 4320 tonnia.

Kuten rakennusten rakentamisen mallinnuksessa, myös infrastruktuurin tarkemmassa EIO-LCA-mallinnuksessa kustannukset jaoteltiin yksityiskohtaisemmin osuvampien sektorivalintojen ja tarkempien tulosten saavuttamiseksi. Infrastruktuurin rakentamisesta aiheutuvat kustannukset jaoteltiin eri toiminnoille Ramboll Finland Oy:n arvioiden mukaan. Toimintojen mukaan jaotellut infrastruktuurin rakentamisen kustannukset on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7 Eri toimintojen mukaan jaotellut infrastruktuurin rakentamisen kustannukset (M€)

Case-alueen infrastruktuurin rakentamisesta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt ovat tarkemman, toimintojen mukaan sektoreihin jaotellun EIO-LCA-mallinnuksen perusteella 5275 tonnia. Eri sektorivalinnoilla suoritettujen EIO-LCA-mallinnusten tulokset esitetään kuvassa 8. Infrastruktuurin rakentamisesta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen määrä on sektorivalinnasta riippumatta kuitenkin vähäinen verrattuna koko case-alueen rakentamisesta aiheutuneisiin hiilidioksidipäästöihin. Tarkempi sektorijaottelu EIO-LCA-mallinnuksessa johtaa noin 22 prosenttia korkeampiin hiilidioksidipäästötuloksiin. Eri sektorivalintojen vaikutukset infrastruktuurin rakentamisessa syntyviin hiilidioksidipäästöihin ovat esitetty kuvassa 8.



Kuva 8 Infrastruktuurin EIO-LCA-tulokset eri sektorivalinnoilla

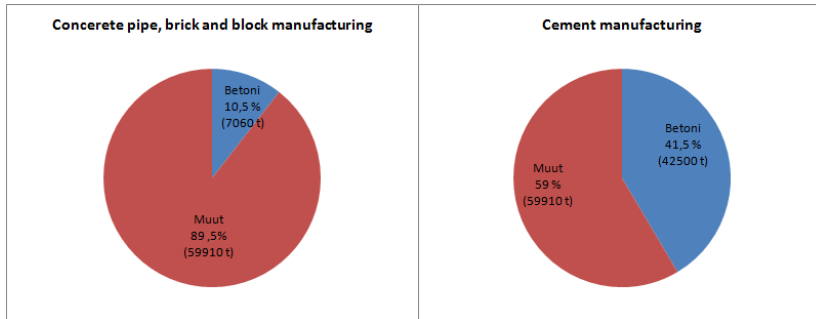
Rakennusprojektin kustannus- ja hiilidioksidipäästöjakaumat eroavat merkittävästi toisistaan rakennusmateriaalien tuotannon erilaisten hiilidioksidi-intensiteettien tuloksena. Selkeimmät erot kustannusten ja hiilidioksidipäästöjen osuudessa on betonilla, teräksellä sekä energialla. Koska hiilidioksidipäästöjen osuus on näillä materiaaleilla jopa moninkertainen verrattuna kustannusten osuuksiin, materiaalien hiilidioksidi-intensiteetti on suuri. Muita rakennusmateriaaleja, joilla on suuri hiilidioksidi-intensiteetti ovat esimerkiksi muurausmateriaalit.

EIO-LCA-menetelmää käytettäessä tehtävillä sektorivalinnoilla on suuri vaikutus lopputulokseen, erityisesti suuren hiilidioksidi-intensiteetin omaavien materiaalien kohdalla. Rakennusprojektin EIO-LCA-mallinnuksessa sektorivalinnoilla oli suuri vaikutus erityisesti betonin ja teräksen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen mallintamisessa.

Rakennusprojektissa käytetyn betonin EIO-LCA-mallinnukseen oli periaatteessa kaksi mahdollista EIO-LCA-sektoria: ”concrete pipe, brick and block manufacturing” sekä ”cement manufacturing”. Lopulliseen EIO-LCA-mallinnukseen valittiin lopulta ”concrete pipe, brick and block manufacturing”-sektori, sillä case-alueen rakennusprojektissa käytettävän betonin jalostusaste on huomattavasti sementinvalmistusta korkeampi. Betoninvalmistuksen mallintamiseen kohdistetulla sektorivalinnalla on huomattava vaikutus EIO-LCA-mallinnuksen lopputulokseen, sillä ”cement manufacturing”-sektorin hiilidioksidi-intensiteetti on huomattavan suuri. Rakennusprojektiin tarvittavan betonin valmistamisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat nykyisellä sektorivalinnalla ainoastaan noin 17 prosenttia siitä, mitä ne olisivat ”cement manufacturing”-sektoria käytettäessä. Koko rakennusten rakentamisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt olisivat 102410 tonnia, joka on noin 53 prosenttia enemmän kuin nykyisellä sektorivalinnalla saadut EIO-LCA-tulokset, mikäli betoniin sovellettaisiin ”cement manufacturing”-sektoria.

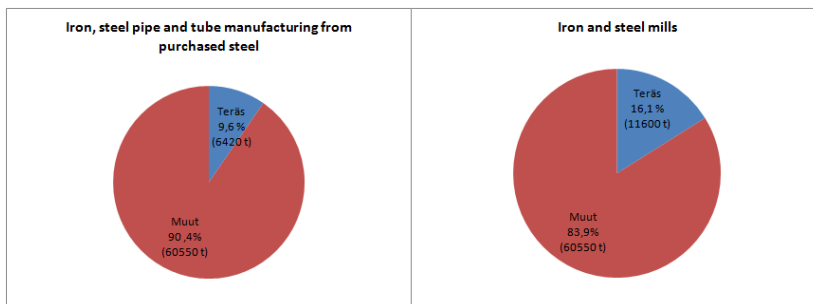
”Concrete pipe, brick and block manufacturing”-sektorin käyttöä EIO-LCA-mallinnuksessa voidaan perustella myös hybridi-LCA-mallinnuksessa selvitettyillä, betonin valmistuksen aiheuttamilla hiilidioksidipäästöillä, jotka olivat noin 6100 tonnia. Hybridimallinnus on lähtökohtaisesti tutkimuksen tarkkin menetelmä, joten EIO-LCA-mallinnuksen betoniin sovellettava sektori ”concrete pipe, brick and block manufacturing” on sopivampi kuin liian suuret hiilidioksidipäästöt antava ”cement manufacturing”. Kuvassa 9 esitetään betonin suhteelliset osuudet rakennusten rakentamisen kokonaispäästöistä eri sektorivalinnoilla.





Kuva 9 Rakennusprojektin kokonaishiilidioksidipäästöjen osuudet erilaisilla betonin sektorivalinnoilla

Toinen EIO-LCA-mallinnuksessa merkittävästi lopputulokseen vaikuttava sektorivalinta koskee case-alueen rakennusten rakentamisessa käytettävää terästä. Kuten betonillekin, myös teräkselle on saatavilla kaksi eri jalostusasteen sektoria. Nämä ovat ”iron, steel pipe and tube manufacturing from purchased steel” sekä ”iron and steel mills”. ”Iron and steel mills”-sektori on matalan jalostusasteen teräksen valmistukseen tarkoitettu sektori, jonka hiilidioksidi-intensiteetti on suuri. EIO-LCA-mallinnukseen valittiin ”Iron, steel pipe and tube manufacturing from purchased steel”-sektori, koska case-alueen rakentamisessa käytettävät teräsmateriaalit ovat jalostusasteeltaan raakateräksen valmistusta korkeampia ja ”iron and steel mills”-sektori johtaisi todellisuutta korkeampiin hiilidioksidipäästölukuihin. Teräksen suhteen tehtyjen sektorivalintojen vaikutuksia case-alueen rakennusten rakentamisesta aiheutuviin EIO-LCA-mallinnuksen hiilidioksidipäästöihin on esitelty kuvassa 10.



Kuva 10 Rakennusprojektin kokonaishiilidioksidipäästöjen osuudet erilaisilla teräksen sektorivalinnoilla

## 5.2 Hybridi-LCA-mallinnus

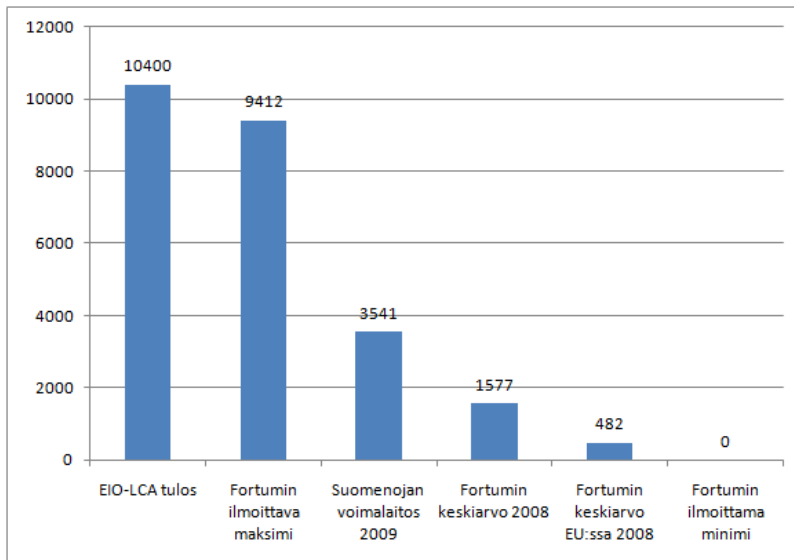
Rakennusprojektin hybridi-LCA-mallinnuksessa tarvittavan energiantuotannon suhteen tehdyt mallinnusratkaisut vaikuttavat merkittävästi mallinnuksen lopputulokseen. Sähköntuotannon

hiilidioksidiprofilin laskemiseksi käytettiin Espoon Suomenojan voimalaitoksen sähkö- ja lämpöenergian tuotantolukuja vuodelta 2009, jotka perustuvat Fortumin raportointiin. YIT Rakennus Oy:ltä saatujen tietojen mukaan rakennusprojektin energiantarve on noin 11 765 MWh ja sen tuottamisessa syntyvät suorat hiilidioksidipäästöt ovat Fortumin tiedoista laskettuna noin 3541 tonnia. Suomenojan voimalaitoksen sähköntuotannon hiilidioksidi-intensiteetiksi saatiin noin 301 g / kWh

Fortum Suomen kestävän kehityksen Heat-divisioonan mukaan sähköntuotannon ominaispäästöt riippuvat laskentatarkkuudesta ja siitä, hankitaanko johonkin tiettyyn tuotantotapaan sidottua sähköä. Tällöin saadaan tulokseksi hiilidioksidi-intensiteetti väliltä 0 – 800 g / kWh. Case-alueen rakennusprojektissa tarvittavan energian tuotannossa syntyvät suorat hiilidioksidipäästöt ovat siis Fortumin mukaan välillä 0 – 9412 tonnia. Nämä ovat energiantuotannon suoria hiilidioksidipäästöjä, joissa ei ole huomioitu tuotannon infrastruktuurin rakentamista.

Fortum and Climate Change 2009-julkaisun mukaan Fortumin kokonaan ja osittain omistamien voimalaitosten sähköntuotannon keskimääräinen hiilidioksidi-intensiteetti oli 134 g / kWh vuonna 2008. Fortumin EU-maissa sijaitsevien voimalaitosten keskimääräinen hiilidioksidintensiteetti oli ainoastaan 41 g / kWh. Case-alueen rakennusprojektissa tarvittavan energian tuotannossa syntyneet suorat hiilidioksidipäästöt olisivat Fortumin vuoden 2008 sähköntuotannon keskimääräisen hiilidioksidi-intensiteetin mukaan noin 1577 tonnia ja EU-maissa sijaitsevien voimalaitosten hiilidioksidi-intensiteetin perusteella 482 tonnia.

EIO-LCA-menetelmällä saadut energiantuotannon elinkaaripäästöt case-alueen rakennusprojektille olivat 11200 tonnia. EIO-LCA-sovelluksella elinkaaren aikana syntyvien hiilidioksidipäästöjen arvioinnissa otetaan huomioon energiantuotantosektorin lisäksi myös muiden kansantalouden sektorien aiheuttamat, epäsuorat hiilidioksidipäästöt. Jotta EIO-LCA-tulokset olisivat vertailukelpoisia prosessimallinnuksella saatujen suorien päästömäärien kanssa, täytyy EIO-LCA-tuloksista poistaa tuotteen elinkaaripäästöjen osuuden lisäksi energiantuotantosektorin aiheuttamat epäsuorat päästöt. EIO-LCA-mallinnuksella saadut, rakennusprojektissa tarvittavan energian tuotannon aiheuttamat suorat hiilidioksidipäästöt ovat 10400 tonnia. Case-alueen rakennusprojektissa tarvittavan sähköenergian tuottamisessa syntyvien suorien hiilidioksidipäästöjen määriä on vertailtu kuvassa 11.



Kuva 11 Eri lähtötiedoilla saadut case-alueen rakennusprojektin energian tuottamisessa syntyvät suorat hiilidioksidipäästöt ilman tuotanto- ja toimitusketjuja (tonnia)

Hybridi-LCA-mallinnuksessa case-alueen rakennusten rakentamisessa tarvittavien teräksen ja betonin valmistamisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt mallinnettiin RT-Ympäristöselosteiden perusteella. RT-Ympäristöselosteet pohjautuvat prosessimallisiin elinkaarilaskelmiin.

Case-alueen rakennusten rakentamisessa tarvittavan betonin valmistus tuottaa hybridimallilla yhteensä 6121,34 tonnia hiilidioksidia. EIO-LCA-mallinnuksessa vastaava luku on 7060 tonnia. EIO-LCA-menetelmällä saatu päästöluku on siis noin 15 prosenttia suurempi.

Rakennusten rakentamisessa tarvittavan teräksen valmistus tuottaa hybridimallilla yhteensä 3612,88 tonnia hiilidioksidipäästöjä. EIO-LCA-menetelmällä mallinnettuna hiilidioksidipäästöjä tuotetaan 6420 tonnia. Teräksen osalta EIO-LCA-menetelmällä saadut tulokset ovat siis noin 78 prosenttia suuremmat kuin hybridimenetelmän tulokset.

Betonin ja teräksen osalta elinkaarinäkökulma eroaa EIO-LCA-menetelmästä sekä EIO-LCA-pohjaisesta hybridimallista, jolla case-alueen rakennusten rakentamisessa tarvittavan sähköenergian aiheuttamat hiilidioksidipäästöt on mallinnettu. RT-Ympäristöselosteet ilmoittavat betonin ja teräksen valmistuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt raaka-aineiden hankinnasta tuotteen valmistaneen tehtaan porteille (cradle to gate) kun taas EIO-LCA-menetelmää käyttämällä mallinnetaan tuotteiden elinkaari raaka-aineiden hankinnasta hävitykseen asti (cradle to grave).

Betonin ja teräksen osalta jää siis mallintamatta materiaalien ylläpidon ja hävittämisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt.

Junnila et al. (2006) on tutkinut artikkelissaan toimistorakennusten elinkaaren eri vaiheiden aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Kyseessä on toimistorakennus, joten se ei vastaa ylläpitovaiheen kannalta täysin asuinrakennusta, sillä ylläpitovaiheeseen kuuluu esimerkiksi hissien huoltaminen. Case-alueen rakennuksiin ei ole suunniteltu hissejä. Junnilan et al. (2006) tutkimuksen rakennus sijaitsee Suomessa.

Junnilan et al. (2006) tutkimuksessa rakennuksessa tarvittavan betonin valmistuksessa syntyi yhteensä 450 Mg hiilidioksidia. Betonin ylläpidosta aiheutui tutkimuksen mukaan 32 Mg hiilidioksidipäästöjä. Betonin ylläpidon aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat siis Junnilan et al. (2006) mukaan noin 7,1 prosenttia sen valmistuksen aiheuttamista päästöistä.

Rakennuksen rakentamisessa tarvittavien teräksisten materiaalien valmistuksen aiheuttamiksi hiilidioksidipäästöiksi Junnila et al. (2006) sai yhteensä 487 Mg. Niiden ylläpidosta aiheutui yhteensä 230 Mg hiilidioksidipäästöjä. Ylläpidon osuus on siis tutkimuksen mukaan noin 47,2 prosenttia.

Kun Junnilan (2006) tutkimuksen tuloksia sovelletaan case-alueen rakentamisessa aiheutuvien päästöjen mallintamiseen, saadaan hybridimallin betonin aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen määräksi:

$$6121,34 \text{ t} \times 1,071 \approx 6555,59 \text{ t}$$

Teräksen osalta vastaava luku on:

$$3612,88 \text{ t} \times 1,472 \approx 5318,16 \text{ t}$$

Näillä arvoilla case-alueen rakentamisen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen summa on hybridi-LCA-menetelmällä laskettuna:

$$(41\,444,2 + 4194 + 6555,59 + 5318,16 + 5169,5) \text{ t} \approx 62\,681 \text{ t}$$

Verrattuna case-alueen hybridi-LCA-mallinnuksen lopputulokseen 60 542 tonnia, Junnilan (2006) tutkimuksen arvoilla tarkennettuna lopputulos olisi noin 4 prosenttia suurempi. Hybridimallin laajan EIO-LCA-perustan ominaisuuksiin kuuluvan virhemarginaalin huomioon ottaen ero ei ole merkittävä.

### **5.3 Kalliolämpöjärjestelmän EIO-LCA-mallinnus**

Kalliolämpöjärjestelmän rakentamisen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen EIO-LCA-mallinnus tehtiin vain yhdellä sektorilla, joka on ”nonresidential

maintenance and repair”. Vaikka sektori sopii infrastruktuurin rakentamiseen, tarkempaan mallinnustulokseen olisi varmasti päästy, mikäli tarkemmin jaoteltua kustannusdataa olisi ollut saatavilla ja mallinnus olisi voitu suorittaa tarkemmalla sektorijaottelulla. Case-alueen infrastruktuurin rakentamisen aiheuttamat päästöt olivat tarkemmin sektoreittain jaotellulla EIO-LCA-mallinnuksella noin 22 prosenttia suuremmat kuin pelkkää ”nonresidential maintenance and repair”-sektoria käyttämällä.

Kalliolämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika hiilidioksidinäkökulmasta on erittäin herkkä energiantuotannon mallintamiseen tarkoitetun EIO-LCA-sektorin ”power supply and management” osalta. EIO-LCA-menetelmällä mallinnetun energiantuotannon hiilidioksidi-intensiteetti on joissain tapauksissa jopa useita kymmeniä kertoja suurempi Fortumin eri energiantuotantotapojen hiilidioksidi-intensiteettiin verrattuna. Tällä on mittavat vaikutukset kalliolämpöjärjestelmän hiilidioksidipäästö-pohjaiseen takaisinmaksu-aikaan, sillä energiantuotannon hiilidioksidi-intensiteetin laskiessa myös järjestelmän takaisinmaksuaika kasvaa olettaen, että järjestelmän rakentamisen päästöt on mallinnettu todenmukaisesti.

## 6. Johtopäätökset

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää case-alueen rakentamisessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen määrä. Päästöjen laskemisessa käytettiin elinkaarianalyysiin perustuvia EIO-LCA- sekä hybridi-LCA-mallinnusmenetelmiä. Hybridi-LCA-menetelmänä käytettiin sovellettua kerrostettua hybridianalyysiä, jonka perustana on laaja EIO-LCA-pohja, jonka muutamat tärkeimmät toiminnot sekä materiaalit ovat korvattu prosessidatalla.

Elinkaarimallinnusten tuloksena saatiin case-alueen rakentamisen aiheuttamiksi hiilidioksidipäästöiksi EIO-LCA-menetelmällä yhteensä 70 800 tonnia ja hybridi-LCA-menetelmällä 60 542 tonnia. EIO-LCA-menetelmällä saadut hiilidioksidipäästöt olivat siis noin 17 prosenttia korkeammat kuin hybridi-LCA-menetelmän tulokset. Suomen kokonaishiilidioksidipäästöt vuonna 2008 olivat noin 70,1 miljoonaa tonnia (Tilastokeskus: Suomen 2008 kasvihuonepäästöt). Case-alueen rakentamisprojektin aiheuttamien päästöjen osuus on siis noin 0,01 prosenttia Suomen vuotuisista hiilidioksidipäästöistä. Pääkaupunkiseudulla asuvan kuluttajan vuotuinen hiilidioksidijalanjälki on noin 12,6 tonnia (Heinonen & Junnila 2010, s. 37). 600 asukkaalle tarkoitetun case-alueen

rakennusprojekti vastaa siis noin 4800 pääkaupunkiseudulla asuvan ihmisen vuotuista hiilidioksidijalanjälkeä. Ulkomaanmatka Kanarian saarille aiheuttaa noin 0,5 tonnia hiilidioksidipäästöjä, joten jokainen case-alueen asukas voisi rakennusprojektin hiilidioksidipäästöjen määrällä tehdä noin 200 ulkomaanmatkaa (International Civil Aviation Organization).

Tutkimuksen tulokset mahdollistavat myös EIO-LCA- sekä hybridi-LCA-menetelmien tulosten keskinäisen vertailun. Tutkimuksen tuloksia voidaan vertailla esimerkiksi Junnilan (2006) sekä Keimelin (2001) tutkimustuloksiin. Junnila (2006) tutki EIO-LCA- ja prosessi-LCA-menetelmillä tehtyjen mallinnustulosten eroavaisuuksia palvelualalla. Keimel et al. (2001) tutki pienen henkilöauton valmistuksessa syntyviä päästöjä ja vertaili EIO-LCA-menetelmällä saatuja tuloksia prosessi-LCA-menetelmään.

Junnilan (2006) tutkimuksessa EIO-LCA-menetelmä tuotti noin 50 prosenttia suuremmat mallinnustulokset ilmastonmuutuskategoriassa verrattuna prosessi-LCA-menetelmään (Junnila 2006, s. 7074). Keimel et al. (2001) taas sai EIO-LCA-menetelmällä noin 30 prosenttia suuremmat ilmastonmuutokseen liittyvät päästöt kuin prosessi-LCA-menetelmällä (Junnila 2006, s. 7074). Tutkimuksessa prosessidataa edustavan hybridimallin toisen osan eli betonin suhteen EIO-LCA-menetelmällä saatiin noin 15 prosenttia suuremmat päästöt kuin hybridimallin avulla. Teräksen osalta EIO-LCA-tulokset olivat noin 78 prosenttia suuremmat kuin hybridi-LCA-menetelmällä. Betonin osalta tutkimuksen mallinnusmenetelmien ero on siis huomattavasti pienempi ja teräksen osalta merkittävästi suurempi kuin Junnilan (2006) ja Keimelin et al. (2001) tutkimusten tuloksissa.

Asuinalueen rakentamisessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen mallintaminen etenkin EIO-LCA-menetelmällä pitää sisällään useita epävarmuustekijöitä. Parhaimmillaankin EIO-LCA-menetelmän virhemarginaali saattaa olla useita kymmeniä prosentteja. Hybridimallia käyttämällä saadaan todennäköisesti tarkempia mallinnustuloksia, mutta suuri osa hybridimallinkin mallinnustuloksista tulee mallin EIO-LCA-perustan kautta.

Menetelmien arvioinnin kannalta olisi hyödyllistä, jos EIO-LCA:lla sekä EIO-LCA-pohjaisilla hybridi-LCA-menetelmillä mallinnettaisiin muutamia sellaisia jo rakennettuja rakennusprojekteja, joiden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt tiedetään suhteellisen tarkasti. Näin saataisiin selville

EIO-LCA-pohjaisten mallinnusmenetelmien karkea virhemarginaali rakennussektorilla.

Case-alueelle rakennettavan kalliolämpöjärjestelmän arviointi hiilidioksidipäästöjen kannalta on yksi opinnäytteen osa. Kalliolämpöjärjestelmän korkea hyötysuhde luo sille kilpailuetua muihin lämmitysratkaisuihin verrattuna. Geofoorumin (2008) mukaan kalliolämpöjärjestelmien hyötysuhde on yleensä noin kolme. Matti Kurosen haastattelun mukaan alueelle suunnitellun kalliolämpöjärjestelmän hyötysuhde voisi olla jopa neljä.

Kalliolämpöjärjestelmän rakentamisen aiheuttamiksi hiilidioksidipäästöiksi saatiin EIO-LCA-menetelmällä noin 1000 tonnia. Suoran sähkölämmityksen käytön aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ylittävät kalliolämpöjärjestelmän rakentamisen ja käytön aiheuttamat päästöt noin puolen vuoden kuluttua käyttöönotosta, kun kalliolämpöjärjestelmän hyötysuhde on neljä.

Kurosen haastatteluun perustuvien kustannustietojen mukaan suoran sähkölämmityksen energiakustannukset ovat reilun kolmanneksen suuremmat kalliolämpöjärjestelmän energiakustannuksiin verrattuna. Kalliolämpöjärjestelmän energiakustannukset ovat siis melko suuret, sillä hyötysuhde huomioiden energiakustannusten osuus suoran sähkölämmityksen energiakustannuksista voisi olla ainoastaan kolmannes. Yksi kalliolämpöjärjestelmän vahvuuksista on Kurosen mukaan sen tarjoama suoja sähkön hinnan kasvua vastaan. Tämä kalliolämpöjärjestelmän vahvuus suoraan sähkölämmitykseen verrattuna voimistuisi entisestään, mikäli energiakustannukset laskisivat sen hyötysuhdetta vastaavalle tasolle.

Tutkimuksen LCA-mallinnukset koskevat asuinalueen elinkaaren rakennusvaihetta. Aikaisempi tutkimus (Junnila et al. 2006, s. 13) osoittaa rakentamisen sekä materiaalien osuuden olevan ainoastaan noin 10 prosenttia rakennuksen koko elinkaaren aikaisista hiilidioksidipäästöistä. Vertailun vuoksi mainittakoon, että rakennuksen käytön eli sähkön ja lämmityksen osuus elinkaaren aikaisista hiilidioksidipäästöistä on noin 80 prosenttia. Lämmityksen osuus koko rakennuksen elinkaaren hiilidioksidipäästöistä on noin 50 prosenttia (Junnila et al. 2006, s. 13). Näin ollen rakentamisessa saavutettu yhden prosentin hiilidioksidipäästövähenys vaikuttaa ainoastaan yhdellä prosentin kymmenesosalla rakennuksen koko elinkaaren aikaisiin päästöihin. Lämmityksessä saavutettu yhden prosentin säästö on siis viisinkertainen verrattuna rakennusvaiheessa saavutettuun päästövähennykseen koko

rakennuksen elinkaari huomioon ottaen. Näin ollen olisi oleellista keskittyä rakennuksen energiatehokkuuden maksimoimiseen, vaikka rakentamisessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen lisääntymisen kustannuksella.



## 7. Lähteet

Asif, M., Muneer, T., Kelley, R. (2005): Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland, *Building and Environment* 42 (2007), 1391-1394

Bilec, M. M. (2007): A Hybrid Life Cycle Assessment Model for Construction Processes. Väitöskirja. University of Pittsburgh, School of Engineering. Pittsburgh. 291 s.

Bilec, M., Ries, R., Matthews, H. S., Sharrard, A. L. (2006): Example of a Hybrid Life-Cycle Assessment of Construction Processes, *Journal of Infrastructure Systems @ ASCE*, 2006, December, 207-215

Block, B. (2010): More Accurate Emissions Data Needed Worldwide, U.S. Researchers Say, *Worldwatch Institute* 29.3.2010. [Viitattu 14.7.2010].  
Saatavissa: <http://www.worldwatch.org/node/6394>

Cano Ruiz, J. A. (2000): Decision Support Tools for Environmentally Conscious Chemical Process Design. Väitöskirja. Massachusetts Institute of Technology. 599 s .

Carnegie-Mellon University Green Design Institute (2008): Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA), US 2002 Industry Benchmark model [Internet], <http://www.eiolca.net>.

Climate Change 2007: Synthesis Report, An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC

Cole, R. (1998): Emerging trends in building environmental assessment methods, *Building Research & Information*, 26, 3-16

Creswell, J. W. (2009): Research design : qualitative, quantitative, and mixed methods approaches, 2009, 3. ed., Sage Publications, Los Angeles

EEA (European Environment Agency) 2003. Europe's environment: the third assessment. European Environment Agency, Copenhagen.

Energiaa Uudellamaalla. [Viitattu 7.6.2010]. Saatavissa: <http://www.energiaasuomessa.net>

Energy Information Administration. [Viitattu 15.7.2010]. Saatavissa: [http://www.eia.doe.gov/abouteia/mission\\_overview.cfm](http://www.eia.doe.gov/abouteia/mission_overview.cfm)

Energy Information Administration (2008): Documentation for Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2006, Energy Information

Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, 244 s.

European Environment Agency (2009): Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009. EEA, Copenhagen, 2009. [Viitattu 10.11.2010]. Saatavissa:

[http://www.eea.europa.eu/publications/eea\\_report\\_2009\\_9](http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2009_9)

Fortum: Emissions into air 2009. [Viitattu 20.7.2010]. Saatavissa:

[http://www.fortum.com/binary.asp?page=47725&file=pdf\2010\5\5613475293781\Fortum\\_Emissions\\_into\\_air\\_2009.pdf](http://www.fortum.com/binary.asp?page=47725&file=pdf\2010\5\5613475293781\Fortum_Emissions_into_air_2009.pdf)

Fortum: Power and heat production at Fortum's plants in 2009. [Viitattu 20.7.2010]. Saatavissa:

[http://www.fortum.com/binary.asp?page=47730&file=pdf\2010\5\59125995049030\Fortum\\_Production\\_2009.pdf](http://www.fortum.com/binary.asp?page=47730&file=pdf\2010\5\59125995049030\Fortum_Production_2009.pdf)

GeoFoorumi (2008): Kalliosta saatuna kaksi kolmasosaa lämmöstä on ilmaista, GeoFoorumi - Geologian tutkimuskeskuksen sidosryhmälehti 1/2008, <http://www.gtk.fi>

Heinonen, J. (2010): A Life Cycle Assessment of Carbon Mitigation Possibilities in Metropolitan Areas

Heinonen, J., Junnila, S. (2010): Matalahiiliasumisen lähtökohdat, Sitran selvityksiä 20

Heinonen, J., Junnila, S. (2010): Modeling carbon footprint of communities for estimating the opportunities for low-carbon urban development, The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010.

Hendrickson, C. T., Lave, L. B., Matthews, H.S. (2006): Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach. Resources for the Future Press.

Huang, G. H., Chang, N. B. (2003): Perspectives of Environmental Informatics and System Analysis, Journal of Environmental Informatics 1 (1) 1-6 (2003).

ilmasto.org. [Viitattu 26.3.2010]. Saatavissa: <http://www.ilmasto.org>

International Civil Aviation Organization: Carbon Emissions Calculator. [Viitattu 5.10.2010]. Saatavissa:

<http://www2.icao.int/en/carbonoffset/Pages/default.aspx>

International Comparison Program: 2005 ICP Global Results: Summary Table. [Viitattu 21.7.2010]. Saatavissa: <http://siteresources.worldbank.org/ICPINT/Resources/icp-final-tables.pdf>

International Standard 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework; International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 1997.

International Standard 14041: Environmental management – Life cycle assessment – goal and scope definition and inventory analysis; International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 1998.

Joshi, S. (2000): Product Environmental Life-Cycle Assessment Using Input-Output Techniques, *Journal of Industrial Ecology*, 2000, Vol. 3, nro 2 & 3, 95-120

Junnila, S. I. (2006): Empirical Comparison of Process and Economical Input-Output Life Cycle Assessment in Service Industries, *Environmental Science and Technology*, Vol 40, No. 22, 2006, 7070-7076.

Junnila, S., Horvath, A., Guggemos, A. A. (2006): Life-Cycle Assessment of Office Buildings in Europe and the United States, *Journal of Infrastructure Systems @ ASCE*, 2006, March, 10-17

Kuronen, M (2009): Kiinteistöjen optimoinnista kokonaisuin alueisiin

Kuronen, M. Hankekehityspäällikkö YIT Rakennus Oy: Haastattelu 22.7.2010

Lounamaa, A. (2010): CO<sub>2</sub>-Emissions During the Life Cycle of Apartments and Office Buildings- Effects of Precast Concrete Elements. Diplomityö. Aalto University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Structural Engineering and Building Technology. 80 s

National Research Council (2010): Verifying Greenhouse Gas Emissions: Methods to Support International Climate Agreements. Press Release. [Viitattu 17.8.2010]. Saatavissa: <http://www8.nationalacademies.org/onpinews/newsitem.aspx?RecordID=12883>

Rakennustietosäätiö RTS: RT-Ympäristöseloste. [Viitattu 20.7.2010]. Saatavissa: <http://www.rts.fi/ymparistoseloste/>

Sasnauskaite V., Uzsilaityte, L., Rogoza, A. (2007): A sustainable analysis of a detached house heating system throughout its life cycle. A case study, *International Journal of Strategic Property Management*, 11, 143-155

Seppälä, J., Koskela, S., Melanen, M., Palperi, M. (2002): The Finnish metals industry and the environment, *Resources, Conservation and Recycling* 35 (2002), 61-76

Seppälä, J., Mäenpää, I., Koskela, S., Mattila, T., Nissinen A., Katajajuuri, J-M., Härmä, T., Korhonen, M-R., Saarinen, M., Virtanen, Y. (2009): Suomen kansantalouden materiaalivirtojen ympäristövaikutusten arviointi ENVIMAT-mallilla, *Suomen ympäristö* 20

Sharrard, A. L., Matthews, H. S., ASCE, A.M., Ries, R. J. (2008): Estimating Construction Project Environmental Effects Using an Input-Output-Based Hybrid Life-Cycle Assessment Model, *Journal of Infrastructure Systems @ ASCE*, 2008, December, 327-336

Soukka, R., Luoranen, M., Lankinen, R., Hirvonen, M. (2010?): Carbon footprint of heating options for a new residential area, *Lappeenranta University of Technology LUT, Finland*, 1-11

Suh, S., Lenzen, M., Treloar, G. J., Hondo, H., Horvath, A., Huppes, G., Jolliett, O., Klann, U., Krewitt, W., Moriguchi, Y., Munksgaard, J., Norris, G. (2004): System Boundary in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches, *Environmental Science & Technology*, 2004, Vol. 38, nro 3, 657-664.

Tekniikka & Talous. [Viitattu 10.6.2010]. Saatavissa:

<http://www.tekniikkatalous.fi>

The Sixth Environment Action Programme of the European Community 2002 – 2012, European Commission. [Viitattu 22.9.2010]. Saatavissa:

[http://ec.europa.eu/environment/climat/home\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/home_en.htm)

Tilastokeskus: Kasvihuonekaasut. [Viitattu 15.7.2010]. Saatavissa:

<http://www.tilastokeskus.fi/meta/til/khki.html>

Tilastokeskus: Suomen 2008 kasvihuonekaasut. [Viitattu 5.10.2010].

Saatavissa: [http://tilastokeskus.fi/til/khki/2008/khki\\_2008\\_2010-04-23\\_kat\\_001\\_fi.html](http://tilastokeskus.fi/til/khki/2008/khki_2008_2010-04-23_kat_001_fi.html)

Treloar, G.J., Love P.E.D., Faniran, O.O., Iyer-Raniga, U. (2000): A hybrid life cycle assessment method for construction, *Construction Management and Economics*, 2000, 18, 5-9

UN on Climate Change. [Viitattu 22.9.2010]. Saatavissa:

<http://www.un.org/en/globalissues/climatechange/>

United Nations Environment Programme. [Viitattu 19.7.2010]. Saatavissa:

<http://www.unep.org/>

Weber, C. L., Matthews, S. (2007): Quantifying the global and distributional aspects of American household carbon footprint, *Ecological Economics*, 2008, 379-391

YIT Rakennus Oy (2010): EIO-LCA- ja hybridi-LCA mallinnuksen lähtötiedot – sähköpostiviesti

ISBN: 978-952-60-4022-6 (pdf)  
ISBN:  
ISSN-L: 1799-487X  
ISSN: 1799-4888 (pdf)  
ISSN: 1799-487X

**Aalto-yliopisto**  
**Insinöörیتieteiden korkeakoulu**  
**Maanmittaustieteiden laitos**  
**[aalto.fi](http://aalto.fi)**

**KAUPPA +  
TALOUS**

**TAIDE +  
MUOTOILU +  
ARKKITEHTUURI**

**TIEDE +  
TEKNOLOGIA**

**CROSSOVER**

**VÄITÖSKIRJAT**