

# Ilmastovaikutusten arvioinnin laskennalliset menetelmät asemakaavoituksessa

Ville Tevajärvi

## Insinöörیتieteiden korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 28.2.2022.

### Työn valvoja

Prof. Raine Mäntysalo

### Työn ohjaajat

Arkkite. Johanna Närhi

Dipl.ins Antti Rahiala



**Aalto-yliopisto**  
Insinöörیتieteiden  
korkeakoulu

---

**Tekijä** Ville Tevajärvi

---

**Työn nimi** Ilmastovaikutusten arvioinnin laskennalliset menetelmät  
asemakaavoituksessa

---

**Pääaine** Maankäytön suunnittelu ja liikennetekniikka **Pääaineen koodi** ENG26

---

**Työn valvoja** Prof. Raine Mäntysalo

---

**Työn ohjaajat** Arkkite. Johanna Närhi, Dipl.ins Antti Rahiala

---

**Päivämäärä** 28.2.2022

**Sivumäärä** 65

**Kieli** Suomi

---

### Tiivistelmä

Tässä työssä perehdyttiin erilaisiin työkaluihin, joita voi käyttää erityisesti asemakaavatason hiilijalanjälkilaskennassa. Työssä huomattiin, että näitä työkaluja on runsaasti, mutta ne on suunniteltu hieman erilaisiin käyttötarkoituksiin, mikä aiheuttaa reunaehdoja niiden soveltamiselle. Jokaisella työkalulla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, jotka vaikuttavat siihen, millaisten kaavojen yhteydessä niitä kannattaa käyttää. Myös käytettävissä olevilla lähtötiedoilla on suuri rooli siinä, mitä työkaluja voi käyttää.

Työssä huomattiin, että esitellyistä työkaluista erityisesti KURKE sopi asemakaavatasolla tehtävään skenaarioanalyysiin, jossa tutkitaan erilaisten liikenneskenaarioiden päästöjä. Tämä johtui siitä, että KURKE:lla on mahdollista arvioida henkilöauton käyttöä vähentäviä suunnitteluratkaisuja portaittain eli määrittää, kuinka hyvin ne on huomioitu. Samantyylistä arviointimahdollisuutta ehdotettiin myös muihin työkaluihin, erityisesti Helsingin asemakaavojen vähähiilisyyden arviointimenetelmään, jossa oli tätä diplomityötä tehtäessä mahdollista tehdä vastaava arviointi ainoastaan binäärisesti eli määrittää, onko niitä otettu huomioon vai ei.

Helsingin asemakaavojen vähähiilisyyden arviointimenetelmän käyttämien kaavojen rakentamisen päästökertoimien havaittiin olevan todennäköisesti hieman alakkanttiin. Erityisen todennäköistä tämän havaittiin olevan tapauksissa, joissa kadut vaativat stabilointia, erityisesti pilaristabilointia. Työssä ehdotettiin mahdollisuutta ottaa stabilointi huomioon samalla tavalla kuin KEKO-työkalussa. Erityisesti pilaristabiloinnin tapauksessa tämä voisi mahdollistaa paljon tarkemmat päästöarviot.

Lisäksi työssä huomattiin, että sekä tiiviimmällä rakentamisella että henkilöauton käyttöä vähentävillä suunnitteluvalinnoilla on merkittäviä vähentäviä vaikutuksia työhön valitun case-kohteen – Pihlajamäen ostoskeskuksen – henkilöä kohden laskettuihin elinkaari päästöihin. Tämä pätee, vaikka rakentamisen päästöt lisääntyvät tiiviimmän rakentamisen skenaariossa.

---

**Avainsanat** hiilijalanjälki, laskennalliset menetelmät, EIO-LCA, KURKE, Helsingin asemakaavojen vähähiilisyyden arviointimenetelmä, KEKO

---

---

**Author** Ville Tevajärvi

---

**Title** Methods in Calculating the Life Cycle Emissions of a Detailed Plan

---

**Major** Spatial Planning and Transportation Engineering      **Code of major** ENG26

---

**Supervisor** Prof. Raine Mäntysalo

---

**Advisors** M.Sc. (Archit.) Johanna Närhi, M.Sc. (Tech.) Antti Rahiala

---

**Date** 28.2.2022

**Number of pages** 65

**Language** Finnish

---

**Abstract**

This thesis investigated the different methods that can be used in estimating the life cycle emissions of a detailed plan. It was noticed that there are plenty of these tools, but they are designed for different purposes and have their own strengths and weaknesses, which limit their use. Also the available initial data defines which tools can be used, as these tools require different kinds of data.

It was noticed that among these tools especially the KURKE tool succeeded in a scenario analysis of a detailed plan that compares different transportation scenarios. This was because KURKE allows the user to determine how strongly certain planning solutions that decrease car usage are taken into account. A similar approach was proposed for another tool (called HAVA) that the city of Helsinki was developing during this thesis was written, which allowed the user only to make a binary choice on whether these solutions were taken into account or not.

It was also noticed that in the tool that the city of Helsinki was developing, the emission factors of street building were most likely too small. This was especially probable in case the streets need stabilization. It was proposed that the tool could take the stabilization into account in order to get more accurate results. This was already possible in another tool called KEKO, and a similar approach was proposed to the HAVA tool.

In addition to these, it was noticed in the case study area calculations that more dense building and better transportation solutions that decrease the usage of private car both lead to major decrease in the life cycle emissions of the study area. This applies even though the building emissions increase in a more dense scenario.

---

**Keywords** carbon footprint, EIO-LCA, calculation methods, KURKE, KEKO, HAVA

---

# Sisällys

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>iii</b>
<b>Sisällys</b>	<b>iv</b>
<b>Yksiköt</b>	<b>viii</b>
<b>Termit, lyhenteet ja matemaattiset merkit</b>	<b>ix</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
1.1 Taustaa . . . . .	1
1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset . . . . .	2
<b>2 Erilaiset päästölaskurit</b>	<b>3</b>
2.1 Yleiskatsaus . . . . .	3
2.2 KURKE-projekti . . . . .	4
2.3 MALTTI-työkalu . . . . .	5
2.4 KEKO-työkalu . . . . .	7
2.5 Helsingin asemakaavojen vähähiilisyiden arviointimenetelmä eli HAVA	8
2.6 One Click LCA . . . . .	10
2.7 Hiilitaselaskuri . . . . .	10
2.8 EcoBalance-arviointimalli . . . . .	12
2.9 KILVA . . . . .	13
<b>3 Elinkaariarviointi</b>	<b>14</b>
3.1 Prosessi-LCA . . . . .	15
3.2 Panos-tuotos-LCA . . . . .	16
3.2.1 EIO-LCA-menetelmän matemaattinen perusta . . . . .	17
3.3 Hybridimallit . . . . .	20
<b>4 Elinkaarimallien käytännön sovelluksia</b>	<b>22</b>
4.1 Hybridimallien sovelluksia . . . . .	22
4.2 Porvoon Skaftkärr - esimerkki prosessimallista . . . . .	23
<b>5 Ominaispäästökertoimia</b>	<b>26</b>
5.1 Rakentaminen ja purkaminen . . . . .	26
5.2 Infrastrukturi . . . . .	26
<b>6 Case-kohde: Pihlajamäen ostoskeskuksen kaavamuutos</b>	<b>29</b>
6.1 Alueen esittely . . . . .	29
6.2 Kaavamuutoksen tarjoamat lähtötiedot . . . . .	32
6.3 Asemakaavan elinkaari päästöjen laskennan metodi . . . . .	34

<b>7</b>	<b>Skenaario 1: Business As Usual</b>	<b>36</b>
7.1	HAVA-työkalu eli Helsingin asemakaavojen vähähiilisyysarviointimenetelmä . . . . .	36
7.2	KEKO-työkalu . . . . .	39
7.3	Yhdistelmämenetelmä . . . . .	40
7.3.1	Katujen rakentamisen päästöjen laskenta EIO-LCA-menetelmällä	40
7.3.2	Rakennusten rakentamisen päästöjen arviointi One Click LCA:lla	43
7.3.3	Kaava-alueen energiankulutuksen päästöt KURKE-työkalulla .	44
7.3.4	Yhdistelmämenetelmän tulos . . . . .	46
<b>8</b>	<b>Skenaario 2: Paremmat liikenneratkaisut</b>	<b>48</b>
<b>9</b>	<b>Skenaario 3: Tiiviimpi rakentaminen</b>	<b>51</b>
9.1	HAVA-työkalu . . . . .	51
9.2	KEKO-työkalu . . . . .	51
9.3	Yhdistelmämenetelmä . . . . .	52
9.3.1	One Click LCA . . . . .	52
9.3.2	KURKE-työkalu . . . . .	53
9.3.3	Yhdistelmämenetelmän tulos . . . . .	53
<b>10</b>	<b>Tulosten tulkinta ja yhteenveto</b>	<b>54</b>
10.1	BAU-skenaario . . . . .	54
10.2	Skenaario 2 . . . . .	57
10.3	Skenaario 3 . . . . .	57
<b>11</b>	<b>Johtopäätökset ja kehitysehdotukset</b>	<b>58</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>60</b>
	<b>Liite 1</b>	<b>65</b>

## Kuvat

1	KURKE-työkalun tulostusnäkyminen. . . . .	5
2	KEKO-laskennan tulostusnäkyminen. . . . .	7
3	Hiilitaselaskurin toimintaperiaate kolmella eri tarkkuustasolla. . . . .	11
4	EcoBalance-arviointimallin periaatekaavio. . . . .	13
5	Koksiuunin prosessimalli. . . . .	15
6	Skaftkärrin vertailumallien päästöjä. . . . .	24
7	Case-kohteen sijainti. . . . .	29
8	Case-kohteen kaavamuutosehdotus . . . . .	31
9	Alueen päästöt HAVA:lla (skenaario 1). . . . .	37
10	KEKO:n laskemat kumulatiiviset päästöt (skenaario 1) . . . . .	39
11	Asuinrakennuksen materiaaleihin sitoutuneet päästöt (skenaario 1). . . . .	43
12	Alueen päästöt KURKE:lla vuonna 2025 (skenaario 1). . . . .	45
13	Alueen keskimääräiset päästöt vuosina 2025–2075 KURKE:lla (skenaario 1). . . . .	46
14	KURKE-työkalulle syötetyt liikenteellisten parannusten tiedot (skenaario 2). . . . .	48
15	KURKE-työkalun arvioimat päästöt liikenteellisten parannusten jälkeen (skenaario 2). . . . .	49
16	KURKE-työkalun arvioimat kulkutapajakaumat (skenaario 2). . . . .	49
17	KEKO-työkalun laskemat kumulatiiviset päästöt (skenaario 3) . . . . .	52
18	KURKE-työkalun arvioimat päästöt (skenaario 3). . . . .	53
19	HAVA:n huomioimat elinkaaren vaiheet rakennusten ja tonttien osalta. . . . .	55

## Taulukot

1	Muutamia kasvihuonekaasuja ja niiden GWP-arvoja. . . . .	viii
2	Panos-tuotos-taulukko. . . . .	18
3	EIO-LCA-mallinnuksen tulos, josta on poistettu sektorit, joihin sovel- letaan prosessidataa. . . . .	22
4	Päästötietokannan ominaispäästökertoimia rakentamiselle. . . . .	26
5	Ominaispäästökertoimia katuprojekteille. . . . .	27
6	Ominaispäästökertoimia tieprojekteille. . . . .	28
7	Kaavamuutosehdotuksen alamerkinnyt . . . . .	33
8	Rakennusten elinkaaren vaiheet. . . . .	34
9	HAVA-laskennassa käytettäviä pinta-aloja. . . . .	36
10	Alustava yhden sektorin EIO-LCA-mallinnus (skenaario 1). . . . .	41
11	Meripihkatien EIO-LCA-mallinnuksen tulos (skenaario 1). . . . .	41
12	Moreenitien EIO-LCA-mallinnuksen tulos (skenaario 1). . . . .	42
13	EIO-LCA-mallinnuksen lopputulos (skenaario 1). . . . .	42
14	Rakennusten rakentamisen kokonaispäästöt (skenaario 1). . . . .	44
15	Rakennusten rakentamisen kokonaispäästöt (skenaario 3). . . . .	52

## Yksiköt

Kasvihuonekaasuja on paljon. Päästöistä puhuttaessa termit menevät usein sekaisin, mikä ei ainakaan helpota erilaisten tulosten vertailua.

Taulukko 1: Muutamia kasvihuonekaasuja ja niiden GWP-arvoja. United States Environmental Protection Agency, 2021.

Kaasu	GWP (Global Warming Potential)
Hiilidioksidi ( $CO_2$ )	1
Metaani ( $CH_4$ )	25
Dityppioksidi ( $N_2O$ )	298
Fluoratut kasvihuonekaasut	12200-22800

Käytännössä usein puhutaan  $CO_2e$ -arvosta (hiilidioksidiekvivalentti), joka summaa useita kasvihuonekaasuja yhden yksikön alle. Se lasketaan kertomalla kunkin kaasun päästöt niiden GWP-kertoimella ja summaamalla ne yhteen. Tämä luku siis kertoo, kuinka suurta määrää pelkkää hiilidioksidia jotkut havaitut kaasut yhteensä vastaavat. Taulukosta 1 nähdään, että metaanin GWP-luku on 25-kertainen hiilidioksidin verrattuna, eli metaani on voimakkuudeltaan 25-kertainen kasvihuonekaasu hiilidioksidin verrattuna.

Eri hiilidioksidiekvivalentteja vertaillessa on tärkeää tietää, mitä kaasuja eri laskelmat sisältävät. Lisäksi joskus puhutaan pelkästä hiilestä, joka voi tarkoittaa lähteestä riippuen pelkkää hiilidioksidia tai useita kasvihuonekaasuja. Tämän termin käyttö voi olla harhaanjohtavaa. (Brander, 2012)

Kun tässä diplomityössä puhutaan päästöistä, tarkoitetaan hiilidioksidiekvivalenttia, ellei toisin mainita. Esimerkiksi Skaftkärr-esimerkissä yksikkönä ei ole hiilidioksidiekvivalentti, koska laskennassa on huomioitu pelkästään hiilidioksidi. Tällöin yksikkönä on  $CO_2$ .

## Termit, lyhenteet ja matemaattiset merkit

Alla on listattuna tässä diplomityössä käytettyjä termejä ja lyhenteitä selitteineen.

- EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment) - Eräänlainen panos-tuotos-malli (ks. luku 3.2.1)
- Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment, LCA) - Tarkoittaa tuotteen tai palvelun koko elinkaaren ympäristövaikutusten arviointia (ks. luku 3)
- Elinkaarimalli - Malli, joka huomioi koko tuotteen tai palvelun elinkaaren ympäristövaikutukset
- ENVIMAT - Suomen ympäristökeskuksen kehittämä panos-tuotos-malli
- HAVA - Helsingin asemakaavojen vähähiilisyden arviointimenetelmä (kts. luku 2.5)
- ILKKA (Ilmastokestävä kaupunki) - Hanke, jossa kehitettiin muun muassa Hiilitaselaskuri (kts. luku 2.7)
- KEKO - Kaavoituksen ekolaskuri (kts. luku 2.4)
- KIILVA (Ilmastokestävä kaavoitus) - Työkalu kaavoituksen ilmastokestävyyden arviointiin (kts. luku 2.9)
- KURKE (Kunnallisten rakennushankkeiden kestävät energiaratkaisut aluenäkökulmasta) - Projekti, jossa on kehitetty samalla nimellä tunnettu työkalu (kts. luku 2.2)
- MALTTI - Matalahiilisen aluekehityksen työkalu (kts. luku 2.3)
- MRL - Maankäyttö- ja rakennuslaki
- Panos-tuotos-malli - Elinkaarimalli, joka perustuu kansantalouden jakamiseen eri sektoreille ja sektoreiden välisten rahallisten panosten ja tuotosten arvioimiseen (ks. luku 3.2)
- Prosessi-LCA tai prosessimalli - Yksikköprosesseihin perustuva elinkaariarviointi, jossa kullakin prosessilla on panoksia ja tuotoksia (ks. luku 3.1)
- TEMIS (Total Emission Model for Integrated Systems) - Eräs malli elinkaari-päästöjen laskentaan (ks. luku 2.8)
- Yksikköprosessi - Yksittäinen prosessi-LCA:n prosessi (ks. luku 3.1)

Työssä käytetään myös seuraavia matemaattisia merkkejä ja laskutoimituksia.

Summa:

$$\sum_{n=1}^m n = 1 + 2 + 3 + \dots + m$$

Pistetulo:

$$\vec{p} \cdot \vec{q} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2$$

# 1 Johdanto

## 1.1 Taustaa

Vuonna 1994 voimaan tulleessa YK:n ilmastonmuutosta koskevassa puitesopimuksessa, Kioton pöytäkirjassa ja Pariisin sopimuksessa on tehty kansainvälisellä tasolla tärkeitä ilmastopoliittisia linjauksia. Ilmastopuitesopimuksessa annetaan ilmastonmuutoksen hillitsemiseen tähtääville kansainvälisille pyrkimyksille tavoitteet, periaatteet ja muut yleiset puitteet. Kehittyneille maille annetaan erityinen velvoite johtaa ilmastonmuutoksen hillitsemiseen tähtääviä toimia. Kaikilla mailla tulisi olla toimia, joilla pyritään hillitsemään ilmastonmuutosta. Kansalliset päästöt ja hiilinielut raportoidaan vuosittain. Lisäksi osapuolet raportoivat 3–4 vuoden välein ilmastotoimista, joita ne ovat tehneet ilmastopuitesopimuksen ja Kioton pöytäkirjan toimeenpanemiseksi. (Ympäristöministeriö, 2021a)

Kioton pöytäkirjassa oli määritelty jokaiselle pöytäkirjaan sitoutuneelle maalle päästövähennystavoitteet, mutta keinot olivat vapaat. Käytännössä maat ovat kehittäneet kukin omalla tahollaan omia ilmasto-ohjelmiaan, joissa määritellään kansalliset toimenpiteet tavoitteiden saavuttamiseksi. Pariisin sopimus korvaa käytännössä Kioton pöytäkirjan ja koskee vuoden 2020 jälkeistä aikaa. Siinä osapuolet sitoutuvat valmistelemaan, tiedottamaan, ylläpitämään sekä saavuttamaan peräkkäiset kansallisesti määritellyt ilmastotavoitteensa. Pariisin sopimus ei sisällä määrällisiä päästövähennystavoitteita. (Ympäristöministeriö, 2021a)

Lisäksi Suomessa on astunut vuonna 2015 voimaan ilmastolaki, jossa säädetään suunnitelmista, joilla Suomen kasvihuonekaasupäästöjä vähennetään. Laki velvoittaa lisäksi valtion viranomaisia seuraamaan ja raportoimaan päästökehityksestä. Tämän diplomityön tekemisen aikana ilmastolaki on käymässä läpi uudistusta, jonka tavoitteena on kehittää lakia niin, että Suomen tavoite olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä toteutuu. Ilmastolain lausuntopyynnössä kerrotaan lisätavoitteeksi olla hiilinegatiivinen vuoden 2035 jälkeen. (Ympäristöministeriö, 2021b)

Myös maankäyttö- ja rakennuslaki käy läpi uudistusta tämän diplomityön tekemisen aikana. Uuteen lakiin kaavaillaan erillistä ilmastopykälää, joka painottaisi yhdyskuntarakenteen eheyttä, olemassa olevan infrastruktuurin kestävää hyödyntämistä, edellytysten luomista vähähiiliselle ja kestäväälle liikennejärjestelmälle sekä uusiutuvien ja vähähiilisten energiamuotojen hyödyntämiselle. Uudistuksen myötä ilmastonmuutos tunnistetaan maankäyttö- ja rakennuslaissa aiempaa suurempana haasteena. (Ympäristöministeriö, 2021c)

Rakennukset tuottavat noin kolmanneksen kaikista kasvihuonekaasupäästöistä maailmanlaajuisesti (YK, 2017; Säynäjoki et al. 2011a). Rakennustoiminta aiheuttaa päästöjä, mutta elinkaaritarkastelussa niiden merkitys on merkittävästi pienempi

kuin rakennusten, rakenteiden ja liikenteen käytönaikaisten päästöjen. Rakennustoiminnan päästöjen osuus koko rakennuksen elinkaaripäästöistä on kuitenkin nousussa, koska rakennusten energiatehokkuus kasvaa jatkuvasti ja ne kuluttavat elinkaarensa aikana yhä vähemmän energiaa (Säynäjoki et al. 2012).

Yleisesti lähes puolet kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu yhdyskuntien toiminnasta. Lisäksi Suomen yhdyskunta on harvaan rakennettu, ja esimerkiksi muiden pohjoismaiden yhdyskunnat ovat jopa kolme kertaa tiheämmin asuttuja (Lahti & Moilanen, 2010). Suomessa yhdyskuntarakenteen muutoksilla ja energiatehokkailla rakennusvalinnoilla voi siis olla merkittäviä vaikutuksia yhdyskunnan hiilijalanjälkeen.

Koska yhdyskuntien merkitys kokonaispäästöjen kannalta on suuri, myös vaikutusmahdollisuudet ovat suuret. Kunnat ovat avainasemassa paikallisten hiilidioksidipäästöjen alentamisessa (Neves & Leal, 2010), ja tällä tasolla voi vaikuttaa ainakin rakennusten suunnitteluun, liikenteeseen ja käytettyihin energialähteisiin. Tässä työssä paneudutaan aiheeseen tutkimalla menetelmiä, joita voi käyttää erityisesti asemakaavojen elinkaaripäästöjen arviointiin.

## 1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Työ on kaksiosainen. Ensimmäisessä osassa käydään läpi erilaisia työkaluja, joita voi käyttää asemakaavojen elinkaaripäästöjen arviointiin. Tavoitteena on saada yleiskuva käytössä olevista työkaluista ja niiden ominaisuuksista.

Toisessa osassa käytetään muutamaa työkalua case-kohteen elinkaaripäästöjen arviointiin. Tavoitteena on paitsi saada yleiskäsitys case-kohteen ilmastovaikutuksista, antaa myös kehitysehdotuksia käytettyihin työkaluihin. Case-kohteen elinkaaripäästöjä arvioidaan erilaisilla skenaarioilla, jolloin ilmenee, miten erilaiset toimenpiteet voivat vaikuttaa päästöihin.

Työ rajautuu tutkimaan erityisesti ilmastovaikutuksia, vaikka joissain esitellyissä menetelmissä on mahdollista arvioida myös muita ympäristövaikutuksia.

## 2 Erilaiset päästölaskurit

### 2.1 Yleiskatsaus

Suomen ympäristökeskus on kehittänyt Kasvener- ja Kuhilas-työkalut, jotka tarjoavat kunnille mahdollisuuden arvioida toiminnastaan aiheutuvia ilmastovaikutuksia, joskin Kasvenerin ongelmana oli epäsuorien päästöjen puuttuminen laskennasta. Tämä tarkoitti käytännössä sitä, että pääkaupunkiseudun  $CO_2e$ -lukemat olivat virheellisesti 6 tonnia pienemmät asukasta kohden kuin muualla Suomessa. Kuhilas ottaa huomioon myös epäsuorat päästöt. Kuhilas laskee päästöihin mukaan kotitalouksien kulutuksen lisäksi myös julkisen kulutuksen sekä investoinnit, eli päästöluvuissa näkyvät myös vienti- ja tuontituotteiden tuottamat päästöt. (Suomen ympäristökeskus, 2012)

Vaikka nämä laskurit keskittyvätkin koko kunnan tason päästöihin, niiden antamista arvioista voi mahdollisesti olla hyötyä myös kaavoituksessa.

Kaavoituksen yhteydessä tehtävää päästöjen arviointia varten on olemassa muutamia kotimaisia laskentatyökaluja. KURKE-projektissa kehitettiin menettelytapoja ja työkaluja alueellisen energiatehokkuuden huomioonottamiseksi ja arvioimiseksi kunnallisten rakennushankkeiden alueellisessa suunnittelussa (Lahti et al. 2012). Vuonna 2014 päättyneessä LOCO-hankkeessa (Low Carbon Neighbourhood Construction) tuotettiin MALTTI - matalahiilisen aluerakentamisen hiililaskentatyökalu, jonka toteutti Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun maanmittaustieteiden laitos. MALTTI-työkalun lisäksi projektissa luotiin kriteeristö matalahiilisen kaupunkikehityksen tueksi. KEKO (kaavoituksen ekolaskuri) taas on Suomen ympäristökeskuksen, Aalto-yliopiston ja VTT:n kehittämä, maankäytön suunnittelun tueksi tarkoitettu laskentatyökalu. Ympäristöministeriön rahoittamassa ilmastokestävä kaavoitus-checklist-hankkeessa puolestaan laadittiin KILVA-työkalu, joka arvioi kaavan ilmastoystävällisyyttä sanallisesti. Näiden työkalujen lisäksi Helsingin kaupunki kehittää Sitowisen avulla Helsingin asemakaavojen vähähiilisyyden arviointi -työkalua (Helsingin kaupunki, 2021), jolla voi arvioida KEKO-työkalun tavoin asemakaavojen elinkaaripäästöjä ja parantaa kaavojen ekologista kestävyyttä.

Erilaisia työkaluja on kehitetty myös yleisempään käyttöön, ja näistä kaavatasolla käytettäväksi sopii muun muassa One Click LCA, josta löytyy useita eri työkaluja, joilla voi arvioida yksittäisten rakennusten ja infrakohteiden elinkaaripäästöjä. ILKKA-hankkeen yhteydessä kehitettiin hiilitaselaskuri (Helsingin kaupunki, 2014a), jonka avulla voi arvioida maankäytön muutoksen myötä tapahtuvaa alueen kasvillisuuden ja maaperän hiilivarastojen muutosta. Lisäksi Irmeli Wahlgrenin väitöskirjan (Wahlgren, 2017) yhteydessä kehitettiin EcoBalance-arviointimalli, jonka avulla voi arvioida yhdyskuntarakenteen ekologisuutta.

Seuraavissa luvuissa tutkitaan tarkemmin näitä laskureita.

## 2.2 KURKE-projekti

Tämän luvun tiedot perustuvat raporttiin Kunnallisten rakennushankkeiden kestävästi energiaratkaisut aluenäkökulmasta (Lahti et al. 2012), jossa raporttoitiin KURKE-projektin tuloksista.

KURKE-projektissa kehitettiin kaksi työkalua. Ensimmäinen näistä on VTT:n kehittämä ja tarkoitettu alueellisen energiatehokkuuden vertailuun. Toinen puolestaan on Aalto-yliopistossa kehitelty ja suunnattu rakennustason energiaratkaisuiden ja niiden kustannusten arviointiin. Molemmat työkalut ovat ilmaisia ja saatavilla verkossa. Tässä luvussa selvitetään alueellisen energiatehokkuuden mallin toimintaa.

Malli laskee rakennusten energiantarpeen ja niiden aiheuttamat päästöt sekä henkilöliikenteen liikennesuoritteet ja siitä aiheutuvat päästöt. Rakenteisiin sitoutunutta energiaa ei huomioida, eli rakennusmateriaalit ja rakentaminen jätetään laskennan ulkopuolelle. Päästöt mitataan hiilidioksidiekvivalenttina  $CO_2e$ .

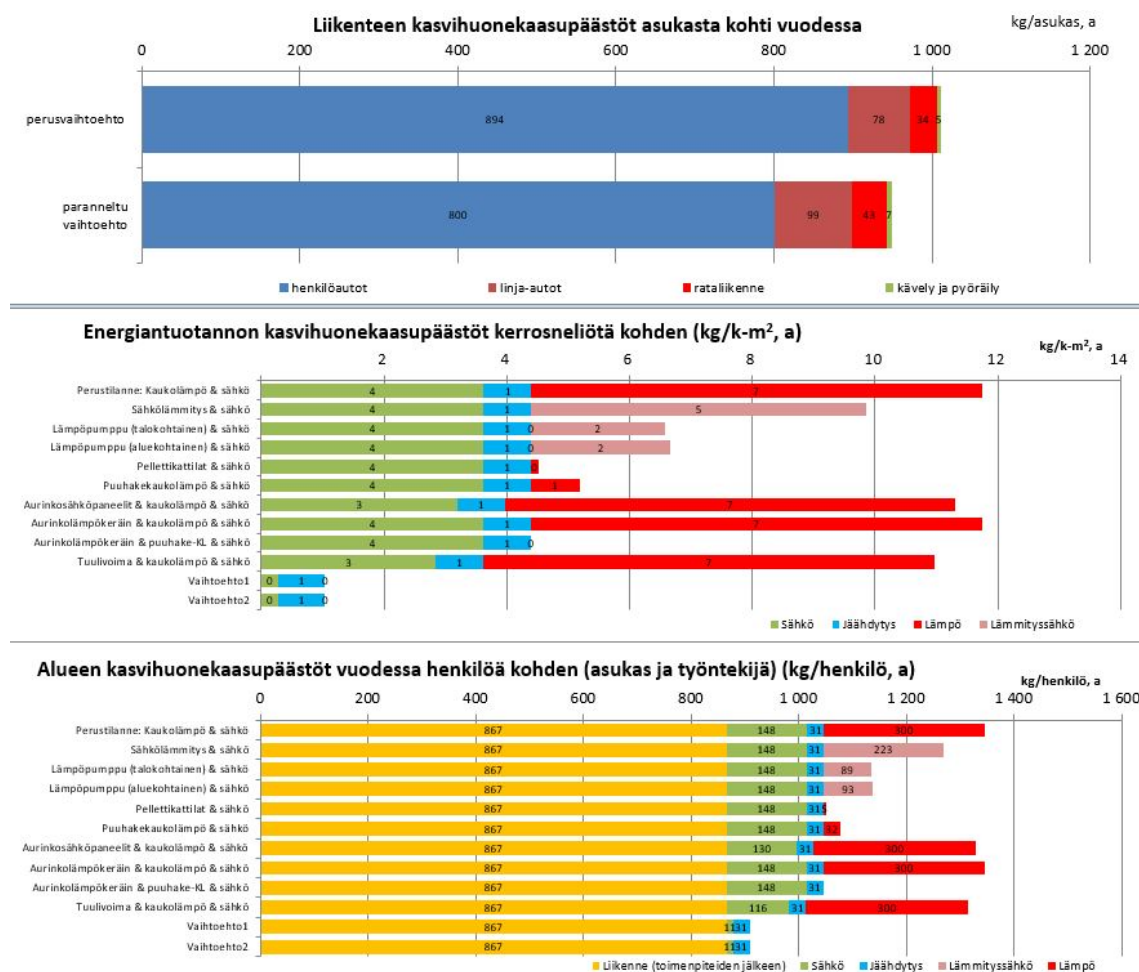
Rakennusten energiankulutuksen arviointia varten työkalussa on kuusi erilaista rakennustyyppiä. Kullakin rakennustyyppillä on oletusarvot, joita voi tarpeen vaatiessa muokata. Työkalulle annetaan lisäksi tiedot rakennusten kerrosalasta. Energiankulutus arvioidaan neljän eri energiaa kuluttavan toiminnon ominaiskulutuskertoimien ( $kWh/k - m^2, a$ ) avulla. Näitä toimintoja ovat tilojen lämmitys, lämmin käyttövesi, sähkö ja jäähdytys. Lämmitys- ja sähköntuotantotapojakin työkalu tarjoaa useita.

Lämmitykselle voi valita kaukolämmön, sähkölämmityksen, maalämmön, pellettikattilan, puuhakekaukolämmön tai aurinkolämmön. Sähkölle taas keskimääräisen verkkosähkön, tuulisähkön tai aurinkosähkön. Rakennuksilla voi olla useita lämmitys- ja sähköntuotantotapoja, ja käyttäjä voi määrittää niiden osuudet. Oletusasetuksissa käytetään kaukolämmön päästöjen jyvittämiseksi hyödynjakomenetelmää. Lisäksi esimerkiksi kaukolämmön siirtohäviö otetaan huomioon, ja sitä arvioidaan aluetehokkuudella, jonka käyttäjä kertoo työkalulle. Energiantuotannon ominaispäästöjä ei ole laskettu LCA:lla, eli niistä puuttuu osin elinkaarinäkökulma. Tämä ei ole toisaalta poikkeuksellista, koska myös KEKO-työkalussa on laskettu energiantuotannon päästöt suorina päästöinä (ks. luku 2.4).

Työkalu laskee myös henkilöliikenteen suoritteet ja päästöt. Niiden laskemiseksi käytetään pohjana henkilöliikennetutkimusta ja LIPASTO-tietokantaa, jotka listavat keskimääräisiä liikennesuoritteita eri kokoisille kaupungeille ja taajamille sekä keskimääräisiä päästöjä matkayksikköä kohden. Henkilöliikennetutkimuksessa on huomioituna niin arkimatkat kuin vapaa-ajan matkat kotimaahan ja ulkomaille. LIPASTO-tietokannassa olevat päästöt ovat niin sanottuja pakoputkipäästöjä, eli ne huomioivat vain polttoaineen palamisessa syntyvät päästöt. Työkalu antaa myös mahdollisuuden tutkia, miten erilaiset henkilöautoliikenteen osuuden pienentämiseen tähtäävät toimenpiteet voivat vaikuttaa suunnittelualueella. Näitä toimenpiteitä ovat

erilliset pyörätiet ja kunnolliset pyörien pysäköintitilat, keskitetyt autojen pysäköinti-ratkaisut, lähijunien asema alueella, lähellä olevat palvelut, laadukas joukkoliikenne ja laadukkaat kävelyreitit.

KURKE-työkalu tekee automaattisesti skenaariovertailua eri energiantuotantovalintojen välillä (kuva 1), minkä lisäksi se ilmoittaa myös rakennusten energiantarpeen.



Kuva 1: KURKE-työkalun tulospäätelmä.

## 2.3 MALTTI-työkalu

Tämän luvun tiedot perustuvat raporttiin Työkaluja vähähiiliseen aluerakentamiseen (Säynäjoki et al. 2014).

MALTTI-työkalu kehitettiin LOCO-hankkeessa (Low Carbon Neighbourhood Construction). Hankkeen työryhmään kuuluivat Culminatium Innovation Oy Ltd, Helsingin ja Vantaan kaupungit, Helsingin seudun ympäristöpalvelut ja Aalto-yliopisto.

Hankkeen tuloksena syntyi MALTTI-työkalu, joka perustuu Aalto-yliopistossa vuosina 2009-2013 tehtyyn tutkimukseen.

MALTTI-työkalu ottaa laskentaan elinkaarinäkökulman ja huomioi energiantuotannon, rakentamisen, liikenteen ja muun kulutuksen eli tavaroiden ja palveluiden ostamisen. MALTTI-työkalu on siis kulutuslähtöinen ja elinkaariperustainen malli. Rakentamisen päästöjen laskemisen pohjana toimii kustannusperustainen panos-tuotos-malli, jonka pohjalta on kehitelty hybridimalli ottamaan huomioon materiaalivalmistajien ja energiantuotannon ajantasaiset päästöprofiilit. Myös alueiden käytön päästöjen ja kuluttajien hiilijalanjäljen laskennassa hyödynnetään vastaavaa mallia, joka hyödyntää paikallisia energiantuotannon päästöprofileja. Nämä hybridimallit pohjautuvat suomalaiseen ENVIMAT-panos-tuotosmalliin.

MALTTI-työkalussa, kuten KURKE-työkalussakin, käyttäjä voi valita eri rakennustyypeistä sekä sähkön- ja lämmöntuotantotavoista ja vertailla niitä. Oletuksena kaukolämmön päästöjen jyvittämiselle käytetään hyödynjakomenetelmää, mutta jyvittämisperiaatetta voi muuttaa. Sähköntuotannon osalta vaihtoehtoina on suomalainen verkkokeskiarvosähkö, pohjoinen verkkokeskiarvo, paikallisen yhteistuotantolaitoksen sähkö hyödynjakoperiaatteen mukaan lasketuilla päästöillä sekä marginaalisähkö, joka edustaa korkeinta mahdollista päästömäärää. Lisäksi tarjolla on aurinko- ja tuulivoimavaihtoehdot. Erilaisia rakennustyyppisiä on neljä, joista jokaisella on omat energiankulutuslukemansa.

MALTTI arvioi asuinalueiden hiilijalanjälkeä tietyn aikavälin kumulatiivisena päästökertymänä. Tällöin on mahdollista nähdä esimerkiksi päästövähennystavoitteiden toteutumismahdollisuudet. Erityisesti rakennusvaiheessa syntyy nopeasti paljon päästöjä, ja niiden kompensoituminen saattaa ekologisillakin rakennuksilla ja kaavaratkaisuilla kestää pitkään. Nyt ja tulevaisuudessa syntyvien päästöjen ei siis oleteta olevan samanarvoisia keskenään. MALTTI pysyttelee laskelmissa kuitenkin melko karkealla tasolla, koska sen tarkoituksena on osoittaa vain suuntaviivoja kehitykselle. Käyttäjällä on valittavanaan kolme erilaista skenaariovaihtoehtoa asuinalueelleen energiankulutuksen ja liikennesuoritteiden osalta: Pessimistinen skenaario, maltillinen skenaario ja optimistinen skenaario. Eri skenaarioissa energiantuotannon tai liikenteen päästöjen määrä vähenee eri tahdeilla.

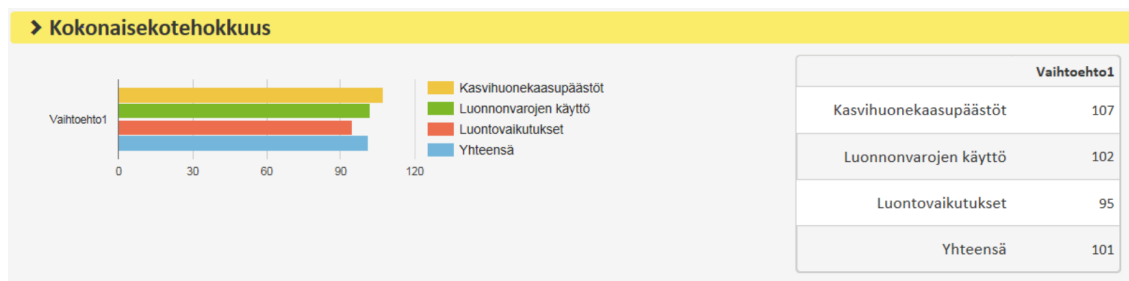
MALTTI-työkalu soveltuu kaavoituksen yhteydessä käytettäväksi apuvälineeksi, ja sen avulla voi tehdä arvioita kaava-alueen kasvihuonekaasupäästöistä. MALTTI näyttää erilaisten suunnitteluratkaisuiden vaikutukset erilaisilla tarkastelujaksoilla ja sisältää aina kokonaishiilijalanjäljen. MALTTI on käypä työkalu kaavatasolla eri alueiden vaihtoehtojen vertailuun. Toisaalta MALTTI menee laskelmissa globaalille kontekstille, koska se ottaa huomioon asukkaiden kaiken kulutuksen. Se mahdollistaa siis päästöjen leikkaamisen globaalilla tasolla.

## 2.4 KEKO-työkalu

Tämän luvun tiedot perustuvat KEKO-työkalun dokumentaatioon, joka on saatavilla Ympäristöhallinnon verkkosivuilla. (Ympäristöhallinto, 2016)

KEKO-työkalu on Suomen ympäristökeskuksen, VTT:n ja Aalto-yliopiston kokoama ekologisen kestävyuden laskuri, joka on tarkoitettu maankäytön suunnittelun tueksi. KEKO laskee rakennetun ympäristön vaikutuksia tuotanto- ja käyttövaiheesta. Näihin lasketaan mukaan maankäytön muutosten luontovaikutukset, rakennusten ja infrastruktuurin rakentamisen ja käytön vaikutukset sekä henkilöliikenteen vaikutukset. Laskennan lähtötietojen syöttämisessä on otettu huomioon maankäytön suunnittelussa käytetyt kaavamerkinnät ja saatavilla olevat tiedot.

Laskuri laskee alueelle indeksi-arvon kolmelle osa-alueelle: kasvihuonekaasupäästöille, luonnonvarojen käytölle sekä vaikutuksille luonnon monimuotoisuuteen ja ekosysteemipalveluihin. Indeksiarvo kuvaa vaikutusten suuruutta suhteessa suomalaisten kaupunkiseutujen viime vuosien keskiarvoon. Laskuri laskee alueelle kokonaistehokkuuden näiden kolmen indeksin keskiarvona. Vertailulukuna on 100, joka kuvaa muiden Suomessa viime vuosina rakennettujen alueiden keskiarvoa. Näin ollen kuvaa 2 voi tulkita niin, että kokonaiskotehokkuus ei juuri eroa keskiarvosta, mutta esimerkiksi kasvihuonekaasupäästöjen ja luonnonvarojen käytön osalta ollaan keskiarvon yläpuolella.



Kuva 2: KEKO-laskennan tulospöytä. Ympäristöhallinto, 2016.

KEKO-laskuri erittelee myös tarkemmin kasvihuonekaasupäästöt ja niiden lähteet. Kaikki päästöt lasketaan 50 vuoden ajalle, ja lisäksi asukasluvun muutos huomioidaan laskuissa. KEKO-laskurissa on siis samanlainen aikaperspektiivi kuin MALTTI-työkalussa. KEKO-laskurissa eritellään luonnonvarojen käyttö rakennuksiin ja infrastruktuuriin. Luontovaikutukset eritellään myös, ja esimerkiksi vaikutukset arvokkaisiin luontoalueisiin on huomioitu. Mukana on myös vaikutukset maanpinnan läpäisevyyteen ja biomassan nettoprimäärituotantoon. Yleisesti erilaisia vaikutuksia on eritelty laajasti. KEKO-laskuri huomioi laskelmissa rakennetun ympäristön rakentamisen ja ylläpidon, käytönaikaisen energiankulutuksen sekä henkilöliikenteen. Asukkaiden muu kuluttaminen jää siis laskennan ulkopuolelle, toisin kuin MALTTI-työkalussa. Rakentamisen päästöjen laskenta pohjautuu laajaan kirjallisuuskatsaukseen, jossa on tutkittu aiemmin LCA-menetelmillä tehtyjä laskelmia.

Sen sijaan energiantuotannon päästöt lasketaan suorina päästöinä, joista puuttuu elinkaarinäkökulma, samoin kuin KURKE:ssakin. KEKO-työkalun dokumentaation mukaan elinkaaripäästöjen laskeminen energiantuotannolle on haasteellista.

KEKO-työkalussa on neljä oletusrakennustyyppiä. Rakennustyypeillä on rakentamiseen liittyvien päästöjen lisäksi myös oletusarvot energiankulutukselle, joskin käyttäjä voi lisätä omia arvojaan. Päästöjen jakamiseen sähkölle ja lämmölle käytetään hyödynjakomenetelmää. Kunnossapidon kasvihuonekaasupäästöt on laskettu LCA-menetelmällä, ja laskennassa on otettu huomioon 20 erilaista kunnossapitotoimenpidettä.

Liikenteen päästöistä huomioidaan henkilöliikenteen päästöt, ja ne lasketaan pohjautuen henkilöliikennetutkimukseen ja LIPASTO-tietokantaan. Näitä keskiarvolukuja kuitenkin tarkennetaan ottamaan huomioon esimerkiksi palveluiden etäisyys kohteesta. LIPASTO-tietokannassa olevat päästöt ovat niin sanottuja pakoputkipäästöjä, eli ne huomioivat vain polttoaineen palamisessa syntyvät päästöt.

KEKO-työkalua kehitetään ja ylläpidetään edelleen, ja sen käytöstä peritään maksu. Perittävän maksun summa riippuu siitä, kuka työkalun tilaa. Kunnille hinta on kunnan koosta riippuen 900-2900 euroa vuodessa. Yliopistoille työkalu maksaa 1900 euroa vuodessa. Yrityksille puolestaan liikevaihdosta riippuen 900-3900 euroa vuodessa. Esimerkiksi A-Insinöörit Civil Oy:n kokoiselle yritykselle vuotuinen hinta on 3900 euroa, ja se sisältää 12 lisenssiä. Projektin lähdekoodi on kuitenkin saatavilla ilmaiseksi ymparisto.fi-sivustolla.

## **2.5 Helsingin asemakaavojen vähähiilisuuden arviointimenetelmä eli HAVA**

Tämän luvun tiedot perustuvat Helsingin asemakaavojen vähähiilisuuden arviointimenetelmä -raporttiin (2021).

Helsingin kaupungin tavoitteena on olla hiilineutraali lähitulevaisuudessa. Helsingin asemakaavojen vähähiilisuuden arviointimenetelmä -raportissa sanotaan tavoitevuodeksi 2035, mutta raportin julkaisemisen jälkeen tavoitetta on aikaistettu 5 vuodella, mikä on nähtävissä uudessa kaupunkistrategiassa (2021a).

Helsingin kaupunki on kehittänyt työkalua avuksi asemakaavoituksen ilmastovaiikutusten arviointiin. Työkalun tarkoitus on tarjota menetelmä, jolla voi arvioida vähähiilisiä ratkaisuja asemakaavatyön yhteydessä. Erityisesti työkalu on suunniteltu ottamaan huomioon merkittävimpiä päästölähteitä ja asioita, joihin asemakaavata-solla on mahdollista vaikuttaa. Asemakaava nähdään hieman laajempaan kokonaisuutena kuin pelkkänä kaavana: siihen sisällytetään laajempi kaavan ympärillä oleva suunnittelu- ja selvitystyö.

Työkalu on tarkoitettu Helsingissä tyypillisille asemakaavahankkeille, joiden koko on noin 1–5 tonttia tai korttelia, joihin sisältyy asuin- ja toimitilarakentamista. Arviointijakso on 50 vuotta, ja se on työkalun ensivaiheessa aina 2025–2075. Kaikkien työkalulla arvioitavien kaava-alueiden oletetaan siis valmistuvan vuonna 2025. Syyksi mainitaan Helsingin asemakaavojen vähähiilisyiden arviointimenetelmä -raportissa (2021) työkalun Excel-pohjaisuus ja sen luomat rajoitteet. Jatkokehityksessä voidaan mahdollisesti suunnitella toisenlainen käyttöliittymä.

Helsingin kaupungin mukaan asemakaavatasolla on suuria vaikutusmahdollisuuksia moniin eri asioihin. Erityisen suuri rooli asemakaavalla on rakennusten ja tonttien rakentamisen ja energiankulutuksen hiilijalanjälkeen. Toisaalta myös vaikutusmahdollisuuksia liikenteeseen ja infran päästöihin on, mutta ne eivät ole aivan niin suuria. Asemakaava-alueen sijainti määräytyy hyvin pitkälti yleiskaavatasolla, ja sijainnilla on suuri vaikutus liikenteeseen. Asemakaavatasolla voi kuitenkin edistää vähähiilistä liikkumista esimerkiksi lisäämällä pyöräilyn mahdollisuuksia. Työkalu tarjoaa erilaisia vaikutusmahdollisuuksia kaava-alueen päästöihin, joiden avulla käyttäjä voi tutkia esimerkiksi laadukkaiden kävely-ympäristöjen vaikutuksia liikenteen päästöihin.

Työkalu laskee kaavan vaikutukset seuraaville asioille: esirakentaminen, infra ja yleiset alueet, rakennukset ja tontit, energiankulutus, liikenne sekä maaperän ja kasvillisuuden hiilivarastot.

Esirakentamisen osalta työkalu tarjoaa kertoimet ainoastaan purkamiselle. Muunlaiselle esirakentamiselle tarvitaan erillinen laskenta, jonka tulos syötetään työkalulle. Tässä voi Helsingin asemakaavojen vähähiilisyiden arviointimenetelmä -raportin mukaan käyttää apuna esimerkiksi MELI HEL -työkalua, joka on kehitetty Helsingin kaupungin käyttöön.

Infran ja yleisten alueiden osalta käytetään lähteinä kirjallisuuskatsauksessa löydettyjä ja KEKO-työkalusta otettuja kertoimia. Rakennusten ja tonttien osalta huomioidaan rakentaminen, ylläpito ja purkaminen. Tämä laskenta perustuu ympäristöministeriön selvitykseen Carbon Footprint Limits for Common Building Types (Bionova, 2021), joka kuvaa tyypillistä nykyrakentamista.

Energiantuotannon päästöjen arviot perustuvat Helenin kaukolämmityksen päästöskenaarioon (Helsingin kaupunki, 2021b) ja työ- ja elinkeinoministeriön raportin Yhteenveto toimialojen vähähiilitiekartoista (TEM, 2020) arvioihin sähköntuotannon kehityksestä. Rakennustyyppien energiankulutus perustuu erinäisiin lähteisiin, joiden tiedot on koottu yhteen taulukkoon kuvaamaan sähkön ominaiskulutusta kerrosneliometriä kohden erilaisille rakennustyypeille.

Liikenteen päästöjen laskentaa varten käyttäjä tarkistaa lisäksi alueen sijainnin joukkoliikennevyöhykkeen Liiteri-palvelun kartasta sekä henkilöauto- ja joukkoliikennematkojen keskipituuden, jonka tarkistamiseen on työkalussa oma kartta. Joukkoliikennevyöhykkeen avulla lasketaan matkamäärät eri kulkumuodoille, ja näihin

matkamääriin sisältyy esimerkiksi kaava-alueella sijaitsevan kaupan asiakkaiden matkat. Matkamäärien laskennassa on lisäksi käytetty ympäristöministeriön tutkimusta Liikennetarpeen arviointi maankäytön suunnittelussa (2008). Laskenta sisältää arkimatkat ja kotimaan vapaa-ajan matkat. Laskennat rajautuvat Helsingin seudun liikenteen Helmet-mallin alueelle. Näiden tietojen pohjalta lasketaan liikenteen päästöt käyttäen ominaispäästökertoimia, jotka on koottu liikenne- ja viestintäministeriön perusennusteesta (2020). Liikenteen päästöissä huomioidaan vain niin sanotut pakoputkipäästöt, eli päästöissä ei huomioida esimerkiksi polttoaineen tuotantoa.

## 2.6 One Click LCA

Tämä luku perustuu One Click LCA:n verkkosivuilla (2021) oleviin tietoihin.

One Click LCA on ohjelmisto, joka on tarkoitettu rakennus- ja infrastruktuurihankkeiden elinkaariarviointiin. One Click LCA -ohjelmistosta on saatavilla muutama erilainen versio, joilla voi tehdä erilaisia laskentoja. Rakennusten elinkaariarviointi-työkalulla saa laskettua yksittäisten rakennusten päästöjä ja toisaalta tutkittua, millaisilla valinnoilla rakennuksen elinkaari päästöjä saisi alennettua. Lisäksi on olemassa erillinen työkalu infrastruktuurihankkeen elinkaari päästöjen arvioinnille: se soveltuu esimerkiksi lentokenttien, siltojen, teiden ja jätteenlajittelutilojen päästölaskentaan. Ohjelmisto sisältää myös rakentamisen kiertotalouden ja elinkaarikustannuslaskennan työkalut.

One Click LCA:n Carbon Designer -lisäosa tarjoaa mahdollisuuden luoda tyyppirakennuksia, jotka vastaavat Suomessa tyyppillisesti rakennettavia rakennuksia. Tällaisen lisäosan käyttö saattaa tarjota kaavatasolle mahdollisuuden tehdä arvioita rakentamisen päästöistä. One Click LCA:n Carbon Designer -työkalua on käytetty muun muassa Helsingin Vartiokylänlahden (Helsingin kaupunki, 2020a) elinkaaren aikaisen ilmastopäästöjen arvioinnissa, vaikka työkalua ei suoraan olekaan suunniteltu aluesuunnittelun yhteydessä käytettäväksi (Green Building Council Finland, 2021).

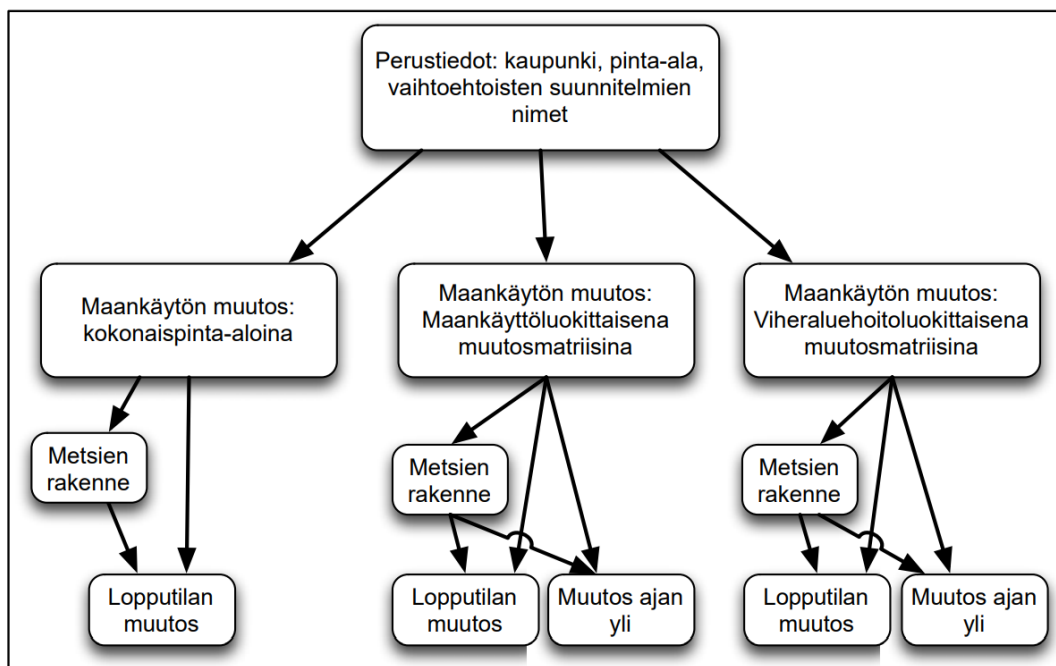
One Click LCA ja sen lisäosat ovat maksullisia, ja sovellus on suomalaisen Bionovan kehittämä. Työkalusta on olemassa kuitenkin ilmainen, Suomen oloihin suunniteltu C-lukulaskuri. Tämä työkalu menee kuitenkin materiaalitasolle, ja se ei todennäköisesti sovellu sellaisenaan kaavoituksen yhteydessä käytettäväksi, mikäli lähtötietona ei ole saatavilla materiaalmääriä.

## 2.7 Hiilitaselaskuri

Tämän luvun tiedot perustuvat Helsingin kaupungin (2014a) julkaisuun Kuntien hiilitasekartoitus osa 2.

ILKKA-hankkeen yhteydessä kehitettiin Hiilitaselaskuri, joka on suunniteltu kaupunkisuunnittelijoiden käyttöön. Työkalulla voi arvioida erilaisten maankäyttötarkaisuiden vaikutuksia suunniteltavan alueen hiilivarastoihin. Työkalu arvioi sekä kasvillisuuden ja maaperän hiilivarastojen muutoksen että puu- ja viherrakentamisen keinojen vaikutuksia hiilivarastojen muutokseen ja kasvihuonekaasupäästöihin. Laskurin lisäksi ILKKA-hankkeessa kehitettiin toimenpidevalikoima, jonka avulla voi vaikuttaa hiilinielujen säilymiseen ja lisäämiseen. Toimenpidevalikoima on suunniteltu tukemaan laskurin käyttöä.

Työkalu on Excel-pohjainen ja sisältää kolme tarkkuustasoa. Tarkkuustason voi valita sen mukaan, millaista lähtötietoa on käytettävissä. Karkeimmalla tarkkuustasolla laskenta tehdään niin, että käyttäjä määrittää metsien, peltojen, avoimien ja rakennettujen viheralueiden sekä rakennetun alueen kokonaispinta-alat ennen maankäytön muutosta ja sen jälkeen. Tarkemmilla tasoilla sovelletaan muutosmatriiseja, joilla saadaan kuvailtua tapahtuvia muutoksia tarkemmin. Muutosmatriiseissa kuvataan, miten eri maankäyttöluokat (tarkkuustasolla 2) tai viheraluehoitoluokat (tarkkuustasolla 3) muuttuvat toisiksi. Muutosmatriisi kuvaa tarkkuustasolla 2 esimerkiksi sen, kuinka monta hehtaaria metsää muuttuu rakennetuksi alueeksi. Kuva 3 selventää eri tarkkuustasojen toimintaa.



Kuva 3: Hiilitaselaskurin toimintaperiaate kolmella eri tarkkuustasolla. Helsingin kaupunki (2014a).

## 2.8 EcoBalance-arviointimalli

Tämän luvun tiedot perustuvat Irmeli Wahlgrenin väitöskirjaan (2017), jossa kuvataan mallin toimintaa.

EcoBalance-arviointimenetelmä on tarkoitettu yhdyskuntarakenteen ekologisuuden arviointiin. Mallin kehitystyö on aloitettu 1990-luvulla, jolloin vastaavia malleja ei ollut vielä yleisesti saatavilla. EcoBalance perustuu Excel-taulukkolaskentaohjelmaan, ja siinä lasketaan lähtötietojen pohjalta aiheutuvia elinkaarivaikutuksia, kuten energiankulutus, päästöt, veden ja jäteveden määrä sekä kokonaiskustannukset. Kuvasta 4 selviää, mitä laskennassa otetaan huomioon ja millaisia asioita lasketaan. Nämä kaikki lasketaan absoluuttisina lukuina, mutta myös jaettuna henkeä/työpaikkamäärää/kerrosalaa kohden. Vaikutukset lasketaan eri lähteistä koottujen ominaiskulutusten, yksikkökustannusten ja ominaispäästökertoimien perusteella. Alun perin nämä arvioitiin TEMIS-mallin perusteella, mutta myöhemmin alettiin käyttää kotimaisia lähteitä tarkempien tulosten saamiseksi. TEMIS-mallin lukuja käytetään kuitenkin edelleen elinkaaren alkupään vaikutusten arvioimiseen.

Eco-Balance-arviointimenetelmässä (kuva 4) käytetään seuraavia lähtötietoja:

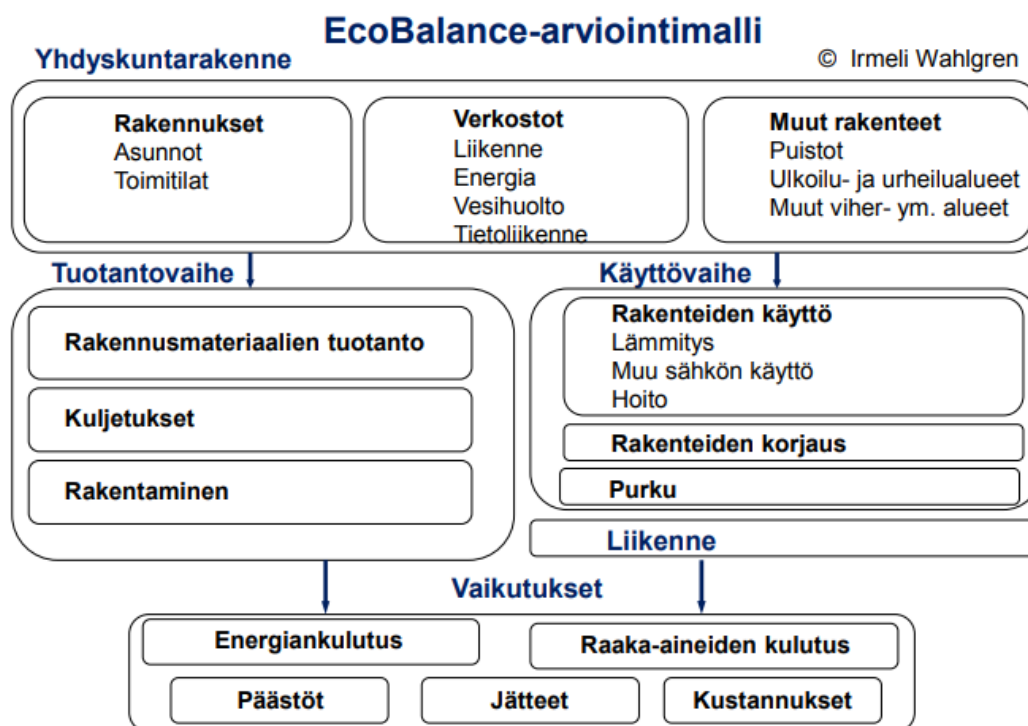
- Tutkimusalueen raja
- Rakennuksia koskevat tiedot (muun muassa kerrosala)
- Väestöä koskevat tiedot
- Rakennusmateriaalit
- Lämmitystapoja, polttoaineita ja energiantuotantotapoja koskevat tiedot
- Verkostojen laajuustiedot (muun muassa pituudet ja pinta-alat)
- Verkostojen materiaalit (muun muassa päällysteet)
- Viheralueiden määrä ja tyyppi
- Liikennettä koskevat tiedot (muun muassa etäisyydet ja matkatuotokset)
- Vedenkulutusta ja jätevesiä koskevat tiedot
- Jätteitä ja niiden käsittelyä koskevat tiedot
- Yksikkökustannustiedot tai hankkeiden kustannustiedot

Elinkaareksi oletetaan 50 vuotta, ja jatkuvat vaikutukset esimerkiksi liikenteen ja energiankulutuksen osalta on laskettu kertomalla yhden vuoden vaikutukset 50:llä, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että malli ei huomioi elinkaaren aikana tapahtuvia muutoksia esimerkiksi ominaiskulutuksessa tai -päästöissä. Nämä voi kuitenkin huomioida arvioimalla keskiarvon koko 50 vuoden ajalle. EcoBalance on kuitenkin kehitelty ennen varsinaisten elinkaaristandardien (ISO 14040, ISO 14044) kehittelyä, joten se ei varsinaisesti seuraa näitä standardeja, joskin seuraa kyllä pääpiirteittäin näissä standardeissa määriteltyjä vaiheita (ks. luku 3).

EcoBalance laskee energiankulutuksen primäärienergiankulutuksena, eli se sisältää välittömän energiankulutuksen lisäksi energiaprosessin hyötysuhteet, energiantuotan-

totavat ja polttoaineet sekä lisäksi myös niiden valmistamiseen käytetyn energian. Energiankulutuksessakin on siis elinkaarinäkökulma.

EcoBalance tutkii ympäristöön kohdistuvia vaikutuksia melko laajasti. Kuten kuvasta 4 nähdään, päästöjen lisäksi huomioidaan myös monia muita ympäristöseikkoja. Malli huomioi kasvihuonekaasuiksi hiilidioksidin lisäksi metaanin ja typpioksiduulin. Metaanin GWP-kertoimena käytetään lukua 21, ja typpioksiduulin kertoimena on puolestaan 310. Mallin laskemat päästöt pitävät sisällään muitakin kaasuja, jotka voivat olla ympäristölle haitallisia.



Kuva 4: EcoBalance-arviointimallin periaatekaavio. Wahlgren, 2017.

## 2.9 KILVA

Tämän luvun tiedot perustuvat ympäristö.fi-sivuston KILVA-tiedotteeseen.

KILVA-työkalu lähestyy kaavan ilmastokestävyyden arviointia hieman eri näkökulmasta kuin aiemmin esitellyt laskurit ja menetelmät. KILVA ei anna käyttäjälleen mitään laskentatuloksia vaan arvioi sanallisesti kaavan ilmastokestävyyttä. Työkalun käyttäjä vastaa kysymyksiin, joiden pohjalta työkalu kertoo, mitä vahvuuksia kaavalla on ja missä olisi kehittämisen varaa. Lisäksi se piirtää kaavion, joka kuvaa kaavan ilmastokestävyyden painottumista eri osa-alueille.

### 3 Elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi ottaa nimensä mukaisesti ympäristövaikutusten arvioinnin perspektiiviksi koko tuotteen tai palvelun elinkaaren. Tällöin huomioidaan materiaalien tuotantovaihe, jatkotuotannon vaiheet, käyttövaihe ja hävitysvaihe (Finnveden et al. 2009). Vaikka elinkaariarvioinnilla usein tutkitaankin tuotteita, se on käyttökelpoinen väline myös esimerkiksi liikenteen, infrastruktuurin ja kaupunkien päästöjen tutkimiseen (Bjørn et al. 2018).

Bjørn et al. (2018) listaa neljä elinkaariarviointia luonnehtivaa ominaisuutta. Sen lisäksi, että niiden perspektiivinä on koko elinkaari, ne ottavat huomioon useita ympäristöseikkoja. Lisäksi ne ovat kvantitatiivisia ja perustuvat tieteelliseen tutkimukseen. ISO 14040 -standardissa puolestaan on lueteltu elinkaariarvioinnin periaatteita. Standardin mukaan elinkaariarvioinnin tulee sisältää neljä vaihetta:

- Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely (Goal and Scope Definition)
- Inventaarioanalyysi (Life Cycle Inventory)
- Vaikutusarviointi (Life Cycle Impact Assessment)
- Tulosten tulkinta (Interpretation)

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyssä määritellään muun muassa, miten yksityiskohtainen tutkimus on ja mitä ajanjaksoa se tarkastelee. Tässä vaiheessa siis käytännössä määritellään, miten laaja tutkimus on ja mitä rajauksia siihen tehdään. Inventaarioanalyysissä kartoitetaan koko tuotejärjestelmän tiedot. Tuotejärjestelmällä tarkoitetaan sarjaa yksikköprosesseja, joista muodostuu tuotteen elinkaari ja joita yhdistävät panokset ja tuotokset. Käytännössä inventaarioanalyysissä määritellään matemaattiset menetelmät, joilla tuotoksia ja panoksia käsitellään. Vaikutusarvioinnissa puolestaan pohditaan ympäristövaikutusten merkittävyyttä inventaarioanalyysin tulosten pohjalta. Tulosten tulkinnassa arvioidaan tulosten luotettavuutta, niihin vaikuttavia tekijöitä, herkkyyttä ja johdonmukaisuutta sekä tehdään johtopäätöksiä. (Koskela et al. 2010)

Huomionarvoista on, että elinkaariarvioinnin laaja perspektiivi vaatii yksinkertaisuuksia (joista esimerkkejä myöhemmissä luvuissa). Näin ollen elinkaariarvioinnin tuloksia ei tule tulkita absoluuttisina totuuksina. Sen sijaan näiden tulosten avulla on mahdollista verrata eri vaihtoehtoja ja pohtia, mikä niistä voisi tulosten valossa olla paras. (Bjørn et al. 2018)

Päästöjen vähennystarve on tällä hetkellä erittäin suuri ja pelkkä asumisen ja liikkumisen tehokkuuden parantaminen ei välttämättä riitä. Lisäksi monet energiatehokkuuteen tähtäävät toimet saattavat aiheuttaa rakennusvaiheessa huomattavan paljon päästöjä. Näistä syntyvän hiilipiikin kumoamiseen menee todella kauan (Säynäjoki et al. 2012). Erilaisilla elinkaarimalleilla voi ottaa huomioon pelkän asumisen ja liikkumisen lisäksi myös muuhun kulutukseen liittyviä elinkaari-päästöjä, kuten

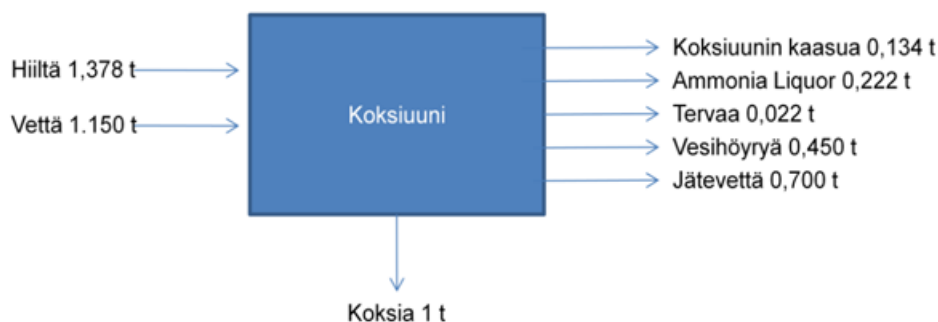
esimerkiksi MALTTI-työkalussa tehtiin.

Seuraavissa luvuissa perehdytään eräisiin elinkaarimalleihin, joita käytetään alue-tason hiilidioksidipäästöjen arviointiin. Näillä menetelmillä on mahdollista laskea rakentamiseen, ylläpitoon ja yleiseen kuluttamiseen liittyviä elinkaaripäästöjä.

### 3.1 Prosessi-LCA

International Standardin (1997) määritelmän mukaan yksikköprosessi on pienin tuotejärjestelmän osa, josta kerätään dataa elinkaariarvioinnin yhteydessä. Prosessien voi ajatella koostuvan materiaalivirroista, panoksista, tuotoksista, raaka-aineista sekä jätteistä. Panoksia ovat materiaalit tai energia, jotka menevät sisään prosessiin. Tuotokset puolestaan ovat materiaalia tai energiaa, jotka poistuvat prosessista. Raaka-aineita ovat suorat tai välilliset tuotteen valmistuksessa käytetyt raaka-aineet. Jätteet ovat tuotoksia, jotka hävitetään. (Säynäjoki et al. 2011b)

Hendrickson et al. (2006) kuvailee prosessi-LCA:n erityispiirteitä ja katsoo yhdeksi prosessi-LCA:n tärkeimmistä ominaisuuksista sen panosten ja tuotosten massojen yhtäsuuruuden. Esimerkkinä tästä on koksiumin yksikköprosessi, josta Säynäjoki et al. (2011b) on tehnyt suomenkielisen prosessimallin (kuva 5) mukaillen Hendrickson et al. tutkimusta. Tuotosten ja panosten yhtäsuuruus käy hyvin ilmi tästä prosessimallista.



Kuva 5: Koksiuunin prosessimalli. Säynäjoki et al. 2011b.

Elinkaariarviointi prosessi-LCA:lla vaatii usein useampien yksikköprosessien yhdistämistä, jolloin prosessien rajaukset ja yhdistäminen muodostuvat usein haasteeksi, erityisesti silloin kun prosessimalleihin sisältyy useita jatkumoit. Esimerkiksi koksiumin tapauksessa on välillisinä vaikutuksina ainakin hiilen louhinta ja käsittely, kuljetukset, kuumen koksen jäädyttäminen ja vesi-infrastruktuuri. Kuitenkin prosessi-LCA-menetelmällä saadaan usein tarkimmat tulokset. (Säynäjoki et al. 2011b)

Hendrickson et al. mainitsee, että esimerkiksi koksiiuunin tapauksessa prosesseista muodostuu kehä. Koksiiuunista talteen kerättävä kaasu poltetaan uudelleen, ja käytännössä uunin panoksena toimivan kaasun määrää ei tiedetä tarkalleen ennen kuin tiedossa on prosessin tuloksena syntyneen kaasun määrä. Tällaisen ongelman voi kiertää käyttämällä EIO-LCA-menetelmää tai jättämällä joitain merkityksettömäksi todettuja kehiä huomiotta. Toisaalta prosessi-LCA-menetelmän yksi vahvuus on mahdollisuus vertailla eri tuotteita keskenään, mitä mahdollisuutta EIO-LCA-menetelmä ei tarjoa. Prosessi-LCA-menetelmässä virheet liittyvät yleensä mallinnuksen rajauksiin. Myös mallinnuksessa syntyvät virheet saattavat olla suuria. (Säynäjoki et al. 2011b)

Prosessimalleissa on lisäksi merkittäviä lähtötietojen saatavuuteen liittyviä ongelmia. Toisin kuin panos-tuotos-malleissa, prosessimalleissa data on usein yksityisten tahojen omistamaa ja maksullista. Näin ollen hyvän prosessidatan saaminen voi olla hankalaa ja kallista (Hou et al. 2018). Hybridimallilla, joka yhdistää prosessimenetelmän ja panos-tuotos-menetelmän parhaita puolia, saadaan todennäköisesti tarkempia tuloksia. (Pomponi et al. 2017)

## 3.2 Panos-tuotos-LCA

Panos-tuotos-LCA (Input-Output Life Cycle Assessment) on toinen yleisesti käytetty elinkaarilaskennan malli. Panos-tuotos-mallissa toimintoihin käytetyt rahapanokset yhdistetään ympäristöpäästöihin, mikä mahdollistaa eri toimintojen ympäristövaikutusten arvioinnin, kun niihin käytetyn rahan määrä on tiedossa. Panos-tuotos-LCA keskittyy koko kansantalouteen, mikä mahdollistaa toisaalta koko kansantalouden kattavan mallinnusketjun mutta samalla rajoittaa mallien määrää, koska malleissa tarvittava data on kerättävä erikseen jokaiselle kansantaloudelle. (Säynäjoki et al. 2011b)

Koko kansantalouden kattava mallinnusketju tarkoittaa sitä, että jollekin sektorille käytetyn rahapanoksen aiheuttamien suorien päästöjen lisäksi lasketaan myös ne päästöt, jotka kansantalouden muilla sektoreilla syntyvät tämän panostuksen seurauksena. Jos esimerkiksi panostetaan kuljetussektorille, tämän seurauksena tapahtuu useita muita panostuksia. Kuljetusyrittäjä ostaa kuljetustaan varten esimerkiksi polttoainetta, ja polttoaineen tuottaja puolestaan öljyä. Panos-tuotos-malleilla saadaan huomioitua kaikki tällaiset alkuperäisestä panostuksesta seuraavat panostukset.

Eräs tunnetuimmista panos-tuotos-malleista on Wassily Lentiefin 1970-luvulla kehittelemä EIO-LCA (Economic Input-Output Life Cycle Assessment), joka on hyvin yleisesti käytössä maailmalla. Wassily Lentief sai vuonna 1973 taloustieteen Nobelpalkinnon työstään panos-tuotossovellusten parissa. EIO-LCA mallintaa Yhdysvaltojen kansantaloudessa eri toimintoihin tarvittavat resurssit ja laskee niistä aiheutuneet päästöt.

Hendrickson et al. (2006) kuvailee EIO-LCA-menetelmän ominaisuuksia: Se on nopea, edullinen ja helppo suorittaa. EIO-LCA-menetelmä huomioi päästöt koko kansantalouden laajuudelta, eikä prosessi-LCA-menetelmässä ongelmaksi muodostuvaa rajojen määrittelyä tarvita. Samalla kuitenkin on huomioitava, että EIO-LCA-menetelmään sisältyy yksinkertaistuksia. Tuotannon ja panosten suhde on lineaarinen, eli jos tuotantopaikan tuotos kasvaa 10 prosentilla, on myös kaikkien panosten kasvatettava 10 prosentilla. Lisäksi kaikki tuotteita ja palveluita tarjoavat tahot on jaoteltu sektoreihin, joita on noin 400–500, ja sektorien keskikoko on 27 miljardia dollaria. Näiden sektorien sisään mahtuu paljon erilaisia prosesseja, jotka eivät ole välttämättä kovin samanlaisia.

Panos-tuotos-menetelmä käyttää siis kertymädataa paikallisen, yksityiskohtaisemman datan sijaan (Hendrickson et al. 2006; Heinonen & Junnila, 2011a; Säynäjoki et al. 2011b). Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että panos-tuotos-analyysi perustuu sektorikohtaisiin keskiarvolukuihin eikä kykene ottamaan huomioon erityistapauksia. Säynäjoki et al. (2011b) antaa esimerkiksi sähköntuotannon. EIO-LCA-menetelmä ei kykene erottelamaan sähköntuotantoa vanhalla hiilivoimalalla uudemmasta, teknisesti kehittyneemmästä voimalasta vaikka kehittyneempi voimala tuottaa sähköä pienemmillä päästöillä. EIO-LCA olettaa, että nämä molemmat voimalat ovat saman sektorin sisällä. Jokin toinen menetelmä, kuten prosessi-LCA, mahdollistaisi tällaisen vertailun.

### 3.2.1 EIO-LCA-menetelmän matemaattinen perusta

Menetelmä pohjautuu panos-tuotos-*taulukoihin* (Input-Output Table), joissa kansantalous on jaettu sektoreihin. Nämä taulukot kuvaavat sektoreilta toisille kulkevia rahavirtoja jossain aikayksikössä, yleensä vuodessa, ja lopuksi näistä rahavirroista saadaan laskettua kunkin sektorin päästöt, kun tiedetään kunkin sektorin päästöt rahayksikköä kohden. Käytännössä näissä taulukoissa on satoja sektoreita, riippuen hieman mallista. USA:n kansantaloudelle kehitellyssä US 2002 Benchmark Producer Price -taulukossa on 428 sektoria (Carnegie Mellon -yliopisto, 2021b).

Panos-tuotos-*taulukoita* on myös mahdollista kehitellä eri tarkoituksiin itse, mutta niiden tuottaminen on erittäin monimutkaista ja vaatii suuren datamäärän tutkimista ja läpikäyntiä (Leontief, 1986). Tästä syystä käytetään yleensä valmiita malleja. Suomessa tehdyssä tutkimuksessa (Heinonen & Junnila, 2011b) todetaan, että Suomen ja Yhdysvaltojen kansantaloudet ovat riittävän samankaltaiset, että USA:n kansantaloudelle kehiteltyä mallia voi käyttää myös Suomessa rakennusprojekteissa. Lisäksi USA:n mallin ja suomalaisen ENVIMAT:in on todettu tuottavan samankaltaisia tuloksia (Heinonen & Junnila 2011a).

Panos-tuotos-*taulukkoa* (taulukko 2) tulkitaan niin, että vaakatasossa luetaan sektorin  $i$  panos sektoriin  $j$ . Jos sektorina 1 olisi esimerkiksi kuljetussektori ja sektorina 3

energiasektori,  $X_{13}$  kuvaisi kuljetussektorin panosta energiasektoriin. Käytännössä  $X_{13}$  kertoo siis rahasumman, jolla kuljetussektori on ostanut energiaa.  $O_i$  kuvaa sektorin  $i$  kokonaispanosta ja on sektorin panosten summa.  $Y_i$  kuvaa kuluttajien kysyntää, eli sitä rahamäärää, jolla kuluttajat ovat ostaneet sektorin  $i$  palveluita. Kokonaistuotos  $X_i$  on näiden kaikkien summa, eli  $X_i = Y_i + O_i$ . Lisäksi jokaisen sektorin kokonaispanos (total input) ja -tuotos (total output) ovat yhtä suuret.

Taulukko 2: Panos-tuotos-taulukko. Hendrickson et al. 2006.

	<i>Input to sectors (j)</i>				<i>Intermediate output O</i>	<i>Final demand Y</i>	<i>Total output X</i>
Output from sectors (i)	1	2	3	$n$			
1	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{1n}$	$O_1$	$Y_1$	$X_1$
2	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{2n}$	$O_2$	$Y_2$	$X_2$
3	$X_{31}$	$X_{32}$	$X_{33}$	$X_{3n}$	$O_3$	$Y_3$	$X_3$
$n$	$X_{n1}$	$X_{n2}$	$X_{n3}$	$X_{nn}$	$O_n$	$Y_n$	$X_n$
Intermediate input $I$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_n$			
Value added $V$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_n$		GDP	
Total input $X$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_n$			

*Notes:* Matrix entries  $X_{ij}$  are the input to sector  $j$  from sector  $i$ . Total output for each sector  $i$ ,  $X_i$ , is the sum of intermediate outputs used by other sectors,  $O_i$ , and final demand by consumers. Gross domestic product (GDP) is the sum of all final demands,  $Y_i$ . Value added for each sector  $V_j$  is the difference between total output (equal to total input for each sector)  $X_j$ , and intermediate input  $I_j$ .

Tavallisesti panos-tuotos-taulukon alkioista muodostetaan matriisi  $A$ , jossa  $a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j}$ . Matriisi  $A$  kuvaa siis sektorilta  $i$  sektorille  $j$  menevää panosta, kun kunkin sektorin kokonaistuotos on 1 dollari. Jokainen alkio  $a_{ij}$  kuvaa näin alkion  $X_{ij}$  osuutta sektorin  $i$  kokonaispanoksesta.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Nyt tiedetään, että

- (1)  $X_i = Y_i + O_i$
- (2)  $X_i = Y_i + \sum_{j=1}^n X_{ij}$
- (3)  $X_i = Y_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j$

Kohdan 3 summalausekkeen voi tulkita vektorien pistetulona  $a_i \cdot X$ , jossa

$$a_i = [a_{i1} \quad a_{i2} \quad a_{i3} \quad \dots \quad a_{in}], X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}$$

Koska tämä selvästi pätee kaikilla riveillä  $i$ , voidaan yleistää seuraavasti:

$$(4) X = Y + AX \iff X = (I - A)^{-1}Y$$

Huomionarvoista on, että EIO-LCA-menetelmän kaava 4 sisältää kaikki alkupanoksesta seuraavat tuotantoketjut. Juuri tämä havainto erottaa EIO-LCA-menetelmän prosessi-LCA-menetelmästä, jossa täytyy rajata prosessit, jotka laskentaan otetaan mukaan. EIO-LCA-menetelmässä tällaisia rajoituksia ei ole tarpeen tehdä. Tämän voi todistaa tutkimalla prosessiketjua (Hendrickson et al. 1998). Ensin lasketaan suorat tuotokset, eli ensimmäinen tuotantoketju, joka koostuu kuluttajan panoksesta  $Y$  ja siitä seuraavasta tuotantoketjusta  $AY$ :

$$(5) x(1) = Y + AY$$

Kuitenkin myös tämä tuotantoketju vaatii resursseja, jolloin tuotantoketju jatkuu, ja lopulta päädytään samaan yhtälöön kuin kohdassa 4.

$$(6) x(2) = Y + AY + A^2Y$$

$$(7) x(n) = Y + AY + A^2Y + A^3Y + A^4Y + \dots + A^n * Y$$

$$(8) x(\infty) = (I + A + A^2 + A^3 + A^4 + \dots)Y = (I - A)^{-1}Y$$

Käytännössä yhtälöstä 4 halutaan usein ratkaista vektori  $X$ , joka listaa sektorien kokonaispanokset. Näiden kokonaispanosten avulla saadaan laskettua arvio näistä panoksista syntyville päästöille, kun tiedetään kunkin sektorin päästöt rahayksikköä kohden. Tämä tieto on mukana EIO-LCA-mallissa.  $Y$ -vektori kuvaa kuluttajien eri sektoreille käyttämän rahasumman määrää, ja tälle vektorille voi asettaa erilaisia arvoja riippuen siitä, mitä halutaan laskea. Jos tarkoituksena on vaikka laskea, miten tienpätkän rakentaminen vaikuttaa koko kansantalouden tasolla, täytyy tieprojektiin tarvittavat investoinnit sijoittaa  $Y$ -vektorille oikeille sektoreille.  $A$ -matriisi puolestaan on alkujaankin tiedossa, sillä se perustuu käytettävän mallin panos-tuotos-taulukkoon.

Laskennan lopputuloksena saadaan näin investoinnin suorien päästöjen lisäksi myös kaikki epäsuorat päästöt, jotka syntyvät alkuperäisen panoksen seurauksena. EIO-LCA-laskennan tuloksena saadut päästöt ovat siis aina linkaaripäästöjä, jotka sisältävät kaikki päästöt materiaalien tuotannosta valmiiseen tuotteeseen tai palveluun.

Carnegie Mellon -yliopisto on tehnyt verkkosovelluksen<sup>1</sup>, joka suorittaa tarvittavan matematiikan käyttäjäystävällisesti. Tarjolla on useita malleja, kuten US 2002 Benchmark Producer Price, 1997 Industry Benchmark Producer Price ja 2002 Canada Industry Account (Carnegie Mellon -yliopisto, 2021b). Tätä verkkosovellusta on käytetty laajasti erilaisissa aluetason päästölaskennoissa (Säynäjoki et al. 2011a, 2011b, 2012).

### 3.3 Hybridimallit

Hendrickson et al. (2006) kertoo, että hybridimalleilla voi ratkaista panos-tuotosmallien ja prosessimallien ongelmia. Lisäksi Pomponi et al. (2017) toteaa, että hybridimallilla, joka yhdistää prosessimallien ja panos-tuotosmallien hyviä puolia, saa todennäköisesti tarkempia tuloksia kuin käyttämällä yksinään jompaa kumpaa mallia.

Lenzen & Crafford (2009) luonnehtii hybridimalleja matemaattisesti. Ajatellaan, että  $q_{hiili} A_{hiilisähkö} y_{sähkö}$  kuvaa yksittäistä sähkön tuotantoprosessia, jossa  $q_{hiili}$  kuvaa hiilikaivoksen päästöjä ja  $A_{hiilisähkö}$  hiilivoimalan päästöjä.  $y_{sähkö}$  puolestaan on jokin sähköä kuluttava toiminto. Kertoimet  $q$  ja  $A$  on tavallisessa panos-tuotos-analyysissä koostettu kertymädatasta ja ovat keskiarvolukuja. Jos kuitenkin sähköä kuluttava toiminto  $y_{sähkö}$  ei käytäkään keskiarvodataan sopivaa tavallista sähköenergiaa, vaan esimerkiksi uudemman ja ekologisemman laitoksen tuottamaa sähköä, kertymädata ei kuvaa tätä yksittäistä prosessia kovin tarkasti. Tarvitaan siis tähän prosessiin sopivaa, tarkempaa dataa. Ei kuitenkaan voi yleistää, että kaikissa prosesseissa tuotettu sähkö olisi tuotettu uudemman voimalaitoksen energialla, ja tätä ongelmaa hybridimalleilla yritetään ratkaista: Tuodaan paikallista dataa mukaan niihin prosesseihin, joissa se on tarpeen ja jätetään loppuosa panos-tuotos-mallista mahdollisimman koskemattomaksi.

Lenzen & Crafford (2009) kuvailee kahta merkittävää hybridimallia, jotka perustuvat panos-tuotos-analyysiin: Integroitu hybridimalli (Integrated Hybrid Model) ja kerrostettu hybridimalli (Tiered Hybrid Adjustment Method). Integroitu hybridimalli perustuu siihen, että panos-tuotos-mallin panos-tuotos-taulukkoa laajennetaan siten, että se ottaa tietyissä prosesseissa mukaan paikallista, tarkempaa dataa. Menetelmä on kuitenkin haasteellinen verrattessa kerrostettuun hybridimalliin, ja sen soveltaminen vaatii muun muassa matriisien  $\tilde{A}$ ,  $C^d$ ,  $C^u$  ja  $A^{corr}$  laatimista seuraavaan yhtälöön (Lenzen & Crafford, 2009):

$$X = (\tilde{B}B') \begin{bmatrix} \tilde{A} & -C^d \\ -C^u I & -A^{corr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{f} \\ f \end{bmatrix}$$

---

<sup>1</sup>Saatavilla: <http://www.eiolca.net/>

Kerrostetussa hybridimallissa puolestaan on tuplalaskennan riski, mutta toisaalta se on yksinkertaisempi kuin integroitu hybridimalli. Säynäjoki et al. (2011b) sanoo kerrostetun hybridimallin kuvaavan suorat ja tulevaisuudessa tapahtuvat vaikutukset prosessimallilla ja loput jo tapahtuneet vaikutukset, kuten materiaalien hankinta, kuvataan panos-tuotos-mallilla.

Säynäjoki et al. (2011b) mainitsee näiden lisäksi vielä kolmannen mallin: panos-tuotos-pohjaisen hybridimallin. Siinä panos-tuotos-sektorit on purettu tapauksissa, joissa sektoreille on saatavilla tarkempaa dataa. Lisäksi on esimerkiksi mahdollista käyttää prosessidataa vain yhteen prosessiin ja käyttää muina panoksina panos-tuotos-analyysin dataa. Käytännössä muutamia prosesseja mallintavan hybridianalyysin tulokset ovat hyvin samanlaisia panos-tuotos-menetelmän kanssa.

Käytännössä usein käytetään kerrostettua hybridimallia, kuten luvun 4 esimerkeistä voi huomata. Usein tämä toteutetaan yksinkertaisesti tekemällä ensin panos-tuotos-mallinnus, jonka jälkeen jotkin mallinnuksen tulokset jätetään joko huomiotta tai parannellaan niitä tarkemmilla laskelmilla.

## 4 Elinkaarimallien käytännön sovelluksia

### 4.1 Hybridimallien sovelluksia

Esimerkiksi Säynäjoki et al. (2011ab) on tutkinut hybridimallilla uuden asuinalueen rakentamisen päästöjä. Tutkimuksessa käytetty hybridimalli on tyypiltään kerrostetun hybridianalyysin sovellettu versio (Modified Tiered Hybrid Analysis). Rakentamisen päästöt voivat olla merkittävässä roolissa myös kaavatasolla, koska niistä aiheutuvat päästöt muodostavat korkean päästöpiikin, jonka kumoamiseen voi mennä todella kauan. Lisäksi rakennusten ekotehokkuuden kasvaessa rakentamisen päästöjen osuus koko rakennuksen elinkaaren päästöistä kasvaa.

Säynäjoen et al. (2011ab) tutkimus pohjautui EIO-LCA-menetelmään, jossa tehtiin aluksi yhden sektorin karkea laskenta. Tässä vaiheessa siis oletettiin kaikkien kulu- jen kuuluvan yhteen sektoriin "residential permanent site single- and multi-family structures". Näin saatiin karkea arvio päästöistä. Tämän jälkeen eri materiaalit ja muut rakentamisen kulut jaettiin tarkemmin 14 sektoriin ja tehtiin uusi mallinnus. Esimerkiksi sähköntuotanto oli eroteltu omalle sektorilleen "power generation and supply", mikä erityisesti paransi tulosten luotettavuutta. Tämän tarkemman EIO-LCA-mallinnuksen pohjalta nähtiin, mitkä sektorit ovat vaikutuksiltaan suurimpia, ja näiden sektoreiden päästölaskelmia tarkennettiin prosessidatalla. Käytännössä betoni, teräs ja energia todettiin suurimmiksi päästölähteiksi, ja niiden päästöt laskettiin uudestaan tarkemmin. Taulukossa 3 on nähtävillä EIO-LCA-mallinnuksen tulos, josta on poistettu betoni, teräs ja energia. Tämä taulukko toimii hybridilaskennan pohjana.

Taulukko 3: EIO-LCA-mallinnuksen tulos, josta on poistettu sektorit, joihin sovelletaan prosessidataa. Säynäjoki et al. 2011b.

Materiaali	EIO-LCA-sektori	M€	EUR-jak. %	Total t CO <sub>2e</sub>	CO <sub>2</sub> -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 %
Sähkötavara	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>

Esimerkiksi sähkön osalta oletettiin, että sähkö tuotetaan Suomenojan voimalaitoksessa, mikä mahdollisti kyseisen voimalaitoksen tarkan hiilidioksidiprofilin käytön laskelmissa. Tällä tavoin saatiin tuotannon aiheuttamat suorat päästöt, joihin sitten lisättiin EIO-LCA:n tuottamat päästöluvut, jolloin saatiin elinkaaripäästöt sähköntuotannolle. Teräksen ja betonin osalta laskettiin uudet päästöt perustuen RT-Ympäristöselosteisiin ja Outokummun ympäristöraporttiin.

Lisäksi Heinonen & Junnila (2011a) ovat tutkineet vastaavanlaisella hybridimallilla erilaisten alueiden kulutuksen päästöjä. Heidän tutkimuksessaan otettiin myös pohjaksi EIO-LCA-malli, johon laitettavia lähtöarvoja otettiin Tilastokeskuksen kulltajarabaremetristä. Näin saatiin laskettua EIO-LCA-mallilla eri tyyppisten alueiden asukkaille hiilijalanjälki. Tutkimuksen tulokset antoivat ymmärtää, että kaupungissa asuvien ihmisten hiilijalanjälki olisi suurempi kuin maaseudulla asuvien. Tämä voi tarkoittaa, että asumisen tiheys ei ole ainoa merkittävä tekijä, vaan myös ihmisten kulutuksella on merkittävä rooli päästöjen syntymisessä.

Heinosen & Junnilan (2011a) tutkimuksessa käytetyn hybridimallin rakenne on sama kuin aiemmin esitellyssä Säynäjoen et al. (2011ab) tutkimuksessa. EIO-LCA-mallinnuksessa paljastuvien suurimmat päästöt aiheuttavien sektorien tuloksia tarkennetaan paikallisella, tarkemmalla datalla. Vaikka liikenteen havaittiin tuottavan vain pienen osan päästöistä, paranneltiin myös liikenteen päästölukuja suomalaisella datalla, koska tutkimuksen tekijöiden mukaan EIO-LCA-mallin päästöprofiili liikenteen osalta eroaa merkittävästi suomalaisesta profiilista. Liikenteen osalta parannukset tehtiin käyttämällä ENVIMAT-mallia.

Hybridimalli mahdollistaa siis päästöjen arvioinnin hyvin erilaisissa tapauksissa. Se on kelvollinen työkalu niin rakennusvaiheen päästöjen arviointiin kuin esimerkiksi asukkaiden kulutuksen päästöjen arviointiin.

Mikäli kaavaprosessissa on saatavilla lähtötietona rahallisia investointeja, päästöjä kannattaa tutkia EIO-LCA-menetelmään pohjautuvalla hybridimenetelmällä. Tällöin saadaan suhteellisen yksinkertaisesti tuotettua ainakin karkeita arvioita päästöluvuista. Menetelmän vahvuutena on yksinkertaisuus ja kattavuus. Koko kansantalouden laajuiset vaikutukset otetaan huomioon, ja suunnittelijan tarvitsee vain syöttää EIO-LCA-matriisin ratkaisevalle sovellukselle sektorikohtaiset lähtötiedot. Työkalun käyttäjän tulee kuitenkin ymmärtää laskennassa tehdyt yksinkertaistukset ja niiden aiheuttamat virheet tuloksessa ja korjata niitä tarvittaessa prosessidatalla. Mallin lineaarisuudesta johtuen lähtötiedoiltakin vaaditaan hyvää tarkkuutta.

## 4.2 Porvoon Skaftkärr - esimerkki prosessimallista

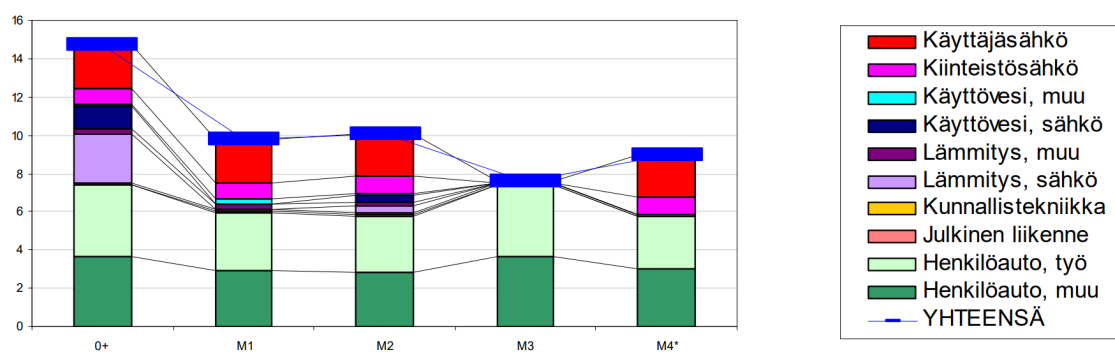
Porvoon Skaftkärrissä tehtiin uuden kaavarungon valmistelun yhteydessä energiatehokkuuslaskentaa. Tämän pilottihankkeen tavoitteena oli tuottaa tietoa eri keinoista,

joilla suunnittelussa on mahdollista vaikuttaa alueiden energiatehokkuuteen. Laskelmat perustuivat niin sanottuun 0+-vaihtoehtoon, joka oli vuonna 2007 alueelle laadittu kaavarunko. Tämän kaavarungon energiankulutus laskettiin ja pääteltiin siitä tärkeimmät päästöihin vaikuttavat tekijät. Merkittävimmiksi tekijöiksi tunnistettiin liikenne, lämmitysenergia ja rakennuksissa kulutettu sähköenergia. (Porvoon kaupunki, 2010)

Tämän jälkeen laadittiin neljä vaihtoehtoista vertailumallia, joissa oli erilaisia pelkistettyjä energiantuotannon, maankäytön, rakennustekniikan ja liikenteen profiileja. Kaikille ratkaisumalleille laskettiin hiilijalanjälki samalla tavalla kuin 0+-vaihtoehdolle. Näiden laskelmien pohjalta tehtiin johtopäätöksiä erilaisten ratkaisujen vaikutuksista energiatehokkuuteen. Ratkaisumalleissa keskityttiin seuraaviin tekijöihin: Liikenneratkaisut ja liikkumistarve, kaupunkirakenne, energiantuotantotapa, lämmitysratkaisut ja rakennustekniikka. (Porvoon kaupunki, 2010)

Liikenteen osalta on käytetty Emme-ohjelmaa, jolla on mallinnettu kunkin ratkaisumallin henkilöliikennesuoritteet. Henkilöliikennetutkimuksen avulla on arvioitu lisäksi erilaisten toimintojen ja palveluiden vaikutukset näihin liikennesuoritteisiin. (Porvoon kaupunki, 2010)

Lämmitys- ja sähköntuotantovaihtoehtojen osalta on tukeuduttu eri vaihtoehtojen tuotannon ominaispäästöihin ja laskettu, millaisia päästöjä eri vertailumalleissa syntyy. Vertailumalleissa on tehty erilaisia oletuksia siitä, millaista lämpöä ja sähköä käytetään ja miten energiatehokkaita rakennukset ovat. (Porvoon kaupunki, 2010)



Kuva 6: Skaftkärrin vertailumallien päästöjä, y-akselin yksikkönä on tuhansia tonneja CO<sub>2</sub>. Porvoon kaupunki, 2010.

Kuva 6 ilmentää hyvin eri vertailumallien ominaisuuksia. 0+-vaihtoehdossa on sähkölämmitys, ja kaikissa vertailumalleissa puolestaan jokin parempi vaihtoehto, mikä näkyy kokonaispäästöjen merkittävänä vähentymisenä. Malleissa M1–M3 myös liikenteen päästöt pienentyivät, koska niissä oli tiiviimpi rakenne ja oletetut lähipalvelut. M3-mallissa sähkö oletettiin tuotettavan aurinkopaneeleilla, mikä näkyy käyttäjäsähkön päästöjen poistumisena. Käytännössä tämän laskennan pohjalta ym-

märrettiin, että kaukolämpö oli juuri Porvoossa erinomainen vaihtoehto, eikä juuri ekologisempaa vaihtoehtoa ollut edes teoriassa. Tämä johtui siitä, että kaukolämmön tuotannossa käytettiin 90 % biopolttoaineita. (Porvoon kaupunki, 2010)

Päästöjen lisäksi on laskettu eri toteutusvaihtoehtojen kustannukset verrattuna 0+-vaihtoehtoon. Laskelmat on tehty useista eri näkökulmista. Laskelmat on tehty sekä asukkaan että energialaitoksen näkökulmasta. On laskettu esimerkiksi energialaitoksen investoinnit kokonaisuudessaan ja per asukas. Asukkaille on laskettu kokonaisinvestoinnit, vuosikustannukset ja 30 vuoden elinkaarikustannus. Lisäksi on eritelty, kuinka paljon yhden hiilidioksiditonin vähentäminen maksaa. (Porvoon kaupunki, 2010)

Skaftkärrissä tehdyt laskelmat nojaavat siis selkeästi paikalliseen dataan, mikä tekee laskelmista varsin luotettavia. Laskelmissa on myös huomioitu rakentamisen kustannuksia muun muassa infra.net-ohjelman avulla, mikä olisi toisaalta myös mahdollistanut panos-tuotos-mallien käyttämisen rakentamisen päästöjen arvioimiseksi. Rakennusvaiheen päästöillä saattaa olla merkittävä osuus koko elinkaaren päästöistä, mikä pätee erityisesti energiatehokkaisiin ratkaisuihin, jotka saattavat aiheuttaa merkittäviä päästömääriä (Säynäjoki et al. 2012).

## 5 Ominaispäästökertoimia

### 5.1 Rakentaminen ja purkaminen

Suomen ympäristökeskus on kehittänyt ympäristöministeriön toimeksiannosta päästötietokannan, josta selviää erilaisia päästökertoimia rakennustuotteille, -prosesseille ja -palveluille. Päästötietokantaa kehitetään jatkuvasti.

Päästötietokannasta löytyy hiilijalanjäljen lisäksi tietoja rakennusmateriaalien hiilikädenjäljestä. Kuitenkin kaavatason ilmastovaikutusten arvioinnin kannalta kenties tärkeämpiä tietoja ovat erilaisten palveluiden ja prosessien päästökertoimet. Lukemat perustuvat Suomessa ja Ruotsissa tehtyihin tutkimuksiin. Esimerkiksi toimistorakentamisen päästöjen taustalta löytyy tutkimus, jossa on käytetty EIO-LCA-menetelmää.

Päästötietokannasta on kerätty päästökertoimia taulukkoon 4.

Taulukko 4: Päästötietokannan ominaispäästökertoimia rakentamiselle.

Prosessi	Ominaispäästökerroin
Maa- ja pohjarakentaminen	7 kg $CO_2e/m^2$
Toimistotalojen rakentaminen	78 kg $CO_2e/m^2$
Asuintalojen rakentaminen	46 kg $CO_2e/m^2$
Koulujen ja päiväkotien rakentaminen	60 kg $CO_2e/m^2$
Stabilointi	0,04 kg $CO_2e/kg$
Toimistorakennusten purkaminen	14 kg $CO_2e/m^2$
Asuinrakennusten purkaminen	7 kg $CO_2e/m^2$
Koulujen ja päiväkotien purkaminen	9,8 kg $CO_2e/m^2$

Teknisessä kuvauksessa kuitenkin korostetaan, että rakentamisen päästöissä on vaihtelua esimerkiksi vuodenajan mukaan: talvikuukausina tarvitaan enemmän energiaa lämmitykseen ja valaisuun. Päästötietokanta voi kuitenkin mahdollistaa nopean ja tehokkaan tavan laskea kaava-alueen päästöjä.

### 5.2 Infrastrukturi

Suomessa on tutkittu katujen ja teiden rakentamiseen liittyviä päästöjä useissa eri projekteissa. Ramboll on tehnyt päästölaskelmia (2018) Skanssin alueelle rakennettavista kaduista, ja näiden esimerkkikatujen päästölaskelmissa huomattiin muun muassa erilaisiin kuljetuksiin liittyvät päästöt ja niissä piilevä päästöjen säästöpotentiaali. Kuljetukset ja materiaalien tuotanto tuottavat selvästi suurimman osan päästöistä, jopa yli 90 prosenttia. Käytännössä esimerkiksi syntyvien massojen hyötykäyttö alueella voi tuottaa todella suuria päästöhyötyjä. Lisäksi Kiinasta tuodun

kiven laskennalliset päästöt olivat 15 kertaa suuremmat kuin kotimaisen kiven. Vallikadulla todettiin pilaristabiloinnin tuottavan huomattavasti enemmän päästöjä kuin esimerkiksi vaahtolasimurskeen: pilaristabiloinnilla Vallikadun hankkeen kokonaispäästöt olivat yli kaksinkertaiset verrattuna vaahtolasimurskekevennykseen. Huomionarvoista on, että erilaisilla pohjanvahvistusvaihtoehdoilla ja suunnitelman vaatimilla kuljetuksilla on suuri vaikutus kokonaispäästöihin. Pelkästään Perhekadun tapauksessa ylijäämämassojen kuljetustarpeen vähentämisellä saavutetaan 12 058 kg  $CO_2e$  säästö. Siksi myös katuhankkeiden ominaispäästökertoimissa voi olla suurta vaihtelua riippuen siitä, mitä materiaaleja käytetään ja millaisia kuljetusmatkoja on. Yleisemmin Skanssin alueella erilaisten katuhankkeiden laskennalliset päästöt vaihtelivat toteutustavasta riippuen välillä 63 – 153 kg  $CO_2e$  per asfaltoitu katuneliometri. Katukilometriä kohden päästöt ovat noin 731 t – 3 520 t  $CO_2e$ . Laskelmiin on huomioitu kadun rakennekerrokset, ja varusteet on jätetty laskennan ulkopuolelle.

Helsingin kaupunki (2020b) on teettänyt Hämeentien katusaneeraushankkeelle päästölaskelman, jossa todettiin myös kuljetuksen ja materiaalien tuotannon olevan suurimmat päästölähteet. Hämeentien laskennalliset kokonaispäästöt olivat korkeimmillaan 1 136 080 kg  $CO_2e$ . Tekemällä päästövähennyksiä vähentämällä kuljetustarvetta ja lisäämällä materiaalien kierrätystä laskettiin jopa 308 000 kg  $CO_2e$  säästöpotentiaali. Hämeentien saneerauksen päästöt ovat näiden lukemien perusteella 436 t – 598 t  $CO_2e$  kilometriä kohden. Saneerauksen päästöt vaikuttavat siis olevan jonkin verran pienemmät kuin uuden kadun rakentamisen. Laskelmiin on huomioitu kadun rakennekerrosten lisäksi valaistuslaitteet.

Taulukkoon 5 on koottu näiden lähteiden pohjalta laskettuja ominaispäästökertoimia katuprojekteille. Näihin lukuihin sisältyy vain tien rakennekerrosten ja erilaisten kiveysten päästöt töineen, ja Hämeenkadun saneeraukseen lisäksi valaistuslaitteet. Vallikadun tapauksessa suurin ominaispäästökerroin tulee käyttämällä pilaristabilointia, kun taas pienin kerroin tulee, kun oletetaan että kaivumaat käytetään hyödyksi projektin sisällä ja pohjanvahvistuksena on vaahtolasimurskekevennys.

Taulukko 5: Ominaispäästökertoimia katuprojekteille.

Katu/tie	Ominaispäästökerroin 1	Ominaispäästökerroin 2
Skanssinkatu	731 – 810 t $CO_2e$ / km	91– 101 kg $CO_2e/m^2$
Vallikatu	1450 – 3 520 t $CO_2e$ / km	63 – 153 kg $CO_2e/m^2$
Perhekatu	1000 t $CO_2e$ / km	130 kg $CO_2e/m^2$
Hämeentie (saneeraus)	440 – 600 t $CO_2e$ / km	-

Väylävirasto on tutkinut tien- ja radanpidon hiilijalanjälkeä selvityksessään Tien- ja radanpidon hiilijalanjälki (2011). Tässä selvityksessä laskettiin eri kokoisille teille 100 vuoden kumulatiiviset elinkaaripäästöt. Selvityksen tuloksesta on eroteltavissa rakentamisen päästöt eri kokoisille maanteille. Taulukkoon 6 on koottu tämän lähteen pohjalta lasketut rakentamisen ominaispäästökertoimet eri tietyypeille. Tässä yksikönä ei ole hiilidioksidiekvivalentti, vaan pelkkä hiilidioksidi. Suluissa on merkittynä, minkä tien päästöjä on käytetty laskennan pohjana.

Taulukko 6: Ominaispäästökertoimia tieprojekteille.

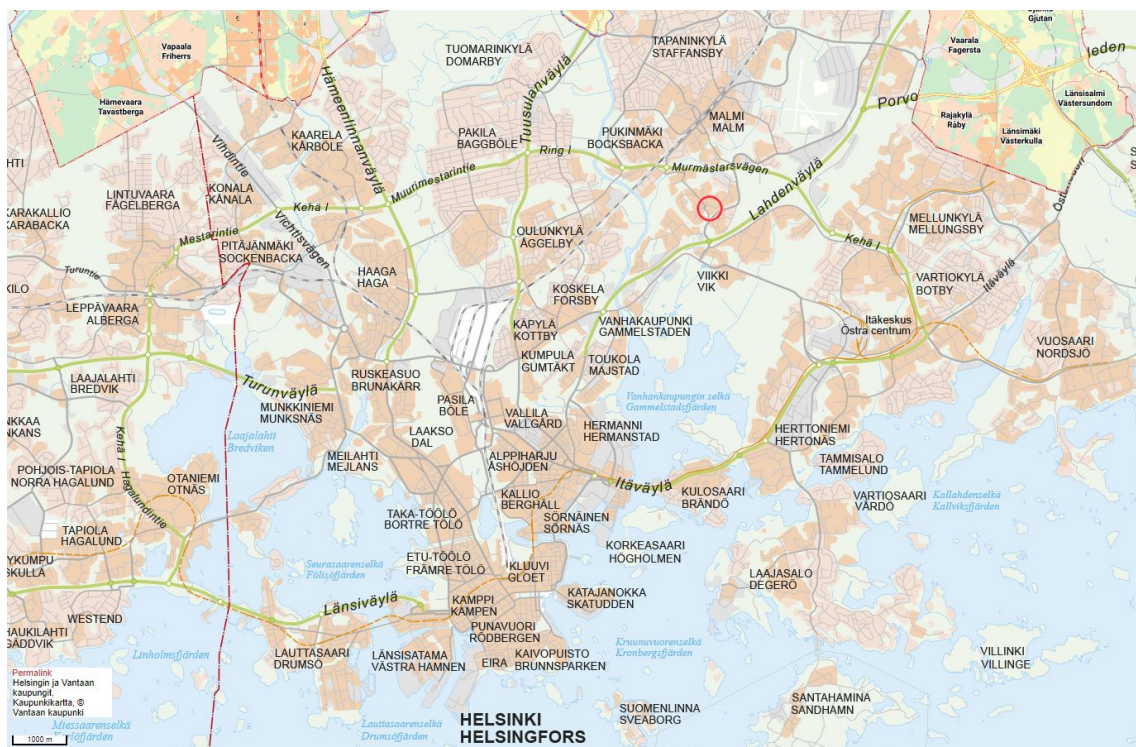
Tietyyppi	Ominaispäästökerroin
Moottoritie (Jutikkala-Kulju)	2641 t $CO_2$ / km
Valtatie (Hanko-Skogby)	931 t $CO_2$ / km
Seututie (Lapinlahti-Rautavaara)	361 t $CO_2$ / km
Yhdystie (Tammikosken paikallistie)	271 t $CO_2$ / km

Näitä ominaispäästökertoimia voi käyttää karkeina arvioina. Ne antavat hyvin suuntaa sille, minkälaisia päästöjä erilaisilta tie- ja katuprojekteilta voi odottaa. Nämä ominaispäästökertoimet voivat myös toimia apuvälineenä omien päästölaskelmien tarkistamisessa, koska oletettavasti myös muiden projektien päästöt ovat samaa suuruusluokkaa kuin näiden ominaispäästökertoimien laskennan pohjana olevien.

## 6 Case-kohde: Pihlajamäen ostoskeskuksen kaavamuutos

### 6.1 Alueen esittely

Pihlajamäen ostoskeskus sijaitsee Helsingin Pihlajamäessä, joka sijaitsee Kehä I:n varrella, Malmin eteläpuolella (Kuva 7). Pihlajamäki kuuluu Malmin kaupunginosaan. Lyhyt matka on myös Viikkiin, jossa sijaitsee Prisma ja yliopistokampus. Pihlajamäen alue on kerrostalovaltaista aluetta, ja Helsingin yleiskaavassa (2016) Pihlajamäen lähiö on merkitty sekä valtakunnallisesti merkittäväksi rakennetun kulttuuriympäristöksi että maakunnallisesti arvokkaaksi kulttuuriympäristöksi. Lisäksi ostoskeskuksen pohjoisosa on suojeltua aluetta, koska se on määritelty asemakaavahistoriallisesti, rakennustaiteellisesti ja kaupunkikuvallisesti merkittäväksi aluekokonaisuudeksi. Kaavamuutoksessa ei kajotakaan pohjoiseen ostoskeskuksen alueeseen, vaan ainoastaan eteläiseen.



Kuva 7: Case-kohteen sijainti. Helsingin seudun opaskartta, 2022.

Alkuperäinen Pihlajamäen kaava laadittiin vuosina 1959–1964, ja alueen rakentaminen alkoi vuonna 1964. Alueella on kallioidelle rakennettuja pitkiä lamellitaloja, ja näiden lisäksi runsaasti korkeita tornitaloja. Kyseessä on ensimmäinen elementtitekniikalla toteutettu lähiö Suomessa, mistä syystä se onkin määritelty maakunnallisesti arvokkaaksi kulttuuriympäristöksi (Helsingin karttapalvelu, 2021). Pihlajamäki

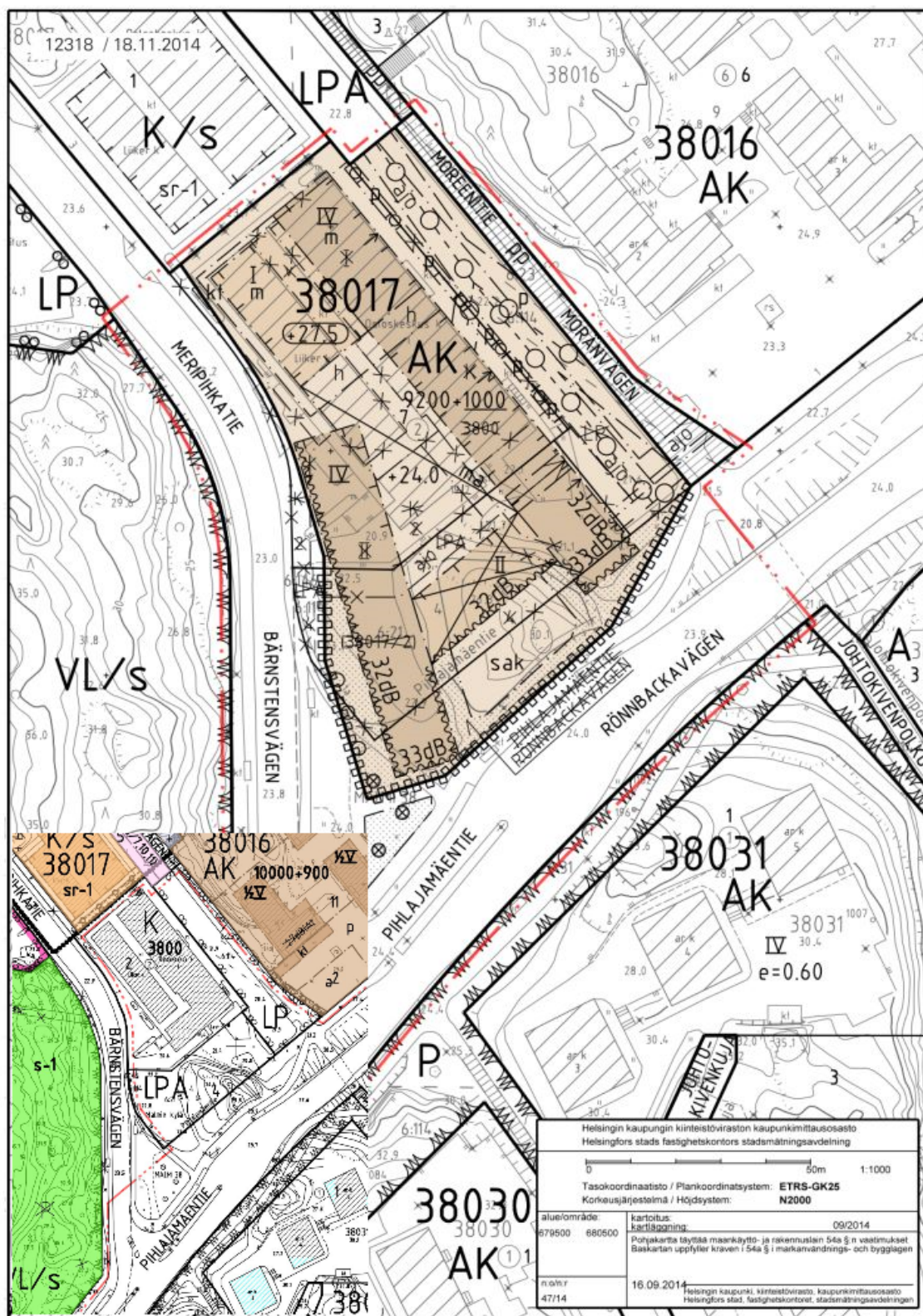
on myös valittu kansainvälisen DOCOMOMO-järjestön hyväksymään suomalaisen modernismin merkkiteosvalikoimaan (Museovirasto, 2021). Nämä rakennettuun kulttuuriympäristöön liittyvät erityiset arvot asettavat reunaehdoja Pihlajamäen ostoskeskuksen täydennysrakentamisen suunnittelulle.

Helsingin yleiskaava 2016 määrittelee Pihlajamäen ostoskeskuksen alueen kategoriaan Lähikeskusta C3. Tällaisen alueen tulisi olla suunniteltu niin, että siellä sekoitetaan toiminnallisesti kaupan ja julkisten alueiden toimintoja sekä asumista. Lisäksi kaikissa yleiskaavan keskusta-alueissa vähittäiskaupan suuryksiköt tulisi integroida asumiseen. Tämä toteutuukin Pihlajamäen ostoskeskuksen kaavamuutoksessa varsin hyvin, sillä samalle tontille sijoitetaan sekä asuntoja että vähittäiskauppaa.

Asemakaavassa ostoskeskuksen eteläpuolinen osa on merkitty liike- ja toimistorakennusten korttelialueeksi. Rakennusoikeutta eteläpuolisella alueella (tontti 38017/2) on 3800 kerrosneliometriä kerrosluvun ollessa 1–2. Ostoskeskuksen tontti 38017/2 (Kuvassa 8) on yksityisomistuksessa. Kaupunki omistaa muut tontti- sekä katualueet.

Pihlajamäen ostoskeskuksen kaavamuutoksessa nykyisen ostoskeskuksen eteläosa muuttuu liike- ja toimistorakennusten korttelialueesta asuin- ja liikerakennusten korttelialueeksi. Muutos toteutetaan siten, että nykyisen ostoskeskuksen eteläinen osa puretaan, ja tilalle rakennetaan asuntoja, uusia liiketiloja sekä pysäköintijärjestelyitä. Asemakaavan muutosehdotukseen ei sisälly nykyisen ostoskeskuksen pohjoisosa, joka on suojeltu. Kaavamuutoksen myötä ostoskeskuksen eteläosan tilalle tulee 9 200 kerrosneliometriä asumiskerrosalaa ja noin 1000 kerrosneliometriä liiketiloja. Asukkaita alueelle kaavaillaan muuttavan noin 230.

Ostoskeskuksen purkamisen ja uudelleenrakentamisen yhteydessä tullaan toteuttamaan katualueiden muutoksia. Moreenitien puolelta pysäköintialuetta liitetään tonttiin, ja tälle alueelle sijoitetaan uuden asuinalueen pysäköintipaikkoja. Osa pysäköinnistä sijoitetaan keskelle tonttia rakennettavaan halliin. Meripihkatiellä tehdään katualueen levennys, mikä mahdollistaa pyöräkaistojen sekä kadunvarsipysäköinnin toteuttamisen. Moreenitiellä jalankulku ja pyöräily erotetaan toisistaan. Osa katualueiden rakenteista jää paikoilleen uudistusten yhteydessä, mutta alueet asfaltoidaan koko pinta-alaltaan.



Kuva 8: Case-kohteen kaavamuutosehdotus. Vasemmassa alakulmassa on vanha asemakaava. Helsingin kaupunki, 2014b (kaavamuutos), Helsingin karttapalvelu, 2021 (vanha kaava).

## 6.2 Kaavamuutoksen tarjoamat lähtötiedot

Pihlajamäen ostoskeskuksen kaavamuutos (Helsingin kaupunki, 2014b) tarjoaa lähtötietoja, joiden avulla alueelle on mahdollista tehdä ympäristövaikutusten arviointia ja laskea elinkaaripäästöjä kirjallisuuskatsauksessa esitellyillä työkaluilla ja metodeilla. Monet näistä työkaluista onkin suunniteltu käytettäväksi nimenomaan kaavatasolla.

Muutosalueen pinta-ala on noin 1,8 hehtaaria. Tästä asuinkerrostalojen korttelialueen osuus on noin 0,9 hehtaaria. Uutta asuinkerrosalaa tulee noin 9200 kerrosneliometriä, ja liiketilan kerrosalaa tulee olemaan noin 1000 kerrosneliometriä, mikä on huomattavasti vähemmän kuin kaavassa aiemmin sallittu 3800 kerrosneliometriä.

Rakennusten osalta kaavamuutoksessa on määrätty ulkonäöllisiä seikkoja. Katolla sijaitsevien tilojen tulee sijaita vähintään 4 metrin etäisyydellä rakennuksen julkisivupinnoista. Kattomuotona on tasakatto, ja yksikerroksisen rakennuksen katon on oltava viherkatto. Rakennusten julkisivumateriaalin tulisi olla pääasiassa betonia. Liiketilojen tulee sijaita maan tasalla, ja lisäksi niiden edustalle tulee sovittaa ulokekatos ja suuri näyteikkuna. Lisäksi yksikerroksisen rakenteen vesikaton on oltava samalla korkeudella pohjoisessa sijaitsevan vanhan ostoskeskuksen katon kanssa. Asuinrakennusten kerrosmäärä on 4.

Maan alle on osoitettu pysäköintitilaa, jonne saa rakentaa kaavassa mainittujen maanpäällisten hehtaarilukemien lisäksi 0,3 hehtaaria. Koko tilaa ei ole pakko käyttää pysäköintiin, vaan sinne saa sijoittaa asumista palvelevia varastotiloja, väestönsuojia ja muuta vastaavaa. Pihakannelle sen sijaan ei saa laittaa pysäköintiä, vaan oleskelu- tai leikkialueen.

Alueen katuihin tehdään muutoksia. Meripihkatien katualue levenee muutamalla metrillä lähellä Pihlajamäentien risteystä, jotta alueelle saadaan pyöräkaistoja sekä kadunvarsipysäköintiä. Jalankulun ja pyöräilyn reittiä levennetään Moreenitiellä, ja jalankulku ja pyöräily erotetaan samalla toisistaan. Näiden muutostöiden on arvioitu kustantavan kaupungille 150 tuhatta euroa. Lisäksi hulevesiviemärien siirtämisestä on arvioitu koituvan kaupungille noin 25 tuhannen euron kulu.

Kaavamuutoksessa on arvioitu myös liikenteellisiä vaikutuksia. Asumiseen liittyvän autoliikenteen lisääntymisen arvioidaan olevan noin 160 automatkaa vuorokaudessa. Liiketilat aiheuttaisivat noin 1200 automatkaa vuorokaudessa. Kaavamuutoksen mukaan Meripihkatiellä liikkuu tällä hetkellä noin 8700 ajoneuvoa vuorokaudessa ja Pihlajamäentiellä noin 16000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Muutoksia kokonaisliikennemääriin ei kaavamuutoksen mukaan ole odotettavissa, koska tontin nykyisen liikerakennuksen purkaminen vähentää omalta osaltaan liikennettä ja kompensoi uudisrakentamisen tuottamaa liikennettä.

Taulukossa 7 on nähtävissä kaavamuutoksen pinta-alojen ja kerrosalojen ja näistä

laskettujen tehokkuuslukujen arvot ja muutokset. Esimerkiksi katualueiden pinta-ala pienenee 0,0867 hehtaaria, mutta kevyen liikenteen katujen pinta-ala lisääntyy 0,0669 hehtaaria, eli noin 7,3 prosenttia. Kokonaiskerrosalan muutos on 6400 kerrosneliömetriä, koska liike- ja toimistorakennusten korttelialue supistuu 3800 kerrosneliömetrillä.

Taulukko 7: Kaavamuutosehdotuksen alamerkinnyt. Helsingin kaupunki, 2014b.

### Alamerkinnyt

Aluevaraukset	Pinta-ala [ha]	Pinta-ala [%]	Kerrosala [k-m <sup>2</sup> ]	Tehokkuus [e]	Pinta-alan muut. [ha +/-]	Kerrosalan muut. [k-m <sup>2</sup> +/-]
<b>Yhteensä</b>	<b>1,7982</b>	<b>100,0</b>	<b>10200</b>	<b>0,57</b>	<b>0,0000</b>	<b>6400</b>
<b>A yhteensä</b>	0,8827	49,1	10200	1,16	0,8827	10200
AK	0,8827	100,0	10200	1,16	0,8827	10200
<b>P yhteensä</b>						
<b>Y yhteensä</b>						
<b>C yhteensä</b>						
<b>K yhteensä</b>					-0,4345	-3800
K					-0,4345	-3800
<b>T yhteensä</b>						
<b>V yhteensä</b>						
<b>R yhteensä</b>						
<b>L yhteensä</b>	0,9155	50,9			-0,4482	
Kadut	0,8486	92,7			-0,0867	
Kev.liik.kadut	0,0669	7,3			0,0669	
LP					-0,2128	
LPA					-0,2156	
<b>E yhteensä</b>						
<b>S yhteensä</b>						
<b>M yhteensä</b>						
<b>W yhteensä</b>						

Maanalaiset tilat	Pinta-ala [ha]	Pinta-ala [%]	Kerrosala [k-m <sup>2</sup> ]	Pinta-alan muut. [ha +/-]	Kerrosalan muut. [k-m <sup>2</sup> +/-]
<b>Yhteensä</b>	<b>0,3000</b>	<b>16,7</b>		<b>0,0500</b>	
ma	0,3000	100,0		0,0500	

### 6.3 Asemakaavan elinkaari päästöjen laskennan metodi

Tämän diplomityön fokus on erilaisissa työkaluissa ja menetelmissä, joita voi käyttää kaavoituksen apuvälineinä ilmastovaikutusten arvioinnissa. Tästä syystä case-kohteen päästölaskenta tehtiin usealla eri työkalulla ja vertailtiin niiden antamia tuloksia. Myös laskennan fokus on diplomityön rajauksia mukaillen näissä menetelmissä, niiden antamissa tuloksissa ja niiden erojen pohtimisessa.

Varsinainen laskenta toteutettiin kolmella eri menetelmällä:

1. HAVA-työkalu eli Helsingin asemakaavojen vähähiilisyiden arviointimenetelmä
2. KEKO-työkalu eli kaavoituksen ekolaskuri
3. Yhdistelmämenetelmä, jossa yhdistetään One Click LCA:n Carbon Designer -lisäosa, panos-tuotos-mallit ja KURKE-työkalu

Näihin kolmeen laskentaan päädyttiin muutamastakin eri syystä. Ensinnäkin Helsingin asemakaavojen vähähiilisyiden arviointimenetelmä on vielä työn alla ja vaatii koekäyttöä. Tässä case-kohteessa tehty vertaileva arviointi saattaa tuottaa arvokasta tietoa, jolla HAVA-työkalua voi jatkokehittää. Myös KEKO-työkalun kehittämisen kannalta tärkeitä seikkoja saattaa nousta esiin. Tälle kaava-alueelle on käytettävissä melko yksityiskohtaista dataa, mikä mahdollistaa erityisesti elinkaari päästöjen laskennan EIO-LCA-työkalulla. Tästä syystä kolmannessa laskennassa päätettiin käyttää EIO-LCA-menetelmää ja tutkia sen ominaisuuksia ja käyttökelpoisuutta eri lähtötietojen tarkkuuksilla.

Tutkittavat työkalut huomioivat rakennusten elinkaaren (taulukko 8) osalta hieman eri asioita, mikä tulee myös ottaa huomioon tuloksia tulkittaessa. KEKO-työkalu huomioi vaiheet A ja B, ja HAVA-työkalu puolestaan myös C-vaiheet. Tässä työssä käytettävä One Click LCA:n Carbon Designer -lisäosa huomioi vaiheet A1-A4, B4-B5 ja C1-C4. One Click LCA mahdollistaisi myös vaiheiden B6 ja B7 arvioinnin, mutta tässä työssä tätä ominaisuutta ei käytetä. KURKE-työkalu laskee vaiheiden B6 ja B7 päästöt. Päästötietokannan kertoimilla on mahdollista laskea vaihe A5.

Taulukko 8: Rakennusten elinkaaren vaiheet.

Ennen käyttöä	Käytön aikana	Käytön jälkeen
A1-A3: Tuotteiden valmistus	B1: Tuotteiden käyttö	C1: Purkutyöt
A4: Kuljetukset työmaalle	B2: Ylläpito	C2: Kuljetukset käsittelyyn
A5: Rakentaminen	B3-B4: Korjaukset ja vaihdot	C3: Jätteenkäsittely
	B5: Laajamittaiset korjaukset	C4: Loppusijoitus
	B6: Energian käyttö	
	B7: Veden käyttö	

Laskenta suoritetaan useassa vaiheessa. Ensin lasketaan Business As Usual -tapauksen (BAU) elinkaaripäästöt, eli laskentoihin otetaan varsin maltilliset olettamukset, joiden voi olettaa toteutuvan kaavassa suurella todennäköisyydellä. Tällainen laskenta tehdään kaikilla työkaluilla erikseen. Tämän jälkeen tutkitaan kahta erilaista skenaariota, joissa on tehty muutoksia kaavan tietoihin. Skenaariossa 2 on paremmat joukkoliikenteen ja pyöräilyn edellytykset, ja skenaariossa 3 on tiheämpää rakentamista. Kaikissa laskennoissa oletetaan lämmitysmuodoksi kaukolämpö ja sähköksi keskimääräinen verkkosähkö.

Kaikissa laskelmissa oletetaan elinkaareksi 50 vuotta, ja koska HAVA erityisesti olettaa elinkaareksi vuodet 2025–2075, oletetaan näin muissakin laskelmissa.

Kaikkien skenaarioiden laskelmien tulokset eri työkaluilla on lisäksi koottu yhteen taulukkoon (liite 1).

## 7 Skenaario 1: Business As Usual

### 7.1 HAVA-työkalu eli Helsingin asemakaavojen vähähiilisyysden arviointimenetelmä

HAVA-työkalu on tätä diplomityötä tehtäessä kokeiluvaiheessa, ja tämä tulee ottaa huomioon tuloksia tulkittaessa. Työkalu ei ole vielä valmis. Tämän laskennan tarkoituksena on kokeilla työkalua case-kohteessa ja esittää jatkokehitysideoita työkalulle.

HAVA-työkalun tämänhetkinen käyttöliittymä on hyvin samanlainen kuin KURKE:ssa, koska molemmat ovat Excel-pohjaisia työkaluja. HAVA-työkalun käyttöä varten oli tarpeen tehdä mittauksia kaavakartasta, jotta saatiin tietoon rakennusalat ja katualueiden pinta-alat. Pinta-alojen mittaukset tehtiin PDF-XChange Editorilla kaavakartasta. Kaavakarttaan saattaa vielä tulla muutoksia, mikä tulee ottaa huomioon tuloksia tulkittaessa. Laskennassa käytetyt pinta-aliatiedot on listattu taulukkoon 9.

Taulukko 9: HAVA-laskennassa käytettäviä pinta-aloja.

Korttelialueen pinta-ala	8800 $m^2$
Liiketilojen rakennusala	1800 $m^2$
Asuinrakennuksen rakennusala	2300 $m^2$
Liiketilojen kerrosala	1000 k- $m^2$
Asuinrakennuksen kerrosala	9200 k- $m^2$
Uusitut kadut	5980 $m^2$
Kadut, joille ei tehdä muutoksia	3175 $m^2$

Uusitut kadut -kohtaan on huomioitu olemassa olevat Meripihkkatie ja Moreenitie sekä niiden levennykset. Pinta-aliatieto on peräisin katusuunnitelmista. Laskenta toteutetaan niin, että HAVA-työkaluun syötetään aiemmin olemassa olleiden katujen yhteispinta-alaksi katualueet, joille ei tehdä muutoksia. Katujen kokonaispinta-alan oletetaan kaavamuutoksen myötä lisääntyvän uusittujen katujen kokonaispinta-alalla, koska ne asfaltoidaan uudestaan kokonaisuudessaan. Näin päästään tässä tapauksessa oletettavasti tarkempaan tuloksiin kuin käyttämällä pelkästään levennysten pinta-alaa, jolloin osa asfaltoinnista jäisi huomiotta.

Kaavamuutoksen selostuksessa on mainittuna, että korttelin 38017 eteläosassa on kalliota ja pohjoisosassa savea noin 1–5 metriä, ja savisen alueen rakennukset vaativat paalutuksen. Liiketilat sijaitsevat korttelin pohjoisosassa, joten niiden paalutuksen tarpeeksi oletettiin 100 % ja eteläosassa sijaitsevan asuinrakennuksen paalutuksen tarpeeksi syötettiin työkaluun 50 %.

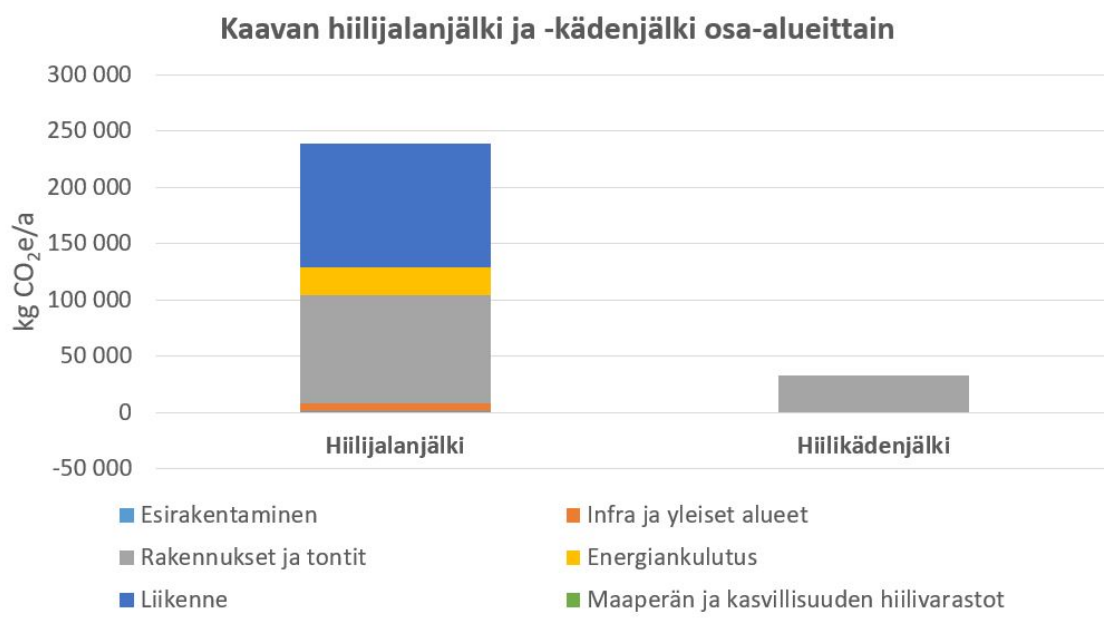
HAVA-työkalun liikenteellistä arviointia varten täytyy käyttää ulkoisia lähteitä.

Henkilöauto- ja joukkoliikenteen keskimääräisten matkojen pituus täytyy selvittää tätä tarkoitusta varten kehitetystä kartasta, joka on HAVA-työkalun raportin liitteenä. Lisäksi alueen liikennevyöhyke täytyy tarkistaa Liiteri-palvelusta. Nämä tiedot selvitettiin ja syötettiin työkaluun. Lisäksi merkittiin, että pyöräilyn edellytyksiin on panostettu, alueella on laadukkaat kävely- ja pysäkkiympäristöt sekä eriytetty pysäköinti. Työkalu otti nämä seikat huomioon laskelmissa. Tulevassa yhdistelmämenetelmällä tehtävässä laskelmassa tehdään myös vastaava oletus.

Laskennan yhteydessä huomattiin, että HAVA-työkalu laskee alueella olevat työntekijät toimistotilojen kerrosneliöiden avulla, eli näillä lähtöarvoilla työkalu olettaa alueella työskentelevien ihmisten määräksi 0, mikä ei pidä paikkaansa, koska alueella on liiketiloja. Laskurissa olevaa asumisväljyyden oletusarvoa 40 muutettiin hieman 45:een, jotta saatiin laskurille asukasluvuksi 230, joka on mainittu kaavamuutoksen selostuksessa.

Laskennan tulos on kuvassa 9. Kuvaajista ilmenee hyvin liikenteen suuri rooli päästöissä. Tarkemmat päästöt eri osa-alueille ovat seuraavat:

Esirakentaminen – 1 064 kg  $CO_2e/a$   
 Infra ja yleiset alueet – 7 006 kg  $CO_2e/a$   
 Rakennukset ja tontit – 95 650 kg  $CO_2e/a$   
 Energiankulutus – 25 594 kg  $CO_2e/a$   
 Liikenne – 109 024 kg  $CO_2e/a$   
 Maaperän ja kasvillisuuden hiilivarastot – -1297 kg  $CO_2e/a$



Kuva 9: Alueen päästöt HAVA:lla. Elinkaarena on 50 vuotta. Työkalu on kokeiluvaiheessa.

Näistä energiankulutukseen sisältyy kaukolämpö sekä asuntojen ja infrastruktuurin kuluttama sähkö, kuten esimerkiksi katuvalaistus. Hiilikädenjäljellä kuvataan rakentamisesta aiheutuvia ilmastohyötyjä. Käytännössä työkalulla on eri rakennustyyppien rakentamisen ominaispäästökertoimien lisäksi kertoimet hiilikädenjäljelle, ja näiden kertoimien avulla saadaan laskettua hiilikädenjälki samalla tavalla kuin hiilijalanjälki.

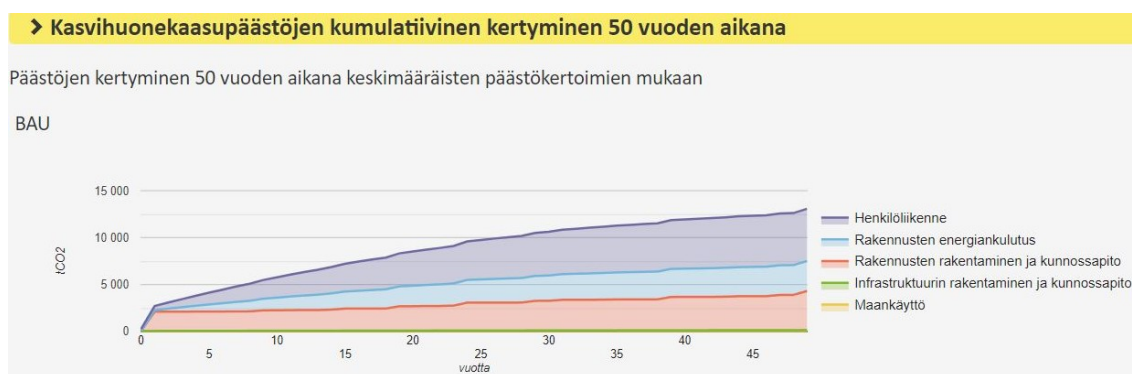
## 7.2 KEKO-työkalu

KEKO-työkalulla tehtiin BAU-skenaarioon laskelma, jossa käytettiin samoja pinta-alatietoja kuin HAVA-työkalun laskelmassa. Nämä tiedot on listattu taulukossa 9. Rakennusten oletettiin olevan betonielementtirakennuksia, ja niiden oletettiin käyttävän kaukolämpöä ja keskimääräistä verkkosähköä.

Mahdollisimman tarkkojen ominaispäästökertoimien saamiseksi käytettiin HAVA-työkalun kertoimia lähtökohtana myös tälle laskelmalle. Tiedossa oli ominaispäästökertoimet tarkastelujakson alulle sekä tarkastelujakson keskimääräiset kertoimet. KEKO-työkaluun laitettiin tarkastelujakson alkuarvoiksi samat kuin HAVA:ssa oli, eli kaukolämmölle 102 g/kWh  $CO_2e$  ja sähkölle 79 kg/kWh  $CO_2e$ . Nämä kertoimet kuvasivat HAVA:ssa vuoden 2025 arvoja.

KEKO-työkalu mahdollistaa energiantuotannon ominaispäästökertoimien eksponentiaalisen muuttamisen tarkastelujakson ajalla. Tällöin saadaan parempi käsitys päästöistä eri vuosina. Eksponentiaaliselle muutokselle laskettiin vakiot määrittämällä Riemannin integraalit funktioille  $f_1(x) = 102 * p^x$  ja  $f_2(x) = 79 * p^x$ , kun  $x \in [0, 50]$ . Vakiot p ratkaistiin olettamalla näiden Riemannin integraalien olevan samat kuin HAVA:n tarkastelujakson keskimääräisten päästöjen ja tarkastelujakson pituuden (50 vuotta) tulo. Kaukolämmön vakioksi syötettiin 0,95 ja verkkosähkön vakioksi 0,94.

Nyt KEKO kuvasi käytännössä päästöjä samoilla ominaispäästökertoimilla kuin HAVA, mutta niiden muutos tapahtui hiljalleen 50 vuoden tarkastelujakson aikana siten, että kaukolämmön päästöt vähenivät joka vuosi 5 % ja verkkosähkön 6 % (kuva 10). HAVA:lla puolestaan laskettiin suoraan keskiarvokertoimilla.



Kuva 10: KEKO:n laskemat kumulatiiviset päästöt. Huomaa, että yksikkönä on  $CO_2$ .

Kuvan 10 päästöt muutettuna samaan muotoon kuin HAVA-työkalussa (kg/a):

Maankäyttö – 0 kg  $CO_2/a$

Infrastruktuurin rakentaminen ja kunnossapito – 2 820 kg  $CO_2/a$

Rakennusten rakentaminen ja kunnossapito – 83 400 kg  $CO_2/a$

Rakennusten energiankulutus – 64 140 kg  $CO_2/a$   
Henkilöliikenne – 111 380 kg  $CO_2/a$

### 7.3 Yhdistelmämenetelmä

Tätä menetelmää varten tarvittiin hieman tarkempaa tietoa kuin asemakaavojen yhteydessä on yleensä saatavilla. Työssä saatiin pääsy A-Insinöörit Civil Oy:n tekemiin katujen rakentamisen kustannuslaskelmiin, joiden pohjalta oli mahdollista tehdä katujen rakentamisesta aiheutuville päästöille arvio EIO-LCA-panos-tuotos-mallin avulla. Tähän arvioon sisältyvät materiaalit, työt ja kuljetukset.

Rakennusten materiaaleihin sitoutuneille ja rakentamisen päästöille käytettiin One Click LCA:n Carbon Designer -lisäosaa, joka tarjoaa mahdollisuuden ottaa huomioon kaava-alueella olevat maanalaiset tilat ja paalutuksen tarpeen. Näihin päästöihin lisättiin päästötietokannasta rakentamisen ja purkamisen töihin liittyvät päästöt.

Energiankulutuksen ja liikenteen päästöjä arvioitiin KURKE-työkalulla. Tällä laskennalla saatiin laskettua rakennusten osalta elinkaaren kaikki vaiheet lukuun ottamatta vaiheita B1-B3. (taulukko 8).

Tämä laskenta menee katujen osalta materiaalitasolle, ja on huomionarvoista, että näin tarkkoja kustannuslaskelmia ei ole useinkaan käytettävissä varsinkaan asemakaavan suunnitteluvaiheessa. Tällaisen menetelmän käyttö voi kuitenkin tulla kyseeseen, mikäli tällaista dataa on saatavilla, mikä voi olla mahdollista esimerkiksi sellaisessa tapauksessa, että arvioidaan jo olemassa olevan asemakaava-alueen elinkaari vaikutuksia tai asemakaavan pohjalta on alettu jo tehdä rakennussuunnitelmia.

#### 7.3.1 Katujen rakentamisen päästöjen laskenta EIO-LCA-menetelmällä

Katujen osalta laskenta aloitettiin tutkimalla saatua kustannusarviota, jossa on listattuna kaikki katusuunnitelmista lasketut materiaalien ja töiden kustannukset. Meripihkatietä ja Moreenitietä levennetään muutamilla metreillä, ja vanha kadun rakenne jää osittain paikoilleen. Molemmat kadut asfaltoidaan kauttaaltaan uudestaan. Laskelmiin sisältyvät katujen rakennekerrokset, vesihuolto, valaistuslaitteet, kuljetukset ja työt. EIO-LCA-malliksi valittiin US 2002 Producer Model, joka kuvaa päästöjä tuottajan näkökulmasta eli laskee päästöt cradle-to-gate-periaatteella.

Laskenta aloitettiin Säynäjoen et al. (2011ab) tutkimusta mukailien tekemällä ensin yhden EIO-LCA-sektorin mallinnus, jossa sijoitettiin kaikki materiaalit ja toiminnot yhden EIO-LCA-sektorin alle. Sektoriksi valittiin ensin "Other nonresidential

structures", jolloin saatiin alla olevat tulokset (taulukko 10).

Taulukko 10: Alustava yhden sektorin EIO-LCA-mallinnus.

Katu	Kustannus	Indeksikorjattu kustannus	t $CO_2e$	kg $CO_2e/m^2$
Meripihkatie	410 400 €	\$ 304 106	186	46,5
Moreenitie	289 100 €	\$ 214 200	131	66,2

Jo nämä tulokset osuvat samaan suuruusluokkaan kirjallisuuskatsauksen perusteella laskettuihin ominaispäästökertoimiin, joita havainnollistettiin taulukossa 5. Tämän case-kohteen perusteella vaikuttaa siis siltä, että EIO-LCA:n avulla saadaan jo karkeilla kustannusarvioilla ja sektorijaolla suuntaa antavia tuloksia. Tämä on huomionarvoinen seikka kaavoittajalle, jolla ei ole tämän tarkempaa tietoa kustannuksista.

Tämän jälkeen mallinnus suoritettiin tarkemmalla sektorijaolla, kuten myös Säynäjoen et al. (2011ab) tutkimuksessa tehtiin. EIO-LCA-sektoreita valittiin kaikkiaan 12, ja kaikki kustannuslaskelman materiaalit ja kuljetuspalvelut jaoteltiin näille 12 sektorille. Sektorisijoittelu tehtiin Excel-tilinlaskentaohjelmalla. Taulukosta 11 ilmenee Meripihkatien mallinnuksen tulos ja EIO-LCA-sektorit, joita mallinnuksessa käytettiin.

Taulukko 11: Meripihkatien EIO-LCA-mallinnuksen tulos.

Materiaalien ja kuljetusten EIO-LCA-sektorit			
EIO-LCA-sektori	Kustannus	Indeksikorjattu kustannus	Päästöt t $CO_2e$
Sand, gravel, clay, and refractory mining	1 127 €	\$ 835	1,25
Stone, mining and quarrying	21 114 €	\$ 15 646	18
Truck transportation	57 032 €	\$ 42 260	59,2
Asphalt paving mixture and block manufacturing	51 887 €	\$ 38 448	64,1
Concrete, pipe, brick and block manufacturing	36 517 €	\$ 27 059	51,9
Plastics pipe and pipe fitting manufacturing	4 120 €	\$ 3 053	4,32
Lighting fixture manufacturing	43 200 €	\$ 32 011	17,9
Other plastics product manufacturing	518 €	\$ 384	0,35
Other non-residential structures	15 730 €	\$ 11 656	7,13
Cut Stone and Stone Product Manufacturing	46 600 €	\$ 34 530	21,5
All other crop farming	3434 €	\$ 2 544	6,44
Ferrous metal foundries	2 700 €	\$ 2 001	2,11
<b>Yhteensä</b>	<b>283 979 €</b>	<b>\$ 210 428</b>	<b>254,2</b>

Vastaava mallinnus tehtiin myös Moreenitielle, ja tämän mallinnuksen tulos on taulukossa 12. Alkuperäisessä yhden sektorin laskelmassa katujen rakentamisen kokonaispäästöjen suhteet olivat samat kuin kustannusten suhteet, koska EIO-LCA on lineaarinen malli. Tarkemmalla sektorijaolla saadut päästölukemat eivät enää ole suorassa suhteessa kustannusten kanssa, koska näissä tarkemmissa laskelmissa materiaaleissa ja kuljetuksissa ovat erot alkavat näkyä.

Taulukko 12: Moreenitien EIO-LCA-mallinnuksen tulos.

Materiaalien ja kuljetusten EIO-LCA-sektorit			
EIO-LCA-sektori	Kustannus	Indeksikorjattu kustannus	Päästöt t $CO_2e$
Sand, gravel, clay, and refractory mining	0 €	\$ 0	0
Stone, mining and quarrying	8 838 €	\$ 6 549	7,53
Truck transportation	32 327 €	\$ 23 954	33,5
Asphalt paving mixture and block manufacturing	9 317 €	\$ 6 904	11,5
Concrete, pipe, brick and block manufacturing	5 944 €	\$ 4 404	8,45
Plastics pipe and pipe fitting manufacturing	20 872 €	\$ 15 466	21,9
Lighting fixture manufacturing	48 000 €	\$ 35 568	19,8
Other plastics product manufacturing	1 613 €	\$ 1 195	1,08
Other non-residential structures	10 699 €	\$ 7 928	4,85
Cut Stone and Stone Product Manufacturing	49 143 €	\$ 36 415	22,7
All other crop farming	1 246 €	\$ 923	2,34
Ferrous metal foundries	4 106 €	\$ 3 042	3,21
<b>Yhteensä</b>	<b>192 106 €</b>	<b>\$ 142 349</b>	<b>136,86</b>

Näissä laskelmissa on kuitenkin huomioituna vain materiaalit ja kuljetukset. Saadut päästölukemat ovat elinkaaripäästöjä, eli ne huomioivat materiaalien tuotannossa koko tuotantoprosessin ja kuljetuksissa pakokaasupäästöjen lisäksi muun muassa polttoaineen tuotannon. Lisäksi tulee huomioida palveluiden osuus hankkeelle. Tämä huomioitiin samalla sektorilla kuin Säynäjoen et al. (2011ab) tutkimuksessa, eli "Other nonresidential structures". Työmaatehtävien kulut siis sijoitettiin tälle EIO-LCA-sektorille, pois lukien työnjohto, jonka ei oletettu aiheuttavan merkittäviä päästöjä kuten ei tilaajatehtävienkään. Tämän mallinnuksen tulokset lisättiin aiemmin laskettuihin päästöihin, ja lopuksi laskettiin kokonaispäästöt molempien katujen rakentamiselle. Tulos on taulukossa 13.

Nämä tulokset ovat jonkin verran korkeampia kuin esimerkiksi Helsingin asemakaavojen arviointimenetelmässä käytettävät ominaispäästökertoimet, jotka ovat autokatujen osalta 58 kg  $CO_2e/m^2$  ja jalankulun ja pyöräilyn alueiden osalta 55 kg  $CO_2e/m^2$  ja jotka sisältävät rakentamisen lisäksi ylläpidon. Syitä tälle erolle pohditaan tarkemmin luvussa 10. Ylläpidon osuudeksi on oletettu Helsingin asemakaavojen arviointimenetelmässä 1 %, eli ylläpidon osuus on todella pieni.

Taulukko 13: EIO-LCA-mallinnuksen lopputulos.

Katu	t $CO_2e$	kg $CO_2e/m^2$
Meripihkatie	282,3	70,6
Moreenitie	156,7	79,1

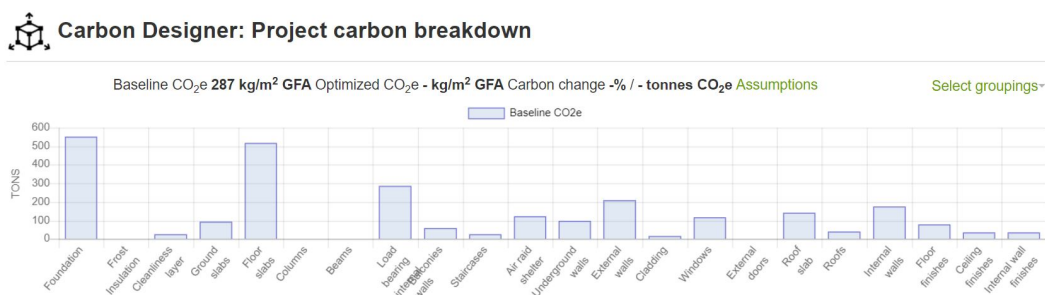
Tätä laskelmaa olisi mahdollista jatkaa hybridimallina, jolloin olisi tarpeen etsiä tarkempia ominaispäästökertoimia EIO-LCA:n perusteella havaituille suurimmille päästölähteille, joita ovat betoni, asfaltti, kivimateriaalit, kuljetukset, muoviputket ja valaistuslaitteet. Infrastruktuurin osuus alueen rakentamisen kokonaispäästöistä on kuitenkin sen verran pieni (noin 11 %), että tässä tutkimuksessa näin ei menetelty. Tässä laskelmassa käytössä olevilla lähtötiedoilla tällainen tarkennus olisi myös ollut haastavaa ja vaatinut useiden oletusten tekemistä, eikä lopputulos olisi ollut

välttämättä parempi.

### 7.3.2 Rakennusten rakentamisen päästöjen arviointi One Click LCA:lla

Asemakaavatasolla ei useinkaan ole tarkkaa tietoa rakennusten materiaaleista ja tarkemmista rakentamisen ratkaisuista, koska ne päätetään vasta rakennussuunnitelmavaiheessa. One Click LCA:n Carbon Designer -lisäosa tarjoaa mahdollisuuden luoda tyyppirakennuksia tiedoilla, jotka asemakaavatasolla on tiedossa. Tässä luvussa lasketaan tällä lisäosalla rakentamisen päästöt kaikille kaava-alueelle tuleville rakennuksille. Kaavaselostuksen mukaan alueen rakennukset tuetaan paaluin. Carbon Designer -lisäosalla voi ottaa tämän huomioon, samoin kuin maanalaiset osatkin, mikä on tärkeää tämän kaavamuuotosalueen parkkihallin takia.

Carbon Designer -lisäosaan syötettiin kaavaselostuksen lähtötiedoista asuinrakennuksen kerrosala, kerrosmäärä, rakennustyyppi ja paalutuksen tarve. Rakennustyyppiä oletettiin tässä betonielementti, jotta rakennus mukailisi Pihlajamäen alueen muita rakennuksia. Työkalun luoman tyyppirakennuksen kokonaispäästöt ovat noin 287 kg  $CO_2e/m^2$ , ja kokonaisuudessaan 2640 t  $CO_2e$ . Työkalu myös erottelee eri materiaalit ja päästöjen jakautumisen eri rakennuksen osille (kuva 11). Tämä auttaa kaavoittajaa hahmottamaan, mistä rakennusmateriaalien päästöt oikeastaan koostuvat. Tässä tapauksessa perustusten rooli on suuri paalutuksen tarpeesta johtuen. Rakennusmateriaaleihin ei voi vaikuttaa kaavatasolla suoraan, mutta tämä laskenta antaa ymmärryksen siitä, miten suuri rooli esimerkiksi paalutuksella on kokonaisuuden kannalta.



Kuva 11: Asuinrakennuksen materiaaleihin sitoutuneet päästöt.

Liiketiloiille tehtiin vastaava laskenta, ja tämän laskennan tuloksena saatiin 304 kg  $CO_2e/m^2$ , eli kokonaisuudessaan 304 t  $CO_2e$ . Työkalu ei tarjoa mahdollisuutta tehdä tyyppirakennusta liiketiloiille. Lähin vaihtoehto on toimistorakennus, jota tässä laskennassa käytettiin. Myös tässä laskennassa oletettiin rakennuksen olevan tyyppiltään betonielementtirakennus, joka vaatii paalutusta.

Nämä lukemat sisältävät materiaaleihin sitoutuneet päästöt (A1-A3), kuljetukset (A4),

osien korvaamisen (B4-B5) sekä elinkaaren lopun (C1-C4). Lisäksi itse rakentamis- ja purkamisprosesseista aiheutuu päästöjä, ja niiden suuruutta voi arvioida esimerkiksi päästötietokannan ominaispäästökertoimilla (taulukko 4). Näiden kertoimien ja kaavaselostuksesta saatavien tietojen avulla saatiin arvioitua rakentamisen ja purkamisen päästöjä, jolloin huomioduksi tulee myös vaihe A5. Kaikki rakentamisen päästöt on listattu taulukkoon 14. Kuljetusten ja elinkaaren loppuvaiheen päästöt on arvioitu One Click LCA:n valmiiksi antamalla perusolettamuksilla, joita ei muutettu.

Taulukko 14: Rakennusten rakentamisen kokonaispäästöt. Purkaminen viittaa olemassa olevien rakennusten purkamiseen.

Päästölähde	kg $CO_2e/m^2$	t $CO_2e$
Materiaalit	287 (asunnot), 304 (liiketilat)	2944
Purkaminen	14	53,2
Rakentaminen	46 (asunnot), 78 (liiketilat)	501,2

Rakennusten rakentamiseen ja infrastruktuurin rakentamiseen liittyvien päästöjen välinen suhde on näissä EIO-LCA:lla ja One Click LCA:lla tehdyissä laskelmissa samaa luokkaa kuin Säynäjoen et al. tutkimuksessa (2011a), jossa todettiin rakennusprojektin kokonaispäästöistä 90 % liittyvän rakennuksiin ja 10 % siihen liittyvään infrastruktuuriin. Tässä tehtyjen laskelmien mukaan infrastruktuuri muodostaa noin 11 % rakentamisen kokonaispäästöistä ja rakennukset puolestaan 89 %.

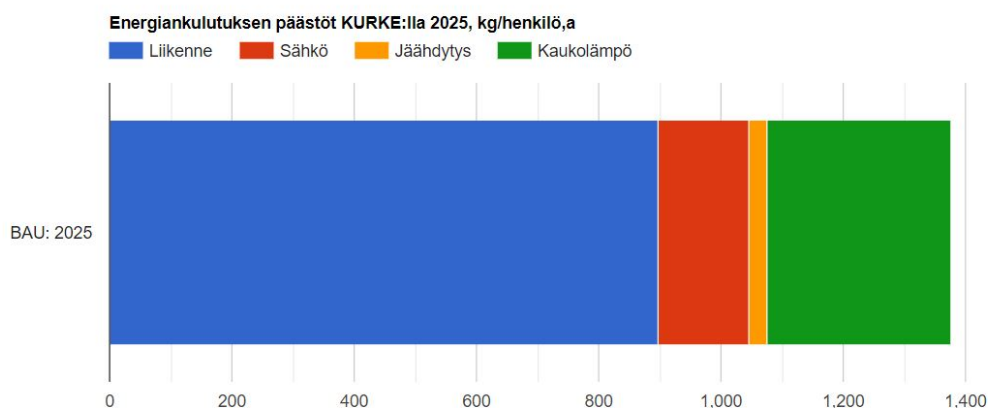
### 7.3.3 Kaava-alueen energiankulutuksen päästöt KURKE-työkalulla

KURKE-työkalulla on mahdollista arvioida rakennusten elinkaaren vaiheita B6 ja B7. Tämän laskennan myötä yhdistelmämenetelmä kattaa kaikki elinkaaren vaiheet lukuun ottamatta vaiheita B1–B3.

KURKE-työkalun etuna on, että se tekee skenaariovertailua automaattisesti. Jo perustiedot syöttämällä saa arvion alueen energiankulutuksesta eri lämmitys- ja sähköntuotantovaihtoehdoilla. Työkalu laskee päästöt oletettujen energiantuotannon ominaispäästökertoimien ja rakennusten oletetun energiankulutuksen perusteella, mutta käyttäjä voi muokata kaikkia lukuja. Tässä BAU-skenaarion laskelmassa rakennusten oletettuja energiankulutuksia ei muutettu. Energiantuotannon ominaispäästökertoimia ei ole laskettu LCA:lla, eli niistä puuttuu osin elinkaarinäkökulma, samoin kuin liikenteen päästöistä, jotka pohjautuvat LIPASTO-tietokannan lukemiin. Tämä ei kuitenkaan ole poikkeuksellista, koska tilanne on sama muissakin tutkituissa työkaluissa.

KURKE-työkaluun syötettiin kaavaselostuksessa olevat tiedot. Työkalun oletusarvona olevaa asumisväljyytlukua muutettiin, jotta saatiin asuntojen kerrosneliömäärä ja asukasluku täsmäämään kaavamutosehdotuksen kanssa. Asumisväljyydeksi asetettiin 40. Työpaikkaväljyyttä ei muutettu, jolloin työkalu olettaa toimitilojen

kerrosneliömetrimäärän perusteella alueella työskentelevän 20 ihmistä. Laskurissa olevia energiantuotannon ominaispäästökertoimia oli tarpeen muokata tämän päivän Helsingin tilannetta vastaavaksi, koska esimerkiksi sähköntuotannon arvona oli koko Suomen keskiarvo vuosilta 2000–2007. Sähkön ja kaukolämmön kertoimet asetettiin samoiksi, mitä HAVA:ssa oletetaan niiden olevan vuonna 2025, eli kaukolämmölle 102 g/kWh  $CO_2e$  ja sähkölle 79 kg/kWh  $CO_2e$ . Laskennan lopputulos on kuvassa 12.



Kuva 12: Alueen päästöt KURKE:lla vuonna 2025. Kuvaaja on tehty Google Chart-silla KURKE:n antamien lukujen pohjalta.

Kuvan 12 liikenteeseen liittyvät päästöt koskevat vuoden 2025 tilannetta, jossa on KURKE-työkalun määritelmän mukaan kohtuulliset pyöräilymahdollisuudet, kohtuulliset joukkoliikenneyhteydet ja mahdollisuus pyörien pysäköintiin. Keskitetyt autojen pysäköintiratkaisut -kohtaan on valittu "puolet". Lähikaupan ja päiväkodin on asetettu olevan alle 400 metrin etäisyydellä, mutta koulun yli 400 metrin etäisyydellä. Kaava-alueen vieressä sijaitsee päiväkotiki, mutta lähin koulu sijaitsee yli 400 m päässä. Tällöin kulkutapajakaumassa henkilöautoilla on 60 prosentin osuus kuljetuista henkilökilometreistä. KURKE:n käyttämät liikenteen ominaispäästökertoimet perustuvat vuoden 2011 henkilöliikennetutkimukseen (Liikennevirasto, 2011), eikä niitä muutettu tässä laskennassa. Niiden oletettiin kuvaavan kohtuullisesti kaupungissa tapahtuvaa ajoa vielä tänäkin päivänä.

Kuvan 12 päästöistä ei kannata laskea suoraan kovin pitkäaikaisia kumulatiivisia päästöjä, koska luultavasti ominaispäästökertoimissa tapahtuu muutoksia jo lähivuosina. HAVA:ssa on oletettu sähköntuotannon ja kaukolämmön ominaispäästökertoimien muuttuvan tavoilla, jotka on ennustettu Helenin kaukolämmityksen päästökenaariossa (Helsingin kaupunki, 2021) sekä työ- ja elinkeinoministeriön raportissa Yhteenveto toimialojen vähähiilitiekartoista (TEM, 2020). KURKE-työkalulla on myös mahdollista tehdä vastaava oletus muutamalla eri tavalla. Yksi tapa on käyttää KURKE-työkalun laskemia energiankulutuksia pohjana mutta laskea päästöt itse käyttämällä muuttuvia ominaispäästökertoimia. Toisaalta voi tehdä kuten HAVA-työkalu tekee, eli laskea laskenta-ajalle keskimääräisiä ominaispäästökertoimia. KURKE-työkalulle

voi myös ilmoittaa päästökertoimien vuotuisen prosentuaalisen muutoksen sähkölle, kaukolämmölle, kaukokylmälle ja liikenteelle. Lisäksi annetaan tarkasteluväli vuosina. Työkalu kertoo kasvihuonekaasupäästöjen muutoksen kerrosneliömetriä ja henkilöä kohden tarkasteluajan lopussa.

Jotta myös tulevaisuudessa tapahtuvat muutokset saatiin otettua huomioon, syötettiin KURKE-työkalulle seuraavaksi HAVA-työkalusta otettuja Helsingin olosuhteita kuvaavia keskimääräisiä ominaispäästökertoimia. Liikenteen muita olettamuksia ei tässä vaiheessa vielä muutettu. KURKE-työkalulle syötettiin siis seuraavat keskiarvolut, jotka kuvaavat vuosien 2025-2075 keskiarvoja myös HAVA-työkalussa:

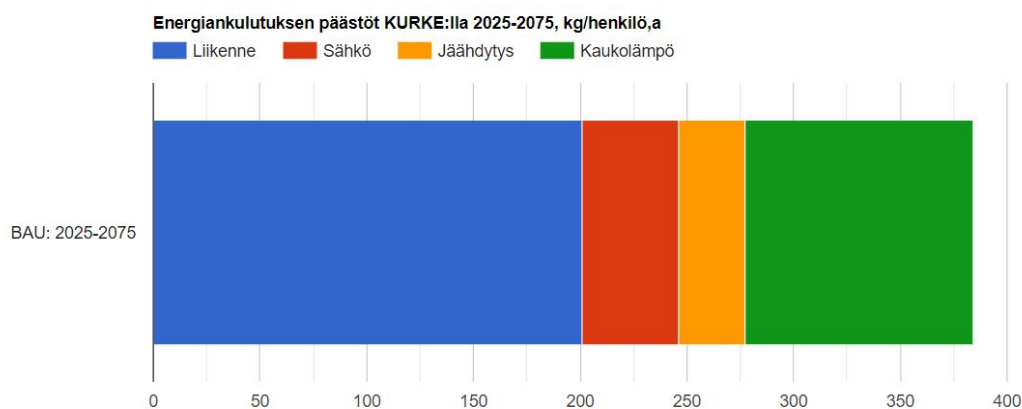
Henkilöautot – 24,1 g  $CO_2e$ /hkm

Joukkoliikenne – 4,4 g  $CO_2e$ /hkm

Kaukolämpö – 37 kg  $CO_2e$ /MWh

Keskimääräinen verkkosähkö – 23,8 kg  $CO_2e$ /MWh

Tämän laskennan tulos (kuva 13) kuvaa vuosien 2025–2075 keskimääräisiä vuotuisia päästöjä samaan tapaan kuin HAVA-työkalussa. Kokonaispäästöt ovat laskeneet merkittävästi, mutta edelleen liikenteellä on merkittävin rooli päästöissä.



Kuva 13: Alueen keskimääräiset päästöt vuosina 2025–2075 KURKE:lla. Kuvaaja on tehty Google Chartsilla KURKE:n antamien lukujen pohjalta.

### 7.3.4 Yhdistelmämenetelmän tulos

Kun yhdistetään EIO-LCA:lla lasketut infrastruktuurin rakentamisen päästöt, One Click LCA:lla lasketut rakennusten rakentamisen päästöt ja KURKE:lla lasketut energiankulutuksen ja liikenteen päästöt, saadaan samankaltaisia tuloksia kuin HAVA:lla.

Kokonaispäästöt ovat noin 175 t  $CO_2e/a$ . Henkilöä kohden lukema on noin 699 kg  $CO_2e/a$ . Tulokset on eritelty tarkemmin liitteessä 1, vertailun helpottamiseksi.

## 8 Skenaario 2: Paremmat liikenneratkaisut

Aiemmassa luvussa tehtiin peruslaskelmat elinkaaripäästöille, ja tässä luvussa tutkitaan aiemmin käytettyjen työkalujen avulla skenaariota, jossa alueella on paremmat liikenteelliset ratkaisut, jotka vähentävät henkilöauton käytön tarvetta. Työkalut tarjoavat tähän tarkoitukseen erilaisia vaihtoehtoja.

Tässä skenaariossa pyritään mallintamaan tilannetta, jossa Pihlajamäen ympäristöön on tullut Raide-Jokeri sekä Viikin–Malmin pikaraitiotie. Nämä nostaisivat alueen joukkoliikenteen palvelutasoa merkittävästi. Päivähoidon ja koulun etäisyyksistä ei ole varmuutta, mutta tähän skenaarioon ei oletettu rakennettavan uusia kouluja tai päiväkoteja alueen lähistölle, eli tämä valinta pidettiin muuttumattomana suhteessa BAU-skenaarioon.

Arviointi aloitettiin yhdistelmämenetelmässä käytettävällä KURKE-työkalulla, joka mahdollistaa tällaisen arvioinnin ottamalla huomioon useampia eri seikkoja. Aiemmassa laskelmassa oli maltilliset oletukset, jolloin henkilöauton kulkutapaosuus oli melko suuri. Nyt työkalulle syötettiin uudet henkilöautoliikenteen tarvetta vähentävät suunnitteluvalinnat (kuva 14).

**Henkilöautoliikenteen tarvetta vähentävät suunnitteluvalinnat:**

Erilliset pyörätiet ja kunnolliset pyörien pysäköintitilat	Erinomaiset
Keskitetyt autojen pysäköintiratkaisut	Kaikki
Lähijunien asema alueella	Ei ole alueella
Lähikauppa, lasten päivähoitotilat ja ala-aste 400 m etäisyydellä	Kaksi kolmesta
Tiheät ja laadukkaat bussi- ja ratikkalinjat	Erinomainen
Tiheät, laadukkaat ja turvalliset kävelyreitit	Erinomainen

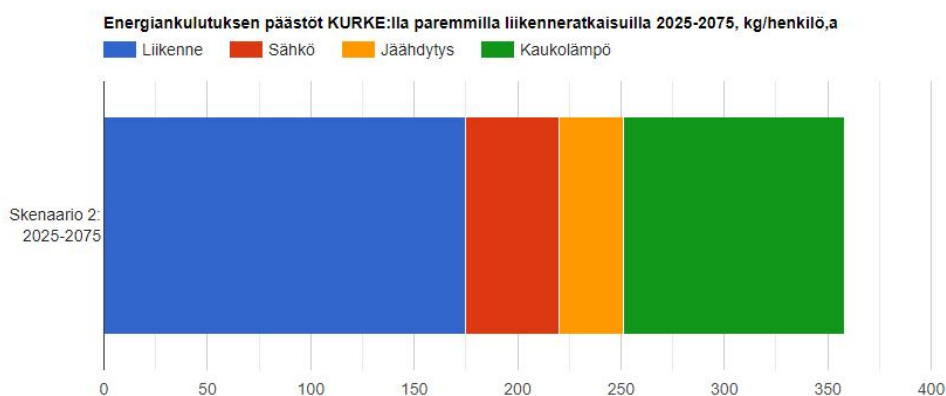
Kuva 14: KURKE-työkalulle syötetyt liikenteellisten parannusten tiedot.

Näiden toimien jälkeen KURKE:n arvioima kulkutapaosuus laskee 49 prosenttiin (kuva 16) ja samalla liikenteen päästöt laskevat merkittävästi (kuva 15). Nämä kulkutapajakaumat tuntuvat melko suurilta Helsingin oloihin, mutta KURKE laskee kulkutapaosuudet osuutena kokonaishenkilökilometrisuoritteesta. Autolla tehdään luonnollisesti pidempiä matkoja kuin kävellen. Esimerkiksi Helsingin henkilöliikennetutkimuksessa (2016) kulkutapaosuus henkilöautoille on 36 %, kun lasketaan matkojen suhteellisia määriä.

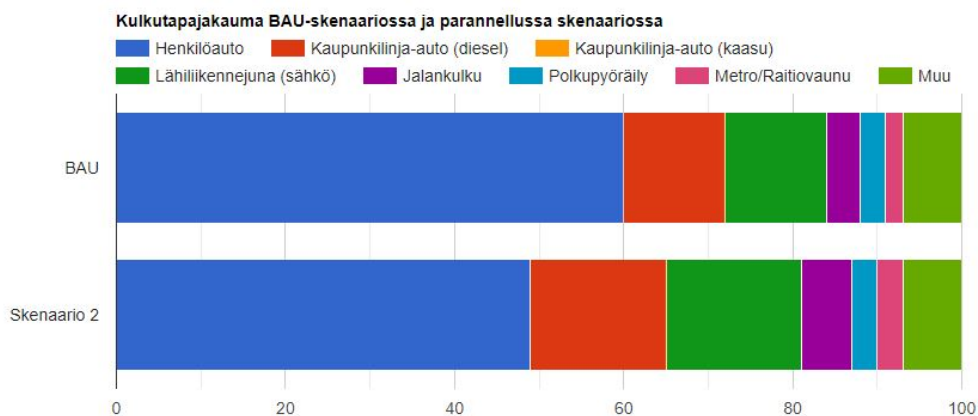
HAVA-työkalu tarjoaa myös mahdollisuuden arvioida liikenteellisten ratkaisuiden vaikutusta alueen elinkaaripäästöihin. HAVA:lla on mahdollista huomioida nämä asiat vain portaattomasti, eli joko ne on huomioitu tai ei. Käytännössä siis HAVA:lla aiemmin tehdyt oletukset kuvaavat työkalun kannalta parhaalla mahdollisella tavalla myös tätä skenaariota. Myöskään KEKO-työkalulla ei saatu kuvattua tätä

skenaariota, koska KEKO-työkalussa ei ole sopivia valintoja näin yksityiskohtaisten liikenteellisten muutosten vaikutusten arviointiin. KEKO-työkalu onkin vahvimmiltaan yleiskaavatasolla.

Käytettyjen menetelmien liikennepäästöjä ei ole laskettu LCA-menetelmillä, vaan kyseessä ovat pakoputkipäästöt. Tällä on luultavasti vaikutuksia siihen, miten esimerkiksi sähköautojen latauspaikkojen lisääntyminen todellisuudessa vaikuttaa liikenteen elinkaaripäästöihin. Tätä pohditaan tarkemmin luvussa 10.



Kuva 15: KURKE-työkalun arvioimat päästöt liikenteellisten parannusten jälkeen. Kuvaaja on tehty Google Chartsilla KURKE:n lukujen pohjalta.



Kuva 16: KURKE-työkalun arvioimat kulutusajakaumat. Kuvaaja on tehty Google Chartsilla KURKE:n lukujen pohjalta.

Käytännössä siis HAVA:lla ja KEKO:lla ei saatu kuvattua tätä skenaariota, ja tästä syystä niiden tuloksiksi on merkitty sama kuin BAU-skenaariossa. Sen sijaan

KURKE:lla tehdyillä laskelmilla päädyttiin merkittäviin päästövähennyksiin. Henkeä kohden elinkaaripäästöt vähenivät 699 kilogrammasta 673 kilogrammaan ( $CO_2e/a$ ). Tuloksia voi vertailla tarkemmin liitteestä 1.

## 9 Skenaario 3: Tiiviimpi rakentaminen

Tähän skenaarioon tehtiin olettaus, jossa asumisen rakentaminen on 25 % tiiviimpää kuin kaavamuutosehdotuksessa. Kaavamuutoksessa alun perin esitetty 9 200 kerrosneliometriä kasvatettiin siis 11 500 kerrosneliometriin. Kerrosmäärää nostettiin neljästä viiteen. Asukasluvun oletettiin kasvavan samassa suhteessa eli noin 288 asukkaaseen. Tähän skenaarioon tehtiin samat liikenteelliset olettamukset kuin BAU-skenaariossa.

Tämän skenaarion laskennat suoritettiin erikseen HAVA:lla, KEKO:lla ja yhdistelmämenetelmällä samaan tapaan kuin BAU-skenaariossa. Tarkoituksena oli selvittää, miten energiankulutus suhteutuu BAU-skenaarioon.

### 9.1 HAVA-työkalu

HAVA-työkalun antamat päästöt olivat seuraavat:

Esirakentaminen – 1 064 kg  $CO_2e/a$   
 Infra ja yleiset alueet – 7 006 kg  $CO_2e/a$   
 Rakennukset ja tontit – 117 270 kg  $CO_2e/a$   
 Energiankulutus – 31 273 kg  $CO_2e/a$   
 Liikenne – 113 258 kg  $CO_2e/a$   
 Maaperän ja kasvillisuuden hiilivarastot – -1 297 kg  $CO_2e/a$

Kokonaishiilijalanjälki on siis noussut noin 13 %. Kuitenkin asukas- ja kerrosneliömäärä ovat nousseet 25 %, joten asukasta kohden päästöt ovat pienemmät. Tarkkaan ottaen BAU-skenaariossa ne ovat 930 kg ja tässä skenaariossa 859 kg ( $CO_2e/a$ ). Tulokset on eritelty tarkemmin liitteessä 1.

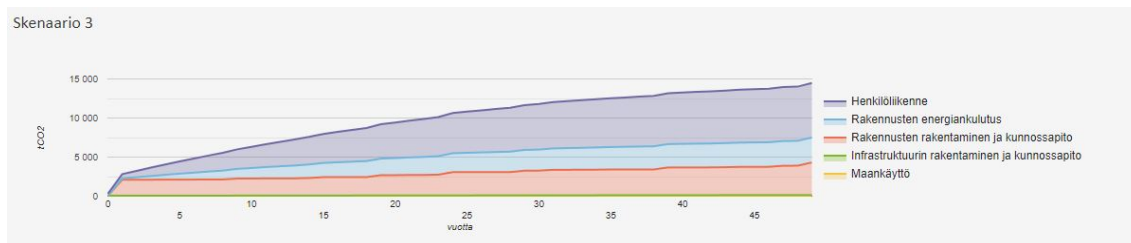
### 9.2 KEKO-työkalu

KEKO-työkalulla tehtiin laskelma samoilla lähtötiedoilla kuin HAVA-työkalulla. Energiantuotannon päästökertoimien oletettiin muuttuvan samalla tavalla kuin BAU-skenaariossa. Laskennan tulos on kuvassa 17.

Kuvan 17 luvut muutettuna samaan muotoon kuin HAVA:ssa (kg/a) ovat seuraavat:

Maankäyttö – 0 kg  $CO_2/a$   
 Infrastruktuurin rakentaminen ja kunnossapito – 2 820 kg  $CO_2/a$

Rakennusten rakentaminen ja kunnossapito – 83 400 kg  $CO_2/a$   
 Rakennusten energiankulutus – 64 140 kg  $CO_2/a$   
 Henkilöliikenne – 139 480 kg  $CO_2/a$



Kuva 17: KEKO-työkalan antamat kumulatiiviset päästöt skenaariolle 3.

Vaikka esimerkiksi rakennusten energiankulutus ei ole muuttunut suhteessa BAU-skenaarioon, sen osuus henkilöä kohden on laskenut, koska asukasmäärä on tässä skenaariossa suurempi. Tarkkaan ottaen vuotuiset kokonaispäästöt asukasta kohden ovat laskeneet 1 150 kilogrammasta 1 016 kilogrammaan ( $CO_2/a$ ). Tulokset on eritelty tarkemmin liitteessä 1.

## 9.3 Yhdistelmämenetelmä

### 9.3.1 One Click LCA

One Click LCA:n antama tulos 5-kerroksiselle rakennukselle, jonka kerrosneliömetrimäärä on  $11500 \text{ k-m}^2$ , oli  $279 \text{ kg/m}^2$ . Tulos on hieman alhaisempi kuin BAU-skenaariossa. Tämä vastaa kokonaisuudessaan noin 3200 tonnin päästöjä. Kun tähän lisätään liiketilat, purkaminen ja rakentaminen, kokonaispäästöiksi saadaan noin 4300 tonnia. Tarkemmat luvut on koottu taulukkoon 15.

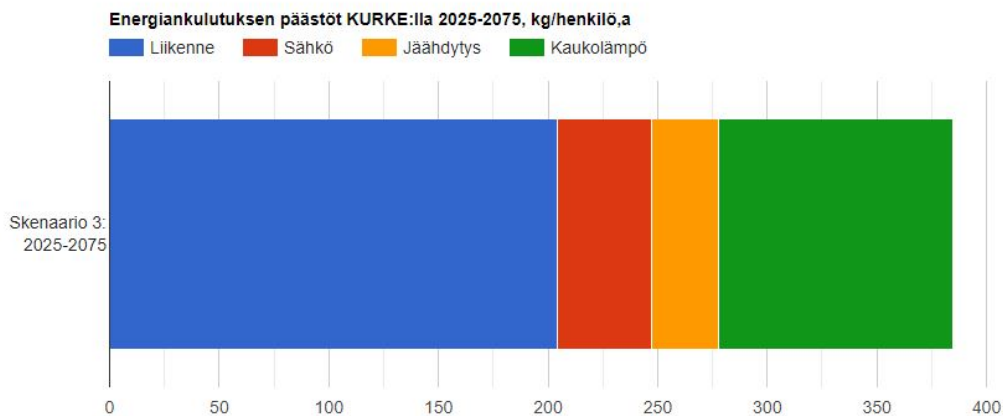
Nämä päästöt ovat kokonaisuudessaan noin 83 tonnia vuodessa ja 271 kg vuodessa henkilöä kohden. Henkilöä kohden lukema on hieman pienempi kuin BAU-skenaariion väljemmässä rakentamisessa, jossa lukema oli 280 kg.

Taulukko 15: Rakennusten rakentamisen kokonaispäästöt. Purkaminen viittaa ole-massa olevien rakennusten purkamiseen.

Päästölähde	kg $CO_2e/m^2$	t $CO_2e$
Materiaalit	279 (asunnot), 304 (liiketilat)	3513
Purkaminen	14	53,2
Rakentaminen	46 (asunnot), 78 (liiketilat)	607

### 9.3.2 KURKE-työkalu

KURKE-työkalun antama tulos on kuvassa 18. Henkeä kohden ei ole käytännössä merkittäviä muutoksia skenaarioon 1 verrattuna.



Kuva 18: KURKE-työkalun arvioimat päästöt. Kuvaaaja on tehty Google Chartsilla KURKE:n lukujen pohjalta.

### 9.3.3 Yhdistelmämenetelmän tulos

Yhdistelmämenetelmällä lasketut kokonaispäästöt tälle skenaariolle ovat noin 211 t  $CO_2e/a$  ja henkeä kohden noin 685 kg  $CO_2e/a$ . Infrastruktuurin rakentamisen päästöjä ei laskettu uudestaan, vaan laskelmiin oletettiin samat päästöt kuin muissakin skenaarioissa.

## 10 Tulosten tulkinta ja yhteenveto

Kaikilla kolmella menetelmällä lasketut päästöt ovat keskenään samaa suuruusluokkaa. Laskentojen tuloksissa on kuitenkin eroja, ja niiden syitä pohditaan tässä luvussa.

Kaikkien laskelmien tulokset on koottu liitteeseen 1.

### 10.1 BAU-skenaario

One Click LCA:n Carbon Designer -lisäosan avulla lasketut rakennusten rakentamisen päästöt poikkeavat hieman HAVA:n arvioimista rakennusten päästöistä. One Click LCA:lla ja päästötietokannan ominaispäästökertoimilla lasketut kokonaispäästöt olivat 3498,4 t  $CO_2e$ , eli noin 70 t  $CO_2e/a$ . HAVA:n antama arvio oli 96 t  $CO_2e/a$ . HAVA laskee kerralla rakennusten ja tonttien päästöt ja sisällyttää niihin vaiheet B1–B3 (kuva 19), joita Carbon Designer -lisäosa ei huomioi. Toisaalta Carbon Designer -lisäosa huomioi vaiheen B5, jota HAVA taas ei huomioi. Carbon Designerilla tehtyihin laskelmiin ei myöskään sisälly tonttien päästöt. Laskennan tulosten erot johtuvat näistä eroista. Mikäli Carbon Designerin avulla laskettuihin lukemiin lisätään ylläpidon vaiheita samalla ominaispäästökertoimella kuin HAVA:ssa, lukemat ovat jo melko lähellä toisiaan. Tämä lisäys tosin sisältää luultavasti myös asioita, jotka on jo kertaalleen huomioitu Carbon Designerilla tehdyssä laskelmassa. Carbon Designer -lisäosalla tehdyt arviot ovat siis linjassa HAVA:n antamien lukemien kanssa, mutta työkalun käyttäjän täytyy olla tietoinen siitä, mitä laskelmiin sisältyy.

KEKO:n antama tulos rakennusten rakentamiselle ja kunnossapidolle asettuu Carbon Designerin ja HAVA:n antamien tulosten välille ja on näin ollen linjassa niiden kanssa. KEKO:n laskenta perustuu kirjallisuuskatsaukseen, jossa on tutkittu erilaisia LCA-menetelmällä tehtyjä tutkimuksia, joten KEKO:n laskelma huomioi elinkaaripe- rusteisesti näitä päästöjä ja sisältää näin ollen samoja asioita kuin Carbon Designer ja HAVA, joskaan täyttä varmuutta näiden tutkimusten metodeista ei ole. KEKO:n antama lukema rakennusten energiankulutukselle sen sijaan on suurempi kuin HAVA:lla ja KURKE:lla.

EIO-LCA-menetelmällä tehty arvio (taulukko 13) infran materiaaleihin ja kuljetukseen liittyvistä päästöistä antoi hieman suuremman arvion kuin HAVA (kuva 10). EIO-LCA:n antama arvio olisi 50 vuoden elinkaarelle jaettuna 8,78 tonnia, kun taas HAVA:n arvio ylläpito sisällytettynä oli noin 7 tonnia. HAVA:n laskelmissa ylläpidon osuus oli arvioitu olevan noin 1 prosentin luokkaa kokonaispäästöistä, joten kokonaisuuden kannalta niillä ei ole suurta merkitystä, eikä niitä huomioitu lainkaan EIO-LCA-laskennassa. HAVA:n katujen rakentamisen ominaispäästökertoimet ovat samat kuin KEKO-työkalussa, ja KEKO-työkalun laskennan kuvausta (Ympäristöhallinto, 2016) tutkimalla selviää, että nämä päästökertoimet perustuvat

yksittäiseen tapaustutkimukseen (Rakennusvirasto, 2009), jossa on huomioitu lähinnä kadun rakennekerrokset eikä varusteita, kuten viemäreitä ja valaistuslaitteita. Tämä selittää osin eroavaisuudet näiden menetelmien tuloksissa. KEKO:n antama tulos infrastruktuurin rakentamiselle on huomattavasti pienempi kuin EIO-LCA:n ja HAVA:n tulokset. KEKO-työkalulle voi syöttää vain tiedon olemassa olevien ja uusien katujen pituudesta ja leveydestä, eikä tämä välttämättä ollut riittävän tarkka tapa laskea rakentamisen päästöjä näin yksityiskohtaisella kaava-alueella, jossa on suuri rooli muun muassa erilaisilla pysäköintipaikoilla, pyörätiellä ja jalkakäytävillä. KEKO käyttää kuitenkin samoja katujen rakentamisen ominaispäästökertoimia kuin HAVA, joten ainakin uusien ja yksinkertaisten katujen rakentamisen päästöjen pitäisi olla molemmilla työkaluilla samat. KEKO-työkalu on tässäkin tapauksessa parhaimmillaan yleiskaavatasolla.

Ennen käyttöä	Käytön aikana	Käytön jälkeen
A1–3 Tuotteiden valmistus	B1 Tuotteiden käyttö	C1 Purkutyöt
A4 Kuljetukset työmaalle	B2 Ylläpito	C2 Kuljetukset käsittelyyn
A5 Rakentaminen	B3–4 Korjaukset ja vaihdot	C3 Jätteenkäsittely
	B5 Laajamittaiset korjaukset	C4 Loppusijoitus
	B6 Energian käyttö	
	B7 Veden käyttö	

Kuva 19: HAVA:n huomioimat elinkaaren vaiheet rakennusten ja tonttien osalta.

EIO-LCA-menetelmällä lasketut päästöt katuneliometriä kohden (taulukko 13) ovat kuitenkin huomattavasti suuremmat kuin HAVA:n katujen rakentamisen ominaispäästökertoimet (autokadut  $58 \text{ kg CO}_2e/m^2$  ja kävelykadut  $55 \text{ kg CO}_2e/m^2$ ). Kun HAVA:n kertoimia ja EIO-LCA:lla laskettuja päästöjä verrataan tämän työn teoriaosuudessa selvitettyihin ominaispäästökertoimiin (taulukko 5), huomataan HAVA:n kertoimien olevan melko pieniä ja toisaalta EIO-LCA:lla laskettujen päästöjen asetuvan näiden ominaispäästökertoimien haarukkaan erittäin hyvin. Kuten HAVA:n katujen rakentamisen ominaispäästökertoimissa, myös taulukossa 5 esitetyissä laskelmissa on huomioitu Hämeentietä lukuun ottamatta vain kadun rakenteita eikä

varusteita, joten HAVA:n katujen rakentamisen ominaispäästökertoimet vaikuttavat olevan yleisesti hieman alakanttiin. Tapaustutkimus (Rakennusvirasto, 2009), jolle HAVA:n ominaispäästökertoimet perustuvat, jättää muun muassa pohjanvahvistuksen huomiotta, ja taulukon 5 ominaispäästökertoimissa haarukan yläpäässä oli tapauksia, joissa erityisesti pilaristabilointi aiheutti suuria päästöjä. Tässä casekohteessa ei ollut tarvetta pilaristabiloinnille, mutta pilaristabiloinnin tapauksessa HAVA:n ominaispäästökertoimet olisivat huomattavasti alakanttiin. KEKO käyttää samoja ominaispäästökertoimia kuin HAVA, mutta toisin kuin HAVA:ssa, KEKO:ssa on kuitenkin mahdollista ottaa katujen perustamisolosuhteet huomioon. KEKO:n tapauksessa siis näitä ominaispäästökertoimia voi tarkentaa ottamaan stabilointi huomioon.

Toisaalta myöskään tässä laskelmassa käytetty EIO-LCA-malli ei ole täydellinen. Malliin sisältyy useita yksinkertaistuksia, kuten kaikkiin muihinkin elinkaarimalleihin, mutta se on todettu kelvolliseksi malliksi rakennusprojektien päästöjen arviointiin. Ehkä tämän laskennan kannalta mallin suurin heikkous on sen kyvyttömyys huomioida erikoistapauksia, koska se perustuu kansantaloudenlaajuiseen keskiarvodataan. Mikäli käytössä on huomattavasti tällaista keskiarvoa ympäristöystävällisempiä prosesseja, malli arvioi niiden päästöt yläkanttiin. On siis mahdollista, että tässä laskelmassa saatu päästöarvio on hieman liian suuri, mutta tätä on näillä lähtötiedoilla hankala tarkistaa. Lisäksi tulee huomioida, että EIO-LCA-laskelma tehtiin kustannusarvion pohjalta, ja toteutuneet kulut voivat olla hieman erilaiset.

KURKE-työkalun antamissa BAU-skenaarion liikenteen päästöissä on suuri ero verrattuna HAVA:n antamiin lukemiin. KURKE antoi arvioksi 201 kg  $CO_2e$ /henkilö,a. HAVA puolestaan antoi 109 024 kg  $CO_2e$ /a, joka on noin 427 kg  $CO_2e$ /henkilö,a. Näitä lukemia verratessa tulee huomioida, mitä nämä työkalut oikeastaan sisällyttävät laskelmiinsa. Toisin kuin KURKE:ssa, HAVA:ssa laskennassa on mukana suuri määrä kaava-alueen ulkopuolelta kaava-alueella sijaitsevaan kauppaan suuntautuvia matkoja. HAVA siis laskee laajemmin kaavan aiheuttamia matkoja, kun taas KURKE:n tuloksessa on huomioitu vain kaava-alueen asukkaiden ja työntekijöiden matkat. Jos HAVA:n laskelmista poistetaan nämä noin 330 tuhatta vuotuista kauppatiekkaa, jää liikenteen päästöiksi noin 84 kg  $CO_2e$ /henkilö,a. KEKO:n antama liikenteen päästöjen tulos on samaa luokkaa HAVA:n antaman tuloksen kanssa. KEKO kuitenkin laskee päästöt KURKE:n tavoin, ja syynä KEKO:n paljon KURKE:ä suurempaan päästölukemaan piilee sen ominaispäästökertoimissa. KEKO käyttää huomattavasti suurempia liikenteen ominaispäästökertoimia kuin HAVA. HAVA:n kertoimia käytettiin tässä diplomityössä myös KURKE:ssa. Varsinaisesti mikään tuloksista ei ole väärä, mutta työkalujen käyttäjän tulee ymmärtää, mitä laskelmiin sisältyy ja mitä lasketaan.

KURKE ja KEKO eivät siis ehkä sellaisenaan ole parhaita vaihtoehtoja alueille, joihin suuntautuu runsaasti liikennettä kaava-alueen ulkopuolelta. Tällöin saattaa jäädä laskematta merkittäviä asiakasliikenteen aiheuttamia päästöjä, kuten tämän casekohteen tuloksista havaittiin.

## 10.2 Skenaario 2

Tätä skenaariota ei saatu mallinnettua HAVA:lla eikä KEKO:lla. KURKE:lla puolestaan saatiin tulokseksi 26 kilogramman ( $CO_2e$ ) vuotuinen säästö henkilöä kohden verrattuna BAU-skenaarioon, eli kokonaisuudessaan noin 6,5 tonnia vuodessa, mikä vastaa noin 4 prosentin laskua. KURKE:lla oli mahdollista kuvata 2. skenaariota, koska se tarjosi mahdollisuuden arvioida erilaisia liikenteellisiä ratkaisuja portaittain eli määrittää, miten hyvin kukin liikenteellinen ratkaisu on tehty. HAVA:lla sen sijaan oli mahdollista huomioida näitä vaikutuksia vain portaattomasti kyllä/ei-vastauksilla.

Kaikissa käytetyissä työkaluissa liikenteen päästöt on laskettu pakoputkipäästöinä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että polttoaineen tuotannon päästöjä ja muita tuotantoketjun päästöjä ei huomioida. Tällöin esimerkiksi sähköauton latauspaikkojen lisäämisen todellinen vaikutus liikenteen päästöihin ei välttämättä ole niin suuri kuin HAVA-työkalu olettaa.

## 10.3 Skenaario 3

HAVA ja yhdistelmämenetelmä antoivat hieman erilaisia tuloksia. HAVA:lla lasketut kokonaispäästöt nousivat noin 13 % suhteessa BAU-skenaarioon, mutta henkilöä kohden lasketut vuotuiset päästöt laskivat 930 kilogrammasta 859 kilogrammaan ( $CO_2e$ ), mikä vastaa noin 7,5 % laskua.

Yhdistelmämenetelmällä puolestaan päädyttiin noin 2 prosentin vuotuisen päästövähennykseen suhteessa BAU-skenaarioon: Päästöt laskivat henkilöä kohden 699 kilogrammasta 685 kilogrammaan ( $CO_2e$ ). Myös yhdistelmämenetelmässä kokonaispäästöt nousivat. Ne nousivat noin 21 %.

KEKO:lla päädyttiin kokonaispäästöjen noin 11 % nousuun: ne kasvoivat 261 730 kilogrammasta 289 840 kilogrammaan ( $CO_2e$ ). Päästöt laskivat henkeä kohden 1 150 kilogrammasta 1 017 kilogrammaan ( $CO_2e$ ), mikä vastaa noin 12 % laskua.

Erityisesti HAVA:n ja KEKO:n tulosten suhteelliset muutokset BAU- ja 3. skenaarion välillä olivat samansuuntaiset. Sen sijaan yhdistelmämenetelmän tulos jäi hieman pienemmäksi.

## 11 Johtopäätökset ja kehitysehdotukset

Laskelmissa huomattiin, että kaikki työkalut antoivat samansuuntaisia tuloksia. Kuitenkin kaikilla työkaluilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, mikä vaikutti tässä laskelmassa erityisesti siihen, miten työkaluja oli mahdollista käyttää skenaarioanalyysissä. Yhdistelmämenetelmässä käytetty KURKE-työkalu oli erityisen vahva liikenneskenaariossa, koska se mahdollisti portaittaisen arvioinnin erilaisille liikenteellisille ratkaisuille. Tällöin on mahdollista vertailla keskenään erilaisia skenaarioita, joiden liikenteelliset erot eivät välttämättä ole kovin suuria. Sen sijaan HAVA ja KEKO eivät sovellu tällaiseen vertailuun yhtä hyvin, mikä on KEKO-työkalun tapauksessa luonnollista, koska se on suunniteltu erityisesti yleiskaavatason käyttöön. HAVA-työkalulle voisi harkita myös tällaista portaittaista arviointiasteikkoa henkilöauton käyttöä vähentäville suunnitteluratkaisuille nykyisen portaattoman kyllä/ei-tyylisten arvioinnin sijasta.

HAVA-työkalun ja KURKE-työkalun liikenteen päästöjen laskennoissa on eroja siinä, millaista liikennettä laskelmiin huomioidaan. HAVA-työkalu laskee myös liiketilojen aiheuttaman asiakasliikenteen päästöt, joita KURKE ja KEKO eivät huomioi. Joissain tapauksissa voi olla tarpeen valita, lasketaanko päästöihin mukaan vain alueen asukkaiden päästöt vai huomioidaanko myös muualta alueelle suuntautuvia matkoja. HAVA:n tapauksessa voisi miettiä mahdollisuutta laskea vain alueen asukkaiden päästöt ja jättää asiakasliikenteen päästöt pois. Toisaalta KURKE:a ja KEKO:a voisi kehittää niin, että myös asiakasliikenne huomioitaisiin. Lisäksi liikenteen päästöt on laskettu kaikissa työkaluissa pakoputkipäästöinä, ja tähän voisi kehittää myös elinkaarinäkökulmaa, mikä voisi mahdollistaa tarkemman päästöprofiilin arvioimisen, mikä on erityisen tärkeää liikenteen sähköistyessä.

Myös työkalujen ominaispäästökertoimissa huomattiin tarvetta jatkokehitykselle. HAVA:n käyttämät katujen rakentamisen ominaispäästökertoimet ovat mahdollisesti hieman alakanttiin, erityisesti tapauksissa, joissa kadut vaativat stabilointia. HAVA-työkaluun voisi KEKO-työkalua mukaillen sisällyttää mahdollisuuden ottaa katujen vaatima stabilointi huomioon, koska kuten tässä työssä huomattiin, sillä on suuri vaikutus päästöihin. Erityisen suuri merkitys on pilaristabiloinnilla, joka saattaa moninkertaistaa katujen rakentamisen päästöt (taulukko 5), jolloin HAVA:n käyttämät ominaispäästökertoimet ovat luultavasti huomattavasti alakanttiin.

Laskelmista on lisäksi huomattavissa, että sekä tiiviimmällä rakentamisella että liikenteellisillä ratkaisulla on vaikutuksia kokonaispäästöihin (liite 1). HAVA ja KURKE ennustivat 3. skenaarion 25 % tiiviimmän rakentamisen jonkin verran tehokkaammaksi päästöjen vähentäjäksi kuin 2. skenaarion liikenteelliset muutokset. Sen sijaan yhdistelmämenetelmä ennusti liikenteellisten ratkaisujen laskevan päästöjä hieman enemmän kuin tiiviimmän rakentamisen. Itse päästölukemat ovat vain arvioita ja tarjoavat käsityksen päästöjen suuruusluokasta ja jakautumisesta eri päästölähteille. Joka tapauksessa nämä työkalut soveltuvat varsin hyvin tässä työssä käytettyyn ske-

naarioanalyysiin ja tarjoavat mahdollisuuden vertailla eri skenaarioiden suhteellisia päästöjä.

## Lähteet

- Bionova. 2021. Carbon Footprint Limits for Common Building Types. [verkkoaineisto]. saatavilla: [https://mrluudistus.fi/wp-content/uploads/2021/01/Bionova\\_MinEnv\\_Finland\\_embodied\\_carbon\\_limit\\_values\\_report\\_FINAL\\_19JAN2021\\_ed.pdf](https://mrluudistus.fi/wp-content/uploads/2021/01/Bionova_MinEnv_Finland_embodied_carbon_limit_values_report_FINAL_19JAN2021_ed.pdf)
- Bjørn et al. 2018. Main Characteristics of LCA. Kirjassa: Hauschild et al. ed(s). Life Cycle Assessment - Theory and Practise. Springer International Publishing AG, s. 9-17. ISBN 978-3-319-56475-3
- Brander, M., Davis, G. 2012. Greenhouse Gases, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>e, and Carbon: What Do All These Terms Mean? [verkkoaineisto]. [viitattu 14.7.2021]. Saatavissa: <https://ecometrica.com/assets/GHGs-CO2-CO2e-and-Carbon-What-Do-These-Mean-v2.1.pdf>
- Carnegie Mellon -yliopisto. 2021a. Economic Input-Output Life Cycle Assessment. [verkkoaineisto]. [viitattu 5.7.2021]. Saatavissa: <http://www.eiolca.net/>
- Carnegie Mellon -yliopisto. 2021b. Available EIO-LCA models. [verkkoaineisto]. [viitattu 29.7.2021]. Saatavissa: <http://www.eiolca.net/Models/index.html>
- Finnveden, G., Hauschild, M., Ekvall, T., Guinee, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S. 2009. Recent developments in Life Cycle Assessments. Journal of Environmental Management. Vol 91:1. 1-21
- Green Building Council Finland. 2021. Alueellisen hiilijalanjäljen laskentamenetelmät ja työkalut.
- Heinonen, J., Junnila, S. 2011a. A Carbon Consumption Comparison of Rural and Urban Lifestyles. Sustainability. 3. 1234-1249. ISSN 2071-1050.
- Heinonen, J. & Junnila A. 2011b. Implications of urban structure on carbon consumption in metropolitan areas. Environmental Research Letters. 6 014018
- Helsingin kaupunki. 2014a. Kuntien hiilitasekartoitus osa 2. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 10/2014. ISBN 978-952-272-720-6
- Helsingin kaupunki. 2014b. Pihlajamäen ostoskeskuksen kaavamuutoksen selostus. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.1.2022]. Saatavilla: <https://dev.hel.fi/paatokset/asia/hel-2011-005332/kslk-2014-30/>
- Helsingin kaupunki. 2016. Henkilöliikennetutkimus. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.1.2022]. Saatavilla: <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/liikenn>

[e-ja-kartat/kadut/liikennetilastot/julkaisut/20200330\\_Helsingin\\_kaupunki.pdf](#)

Helsingin kaupunki. 2020a. Vartiokylänlahden rakentamisalueiden elinkaaren aikaisien ilmastopäästöjen arviointi. Kohti hiilineutraalia kaupunkia - Millä on merkitystä? [verkkoaineisto]. [viitattu 13.10.2021]. Saatavilla: <https://dev.hel.fi/paatokset/asia/hel-2018-012524/kylk-2020-29/>

Helsingin kaupunki. 2020b. Hämeentien CO<sub>2</sub>-päästölaskenta ja ilmastoviisaat tarkastelut. Kaupunkiympäristön aineistoja 2020:30. ISBN 78-952-331-874-8.

Helsingin kaupunki. 2021a. Kasvun paikka. Helsingin kaupunkistrategia 2021–2025. [verkkoaineisto]. [Viitattu 15.12.2021]. Saatavilla: <https://www.hel.fi/fi/paatoksenteko-ja-hallinto/strategia-ja-talous/strategia>

Helsingin kaupunki. 2021b. Ilmastovahti: Kaukolämmöntuotannon päästökerroin. [verkkosivu] saatavilla: <https://ilmastovahti.hel.fi/indicators/9>

Helsingin karttapalvelu. 2021. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.1.2022]. Saatavilla: <https://kartta.hel.fi>

Helsingin seudun opaskartta. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.1.2022]. Saatavilla: <https://kartta.helsinginseutu.fi/?zoom=0&lat=6674979&lon=25499530&layers=BTFFFFFTT>

Hendrickson, C.T., Lave, L.B., Matthews, H.S. 2006. Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach. Resource for the Future Press. ISBN 1-933115-24-6

Hendrickson, C., Joshi, S., Lave, L. 1998. Economic Input-Output Models for Environmental Life-Cycle Assessment. Environmental Science and Technology. Vol 32:7. S. 184-191.

Hou, P., Cai, J., Qu, S., Xu, M. 2018. Estimating Missing Unit Process Data in Life Cycle Assessment Using a Similarity-Based Approach. Environmental Science & Technology. 52:9, 5259–5267

International Standard 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework; International Organization for Standardization (ISO); Geneve, Sveitsi, 1997.

Junnila, S. I. 2006. Empirical Comparison of Process and Economical Input-Output Life Cycle Assessment in Service Industries. Environmental Science and Technology. Vol 40:22. 7070-7076.

Koskela, S., Sokka, L., Korhonen, M., Mattila, T., Soimakallio, S. 2010. Elinkaariarviointi ja sen käyttö. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 7. Springer Suomen ympäristökeskus, s. 16-50. ISBN 978-952-11-3734-1

Lahti, P., Moilanen P. 2010. Kaupunkiseutujen yhdyskuntarakenne ja kasvihuonekaasupäästöt. Kehitysvertailuja 2005-2050. 87 s. Suomen Ympäristö 12/2010. ISBN 978-952-11-3767-9.

Lahti, P., Sepponen, M., Virtanen, M. 2012. Kunnallisten rakennushankkeiden kestävät energiaratkaisut aluenäkökulmasta. 59 s.

Leontief, W. 1986. Input-Output Economics: Edition 2. Oxford University Press. 448 s. ISBN 9780195365221.

Liikenne- ja viestintäministeriö. 2020. Liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen perusennuste 2020-2050. [verkkojulkaisu]. saatavilla: [https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/d99a3ae3-b7f9-49df-afd2-c8f2efd3dc1d/1ab511f1-aa06-45c0-b3ef-9ac9650838c9/MUISTIO\\_20200422120412.pdf](https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/d99a3ae3-b7f9-49df-afd2-c8f2efd3dc1d/1ab511f1-aa06-45c0-b3ef-9ac9650838c9/MUISTIO_20200422120412.pdf)

Liikennevirasto. 2011. Henkilökiikennetutkimus 2010–2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 8/2012. ISBN 978-952-255-116-0.

Mattioli, G., Morton, C., & Scheiner, J. (2021). Air Travel and Urbanity: The Role of Migration, Social Networks, Airport Accessibility, and ‘Rebound’. *Urban Planning*, 6(2), 232-245.

Museovirasto. 2021. Valtakunnallisesti merkittävät rakennetut ympäristöt. Pihlajamäen lähiö. [verkkoinfo]. [viitattu 13.10.2021]. Saatavilla: [https://www.rky.fi/read/asp/r\\_kohde\\_det.aspx?KOHDE\\_ID=1568](https://www.rky.fi/read/asp/r_kohde_det.aspx?KOHDE_ID=1568)

Neves, A. R., Leal, V. (2010) Energy sustainability indicators for local energy planning: Review of current practices and derivation of a new framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2723–2735. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.067

One Click LCA Ltd. 2021. One Click LCA rakennus- ja infrastruktuurihankkeisiin. [verkkoinfo]. Saatavilla: <https://www.oneclicklca.com/fi/rakennushankkeisiin/>

Pomponi F, Lenzen M, Hybrid life cycle assessment (LCA) will likely yield more accurate results than process-based LCA, *Journal of Cleaner Production* (2017), doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.119.

Porvoon kaupunki. 2010. Skaftkärr - Energiategohkuus kaavoituksessa. Kaavarunkovaiheen loppuraportti. ISBN 978-951-563-742-0

Ramboll. 2018. CO<sub>2</sub>-päästölaskennan kehittäminen Skanssin alueella ja Turun kaupungin infrarakentamisessa. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.1.2022]. Saatavilla: [https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files/skanssin\\_alueen\\_co2-laskenta\\_loppuraportti.pdf](https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files/skanssin_alueen_co2-laskenta_loppuraportti.pdf)

Suomen Ympäristökeskus. 2012. Kuntien hiilijalanjäljen laskentaan uusi työkalu. Tiedote. [verkkoaineisto]. [viitattu 25.11.2021]. Saatavilla: [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Kuntien\\_hiilijalanjaljen\\_laskentaan\\_uusi\(2065\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Kuntien_hiilijalanjaljen_laskentaan_uusi(2065))

Säynäjoki, A., Heinonen, J., Junnila, S. 2011a. Carbon Footprint Assessment of a Residential Development Project. International Journal of Environmental Science and Development. Vol 2:2. S. 11-12. ISSN-numero.

Säynäjoki, A., Heinonen, J., Junnila, S. 2011b. Asuinalueen rakentamisessa syntyvien hiilipäästöjen hybridi-LCA-mallinnus. 51 s. Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 11/2011. ISBN 978-952-60-4022-6.

Säynäjoki, A., Heinonen, J., Junnila, S. 2012. A scenario analysis of the life cycle greenhouse gas emissions of a new residential area. Environmental Research Letters. 7 034037

Säynäjoki, E., Heinonen, J., Säynäjoki, A., Ala-Mantila, S., Pääkkönen, L. 2014. Työkaluja vähähiiliseen aluerakentamiseen, Maltti - matalahiilisen aluekehityksen tukityökalu. 29 s. Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 11/2011. ISBN 978-952-60-5729-3.

TEM (Työ- ja elinkeinoministeriö). 2020. Yhteenveto toimialojen vähähiilitiekartoista. [verkkojulkaisu]. Saatavilla: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162494/TEM\\_2020\\_52.pdf?sequence=1](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162494/TEM_2020_52.pdf?sequence=1)

Tilastokeskus. 2019. Maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous –sektorin nielu 20 miljoonaa hiilidioksiditonnia. [verkkoaineisto]. [viitattu 9.9.2021]. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/khki/2017/01/khki\\_2017\\_01\\_2019-01-15\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/khki/2017/01/khki_2017_01_2019-01-15_tie_001_fi.html)

Tilastokeskus. 2020. Tietilasto. Vuonna 2019 henkilöautoilla ajettiin saman verran kuin vuotta aiemmin – raskaan liikenteen kilometrit vähenivät. [verkkoaineisto]. [viitattu 9.8.2021]. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/tiet/2019/tiet\\_2019\\_2020-04-15\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/tiet/2019/tiet_2019_2020-04-15_tie_001_fi.html)

Tilastokeskus. 2021. Kasvihuonakaasuinventaario. [verkkoaineisto]. [viitattu 5.7.2021]. Saatavissa: <https://www.stat.fi/tup/khkinv/index.html>.

United States Environmental Protection Agency. 2021. Overview of Greenhouse

Gases. [verkkoaineisto]. [viitattu 16.7.2021]. Saatavissa: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#f-gases>

Väylävirasto. 2011. Tien- ja radanpidon hiilijalanjälki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 38:2011. ISBN 978-952-255-700-1.

Wahlgren, I. 2017. Yhdyskuntarakenteen ekologisuus ja sen arviointi - EcoBalance-arviointimalli yhdyskuntarakenteen vaikutusten arvioinnissa. Väitöskirja. Aalto-yliopisto. ISBN 978-952-60-7712-3.

YK. Global Status Report 2017. [verkkoaineisto]. [viitattu 5.7.2021]. Saatavissa: [https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188\\_GABC\\_en%20%28web%29.pdf](https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188_GABC_en%20%28web%29.pdf)

Ympäristöhallinto. 2016. Tietoa KEKO-laskennasta. [verkkoaineisto]. [viitattu 26.11.2021]. Saatavilla: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/KEKO\\_\\_Kaavoituksen\\_ekolaskuri/Tietoa\\_KEKO\\_laskennasta](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/KEKO__Kaavoituksen_ekolaskuri/Tietoa_KEKO_laskennasta)

Ympäristöministeriö. 2008. Liikennetarpeen arviointi maankäytön suunnittelussa [verkkoaineisto]. [viitattu 15.12.2021]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/1986/Liikennetarpeen\\_arviointi\\_maankayton\\_suunnittelussa.pdf](https://www.motiva.fi/files/1986/Liikennetarpeen_arviointi_maankayton_suunnittelussa.pdf)

Ympäristöministeriö. 2021a. Kansainväliset ilmastoneuvottelut [verkkoaineisto]. [viitattu 5.7.2021]. Saatavissa: <https://ym.fi/kansainvaliset-ilmastoneuvottelut>

Ympäristöministeriö. 2021b. Uusi ilmastolaki lausuntokierrokselle. [verkkoaineisto]. [viitattu 5.7.2021]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/uusi-ilmastolaki-lausuntokierrokselle>

Ympäristöministeriö. 2021c. Kestävä aluesuunnittelu maankäyttö- ja rakennuslain uudistuksessa. Esitelmä seminaarissa Kestävä aluesuunnitteluseminaari 2021 - Rakennetun ympäristön resilienssi. 23.9.2021.

