

Roosa Leino

KERROSTALON HIILIJALANJÄLKI: PÄÄSTÖJEN MÄÄRÄ JA LASKENTA

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Roosa Leino: Kerrostalon hiilijalanjälki: Päästöjen määrä ja laskenta
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Vastuuohjaaja ja tarkastaja: Tutkijatohtori Arto Köliö
Tarkastaja: Professori Kalle Kähkönen
Huhtikuu 2020

Tietoisuus ilmastonmuutoksesta ja sen vaikutuksista on kasvanut niin globaalisti kuin kansallisestikin. Rakennusalan vaikutus päästöjen määrään on suuri, ja sen on todettu olevan yksi kustannustehokkaimmista aloista, joilla päästöjä voitaisiin vähentää. Rakennusten energiankulutuksen päästöjen vähentämiseen on kiinnitetty jo huomiota, ja käytönaikaisille päästöille on asetettu vähentämistavoitteita. Energiankulutuksen päästöjen pienentyessä materiaalien hiilijalanjäljen merkitys kasvaa, joten materiaalipäästöjen merkittävimmät lähteet on tunnistettava ja löydettävä vaihtoehtoisia ratkaisuja, joilla hiilijalanjälkeä voitaisiin pienentää.

Tutkimuksen taustoittamiseksi rakentamisen päästöjen vähentämiseen liittyviä säädöksiä ja ohjeita käsiteltiin tarkemmin. Kirjallisuustutkimuksen avulla haluttiin selvittää, millaisia tuloksia aiemmissa tutkimuksissa on saatu materiaalien hiilijalanjäljen merkittävydestä ja hiilijalanjäljen suuruuteen vaikuttavista tekijöistä. Lisäksi teoriaosuudessa käsiteltiin hiilijalanjäljen laskentaa yleisesti ja laskennan rajauksia sekä suorittamista koskevia ohjeita ja säädöksiä.

Materiaalien hiilijalanjäljen keskeisimpien aiheuttajien selvittämiseksi valittiin neljä rakenneratkaisuiltaan poikkeavaa kerrostaloa. Kaikille kohderakennuksille laadittiin One Click LCA -laskentaohjelmalla karkea laskelma, tietomallin pohjalta tehty laskelma ja tarkka laskelma. Näin pystyttiin tutkimaan sekä laskentaohjelman ominaisuuksia että materiaalien hiilijalanjälkeä. Ohjelman avulla pystyttiin tunnistamaan päästöjen kannalta keskeisiä materiaaleja ja rakennusosia sekä tutkimaan vaihtoehtoisia ratkaisuja ja niiden vaikutusta päästöihin. Lopuksi kohderakennusten hiilijalanjälkeä verrattiin hankkeiden kustannuksiin ja aiemmissa tutkimuksissa esitettyihin tuloksiin.

Kerrostalon hiilijalanjäljen suuruudeksi saatiin keskimäärin 1,1-1,9 t CO₂e neliometriä kohti. Tästä summasta lähes 30% liittyy pelkästään materiaalien valmistukseen. Keskeisimpiä tekijöitä materiaalipäästöjen määrässä olivat betonin ja teräksen sekä julkisivumuurausten määrä ja pääasiallinen runkomateriaali. Paikallavaletun välipohjan ja ontelolaattavälipohjan välillä ei todettu olevan selkeää eroa päästöjen määrän suuruudessa, mutta välipohjan osuus materiaalien hiilijalanjäljestä on suuri. Puurunkoisen kerrostalon päästöt olivat selkeästi pienemmät kuin betonirunkoisen kerrostalon. Betonin päästöjen pienentäminen pääasiassa nosti kustannuksia, ja tiilimuurauksen korvaamisen vaikutukset sekä päästöihin että kustannuksiin pitää arvioida kohdekohtaisesti. Teräksen päästöjen vähentäminen on mahdollista ilman vaikutusta kustannuksiin ja kerrostalon rakentaminen puurungolla pienentää sekä talon hiilijalanjälkeä että hankkeen kokonaiskustannuksia.

Avainsanat: Kerrostalon hiilijalanjälki, rakennusmateriaalien hiilijalanjälki, rakentamisen kestävä kehitys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Roosa Leino: Carbon Footprint of an Apartment House: Amount and Calculation of Carbon Emissions

Master of Science Thesis

Tampere University

Degree Program in Civil Engineering

Responsible Supervisor and Examiner: Post-Doctoral Researcher Arto Köliö

Examiner: Professor Kalle Kähkönen

April 2020

Awareness concerning climate change and the effects of it has grown globally and nationally. The impact of the building and construction sector is vital and it has stated to be one of the most cost effective sectors to decarbonize. Attention has already been paid to the emissions of energy consumption of buildings and targets to reduce the emissions of energy consumption have even been set. When the carbon emissions of energy consumption are decreasing, the impact of the emissions created by materials becomes more important. Therefore, the main sources of embodied carbon must be recognized and alternative solutions to cut down the carbon footprint needs to be discovered.

To provide a background for this research, guidelines concerning the mitigation of emissions were studied. Outcomes of recent studies and researches about the significance of the carbon footprint of building materials and crucial factors in the amounts of embodied carbon were covered with literary research. The theoretical part of this study also includes the background information about the life cycle assessment method and the guidelines of it.

Four apartment houses with different structural solutions were chosen to get to the bottom of the key factors affecting the carbon emissions of building materials. Life cycle assessment with One Click LCA software was made to all target houses. Life cycle assessment was made for each house with three different methods: rough estimation, assessment based on the building information model and an accurate estimation, so that it was possible to study both the software and the amount of emissions. With the chosen software it was possible to identify emission centered materials and structures and compare alternative solutions and their impacts on the carbon footprint. Finally, a comparison between the total emissions of the chosen houses and the previous studies was made and connections between the emission levels and total costs were studied.

The carbon footprint of an apartment house was determined to be 1,1-1,9 tons of CO₂e per square meter on average. Nearly 30% of these emissions are linked to the manufacture of the building materials. Key factors in the volume of the emissions are the amounts of concrete, steel and façade bricklaying in the building and the type of the main building frame material. Clear difference in the emissions of a cast-in-place floor and a hollow-core slab floor was not recognized, but slabs were defined to be relevant to the total amount of the carbon footprint of materials. Emissions of a wooden framed house are clearly smaller than the ones of a concrete framed house. Decreasing the emissions of concrete principally increases the costs and the effects on both emissions and costs of substituting bricklaying with other façade material must be evaluated in each project. Decreasing the emissions of steel is possible without affecting the costs and constructing the building with wooden frame decreases both the carbon footprint and the total costs of the project.

Keywords: carbon footprint of an apartment house, carbon footprint of building materials, sustainability of construction

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on viimeinen merkittävä osa tutkintoani, jonka suorittamisen aloitin vuonna 2015. Opiskeluvuosieni aikana olen oppinut paljon uutta ja tutustunut mahtaviin ihmisiin, jotka ovat tuoneet vastapainoa intensiivisille harjoitustyörupeamille ja RM:ssä vietetyille pitkille tunneille.

Haluan kiittää yliopiston ohjaajaani Arto Köliötä hyvistä neuvoista ja asiantuntevista kommentteista työhön liittyen. Haluan kiittää myös YIT Oyj:tä mielenkiintoisen tutkimuksen mahdollistamisesta ja erityisesti haluan kiittää ohjaajiani Tia Jysmää ja Elina Virolaista tuesta ja kannustuksesta työn tekemiseen liittyen.

Haluan kiittää myös perhettäni ja kaikkia ystäviäni projektissa myötäelämisestä ja kirjoittamisen täyteen elämän tasapainottamisesta. Erityisesti haluan kiittää poikaystävääni, joka on kuunnellut aiheellisia ja aiheettomia murheitani sekä tehnyt ruokaa silloin, kun en ole pystynyt irtautumaan tietokoneen ruudusta. Vaikka tunteeni opiskelujen päättymisestä ovat aika ajoin ristiriitaiset, en voi muuta kuin iloita siitä, miten mahtava vaihe tämä on elämässäni ollut. Kiitos kaikille ystäväilleni kiltahuoneella, kellarissa ja kotona, olette mahtavia.

Tampereella, 24.4.2019

Roosa Leino

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	1
1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne.....	2
2. RAKENNUSALAN KESTÄVÄN KEHITYKSEN EDISTÄMINEN	4
2.1 Rakentamisen ilmastovaikutusten sääntely	4
2.2 Kohdeyrityksen strategiset tavoitteet.....	6
3. RAKENNUSHANKKEEN HIILIJALANJÄLKI	8
3.1 Hiilidioksidipäästöjen syntyminen ja jakautuminen.....	8
3.2 Rakentamisen päästöistä toteutetut tutkimukset.....	9
3.3 Materiaaleihin sitoutuneet päästöt.....	13
4. HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA	17
4.1 Arviointimenetelmät ja laskennan merkitys.....	17
4.2 Rakennuksen elinkaaren vaiheet laskennassa	18
5. LASKENNAN KOHTEET JA SUORITTAMINEN.....	23
5.1 Laskennan kohteet	23
5.2 One Click LCA: työkalun esittely	25
5.3 Laskennan suorittaminen.....	28
6. LASKENNAN TULOKSET	33
6.1 Alustava laskenta	33
6.2 Tietomallien pohjalta toteutettu laskenta	35
6.3 Tarkka laskenta	36
6.4 Tulosten luotettavuuden arviointi.....	39
7. TULOSTEN ANALYSOINTI	42
7.1 Merkittävimmät päästölähteet ja niiden vertailu	42
7.2 Hiilijalanjäljen ja kustannusten välinen korrelaatio	47
7.3 Materiaalipäästöjen optimointi.....	51
7.4 Laskentaohjelman kehitysehdotukset ja toiminta.....	54
8. JOHTOPÄÄTÖKSET	57
8.1 Johtopäätökset.....	57
8.2 Jatkotutkimusehdotukset	59
9. YHTEENVETO	61
LÄHTEET.....	63
LIITE A: YMPÄRISTÖMINISTERIÖN LASKENTAOHJEET	65
LIITE B: RAKENNUSOSIEN PÄÄSTÖJAKAUMA KOHDERAKENNUKSISSA	72
LIITE C: KOHDERAKENNUSTEN ELINKAAREN HIILIJALANJÄLJEN TARKEMPI JAKAUTUMINEN	76

KUVALUETTELO

Kuva 1:	<i>Kohdeyrityksen asettamat tavoitteet vuosille 2020-2022 (YIT, a. 2019).....</i>	7
Kuva 2:	<i>CO₂ -päästöjen jakaantuminen rakennushankkeessa (Perustuu lähteeseen Ruuska & Häkkinen. 2014, s.324).....</i>	9
Kuva 3:	<i>Päästöjen ja kustannusten suhde Espoon asuinaluehankkeessa. (Perustuu lähteeseen Säynäjoki et al. 2011, s.119).....</i>	10
Kuva 4:	<i>Tyypillisen kerrostalorakennuksen päästöjen määrät jaettuna eri kategorioihin ja laskettuna erilaisilla materiaaleilla. (Perustuu lähteeseen Ruuska & Häkkinen. 2014, s.322).....</i>	14
Kuva 5:	<i>Laskentamenetelmien käyttö rakennushankkeen eri vaiheissa ja laskennan vaatimat lähtötiedot. Kaikissa laskennoissa tarvitaan lisäksi tiedot energiankulutuksesta, arviointijakson pituudesta ja lämmitetystä nettoalasta.....</i>	26
Kuva 6:	<i>One Click LCA -laskentaohjelman tulosten määrittäminen käyttäjän syöttämien tietojen ja taulukkoarvojen perusteella.....</i>	27
Kuva 7:	<i>Kuvakaappaus OneClick LCA:n alustavan laskennan osuuksien täydennysnäköymästä.</i>	29
Kuva 8:	<i>Merkittävimmät materiaalit kohteittain.</i>	38
Kuva 9:	<i>Rakennusmateriaalien hiilijalanjälki eri laskentamenetelmillä laskettuna.</i>	39
Kuva 10:	<i>Kerrostalon hiilijalanjäljen jakaantuminen vaakarakenteiden eri osille kohteissa 1 AB (ylempänä) ja 2 (alempänä).</i>	43
Kuva 11:	<i>Tutkimuksessa esiin nousseet merkittävät päästöjen aiheuttajat.</i>	46
Kuva 12:	<i>Kohderakennusten tarkan laskennan avulla määritetyn materiaalien hiilijalanjäljen ja kokonaiskustannusten suhde.</i>	47
Kuva 13:	<i>Kustannusten ja materiaalien hiilijalanjäljen jakautuminen rakennusosittain ja kohteittain betonirunkoisissa rakennuksissa. Materiaalien hiilijalanjälki kuvaa kaikkien kohteiden hiilijalanjäljen keskiarvoa rakennusosissa.</i>	48
Kuva 14:	<i>Betonirunkoisten ja puurunkoisten kohteiden kustannukset ja keskimääräiset materiaalien hiilijalanjäljet jaettuna osiin.</i>	50
Kuva 15:	<i>Eri laskentamenetelmien vahvuudet ja heikkoudet.</i>	55

KÄSITELUETTELO

Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment)

Esineiden ja ihmisen toiminnan ympäristövaikutusten kattava arviointimenetelmä, joka ottaa huomioon sekä suorat että epäsuorat ilmastovaikutukset. Rakennuksen elinkaariarviointi ottaa huomioon rakennushankkeen ympäristövaikutukset aina raaka-aineiden hankinnasta purkuun asti.

Elinkaaren hiilijalanjälki

Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki on moduuleissa A-C syntyvien hiilidioksidipäästöjen summa. Elinkaaren hiilijalanjäljen arvioinnissa otetaan huomioon kaikkien resurssityyppien päästöt. Elinkaaren hiilijalanjälki esitetään yksikössä kg CO₂e/m²/a.

Hiilidioksidipäästöt

Hiilidioksidipäästöillä tarkoitetaan kaikkien kasvihuonekaasujen yhteenlaskettuja päästöjä. Hiilidioksidipäästöt ilmoitetaan yksikössä kg CO₂e.

Hiilijalanjälki

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan henkilön, prosessin tai tapahtuman yhteenlaskettuja suoria ja epäsuoria hiilidioksidipäästöjä. Hiilijalanjäljen suuruuteen viitataan tässä tutkimuksessa myös hiilidioksidipäästöinä tai pelkästään päästöinä.

Hiilijalanjälkilaskenta

Hiilijalanjäljen laskenta perustuu elinkaariarviointiin, ja sen tavoitteen mukaan huomioon otetaan kaikki elinkaaren vaiheet tai vain osa niistä.

Kestävä kehitys

Kestävällä kehityksellä tarkoitetaan järjestelmän kykyä ylläpitää ja säilyttää yhteiskunnan ekologiset, taloudelliset ja sosiaaliset tarpeet tuleville sukupolville.

Materiaalien hiilijalanjälki

Rakennuksen materiaalien hiilijalanjälki on moduuleissa A1-A4, B4-B5 ja C1-C4 syntyvien materiaaleihin liittyvien hiilidioksidipäästöjen summa. Materiaalien hiilijalanjälki esitetään yksikössä kg CO₂e/m².

Materiaalien hiilijalanjäljen vertailuarvo

Vertailuarvo on materiaalien hiilijalanjäljen perusteella määritetty ja tasoilla A-G esitetty arvo, joka perustuu One Click LCA:n tietokantaan. Vertailuarvon taso määräytyy sen mukaan, miten rakennuksen materiaalien hiilijalanjälki vertautuu valittuun rakennuskantaan.

Materiaalien kartoitus

Materiaalien kartoituksella tarkoitetaan tässä tutkimuksessa One Click LCA -ohjelmassa tehtävää työvaihetta, jossa lähdemateriaalista tuodut materiaalit yhdistetään laskentaohjelman kirjaston materiaaleihin.

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Ilmastonmuutos on noussut viime vuosien aikana yhdeksi puhuttavimmista aiheista sekä mediassa että arkipäiväisissä keskusteluissa. Euroopan komission tiedonannon (2018, s.2) mukaan maapallon ilmasto on lämmennyt jo yhden celsiusasteen esiteolliseen aikaan verrattuna ja ilman tehostettuja kansainvälisiä ilmastotoimia maapallon keskilämpötila saattaa nousta kahteen celsiusasteeseen jo vuoteen 2060 mennessä.

IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) raportin mukaan ilmastonmuutos on saatava rajattua 1,5 celsiusasteeseen, ja tätä varten päästöjä on vähennettävä kii-reellisemmin kuin aikaisemmin on ennakoitu (Euroopan komission tiedonanto. 2018, s.5). Tällä hetkellä rakennettu ympäristö tuottaa yhteensä 39% maailmanlaajuisista hiili-dioksidipäästöistä ja näitä päästöjä vähentämällä pystyttäisiin kustannustehokkaimmin vähentämään ilmastonmuutoksen vaikutuksia. (WorldGBC. 2019, s.7)

World Green Building Council -verkoston visiona on, että rakennetun ympäristön päästöjä saadaan tiputettua 40 prosenttia, ja että rakennukset olisivat käytön aikana täysin hiilineutraaleja vuoteen 2030 mennessä (WorldGBC. 2019, s.9). Euroopan Unionin Pariisin sopimuksessa on määriteltä, että päästöjä on yleisesti vähennettävä vuoteen 2030 mennessä vähintään 40% vuoden 1990 tasosta. Lisäksi EU tähtää vuoteen 2050 mennessä hiilidioksidipäästöneutraaliuteen rajoittaakseen maapallon lämpötilan nousun 1,5 celsiusasteeseen. (Euroopan komission tiedonanto. 2018, s.5)

Myös Suomessa kiinnostus aihetta kohtaan on noussut sekä kansallisella että poliittisella tasolla. Osana Euroopan Unionia koskevat sen tavoitteet myös Suomea ja kansallisella tasolla ilmastovaikutusten pienentäminen näkyy esimerkiksi tuoreessa hallitusohjelmassa, jossa tavoitteena on hiilineutraali Suomi jo vuonna 2035 (Valtioneuvoston julkaisu. 2019, s.34).

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia kerrostalorakennuksen hiilijalanjäljen suuruutta ja rakennusmateriaalien merkittävyyttä hiilijalanjälkeen. Neljän kohderakennuksen avulla pyritään tunnistamaan merkittävimpiä päästöihin vaikuttavia tekijöitä. Kohteet on

valittu niin, että pystytään tutkimaan runkomateriaalien, kuten puun ja betonin sekä rakennetyyppien, kuten paikallavaletun ja ontelolaatoilla toteutetun välipohjan välisiä keskeisimpiä eroja ja vaikutuksia päästöihin. Apuna hiilijalanjäljen suuruuden tutkinnassa käytetään laskentaohjelmaa, ja lähtötietoina muun muassa kohteiden tietomalleja, rakennepiirustuksia sekä urakkalaskelmia. Lisäksi pyritään laskennan tulosten pohjalta löytämään vaihtoehtoisia materiaaleja ja ratkaisuja, joiden avulla päästöjen määrää pystyttäisiin vähentämään. Kohteita vertaillaan myös kokonaisuuksina ja tuloksia vertaillaan kohteiden kokonaiskustannuksiin. Lisäksi pyritään tunnistamaan kustannusten ja päästöjen välisiä yhteyksiä.

Koska laskenta suoritetaan ohjelmalla, joka aiotaan ottaa kohdeyrityksessä laajempaan käyttöön, pyritään tutkimuksen avulla myös selkeyttämään tehokkaimpia tapoja laskennan suorittamiseen. Lisäksi tutkitaan myös sitä, kuinka eri laskentamenetelmillä saadut tulokset eroavat toisistaan ja miten hyvin esimerkiksi alustavan laskennan tulokset vastaavat tarkan laskennan tuloksia.

Rakennettu ympäristö kokonaisuutena on erittäin laaja, ja se käsittää infrarakentamisen, talonrakentamisen ja yhdyskuntatekniikan. Tässä diplomityössä tutkimus on rajattu koskemaan talonrakentamista ja tarkemmin asuntorakentamisen hankkeita. Tutkimuksella halutaan selvittää, millainen hiilijalanjälki asuinkerrostaloilla on. Pääpaino laskennassa ja tulosten tarkastelussa on rakennuksiin sitoutuneissa materiaalipäästöissä. Rajauksena voidaan pitää myös sitä, että tutkimuksessa tarkastellaan vain kohdeyrityksen neljää uudisrakennusta.

Hiilijalanjäljen laskenta toteutetaan One Click LCA-laskentaohjelmistolla, ja laskenta rajautuu laskentaohjelman rajausten mukaan. Teoria, johon laskenta pohjautuu, esitellään tarkemmin luvussa 4 ja luvussa 5 käsitellään yksityiskohtaisemmin laskennan suorittamista ja lähtötietoja. Tuloksissa esitetään sekä materiaalien että koko elinkaaren hiilijalanjälki, mutta tulosten käsittelyssä keskitytään rakentamisen aikaisten materiaalien vaikutuksiin, eikä käytönaikaisen energiakulutuksen erojen syihin tässä tutkimuksessa tarkemmin syvennyttä.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Tutkimuksen taustojen selvittämiseksi tehtiin kirjallisuustutkimusta, jonka lähteinä käytettiin esimerkiksi Ympäristöministeriön ja World GBC:n julkaisuja. Kirjallisuustutkimuksen tarkoituksena oli taustoittaa rakentamisen vaikutuksia ilmastonmuutokseen sekä rakentamisen synnyttämiä hiilidioksidipäästöjä. Tieteellisten artikkelien ja aikaisempien tutki-

musten avulla haluttiin syventyä rakennusten hiilijalanjäljen suuruuteen sekä sen laskentaan tarkemmin. Teoriaosuudessa selvitettiin myös miten rakentamisen ilmastovaikutuksia tällä hetkellä säädellään ja millainen merkitys hiilijalanjäljenlaskennalla on. Tutkimuksen empiirinen osuus suoritettiin One Click LCA -laskentaohjelmistolla.

Luvuissa kaksi ja kolme perehdytään tarkemmin tutkimuksen taustoihin sekä käsitellään aiheesta aiemmin toteutettuja tutkimuksia ja muuta teoriaa. Luvussa neljä on esitelty teoriaa laskennan takana sekä käsitelty laskennan merkitystä ja ohjemateriaalia. Luvussa viisi esitellään tutkimuksen empiirisen osion kohdehankkeet, laskentaohjelma ja toteutus. Luvussa kuusi esitellään empiirisen osion tulokset, joita analysoidaan luvussa 7. Luvussa 7 käsitellään myös kustannusten ja päästöjen välisiä yhteyksiä sekä mahdollisia ratkaisuja hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Luvussa 8 esitetään tutkimuksen johtopäätökset ja luvussa 9 yhteenveto.

2. RAKENNUSALAN KESTÄVÄN KEHITYKSEN EDISTÄMINEN

2.1 Rakentamisen ilmastovaikutusten sääntely

Ilmastonmuutokseen liittyvän tietoisuuden lisääntyttyä kiinnostus aiheesta ja vaikutusmahdollisuuksia kohtaan on lisääntynyt. Kestävän kehityksen tavoittelu on noussut osaksi eri alojen organisaatioiden tavoitteita ja strategioita. Kestävällä kehityksellä tarkoitetaan järjestelmän kykyä ylläpitää ja säilyttää yhteiskunnan ekologiset, taloudelliset ja sosiaaliset tarpeet tuleville sukupolville. (SFS-EN 15643-1. 2012, s.16) Ekologinen näkökulma usein korostuu kestävästä kehityksestä keskusteltaessa, sillä kestävä kehityksen perusehtona on luonnon monimuotoisuuden säilyttäminen eikä kestävä talouskehitys ole mahdollista ilman ekologisesti kestävää perustaa (Ympäristöministeriö. 1994, s.3)

Säynäjoen et al. (2011, s.116) mukaan suurimmat ihmisen toiminnasta johtuvat ilmastonmuutoksen aiheuttajat ovat energiankulutus, rakentaminen ja matkustamiseen liittyvä infrastruktuuri. Alalla tehtävillä muutoksilla on suuri vaikutus, sillä rakennettu ympäristö tuottaa yli kolmasosan kaikista hiilidioksidipäästöistä (Säynäjoki et al. 2012, s.2). Hiilidioksidipäästöillä tarkoitetaan kaikkien kasvihuonekaasujen yhteenlaskettuja päästöjä. (WorldGBC. 2019, s.5) Lisäksi on arvioitu, että rakennuskannan määrä tulee kaksinkertaistumaan vuoteen 2060 mennessä. Lähes puolet tästä kasvusta keskittyy Afrikkaan ja Aasiaan. (WorldGBC. 2019, s.22)

WorldGBC:n (2019, s.16) visiona on vuoteen 2030 mennessä vähentää talonrakentamisen, infrarakentamisen ja korjausrakentamisen päästöjä vähintään 40% sekä laskea käytönaikaiset päästöt nollassa. Lisäksi vuoteen 2050 mennessä kaiken rakentamisen tulee olla täysin päästötöntä. Euroopan komission vuonna 2011 julkaiseman tiekartan tavoitteet ovat hyvin samanlaiset: asumisen ja rakentamisen vuosittaisia hiilidioksidipäästöjä on tiekartan mukaan vähennettävä 37-53% vuoteen 2030 mennessä ja vuoteen 2050 mennessä 88-91% vuoden 1990 tasoon verrattuna. (Ruuska et al. 2013, s.7; Euroopan komission tiedonanto. 2011, s.6)

Monille rakennusalan toimijoille ilmastonmuutoksen torjuminen saattaa olla uusi asia. On kuitenkin olemassa organisaatioita, jotka ovat tutkineet aiheesta ja työskennelleet ilmastovaikutusten pienentämiseksi jo useita vuosia. (WorldGBC. 2019, s.35) Viime aikoina rakennetun ympäristön ilmastovaikutuksiin ovat kuitenkin alkaneet vahvemmin kiinnittää

huomiota niin valtiot, kaupungit ja kunnat kuin rakennusliikkeetkin. Myös rakennusmateriaaleja valmistavissa yrityksissä on ryhdytty toimenpiteisiin materiaalien ja tuotteiden ilmastovaikutusten pienentämiseksi. WorldGBC:n (2019, s.32) raportin mukaan Suomi kuuluu Ruotsin ja Hollannin ohella edelläkävijämaihin, sillä Suomessa on kansallisella tasolla vahvistettu poliittisia aloitteita, jotka tukevat ilmastovaikutusten pienentämistä.

Suomi on osana Euroopan unionia sitoutunut Pariisin sopimukseen, jonka tavoitteena on rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu alle kahteen celsiusasteeseen, vahvistaa kansainvälistä ilmastokestävyyttä sekä tukea vähäpäästöisen kehityksen rahoitusta (HE 200/2016. 2016, s.1). Pariisin sopimuksen osallisena Suomen valtio on osoittanut tiedostavansa, että ilmastonmuutoksen välittömään uhkaan on vastattava parhaan mahdollisen tieteellisen tiedon pohjalta, mikä vaatii innovaatioiden edistämistä sekä ilmastonmuutokseen liittyvän kasvatuksen ja kouluttamisen lisäämistä. (HE 200/2016. 2016, s.34,49,51). Myös WorldGBC:n (2019, s.11) raportti listaa innovaatioiden edistämisen ja koulutuksen lisäämisen keinoiksi ilmastonmuutoksen torjumiseen. Tuoreessa pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelmassa ”Osallistava ja osaava Suomi” on osoitettu rakennusalan energiatehokkuuteen liittyvään täydennyskoulutukseen sekä riippumattomaan rakennusalan tutkimukseen miljoona euroa. (Valtioneuvoston julkaisuja. 2019, s.202)

Suomalaisista yliopistoista muun muassa Aalto-yliopisto ja Tampereen yliopisto ovat lisänneet rakentamisen kestäväää kehitystä tukevaa opetustarjontaa. Aalto-yliopisto (2018) tarjoaa opiskelijoilleen useita kestäväään kehitykseen liittyviä koulutusohjelmia, joista esimerkiksi ”Creative Sustainability” ja ”Maankäytön suunnittelu ja liikennetekniikka” keskittyvät rakennetun ympäristön ilmastovaikutuksiin. (Aalto-yliopisto. 2018) Tampereen yliopistossa aloitetaan vuoden 2020 syksyllä täysin uusi koulutusohjelma nimeltään ”Sustainable Urban Development”. Uusi koulutusohjelma on koostettu yhdistämällä rakennustekniikan, yhteiskuntatutkimuksen ja hallintotieteiden koulutusohjelmien sisältöä. (Tampereen yliopisto. 2020) Lisäksi Tampereen yliopiston rakennustekniikan koulutusohjelmaan lisättiin syksyllä 2018 kiertotalous talonrakentamisessa -kurssi, jonka sisältöön kuuluvat esimerkiksi kiertotalouden periaatteiden läpikäynti, rakennusten ympäristövaikutukset sekä materiaalien uusiokäyttö ja kierrätettävyys. (Tampereen yliopisto. 2019)

Rakennusalan koulutuksen ja tutkimuksen tukemisen lisäksi hallitusohjelman mukaan materiaalien kierrätystä ja kiertotaloutta tehostetaan rakennusosalalla. Myös puurakentamista edistetään ja ilmastonmuutoksen vastustaminen otetaan huomioon kaavoituk-

sessä, rakentamisessa ja rakennuskannan ylläpidossa. Hallitusohjelman mukaan loppuun viedään myös maankäyttö- ja rakennuslain uudistus, jonka yksi päätavoitteista on hiilineutraali yhteiskunta. (Valtioneuvoston julkaisuja. 2019, s.40,49)

Pariisin sopimuksen ja kansallisten ohjeiden rinnalle on laadittu useita eurooppalaisia standardeja, jotka keskittyvät rakentamisen kestävään kehitykseen. Keskeisimpiä standardeja on yhteensä neljä:

- SFS-EN 15643 Sustainability of construction works. Sustainability assessment of buildings. (Parts 1-4)
- SFS-EN 15804 Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products.
- SFS-EN 15978 Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method.
- SFS-EN 15942 Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Communication format business-to-business.

SFS-EN 15643 -standardin (2012, s.7) neliosainen sarja antaa kestäväälle rakentamiselle viitekehykset sekä tarkastelee kestävästi toteutetun rakentamisen vaikutuksia ympäristön, yhteiskunnan ja talouden näkökulmista. Tässä standardissa ei ole kuitenkaan asetettu vertailuarvoja tai -luokkia suorituskyvyn mittaamiseksi, vaan ne tulee asettaa kansallisesti.

Standardit SFS-EN 15804 ja SFS-EN 15978 keskittyvät siihen, miten ympäristövaikutusten laskentaa ja arviointia tulisi tehdä. SFS-EN 15804 (2019, s.4,13) asettaa säännöt ja rakenteen sille, miten rakentamisen tuotteet ja palvelut tulee ottaa laskennassa huomioon ja miten ne kategorisoidaan. Standardin tavoitteena on yhtenäistää laskennan suorittamista ja esittämistapoja. SFS-EN 15978 (2012, s.5) on tarkoitettu päätöksenteon ja laskennan dokumentoinnin tueksi. Tässä standardissa kategorisointi on esitetty karkeammin, ja pääpaino on muissa laskentaan vaikuttavissa tekijöissä, kuten valituissa lähtötiedoissa ja laskennan suorittamistavoissa. SFS-EN 15942 -standardi (2012, s.4) pyrkii yhtenäistämään eurooppalaisia ympäristötuoteselosteita ja parantamaan erityisesti yritysten välistä kommunikointia.

2.2 Kohdeyrityksen strategiset tavoitteet

Tämän diplomityön toimeksiantajana toimii yritys, joka kuuluu Suomen suurimpiin rakennusliikkeisiin. Tähän yritykseen viitataan myöhemmin kohdeyrityksenä. Kuten useimmat rakennusliikkeistä ja rakennusmateriaalien toimittajista, myös kohdeyritys on asettanut

itselleen strategiset tavoitteet kestävän kehityksen ekologisen näkökulman edistämistä varten. Keskeisiä tavoitteita on yhteensä kolme, ja ne ovat linjassa jo esitettyjen tavoitteiden ja visioiden kanssa. (YIT, a. 2019) Kohdeyrityksen hallituksen asettamat kestävän kehityksen tavoitteet vuosille 2020-2022 on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1: Kohdeyrityksen asettamat tavoitteet vuosille 2020-2022 (YIT, a. 2019).

Näitä tavoitteita tukemaan yritykseen on perustettu rakentamisen ilmastovaikutusten vähentämiseen keskittyvä kehitysohjelma, jonka avulla tuetaan kasvua ja tuottavuuskehitystä kestävän kehityksen periaattein. Kehitysohjelman tehtävänä on tunnistaa kohdeyrityksen toiminnan tämänhetkinen tila ja asettaa kestävään kehitykseen liittyviä tavoitteita. Lisäksi pyritään toiminnan tehostamiseen energia- ja materiaalitehokkuuden sekä kiertotalouden keinojen avulla. (YIT, b. 2019) Lisäksi kehitysohjelman toimesta on järjestetty hiilijalanjäljen laskentaan liittyviä koulutuksia yrityksen sisällä.

3. RAKENNUSHANKKEEN HIILIJALANJÄLKI

3.1 Hiilidioksidipäästöjen syntyminen ja jakautuminen

Rakentamisen ilmastovaikutuksen arvioimiseksi käytetään hiilijalanjälkeä, jonka on todettu olevan toimivin tapa tietyn tuotteen tai prosessin kasvihuonekaasujen päästöjen määrittämiseen (Säynäjoki et al. 2011, s.116). Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan henkilön, prosessin tai tapahtuman yhteenlaskettuja suorja ja epäsuoria hiilidioksidipäästöjä (WorldGBC. 2019, s.6). Koska rakentamisen ilmastovaikutus on suhteellisen suuri, on syytä selvittää, mistä hiilijalanjälki syntyy ja miten siihen pystytään vaikuttamaan. Hiilijalanjäljen pienentäminen on tärkeää, sillä tutkimusten mukaan uudet asuinalueet aiheuttavat päästöihin hiilidioksidipiikin. Hiilidioksidipiikillä tarkoitetaan lyhyellä aikavälillä (alle vuodesta maksimissaan viiteen vuoteen) syntynyttä suurta nousua päästöissä. (Säynäjoki et al. 2012, s.2) Hiilijalanjäljen suuruuteen viitataan tässä tutkimuksessa myös hiilidioksidipäästöinä tai pelkästään päästöinä.

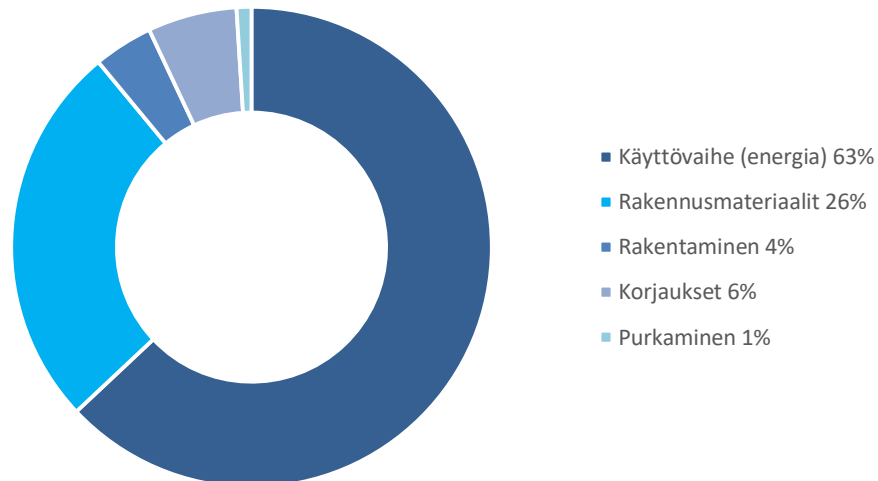
Kuvassa 2 on esitetty koko rakennushankkeen aikana syntyvien päästöjen jakautuminen hankkeen eri vaiheisiin. Kuten kuvasta nähdään, on energiankulutuksen todettu aiheuttavan suurimman osan rakennuksen synnyttämistä päästöistä ja rakentamisen materiaaleineen yhteensä noin 30%. Rakennusmateriaalien synnyttämien päästöjen merkitystä kuitenkin aliarvioidaan usein, eikä aina esimerkiksi huomioida sitä, että energiatehokkuutta parannettaessa materiaalien päästöt usein kasvavat. Rakennusmateriaalien ja rakennusvaiheen päästöjen merkitys kasvaa, kun otetaan huomioon päästöjen temporaalinen eli ajallinen vaikutus. Viimeisimpien tutkimusten mukaan tällä hetkellä syntyvät päästöt saattavat nimittäin olla haitallisempia kuin tulevaisuudessa syntyvät päästöt. (Säynäjoki et al. 2012, s.2)

Energiankulutuksen osuutta rakennuksen kokonaispäästöistä arvioidessa tulee ottaa huomioon myös se, että energiankulutuksen päästöihin vaikuttavat vahvasti tavat, joilla energiaa tuotetaan. Säynäjoen et al. (2012, s.2) mukaan koko rakennuksen elinkaarta kuvaavat arviot eivät useinkaan ota huomioon sitä, milloin ja missä päästöt mahdollisesti syntyvät. Energian tuottamistavat saattavat esimerkiksi vaihdella kaupungeittain.

Suomen tämänhetkisen hallitusohjelman (Valtioneuvoston julkaisuja. 2019, s.35) mukaan ”sähkön ja lämmöntuotannon tulee olla Suomessa lähes päästötöntä 2030-luvun loppuun mennessä huolto- ja toimitusvarmuusnäkökulmat huomioiden”. Lisäksi hallitusohjelmassa esitetään taloyhtiöille suunnatusta energia-avustuksesta, jossa taloyhtiöille

maksettaisiin avustusta energiatehokkuushyötyihin perustuen (Valtioneuvoston julkaisu. 2019, s.40). Jos hallitusohjelmassa esitetyt tavoitteet saavutetaan, ollaan Suomessa jo 10 vuoden päästä tilanteessa, jossa energiankulutuksen aiheuttama osuus hiilijalanjäljestä on selkeästi pienentynyt tai kokonaan poistunut. Mitä enemmän energiankulutuksen päästöt pienenevät, sitä suurempi vaikutus materiaalien aiheuttamilla päästöillä on.

Rakennushankkeen hiilijalanjälki



Kuva 2: Hiilidioksidipäästöjen jakaantuminen rakennushankkeessa (Perustuu lähteeseen Ruuska & Häkkinen. 2014, s.324)

Energiankulutuksen ilmastovaikutuksien pienentämiseen on keskitytty jo pidempään, mutta rakennusmateriaalien ilmastovaikutuksiin on aloitettu kiinnittämään huomiota vasta viime aikoina. Säynäjoki et al. (2012, s.3) tuovat esille sen, että rakentamisen laakelvoitteiset säädökset keskittyvät käytönaikaisiin päästöihin, sillä ne muodostavat suurimman osan koko elinkaaren päästöistä. Rakentamisvaiheen päästöt ovat vielä suurimmaksi osaksi sääntelemättömiä. Vaikka kuvan 2 voidaan ajatella kuvaavan perusskenaariota, vaikuttavat päästöihin myös esimerkiksi tontin maaperä ja tontin sijainti. Nämä seikat saattavat vaikuttaa merkittävästi materiaalien ja rakennusosakuljetusten päästöihin. (Ruuska et al. 2014, s.319)

3.2 Rakentamisen päästöistä toteutetut tutkimukset

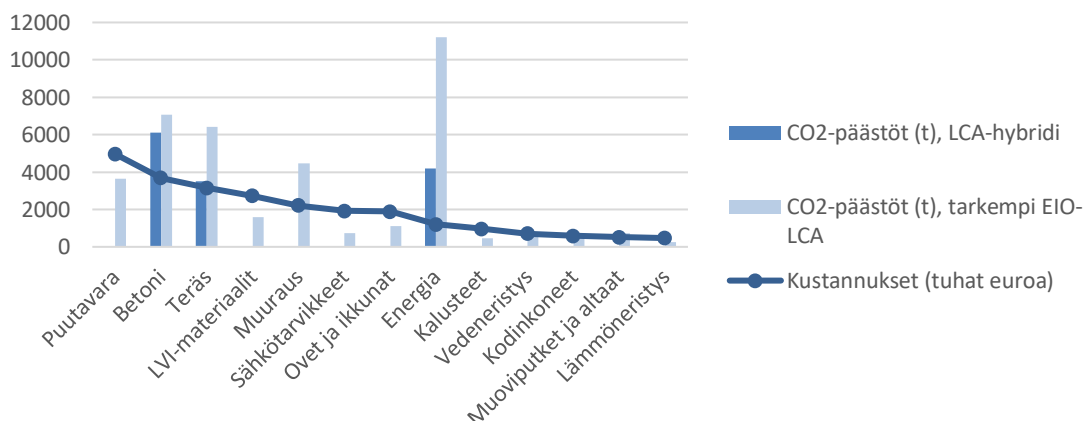
Säynäjoen et al. (2011, s.117) toteuttamassa tutkimuksessa on tehty selvitys Espooseen rakennettavan asuinalueen synnyttämistä hiilidioksidipäästöistä koko sen elinkaaren aikana. Tutkimus on tehty käyttäen erilaisia LCA-laskennan metodeja, joita käydään tarkemmin läpi tämän diplomityön luvussa 4.1. Laskennan kohteena olevalle asuinalueelle

on suunniteltu rakennettavaksi rivitaloja, paritaloja ja omakotitaloja yhteensä 35 400 m². Asuntojen, joiden koot vaihtelevat 70 neliömetristä 160, on suunniteltu asuttavan tulevaisuudessa 550-600 ihmistä. (Säynäjoki et al. 2011, s.117)

Selvityksen tuloksena koko rakennushankkeen elinkaaren aikaisiksi päästöiksi saatiin LCA-hybridimallilla yhteensä 60 542 t CO₂e. Rakennusten osuus tästä on noin 91% ja infrarakentamisen osuus noin 9%. Suurimmat päästöjen aiheuttajat hankkeessa olivat betoni, energia ja teräs, jotka muodostavat yhteensä 23% koko hankkeen päästöistä. (Säynäjoki et al. 2011, s.118)

LCA-hybridimallin lisäksi laskenta suoritettiin myös käyttämällä kahta muuta laskentatappaa. Alustavalla EIO-LCA -mallilla laskettuna päästöjen yhteenlasketuksi määräksi on saatu 49 020 t CO₂e. Jakauma rakennusten ja infrarakentamisen synnyttämien päästöjen välillä on täysin sama kuin ensimmäisen mallin avulla määritetty 91% ja 9%. Tarkennetulla EIO-LCA -mallilla laskettuna hiilidioksidin määräksi on tullut yhteensä 70 800 t CO₂e, joista 93% on tullut rakennuksista ja loput 7% infrarakentamisesta. Myös EIO-LCA -malleilla laskettujen tulosten perusteella betoni, teräs ja energia ovat suurimmat päästöjen aiheuttajat. (Säynäjoki et al. 2011, s.118) Sekä LCA-hybridimallin että eritellyn EIO-LCA -mallin avulla saadut tulokset on esitetty kuvassa 3.

Tutkimuskohteena olevan asuinalueen kokonaiskustannukset on jaettu rakennuksiin kuuluviin kustannuksiin ja infrarakentamisen kustannuksiin seuraavasti: rakennusten kokonaiskustannuksiksi on arvioitu 69,39 M€ ja infrarakentamisen kokonaiskustannuksiksi 6,93 M€ (Säynäjoki et al. 2011, s.117). Voidaan todeta, että kustannukset jakautuvat rakennusten ja infrarakentamisen välillä samalla jakaumalla kuin hiilidioksidipäästötkin. Infrarakentaminen muodostaa sekä kustannuksista että päästöistä noin 9% ja rakennukset suunnilleen 91%. Kustannukset eri rakennusmateriaaleille jaoteltuna on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Päästöjen ja kustannusten suhde Espoon asuinaluehankkeessa. (Perustuu lähteeseen Säynäjoki et al. 2011, s.119)

Kun koko hankkeen kokonaispäästöjen keskiarvo kohdistetaan hankkeen kokoon, saadaan hiilidioksidipäästömäärän arvioksi noin 1,6 t CO₂e yhtä neliötä kohden (Säynäjoki et al. 2011, s.122). Säynäjoen et al. (2011, s.122) mukaan tulos kuitenkin poikkeaa aiemmista tuloksista, joissa määrän on arvioitu olevan luokkaa 0,4t-0,5 t CO₂e. Aiemmissä tutkimuksissa kohteena ovat olleet kerrostalot, mutta Säynäjoen et al. mukaan tämä selittäisi vain noin 10% eron saaduissa tuloksissa. Sen sijaan ero tutkimusten välillä saattaa johtua erilaisesta tutkimusmenetelmästä sekä siitä, että aiemmissä tutkimuksissa ei ole otettu huomioon epäsuoria hiilidioksidipäästöjä. (Säynäjoki et al. 2011, s.122)

Toisessa, vuonna 2012 toteuttamassaan tutkimuksessa Säynäjoki et al. (2012, s.3) keskittyvät koko elinkaaren hiilijalanjäljen laskemisen sijaan rakennusvaiheen merkitykseen päästöjen määrässä. Tässä tutkimuksessa kohteena on rakennusalueen 35 270 m² kokoinen Etelä-Suomessa sijaitseva asuinalue, joka koostuu 220 rivitalosta ja paritalosta. Tutkimuksessa on korostettu hiilidioksidipäästöjen syntymisen ajankohdan merkitystä päästöjen synnyssä, ja oletettu esimerkiksi energiankulutuksen päästöjen vähenevän vuosittain suomalaisten päästötavoitteiden mukaisesti. (Säynäjoki et al. 2012, s.3,5)

Rakentamisvaiheen merkityksen korostamiseksi tutkimukseen on valittu vertailtavaksi neljä erilaista skenaariota, joilla asuinalue voitaisiin toteuttaa: vähän energiaa kuluttavien talojen rakentaminen, passiivitalojen rakentaminen, 1960-luvulla rakennettujen talojen energiatehokkuutta parantava remontti ja 1980-luvulla rakennetut talot, joille ei tehdä remonttia. Vertailtavana perustapauksena on käytetty rakentamismääräyskokoelman mukaista energiankulutusta. (Säynäjoki et al. 2012, s.3) Asuinalueiden arvioidut rakentamis- ja remontointikustannukset sekä eri rakennustyypeillä toteutettujen talojen energiankulutus on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1: Tutkimuksessa vertailtavat skenaariot
(Perustuu lähteeseen Säynäjoki et al. 2012, s.5)**

Rakennustyyppi	Rakentamisen kokonaiskustannukset (M€)	Lämmitysenergian kulutus (kWh/m ²)
Perustapaus	76,3	100
Vähän energiaa kuluttava talo LE-50	77,7	50
Passiivitalo PH-15	81,1	15
Remontoitu 1960-luvun talo R-60s	50,6	50
1980-luvun talo R-80s	-	195

Perustapauksessa päästöjen kokonaismääräksi saatiin 104 700 t CO₂e, kun laskentaajaksi oli valittu 50 vuotta. Rakentamisvaiheen päästöjen osuus tästä oli 60 500 t CO₂e, joista 91% syntyi rakennuksesta ja 9% infrastruktuurista. Loppujen 44 200 t CO₂e on

laskettu syntyvän 50 vuoden aikana käytönikäisistä lämmitys-, jäähdytys- ja sähköpäästöistä. Rakennusvaiheen osuus kokonaispäästöistä on perustapauksessa lähes 60%. Virhettä saattaa kuitenkin aiheuttaa esimerkiksi energiankulutuksen päästöjen määrän epävarmuus tulevaisuudessa. (Säynäjoki et al. 2012, s.5)

Muissa tapauksissa elinkaaren kokonaispäästöiksi saatiin 89 100 t CO₂e (vähän energiaa kuluttavat talot), 79 600 t CO₂e (passiivitalot), 67 700 t CO₂e (1960-luvun talojen remontointi) ja 83 000 t CO₂e (1980-luvun talot). Taulukossa 1 esitettyjen lämmitysenergian kulutuksen mukaisten arvojen mukaan on käytönikäisiksi päästöiksi määritetty 27 600 t CO₂e (vähän energiaa kuluttavat talot), 16 000 t CO₂e (passiivitalot), 27 600 t CO₂e (1960-luvun talot remontin jälkeen) ja 83 000 t CO₂e (1980-luvun talot, elinkaaren kokonaispäästöt ovat yhtä suuret kuin käytönikäiset päästöt). Kun vertaillaan elinkaaren kokonaispäästöjä, voidaan todeta, etteivät erot ole kovin suuria 1960-luvun talojen remontointia lukuun ottamatta. (Säynäjoki et al. 2012, s.6)

Vähän energiaa kuluttavien talojen rakennusaikaiset päästöt olivat noin 1,5% ja passiivitaloilla noin 5% korkeammat kuin perustapauksessa. Sen sijaan 1960-luvun remontti-kohteen rakennusaikaisten päästöjen määrä oli 30% vähemmän kuin perustapauksessa. Säynäjoen et al. (2012, s.6) mukaan tutkimus osoittaa, että rakennusvaiheen aikaisilla päästöillä on hallitseva osuus koko elinkaaren aikaisista päästöistä, kun asetetut päästöjen vähentämistavoitteet huomioidaan. Säynäjoki et al. (2012, s.6) korostaa myös, että rakennusvaiheen aiheuttaman hiilidioksidipiikin pienentämisen merkitys kasvaa päästöjen vähentämistavoitteiden saavuttamisessa lähitulevaisuudessa.

Vaikka vanhan asuinalueen remontoinnin päästöt olivat selkeästi pienemmät, kuin minäkään uudisalueen rakentamisen vaihtoehdoista, on Säynäjoen et al. (2012, s.8) mukaan kuitenkin huomioitava, kuinka nopeasti remontoinnin aiheuttamat päästöt näkyvät käytönikäisen energiatehokkuuden parantumisena. Remontoinnin materiaalien päästöihin tulisikin kiinnittää jatkossa enemmän huomiota. Uudisrakentamisessa Säynäjoki et al. (2012, s.7-8) suosittelee käytettävien ratkaisuja, jotka parantavat rakennuksen energiatehokkuutta. Koska vuosien 2020-2050 välillä aiheutuvat päästöt ovat kuitenkin merkittäviä, ei energiatehokkuutta saa tavoitella Säynäjoen et al. (2012, s.6) mukaan rakennusaikaisten päästöjen kustannuksella.

3.3 Materiaaleihin sitoutuneet päästöt

Kuvasta 2 nähdään, että materiaalit synnyttävät noin 26% koko rakennuksen elinkaaren päästöistä. Rakentamisessa käytetty energia aiheuttaa suurimman osan rakennusaikaisista päästöistä, mutta käytettävän energian päästöjen tippuessa materiaalien synnyttämien päästöjen merkitys kasvaa.

Ruuska & Häkkinen (2014, s.318) ovat toteuttaneet tutkimuksen, jossa keskitytään erityisesti materiaalien hiilijalanjälkeen. Tutkimuksessa tyypillisen suomalaisen kerrostalon rakentamisen päästöt on laskettu jakamalla ne kolmeen eri kategoriaan rakennusvaiheen perusteella: maanrakennus, runkotyöt ja täydentävät työt. Lisäksi tutkimuksessa on vertailtu materiaalien päästöjä määrittelemällä päästöille minimi-, perus- ja maksimitasot. Minimitasolla pääasiallisena runkomateriaalina on käytetty puuta, perustasolla pääasiallisina materiaaleina on käytetty tavallisimmin kerrostalorakentamisessa käytettäviä materiaaleja, kuten betonisia ulkoseiniä ja kipsiväliseiniä. Maksimitasolla pääasiallisena rakennusmateriaalina on käytetty massiivisia betonielementtejä. (Ruuska & Häkkinen. 2014, s.319-320)

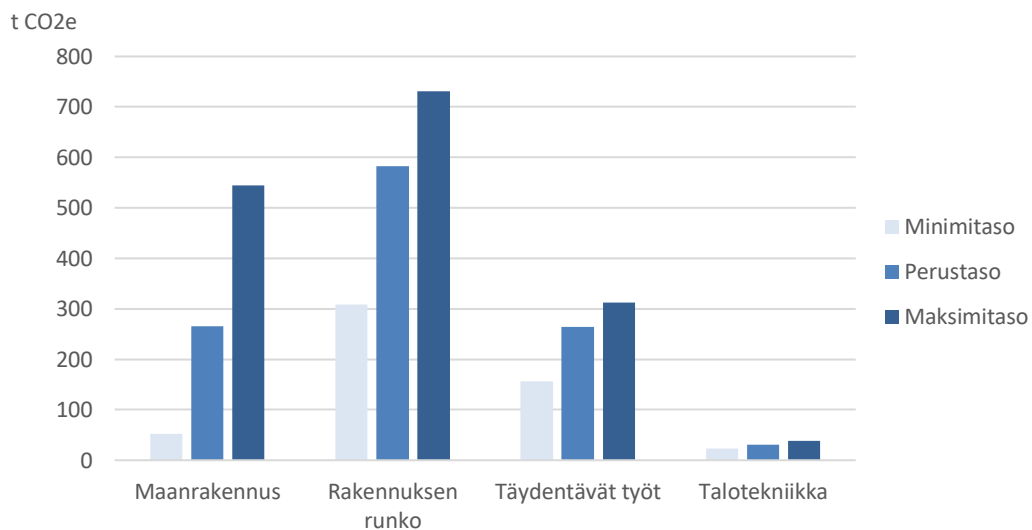
Maanrakennustöiden merkittävimäksi päästölähteeksi määritettiin piharakenteet, joiden päästöt olivat keskimäärin yhteensä 186 t CO₂e. Jos maaperää joudutaan stabiloimaan, saattaa stabilointi synnyttää jopa 1080 t CO₂e päästöt. Keskimäärin maatöiden päästöt ovat yhteensä 265 t CO₂e, mikäli maaperän stabilointia ei jouduta tekemään. (Ruuska & Häkkinen. 2014, s.321)

Kolmesta kategoriasta merkittävimmät päästöt aiheutti rakentamisen runkovaihe. Runkovaiheen keskimääräiset päästöt olivat 582 t CO₂e, eli noin kolminkertaiset maanrakennustöiden päästöihin verrattuna. Suurimpia runkovaiheen päästölähteitä olivat välipohjat, ulkoseinät ja kantavat väliseinät. Materiaalivalinnan mukaan runkovaiheen päästöt olivat yhteensä 308 t CO₂e (puurunkoinen kerrostalo) tai 731 t CO₂e (massiivibetonirakenteinen kerrostalo), mikä osoittaa runkomateriaalin valinnan merkityksen lopullisen rakennuksen päästömäärissä. (Ruuska & Häkkinen. 2014, s.321)

Täydentävien rakennusosien, kuten parvekkeiden, portaiden, (ei-kantavien) väliseinien, ikkunoiden ja ovien sekä kalusteiden kokonaispäästö määrä on keskimäärin lähes sama kuin maanrakennustöiden, 264 t CO₂e. Merkittävimmät päästöjen aiheuttajat olivat parvekkeet, ovet ja ikkunat sekä kalusteet ja pintamateriaalit. Päästöjen suuruuteen vaikutti kuitenkin merkittävästi se, oliko kyse minimitapauksesta vai maksimitapauksesta. Esimerkiksi puurakenteisten parvekkeiden päästöt olivat 35 t CO₂e, kun taas betonista valmistettujen parvekkeiden hiilijalanjälki oli lähes kolminkertainen, 93 t CO₂e. (Ruuska & Häkkinen. 2014, s.321) Ruuska & Häkkinen (2014, s.321) kuitenkin huomauttavat, että

materiaalien, joita perinteisesti korjataan tai vaihdetaan tietyin väliajoin, merkitys kasvaa, kun tarkastellaan rakennuksen koko elinkaaren aikaisia päästöjä. Tällaisia vaihdettavia materiaaleja sisältäviä rakennusosia ovat esimerkiksi kalusteet ja kodinkoneet.

Lisäksi tutkimuksessa on laskettu talotekniikkajärjestelmien päästöt. Järjestelmien tuottamien päästöjen laskennassa on otettu huomioon sähköjen, lämmityksen, ilmanvaihdon, viemäroinnin, sprinklerijärjestelmän ja hissien materiaalien päästöt. Taloteknisten järjestelmien keskimääräiseksi päästöiksi on saatu yhteensä 31 t CO₂e. (Ruuska & Häkkinen. 2014, s.322) Maanrakennuksen, rakennuksen rungon, täydentävien töiden ja talotekniikan päästöjen määrät minimi-, perus- ja maksimitapauksessa on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4: Tyypillisen kerrostalorakennuksen päästöjen määrät jaettuna eri kategorioihin ja laskettuna erilaisilla materiaaleilla. (Perustuu lähteeseen Ruuska & Häkkinen. 2014, s.322)

Kuvassa 4 esitetyissä arvoissa ei ole otettu huomioon maanrakennuksessa mahdollisesti tehtävää maaperän stabilointia, sillä se vääristäisi vertailua. Myöskään talotekniikan arvoissa ei ole otettu huomioon aurinkopaneelien asennusta tai erillistä ilmastointia, eikä siihen käytettäviä jäähdytysnesteitä, jotka lisäisivät talotekniikan päästöjä yhteensä 264 t CO₂e. (Ruuska & Häkkinen. 2014, s.322)

Ottaakseen huomioon koko rakennuksen elinkaaren aikaiset materiaalipäästöt, ovat Ruuska & Häkkinen (2014, s.322) laskeneet korjausten ja remonttien aiheuttamat päästöt olettamalla, että taloteknisiä järjestelmiä, ikkunoita, ovia, lasituksia ja märkätiloja korjataan vaihtamalla vanhat materiaalit uusiin kerran 50 vuoden aikana. Lisäksi asuntojen kalusteita ja varusteita on arvioitu vaihdettavan neljä kertaa samalla aikavälillä. Korjaus-

ten ja remonttien päästöjen määrä on perustapauksessa 281 t CO₂e, minimitapauksessa 211 t CO₂e ja maksimitapauksessa 354 t CO₂e. Koska parvekkeiden osuus täydentävien rakenteiden päästöistä oli perustapauksessa yli kolmasosan, vaihtelevat muiden täydentävien rakenteiden materiaalien valmistuksen päästöt välillä 157-313 t CO₂e. Näin ollen voidaan todeta, että remontoitavien rakenneosien koko elinkaaren aikaiset päästöt ovat suuremmat, kuin niiden alkuperäiset päästöt. (Ruuska & Häkkinen. 2014, s.322)

Kun rakennushankkeen koko elinkaaren hiilijalanjäljen arvioinnissa käytetään nykyisiä käyttöenergian päästöprofiileja, materiaalien ja rakennustyön osuus kokonaispäästöistä on 28-41%. Jos energian päästöjen muutoksia ei oteta huomioon, laskee materiaalien osuus päästöistä keskimäärin 28% tasolle. Koko elinkaaren päästöjen määrän vaihteluväli riippuu siis pitkälti laskennassa tehdyistä oletuksista ja valinnoista. Kuvan 4 perusteella voidaan kuitenkin todeta, että materiaalivalintojen merkitys rakennushankkeen hiilijalanjäljen suuruuteen on merkittävä ja että materiaalivalinnoilla pystytään ratkaisevasti vaikuttamaan rakennushankkeen päästöihin. (Ruuska & Häkkinen. 2014, s.324,328)

Kuvasta 3 voidaan suoraan lukea, että merkittävimmät materiaalien aiheuttamat päästöt rakennushankkeessa syntyvät betonista ja teräksestä. Sama tulos voidaan lukea myös kuvasta 4, josta nähdään, että perustapauksessa runkorakenteet aiheuttavat tarkasteltavan rakennuksen suurimmat materiaalipäästöt. Perustapauksessa runkorakenteet koostuvat pääosin teräsbetonista.

Maailmanlaajuisesti sementin tuotanto aiheuttaa 7% ja teräksen tuotanto 7-9% kaikista maailman hiilidioksidipäästöistä ja näistä noin puolet voidaan osoittaa rakennustuotannon aiheuttamiksi. Lisäksi sementin kulutuksen on ennustettu kasvavan 12-23% ja teräksen kulutuksen 30% vuoteen 2050 mennessä. (WorldGBC. 2019, s.24) Näiden kahden materiaalin merkitys on siis nyt ja tulevaisuudessa yksi ratkaisevimmista rakentamisen päästöjen pienentämisen kannalta.

Betonin ja teräksen hallitsevaa osuutta hiilidioksidipäästöistä selittävät paitsi niiden suuri määrä rakennushankkeessa, myös niiden tuotantoprosessin synnyttämien päästöjen suuruus. WorldGBC:n (2019, s.8) raportin mukaan monet muutkin rakennusalan materiaaleja tuottavat alat ovat hiili-intensiivisiä, raskaan teollisuuden aloja. Euroopan komission tiedonannossa (2018, s.11) ehdotetaankin uusiutuvan sähkön käyttöönottoa merkittävänä mahdollisuutena hiilestä irtautumiselle muun muassa teollisuudessa.

Betonin ja teräksen lisäksi merkittäviä materiaaleihin liittyviä päästöjä aiheuttavat esimerkiksi muuraus ja puutavara. (Kuva 3; Säynäjoki et al. 2011, s.120) Myös alumiinilla ja lasitavaralla on suuri hiilijalanjälki, sillä niiden tuotanto vaatii korkeiden lämpötilojen

käyttöä. Suurin osa lämmönostoon tarvittavasta energiasta tuotetaan edelleen fossiilisten polttoaineiden avulla, mikä nostaa tuotannon ja näin ollen myös materiaalin päästöjä. (WorldGBC. 2019, s.24) Ruuska & Häkkinen. (2014, s.326) korostavatkin, ettei materiaalivalmistajien välisiä päästöeroja ole tutkittu riittävästi.

Teollisuuden käyttämien energialähteiden vaihtamisen lisäksi myös muita mahdollisuuksia merkittävien päästöjen vähentämiseksi on kehitetty ja ollaan koko ajan kehittämässä. Euroopan komission tiedonannon (2018, s.13) mukaan raaka-aineissa piilee erittäin arvokas mahdollisuus päästöjen vähentämiseen. Raaka-aineiden ja materiaalien uudelleenkäyttö ja kierrätys vähentävät raaka-aineiden tarvetta, ja näin pienentävät raaka-aineiden tuotannon ja materiaalien valmistamisen päästöjä. (Euroopan komission tiedonanto. 2018, s.13) WorldGBC:n (2019, s.24,26) mukaan esimerkiksi teräksen kulutuksen kasvaessa myös kierrätetyn teräksen osuus tuotannosta on kasvamassa.

Energiaintensiivisten raaka-aineiden päästöjä voidaan vähentää myös korvaamalla raaka-aineet täysin uusilla tai käyttämällä korvaamiseen jo olemassa olevia, mutta vähemmän päästöjä aiheuttavia materiaaleja. Esimerkiksi puurakenteita voitaisiin käyttää rakentamisessa betonirakenteiden sijasta. (Euroopan komission tiedonanto. 2018, s.13-14) Puutavaran aiheuttamien pienien päästöjen lisäksi materiaalia suositetaan myös siksi, että oikein kasvatettuna ja kaadettuna puu sitoo hiilidioksidia itseensä. Puutavaran tuotantoa varten kaadettujen metsien tilalle tulee kuitenkin istuttaa uusia, jotta puutavaran käytöstä on todellista hyötyä. (WorldGBC. 2019, s.26)

Täysin uusia, korvaavia materiaalien raaka-aineita on jo jonkin verran kehitetty, mutta niiden käyttöönotto rakentamisessa vaatii, että ne toimivat myös suuressa mittakaavassa. Esimerkiksi biomassaa on esitetty korvaavaksi vaihtoehdoksi rakennusalan hiiliintensiivisille raaka-aineille. Sen kokonaisvaltainen käyttöönotto Euroopassa ei kuitenkaan ole tällä hetkellä mahdollista, sillä eurooppalaiset metsät eivät riitä biomassan tuotantoon ilman, että metsien tarjoama hiilinielu kärsii. (Euroopan komission tiedonanto. 2018, s.15)

4. HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA

4.1 Arviointimenetelmät ja laskennan merkitys

Elinkaariarviointia (LCA=Life Cycle Assessment) käytetään esineiden ja ihmisen toiminnan ympäristövaikutusten kattavaan arviointiin, sillä se ottaa huomioon sekä suorat että epäsuorat vaikutukset ilmastoon (Säynäjoki et al. 2011, s.116). Rakennuksen elinkaariarviointi ottaa huomioon rakennushankkeen ympäristövaikutukset aina raaka-aineiden hankinnasta purkamiseen asti (Ruuska & Häkkinen. 2014, s.318; Säynäjoki et al. 2011, s.116; Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.12)

Elinkaariarvioinnin toteutus voidaan jakaa kolmeen eri tapaan: prosessipohjaiseen LCA-arviointiin, syöte-tulos -pohjaiseen arviointiin (IO-LCA/EIO-LCA) sekä nämä yhdistämällä kehitettyyn LCA -hybridimalliin. Prosessipohjainen arviointimenetelmä on perinteinen tapa arvioida koko elinkaaren ympäristövaikutuksia ja se soveltuu hyvin homogeenisten ja selväpiirteisten kokonaisuuksien, kuten rakennushankkeiden arviointiin. Tarkan ja laajan arvioinnin suorittaminen on kuitenkin tällä menetelmällä hankalaa, sillä prosessia joudutaan rajaamaan arvioinnissa, ja merkittävät osat saattavat jäädä laskennan ulkopuolelle. (Säynäjoki et al. 2011, s. 117; Säynäjoki et al. 2012, s.3)

Syöte-tulos (input-output) -pohjainen arviointi, johon viitataan yleisesti lyhenteillä IO-LCA tai EIO-LCA, arvioi tuotteen tai toiminnon ympäristövaikutuksia niiden rahallisten kustannusten pohjalta. Tiettyjen syötteiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia arvioidaan keskimääräisten, teollisuuteen perustuvien tietojen perusteella. Menetelmässä kaikkien rahallisten investointien ympäristövaikutus lasketaan erikseen, jolloin prosessipohjaisessa arvioinnissa tehtävää rajausta ei tarvitse suorittaa ja tuloksesta saadaan tarkempi. IO-LCA -arviointi pohjautuu kuitenkin koottuihin, kansallisiin tietoihin, eikä se huomioi tiettyjen prosessien ominaisia piirteitä. Arviointimenetelmä soveltuukin huonosti alakohtaiseen vertailuun. (Säynäjoki et al. 2011, s.117)

Näiden kahden arviointimenetelmän sisältämien virheiden mitätöinniksi on kehitetty yhdistelmämalli eli LCA-hybridi, johon on sisällytetty kummankin menetelmän sopivimmat ominaisuudet sekä jossa virhelähteiden merkitystä on pienennetty tai se on kokonaan poistettu. (Säynäjoki et al. 2011, s.117) LCA -hybridimallia voidaan pitää parhaana elinkaariarvioinnin menetelmänä (Säynäjoki et al. 2012, s.3). Yhdistelmämalliin voidaan viitata eri nimillä, ja tässä tutkimuksessa se toimii valittuna laskentamenetelmänä. LCA -hybridimallin ja EIO-LCA -mallin erojen vaikutus tuloksiin nähdään kuvasta 3, missä samoille kohteille on suoritettu laskenta eri tavoilla.

Ympäristöministeriö on julkaissut vuonna 2019 oppaan, jonka avulla rakennuksen elinkaariarviointia tulisi Suomessa tehdä. Ympäristöministeriön julkaisun (2019, s.12) mukaan elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arviointia voidaan tehdä kaikille rakennustyypeille ja sitä voidaan soveltaa sekä uudis- että korjausrakentamiseen. Elinkaariarviointia on suunniteltu tehtäväksi yhtäaikaaisesti rakennuksen energiatehokkuusarvioinnin kanssa. Arviointimenetelmää ei voida kuitenkaan suoraan soveltaa infrahankkeiden käyttöön, sillä Ympäristöministeriön julkaisu on laadittu talonrakentamisen ominaispiirteiden pohjalta. Rakentamisen vähähiilisyys arviointiin lasketaan mukaan rakennus, tontin rakenteet sekä keskeinen osa taloteknisistä järjestelmistä.

Elinkaariarviointi mahdollistaa ympäristövaikutusten arvioinnin aikaisessa vaiheessa rakennushanketta ja toimii päätöksenteon tukena (WorldGBC. 2019, s.28). Arvioinnilla pyritään huolellisen ennakkosuunnittelun avulla pienentämään rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä (Ympäristöministeriön julkaisu: 22. 2019, s.11). Ruuskan & Häkkisen (2014, s.327) mukaan elinkaariarviointia tulisi tehdä mahdollisimman aikaisessa vaiheessa hanketta, sillä päästöihin suurimmin vaikuttavat suunnitteluvalinnat tehdään myös silloin. Valitun tontin maaperä saattaa suurilta osin vaikuttaa hankkeen todellisiin päästöihin, joten arviointia tulisi tehdä jo silloin, kun potentiaalisia tonttivaihtoehtoja vertaillaan. Suunnittelijoilla tulisi olla ajankohtaista tietoa rakennusosien päästöistä ja esimerkiksi siitä, miten suuri vaikutus runkomateriaalin valinnalla on koko hankkeen päästöihin.

Yhä yleisemmin rakennushankkeissa hyödynnettävää tietomallintamista voidaan käyttää myös rakentamisen vähähiilisyys arvioinnin apuna. Tietomalleja hyödyntävien LCA- laskentaohjelmien avulla voidaan suunnittelussa reaaliajassa vertailla erilaisten ratkaisujen tai muuttuneiden rakenteiden vaikutusta rakennuksen ympäristövaikutuksiin (WorldGBC. 2019, s.28). Elinkaariarviointia onkin tarkoitus tehdä hankesuunnittelun ja rakennesuunnittelun lisäksi koko hankkeen ajan ja sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi hankintojen teossa.

4.2 Rakennuksen elinkaaren vaiheet laskennassa

Suomessa käytettävä Ympäristöministeriön arviointimenetelmä perustuu Level(s)-menetelmään, jonka Euroopan komissio on laatinut (Ympäristöministeriön julkaisu: 2019, s.11). Level(s) on vapaaehtoinen raportointikehys, jonka avulla rakennusten kestävä kehitystä erityisesti ekologisesta näkökulmasta pyritään edistämään. Olemassa olevia standardeja hyödyntäen Level(s) mahdollistaa rakennetun ympäristön elinkaariarvioinnille yhtenäisen lähestymistavan Euroopan Unionissa. (European Commission. 2020)

Rakennushanke jaetaan arvioinnissa neljään eri vaiheeseen: tuotevaiheeseen, rakentamiseen, käyttövaiheeseen ja elinkaaren loppuvaiheeseen. Tuotevaihe ja rakentaminen muodostavat yhdessä ennen rakennuksen käyttöä syntyviä päästöjä kuvaavan moduulin A, moduuli B kuvaa käytönaikana ja moduuli C käytön jälkeen syntyviä päästöjä. Jokainen näistä vaiheista on jaettu pienempiin osiin, jotka on kuvattu standardeissa EN 15643-2 ja EN 15804. Arvioinnissa otetaan huomioon myös moduuli D, joka kuvaa rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle jääviä hyötyjä ja haittoja. Moduulit A-C ja niiden sisältö on kuvattu taulukossa 2. (Ruuska & Häkkinen. 2014, s.318; SFS-EN 15804. 2019, s.13; Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.14)

Taulukko 2: Rakennushankkeen jako elinkaaren vaiheisiin perustuviin moduuleihin. (Perustuu lähteisiin Ruuska & Häkkinen. 2014, s.318; SFS-EN 15804. 2019, s.13; Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.14)

A 1-3 TUOTEVAIHE			
A1	Raaka-aineen hankinta	A2	Kuljetus valmistukseen
A3	Tuotteen valmistus		
A 4-5 RAKENTAMINEN			
A4	Kuljetus työmaalle	A5	Työmaatoiminnot
B KÄYTTÖVAIHE			
B1	Tuotteen käyttö rakennuksessa (ei arvioida)	B2	Kunnossapito (ei arvioida)
B3	Korjaukset	B4	Osien vaihto
B5	Laajamittaiset korjaukset	B6	Energian käyttö
B7	Veden käyttö (ei arvioida)		
C ELINKAAREN LOPPU			
C1	Purkaminen	C2	Kuljetus jatkokäsittelyyn
C3	Purkujätteen käsittely	C4	Purkujätteen loppusijoitus
D LISÄTIEDOT			

Moduulit A1-3 kuvaavat rakennustuotteiden valmistuksesta syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Arviointi aloitetaan tekemällä määräluettelo tuotteista, joita on suunniteltu rakennukseen, tontille ja keskeisiin taloteknisiin järjestelmiin. Arviointiin otetaan mukaan myös mahdollinen työmaalla syntyvä ylijäämä tai hukka. Laskennassa arvioidaan esimerkiksi perustukset, pintarakenteet, tuennat ja vahvistukset sekä lämmitys- ja sähköjärjestelmät. Arvioinnissa ei oteta huomioon kasvillisuutta tai tontin maaperään, kasvillisuuteen tai vesistöön tehtävien muutosten ilmastovaikutuksia. Arviointiin sisältyvät ja sen ulkopuolelle jäävät rakennusosat on esitetty tarkemmin liitteessä A sivulla 65 (Ympäristöministeriön julkaisu. 2019, s.18, 43). Ympäristöministeriön julkaisussa on myös esitetty rakennusosaluettelo Talo2000 -nimikkeistöön perustuen.

Jos rakentamisessa käytetään muilta työmailta ylijääneitä tuotteita tai uusiokäytetään vanhoja rakennusosia, jätetään nämä laskennan ulkopuolelle. Tämä poissulku edellyttää, että uudelleenkäytettävät tuotteet ovat olleet mukana rakennuksen suunnittelussa. Kun arviointia tehdään hankkeen varhaisessa vaiheessa, voidaan tiettyjen taloteknisten järjestelmien hiilijalanjäljen arviointiin käyttää Ympäristöministeriön julkaisussa esitettyjä taulukkoarvoja, jotka on esitetty liitteessä A sivulla 68 (Ympäristöministeriön julkaisu. 2019, s.44). Kun järjestelmät tarkentuvat, käytetään edellä mainittuja rajauksia. (Ympäristöministeriön julkaisu. 2019, s.17-18)

Rakentamisvaihetta kuvaavat moduulit A4 ja A5. Moduuli A4 sisältää rakentamisvaiheen kuljetuksien hiilijalanjäljen, jossa otetaan huomioon kaikkien rakennustuotteiden, materiaalien ja maamassojen kuljetukset rakennustyömaalle. Arvioinnissa huomioidaan myös mahdolliset välivarastointi- tai esivalmistuspaikat. Kuljetuksien päästöjen laskennassa otetaan huomioon myös rakennusjätteiden kuljetukset jätteenkäsittelyyn tai välivarastointiin, mutta rakennuskoneiden kuljetuksia tai rakennustyömaan työntekijöiden työmatkoja ei huomioida. Kuljetusten päästöjen laskenta tehdään jokaiselle kuljetukselle erikseen, ja erilaisille kuljetusmuodoille ja polttoaineille käytetään tyyppillisiä päästökertoimia. Laskennassa voidaan myös hyödyntää liitteessä A sivulla 69 (Ympäristöministeriön julkaisu. 2019, s.45) esitettyjä taulukkoarvoja. (Ympäristöministeriön julkaisu. 2019, s.23)

Moduulin A5 esittämän työmaan hiilijalanjäljen laskenta suoritetaan rakennustyömaalla kuluvan ostoenergian ja polttoaineiden päästöjen avulla. Arvioinnissa huomioidaan rakennustöiden, työmaan valaistuksen, kuivatuksen, lämmityksen, toimisto- ja taukotilojen käytön sekä muiden vastaavien toimintojen aiheuttama energiantarve. Jos työmaatilat, esimerkiksi toimisto- ja sosiaalityilat toimivat myös muiden kuin arvioinnin kohteena olevan työmaan tiloina, jaetaan yhteisessä käytössä olevien tilojen hiilijalanjälki suhteessa

rakennushankkeiden bruttopinta-alaan. Laskennassa voidaan käyttää liitteen A sivun 69 taulukkoarvoja. (Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.27)

Moduulit B1-7 kuvaavat rakennuksen käyttövaihetta, mutta moduuleja B1, B2 ja B7 ei arvioida laskennassa. Rakennukseen tehtävät korjaukset, joita kuvaavat moduulit B3-5, otetaan huomioon. Näiden moduulien hiilijalanjälki lasketaan huomioimalla uusien rakennustuotteiden valmistus ja kuljetukset sekä korjausvaiheen töiden hiilijalanjälki. Näiden laskenta suoritetaan samalla tavalla kuin moduuleissa A1-5. Moduulin B4 laskennassa arvioidaan rakennuksen käytön aikana vaihdettavien rakennustuotteiden määrä ottamalla huomioon kaikki tuotteet, joiden käyttöikä on rakennuksen tavoiteltua ikää lyhyempi. Vaihtojen arviointi tehdään joko liitteessä A sivulla 69 esitettyjen taulukkoarvojen mukaan tai liitteessä A sivulla 70 (Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.20) esitetyn laskukaavan avulla. Korjausrakentamisessa käytettävien rakennustuotteiden oletetaan aina olevan uusia. Laajamittaisille korjaushankkeille, joita kuvaa moduuli B5, tehdään oma, erillinen arviointi, eikä korjaushankkeiden hiilijalanjäljen laskentaa tehdä takautuvasti rakennuksen aiemmille työmaavaiheille. (Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.19, 24, 28, 36)

Moduulin B6 eli rakennuksen käyttämän energian hiilijalanjälki lasketaan kertomalla rakennuksen laskennallisen ostoenergian kulutus eri energiamuotojen päästökertoimilla. Rakennuksen laskennallinen ostoenergiankulutus määritetään Ympäristöministeriön 20.12.2017 antaman rakennuksen energiatehokkuuden asetuksen mukaan. Jos asetuksen mukaista energiaselvitystä ei ole laadittu, voidaan käyttää asetuksessa annettua laskentamenetelmää ostoenergiankulutuksen arviointiin. Kullekin energiamuodolle on määritetty päästökertoimet, jotka on esitetty liitteessä A sivulla 71 (Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.46). Päästökertoimissa on huomioitu päästöjen laskevan Suomen energia- ja ilmastostrategian toimenpiteiden mukaisesti. (Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.29)

Elinkaaren loppumista eli rakennuksen purkamista ja siihen liittyviä toimintoja kuvaavat moduulit C1-4. Purkutyömaan energian hiilijalanjälki, jota kuvaa moduuli C1, lasketaan samalla tavalla, kuin uudisrakentamisen ja korjausrakentamisen työmaaenergian hiilijalanjälki. Moduuliin C2 sisältyvät kaikki kuljetukset purkupaikalta uudelleenkäyttöön, kierrätykseen tai jätteenkäsittelyyn. Mahdolliset välivarastointi- tai jatkokäsittelypaikat huomioidaan laskennassa. Kulkuetäisyydet lasketaan arviointihetkellä toimivien jätteenkäsittely-, kierrätys- ja uudelleenkäyttölaitosten sijaintien mukaan. Jätteenkäsittelyn ja loppusijoituksen hiilijalanjäljen arviointi (moduulit C3 ja C4) tehdään liitteen A sivulla 69 taulukoitujen arvojen mukaan tai laskemalla kunkin materiaali-jakeen jätteenkäsittelyn ja lop-

pusijoituksen hiilijalanjälki. Laskennassa arvioidaan ensin purkuvaiheessa syntyvien jätemateriaalien määrä, joka on sama kuin rakennuksen valmistumisvaiheessa riippumatta siitä, kuinka paljon vaihtoja tai korjauksia elinkaaren aikana on tehty. (Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.21)

Hiilikädenjälkeä ovat ne ilmastohyödyt, joita rakennuksen elinkaaren aikana on mahdollista saavuttaa ja joita ei syntyisi ilman rakennushanketta. Tällaisia ilmastohyötyjä ovat esimerkiksi rakennusosien ja -materiaalien uudelleenkäytön ja kierrätyksen avulla vältyt uusien tuotteiden tuotannon päästöt, jotka otetaan elinkaariarvioinnissa huomioon modulissa D. Muita ilmastohyötyjä synnyttävät myös rakennuksessa tuotettu ylimääräinen uusiutuva energia (moduuli B) sekä rakennusmateriaaleihin varastoitunut eloperäinen hiili sekä elinkaaren aikana niihin mahdollisesti sitoutuva hiilidioksidi (moduulit A-C). Vaikka hiilikädenjälki otetaan elinkaariarvioinnissa huomioon, ei sitä vähennetä hiilijalanjäljestä. (Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.30)

5. LASKENNAN KOHTEET JA SUORITTAMINEN

5.1 Laskennan kohteet

Laskennan kohteena on kohdeyrityksen kolme jo valmistunutta betonirunkoista asuinkerrostaloa sekä yksi rakenteilla oleva puurunkoisilla moduuleilla toteutettava asuinkerrostalo. Kohteiden tiedot on esitetty taulukossa 3.

Kaikki kohteet sijaitsevat Pirkanmaan alueella, ja kohteet 1 AB, 1 C ja 3 ovat valmistuneet joulukuussa 2019 ja kohteen 2 suunniteltu valmistuminen on kesäkuussa 2020. Kohde 3 toimii tavallisen asuinkerrostalon sijasta myös ryhmäkotina. Asuntojen lisäksi rakennuksessa on esimerkiksi monitoimitila, toimistoja, takkahuone sekä juhlatila. Tässä tutkimuksessa kohdetta 3 käsitellään kuitenkin pääasiassa asuntorakennuksena. Kohteet 1 AB, 1 C ja 3 edustavat hyvin kohdeyrityksen tavanomaista tuotantoa, ja kohde 2 täysin erilaista, uudempaa tuotantotapaa.

Nämä neljä hanketta valittiin tämän tutkimuksen kohderakennuksiksi, sillä niiden pääasialliset runkomateriaalit poikkeavat toisistaan. Kohteiden 1 AB ja 1 C pääasiallinen runkomateriaali on betoni, ja välipohjat on toteutettu pääsääntöisesti paikalla valettuina teräsbetonilaattoina. Ulkoseinien rakennetyyppejä ovat betonisandwich-elementit sekä sisäkuorielementit, joiden julkisivut on toteutettu muurauksella. Kohteessa 3 ulkoseinät on pääasiassa toteutettu lämpöeristettyinä sisäkuorielementteinä ja tiiliverhouksella. Rungon pääasiallinen rakennusmateriaali on betoni ja välipohjien pääasiallinen rakennetyyppi on ontelolaatta. Kohteissa 1 AB, 1 C ja 3 kantavat väliseinät ovat betonirakenteisia.

Kohde 2 poikkeaa muista kohteista, sillä rakennus koostuu pääasiassa puisista moduuleista, jotka sisältävät runkorakenteiden lisäksi myös joitakin varusteita ja pintamateriaaleja. Moduulien avulla toteutettu asennustapa on myös syynä taulukossa 3 esitetyle rungon lyhyelle nostoajalle. Kohteessa 2 pääosa sekä välipohjista että ulkoseinistä on toteutettu puurankaisina. Koska kohde 1 koostuu kahdesta erillisestä rakennuksesta, suoritetaan laskenta sille kahdessa osassa, kummallekin rapulle AB ja C erikseen. Laskentaohjelma tukee tätä valintaa, sillä laskentaan pystytään syöttämään vain yksi rakennus kerrallaan. Näin voidaan myös vertailla kaikkia kohteita keskenään, koska niiden suuruusluokat vastaavat toisiaan paremmin.

Kaikissa kohderakennuksissa lämmitysenergiamuotona on kaukolämpö. Suurin kaukolämmönkulutus on kohteella 3 ja pienin kohteella 2. Kohteet 1 AB ja 1 C kuuluvat asuinkerrostalojen energialuokkaan C ja kohde 2 luokkaan B. Kohteen 3 energialuokka on

määritelty majoitusliikerakennusten mukaan B:ksi, mutta asuinkerrostalojen vertailutalossa se kuuluisi luokkaan D.

Taulukko 3: Laskennan kohteena olevat rakennukset sekä niiden ominaisuudet.

	Kohde 1		Kohde 2	Kohde 3
	AB	C		
Bruttoala m2	3868	3034	3467	3043
Kerrostien ja rappujen lukumäärä	2 rappua, 4 maanpäällistä kerrosta, 1 maanalainen	1 rappu 6 maanpäällistä kerrosta	1-rappuinen 5-kerroksinen talo.	1-rappuinen, 4-kerroksinen talo
Asuntoja yht.	51	55	64	60
Rakentamisen aloitusajan-kohta	Tammikuu 2018		Kesäkuu 2019	Marraskuu 2018
Runkovaiheen kesto	8 vko	6 vko	1 vko	7 vko
Alapohjan rakennetyyppi	Paikallavalettu betonilaatta 60% ontelolaatta 40%	Ontelolaatta	Paikallavalettu betonilaatta	Ontelolaatta 90% Paikallavalettu betonilaatta 10%
Välipohjan rakennetyyppi	Paikallavalettu teräsbetonilaatta		Puu 85% Ontelolaatta 10% Pv betonilaatta 5%	Ontelolaatta 80% Valubetonilaatta 20%
Kantavat sisäseinät	Betoni		Puu 90% Betoni 10%	Betoni
Pääasiallinen ulkoseinän rakennetyyppi	Sandwich- elementti/ Sisäkuorielementti: betoni ja mineraalivilla		Puu 90% Sandwich- elementti, betoni 10%	Sandwich- elementti/ Sisäkuorielementti: betoni ja mineraalivilla
Julkisivumateriaalit	Ohutrappaus >50%, Tiiliverhoilu <50%		Puuverhoilu 90% Ohutrappaus 10%	Tiiliverhoilu 70% Ohutrappaus 30%
Yläpohja	Betonilaatta, jonka päällä ristikkorakenne		Puu 60% Betonilaatta 40%	Ontelolaatta 75% Puu 25%

5.2 One Click LCA: työkalun esittely

Tämän tutkimuksen empiirisessä osiossa tehtävä hiilijalanjälkilaskenta suoritetaan Binova Ltd:n kehittämällä One Click LCA -laskentaohjelmalla, joka perustuu aiemmin käsitelyyn Ympäristöministeriön ohjeeseen. Laskentaohjelma tarjoaa erilaisia työkaluja hiilijalanjäljen laskentaan hankkeen eri vaiheissa. Tässä tutkimuksessa keskitytään kolmeen laskentaohjelman eri hankevaiheissa tarjoamaan laskentamenetelmään: alustavaan laskentaan, tietomalliin pohjautuvaan laskentaan ja tarkkaan laskentaan. Kaikki laskennat toteutetaan erillisinä, eivätkä lopulliset tulokset ole useamman laskentamenetelmän summia.

Kaikkien laskentamenetelmien lähtötiedot ja käyttö hankkeen eri vaiheissa on esitetty kootusti kuvassa 5. Näiden lähtötietojen avulla One Click LCA arvioi rakennuksen materiaalien hiilijalanjäljen, ja elinkaaren hiilijalanjäljen määrittämiseksi kaikkia laskentamenetelmiä käytettäessä ohjelmaan syötetään myös tiedot rakennuksen vuotuisesta energiankulutuksesta ja lämmitetystä nettoalasta. Jos energiatodistus on laadittu, voidaan luvut ottaa suoraan siitä. Rakennukselle määritetään myös arviointijakso rakennuksen käyttöiän mukaan. Käyttöikä voidaan käyttää 50 vuotta, mikäli sitä ei pystytä tarkasti määrittämään.

Alustavaa eli karkeaa laskentaa pystytään tekemään heti, kun rakennuksesta tiedetään kokonaisala ja kerrosmäärä. Alustavassa laskennassa hyödynnetään Carbon Designer -työkalua, jonka avulla rakennukselle luodaan karkeiden lähtötietojen avulla vertailutaso. Vertailutasolle valitaan materiaalit esimerkiksi ulkoseinille, välipohjille, ulkoverhoukselle ja muille rakenneosille. Hankkeen alkuvaiheessa tätä työkalua voidaan hyödyntää päätöksenteossa, sillä se tarjoaa mahdollisuuden optimoida suunnitelmaa eri tavoin. Ohjelman avulla voidaan reaaliajassa testata vaikuttaako jonkin rakennusosan materiaalin vaihto rakennuksen päästöihin positiivisesti vai negatiivisesti.

Alustavassa laskennassa kokonaisalan ja kerrosmäärän syöttämisen jälkeen rakennusosien määriä pystytään tarkentamaan. Jos kyseessä on monimutkaisen muotoinen rakennus, pyritään leikkaa ja liimaa -tekniikalla muodostamaan rakennuksesta suorakulmion muotoinen, sillä laskentaohjelma tunnistaa symmetrisen muodon parhaiten. Tarkennettujen mittojen avulla laskentaohjelma laskee rakennusosien määrät uudelleen. Jos rakennuksen tarkat mitat ja rakennusosien määrät ovat tiedossa, pystytään ne korjaamaan rakennuksen luontivaiheessa.



Kuva 5: Laskentamenetelmien käyttö rakennushankkeen eri vaiheissa ja laskennan vaatimat lähtötiedot. Kaikissa laskennoissa tarvitaan lisäksi tiedot energiankulutuksesta, arviointijakson pituudesta ja lämmitetystä nettoalasta.

Kun rakennushanke etenee ja lähtötietojen määrä kasvaa, voidaan laskennassa siirtyä seuraavalle tasolle, tietomallin avulla toteutettavaan laskentaan. IFC -muotoinen tietomalli tuodaan laskentaohjelmaan Simplebim- ohjelmistolla, johon asennettava One Click LCA- liitännäinen mahdollistaa tietomallin tuonnin suoraan laskentaohjelmaan. Kun tietomalli on tuotu laskentaohjelmaan, ohjelma erottelee tietomallista tunnistamansa datan, sekä datan, jota se ei pysty lukemaan. Tietomallin tuonnin jälkeen tunnistamaton data kartoitetaan manuaalisesti, mikä tarkoittaa, että käyttäjä yhdistää tunnistamattomat materiaalit parhaiten laskentaohjelman kirjastoa vastaaviin materiaaleihin.

Siinä missä alustava laskenta perustuu rakennuksen geometrian pohjalta tehtyihin oletuksiin materiaalmääristä ja tietomalliin pohjautuva laskenta tietomallissa esitettyihin materiaaleihin ja määriin, perustuu tarkka laskenta todellisiin materiaalmääriin. Tarkka laskenta voidaan toteuttaa, kun todelliset materiaalmäärät ovat tiedossa, esimerkiksi kun urakkalaskelma tai muu tarkka listaus materiaaleista on laadittu. Tarkka laskenta voidaan toteuttaa täyttämällä materiaalit ja määrät manuaalisesti rivi riviltä laskentaohjelmaan tai tiedot voidaan tuoda Excel -taulukon avulla. Jos tiedot tuodaan taulukon avulla, laskentaohjelma käsittelee datan samalla tavalla kuin tietomallin tuonnissa, eli se erottelee tunnistamansa datan ja tunnistamattomat materiaalit, jotka käyttäjän pitää itse kartoittaa.

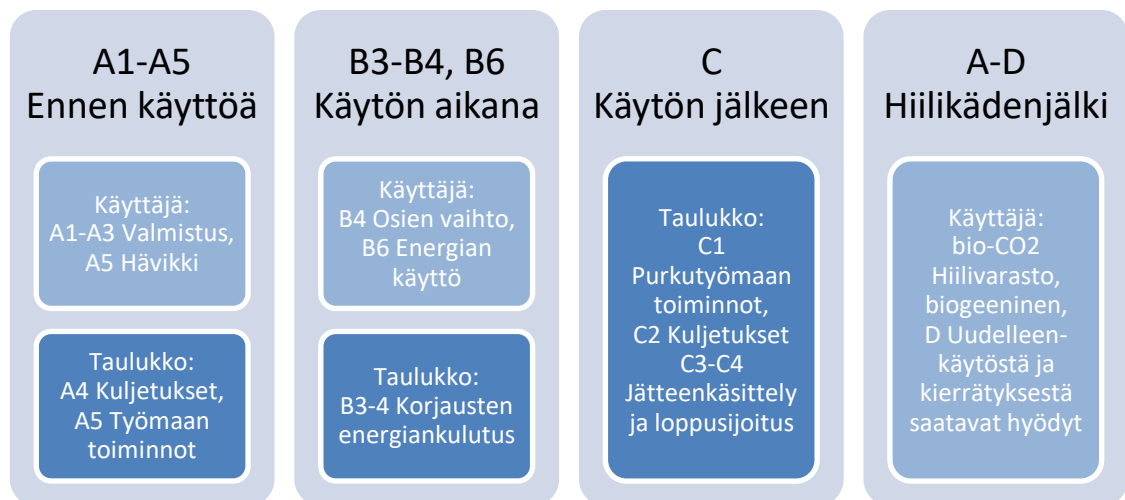
Kun materiaalitiedot ja tiedot energiankulutuksesta on syötetty ohjelmaan, antaa laskentaohjelma tuloksista erilaisia tulosteita. One Click LCA määrittää materiaalipäästöjen perusteella materiaalien hiilijalanjäljen vertailuarvon asteikolla A-G. Vertailuarvo voidaan määrittää perustuen eri alueiden tietokantoihin ja rakennustyyppeihin. Ohjelma tarjoaa

oletuksena vertailuarvon määrittämistä vertailemalla rakennusta Suomen asuntorakentamiskantaan. Suomen asuntorakentamisen otoskoko on tällä hetkellä 62 projektia, ja nämä projektit on seulottu niin, että laskentatulokset ovat johdonmukaisia, täydellisiä ja luotettavia. Poikkeavia arvoja sisältävät projektit on jätetty pois otoksesta. Materiaalien hiilijalanjälki ilmoitetaan yksikössä kg CO₂e/m², ja Suomen vertailukannassa arvosana A merkitsee pienempiä päästöjä kuin 250 kg CO₂e/m² ja huonoin arvosana G yli 550 kg CO₂e/m². Materiaalien hiilijalanjälki kuvaa kaikkia materiaaleihin liittyviä päästöjä, jotka syntyvät moduuleissa A1-A4, B4-B5 ja C1-C4.

Vertailuarvojen lisäksi ohjelma antaa tulosten esimerkiksi siitä, miten materiaalien hiilijalanjälki jakautuu eri rakennusosille. Laskentaohjelma jakaa materiaalit oletuksien tai käyttäjän määritysten mukaan kuuteen eri pääluokkaan, jotka ovat:

1. Perustukset ja maanalaiset rakenteet
2. Pystyrakenteet ja julkisivu
3. Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit
4. Muut rakenteet ja materiaalit (mm. ikkunat, ovet ja pintamateriaalit)
5. Alue- ja piharakentaminen
6. Rakennuksen talotekniikka

Lisäksi tulossivulla One Click LCA esittää rakennuksen elinkaaren kokonaispäästöjen jakautumisen moduuleille A-D. Elinkaaren hiilijalanjälki on moduulien A-C summa. Ohjelma käyttää syötettyjä tietoja ja Ympäristöministeriön julkaisussa esitettyjä taulukkoarvoja päästövaikutusten arviointiin eri moduuleissa kuvassa 6 esitetyillä periaatteilla. Suurin vaikutus käyttäjän määrittämällä arvoilla on tulosten kannalta moduuleihin A ja B, kun taas moduuliin C käyttäjän syöttämällä tiedoilla ei ole vaikutusta.



Kuva 6: One Click LCA -laskentaohjelman tulosten määrittäminen käyttäjän syöttämien tietojen ja taulukkoarvojen perusteella.

Laskentaohjelma listaa tulossivulla myös eniten hiilijalanjäljen suuruuteen vaikuttavat materiaalit ja tarjoaa niille ympäristötehokkaita vaihtoehtoja ohjelman omasta materiaali kirjastosta. Lisäksi ohjelma tarjoaa erilaisia kaavioita, joissa on visuaalisesti esitetty päästöjen jakautuminen esimerkiksi rakennusosittain ja elinkaarivaiheittain.

Tulosten luotettavuuden arviointia pystytään tekemään laskentaohjelman tarjoamalla työkalulla, joka antaa laskennasta arvosanan sen mukaan, miten kattava laskenta on ja miten se vertautuu muihin laskentoihin. Ohjelma määrittelee esimerkiksi tavanomaisen vaihteluvälin vaakarakenteiden massalle, ja mikäli laskennan tulos poikkeaa selvästi tästä, ohjelma huomauttaa siitä. Paras arvioinnin antama arvosana on A, ja mitä enemmän poikkeavuuksia laskelmassa on, sitä huonompi arvosana on. Lisäksi ohjelma listaa mahdolliset puuttuvat pakolliset ja suositellut elementit. Elementtien puute ei kuitenkaan vaikuta laskennan saamaan arvosanaan, vaan puutoslistan tarkoitus on toimia laskijan apuvälineenä.

5.3 Laskennan suorittaminen

Tässä luvussa käsitellään empiirisen osion toteutus, tehdyt valinnat ja oletukset. Kohteiden keskinäisen vertailun lisäksi laskennassa pyritään simuloimaan todellista rakennushanketta niin, että alustava laskenta suoritetaan sillä tiedon määrällä, joka hankkeen alkaessa käytössä on. Laskenta aloitettiin karkean laskennan työkalulla ja koska haluttiin tutkia myös alustavan laskennan toimintoja, laskentaa tarkennettiin niin, että rakenteiden määrät korjattiin ohjelman arvioista todellisiin arvoihin ja oikeat rakennetyypit syötettiin ohjelmaan.

Alustavassa laskennassa ohjelmaan syötettiin alapohjien, välipohjien, yläpohjien, ulkoseinien, kantavien väliseinien, parvekkeiden ja ikkunoiden pinta-alat, jotka määritettiin tietomallien avulla. Lisäksi ohjelmaan syötettiin maanalaisten seinien ja väestönsuojan pinta-alat sekä portaikkojen korkeus. Tämän jälkeen laskentaa tarkennettiin rakennetyyppien osalta niin, että piirustusten ja tietomallin avulla laskettiin rakenteiden eri rakennetyyppien osuudet rakenteen kokonaismäärästä.

Kohteen välipohjien pääasiallinen rakennetyyppi voi olla esimerkiksi paikalla valettu teräsbetoni laatta, mutta jokin osa välipohjasta on toteutettu ontelolaatoilla. Jos välipohjien yhteenlaskettu pinta-ala olisi yhteensä 1996 m², tekee laskentaohjelma oletuksen, että 100% tästä pinta-alasta on paikalla valettua teräsbetoni laattaa. Tämä oletus korjataan syöttämällä ohjelmassa valmiiksi määritetyille välipohjatyypeille prosenttiosuudet, jotka tässä esimerkissä voisivat olla esimerkiksi valubetoni laatta 81% ja ontelolaatta 19%.

Muita etukäteen ohjelmassa määritettyjä välipohjatyyppejä ovat esimerkiksi puupalkkirakenne ja CLT-rakenne. Niiden rakennetyyppien kohdalle, joita kohderakennuksessa ei ole käytetty, merkitään yksinkertaisesti 0%. Kuvassa 7 on esitetty laskentaohjelmassa tehtävä korjaus.

– Välipohjat	1996 m ²	Osuus 100%	153 tn	11%	Hiihi-intensiteetti
Ontelolaatta, 310 mm ?	1617 m ²	<input type="text" value="81"/>	120 tn	78%	74 kg
Valubetonilaatta ?	379 m ²	<input type="text" value="19"/>	33 tn	22%	88 kg
Välipohja, puupalkkirakenne, P2 R60 (3...8 krs.) (Apartment/office building) ?	0 m ²	<input type="text" value="0"/>	0 tn	0%	0 kg

Kuva 7: Kuvakaappaus OneClick LCA:n alustavan laskennan osuuksien täydennysnäköymästä.

Sama osuuksien jako tehtiin alapohjille, yläpohjille, parvekelaatoille, kantaville sisäseinille sekä ulkoseinille ja -verhouksille luvussa 5.1 esitettyjen materiaalien mukaan. Lisäksi ohjelmassa voidaan tarkentaa lattiamateriaalien, ikkunoiden ja sisäkattojen tyypit. Tämän jälkeen todelliset määrät ja rakennetyypit tallennettiin laskentaohjelmaan hankkeen perustasoksi.

Kaikissa laskentamenetelmissä rakennuksen energiankulutus ja lämmitetty nettoala syötettiin laskentaohjelmaan energiatodistuksen tietojen perusteella. Kohteessa 1 kummallakin rakennukselle oli laadittu omat energiatodistukset, joten laskenta suoritettiin normaalisti. Arviointijakson pituus määritettiin kaikille kohderakennuksille sen mukaan, mikä käyttöikä rakennuksen kantavalle rungolle oli rakennepiirustuksissa määritetty. Kaikkien tutkimuksen rakennuksien arviointijaksoksi määritettiin 100 vuotta.

Alustavan laskennan suorittamisen jälkeen testattiin ohjelman ominaisuuksia tuomalla rakennuksen IFC-muotoinen arkkitehtimalli laskentaohjelmaan. Laskentaohjelma muistaa tunnistamattoman datan kartoitukset ja esimerkiksi kohteiden 1 AB ja 1 C laskennassa, jossa erillisten rakennusten materiaalit ja rakennetyypit muistuttivat toisiaan ja missä tietomallit oli luotu samoilla säännöillä, jälkimmäisen kohteen tietomalliin tuonnissa ohjelma tunnistasi datasta suuremman osan kuin ensimmäistä kohdetta laskettaessa.

Laskentaohjelman tietomallista tunnistama data ja laskentaohjelman sen perusteella tekemät oletukset materiaaleista ja rakenteista tarkistettiin myös. Tietomalleista tunnistetun ja tunnistamattoman datan määrän suhteet vaihtelivat selkeästi kohteittain. Laskentaohjelma lajittelee tunnistamattoman datan sen perusteella, miten suuren osan tunnistamaton data päästöistä aiheuttaa. Laskentaohjelma antaa myös mahdollisuuden pois-

taa kaikki materiaalit ja rakenteet, joiden päästöt ovat alle 1% tai alle 0,1%. Tätä ominaisuutta ei kuitenkaan tietomallien tuonnissa käytetty, sillä haluttiin varmistua, ettei laskennan ulkopuolelle jää päästöjä. Esimerkiksi kuitenkin kohteen 3 tietomallissa oli kaksi tonnilla sijaitsevaa rakennusta, joita ei haluttu mukaan laskentaan. Tietomallissa rakennuksille ei ollut kuitenkaan määritetty kokoja tai materiaaleja, joten laskentaohjelma oletti näiden tietomallien osien aiheuttavan 0% päästöistä ja ne poistettiin kartoitusvaiheessa laskennasta kokonaan.

Koska tietomalliin pohjautuvassa laskennassa käytettiin arkkitehtimalleja, jouduttiin joidakin kohtia lisäämään materiaalilistaukseen taulukkoarvojen avulla. Tietomalleihin ei välttämättä ollut mallinnettu esimerkiksi perustuksia tai talotekniikan järjestelmiä, joten ne piti lisätä tietomallin tuonnin jälkeen laskentaan manuaalisesti. Perustuksien syöttämiseen käytettiin alustavassa laskennassa käytettyä bruttoalaa perustuvaa taulukkoarvoa perustuksille ja paalutuksille.

Alustavan laskennan ja tietomallin pohjalta tehdyn laskennan jälkeen suoritettiin tarkka laskenta. Tarkka laskenta suoritettiin hankkeiden urakkalaskelmien perusteella, ja sitä täydennettiin tarvittaessa rakennepiirustusten, tietomallin ja muiden hankkeesta saatavilla olevien tietojen avulla. Kohteen 2 osalta laskennan toteuttaminen oli haastavampaa, sillä kaikkien materiaalien määrien arviointiin ei pystytty suoraan hyödyntämään urakkalaskelmaa, sillä kaikkia moduulien sisältämiä materiaaleja ei ollut urakkalaskelmassa eritelty. Tästä syystä urakkalaskelmassa esitettyjen määrien tuonnin lisäksi on välipohjien, ulkoseinien ja kantavien väliseinien määrät laskettu kuvien ja tietomallin avulla, ja sitten tuotu laskentaan valmiina rakennusosina.

Urakkalaskelman materiaalitiedot tuotiin laskentaohjelmaan Excel -tiedostona. Tuotava tiedosto tehtiin laskentaohjelman tukemaan pohjamalliin, jossa materiaaleille linkitettiin luokka (class), määrä ja määrän yksikkö. Suurin osa laskentaohjelman materiaaleista esitetään tilavuuksien avulla, joten urakkalaskelmassa esitettyjä materiaalitietoja jouduttiin muokkaamaan, mikäli niitä ei ollut esitetty laskentaohjelman tukemassa yksikössä. Esimerkiksi väliseinien kipsilevyjen määrä oli ilmoitettu neliömetreinä, joten käytettävään taulukkoon erilliseen sarakkeeseen täytettiin urakkalaskelmassa esitetty määrä pinta-alana sekä erilliseen sarakkeeseen kipsilevyjen paksuus. Näin laskentaohjelma pystyi etsimään materiaalia omasta kirjastostaan tilavuuden avulla.

Ne materiaalit, jotka oli urakkalaskelmassa ilmoitettu kappalemäärinä tai juoksumetreinä, muutettiin tilavuuden yksiköihin tai siihen yksikköön, jota materiaalikirjasto tuki parhaiten. Esimerkiksi sahatavara oli ilmoitettava juoksumetriena sijaan tilavuuden yksikönä, mutta ikkunat ja ovet muutettiin kappalemäärästä pinta-aloiksi. Tämän tutkimuksen

empiirisen osion laskennassa Excel -taulukon yksiköt muunnettiin sen mukaan, mitä yksikköä laskentaohjelman kirjasto suosi parhaiten.

Laskentaohjelmaa varten luotavaa taulukkoa tehtäessä huomioitiin, että kaikkia urakalaskelman panoksia ei oteta hiilijalanjäljen laskennassa huomioon. Tällaisia poisjätettäviä materiaaleja olivat liitteessä A sivuilla 65-67 esitettyjen rakennusosien materiaalit, kuten esimerkiksi muotteihin ja väliaikaisiin kaiteisiin käytettävä sahatavara. Huomioon ei otettu myöskään kiinnikkeitä tai perustusten ulkopuolisia tukimuureja. Lähtötietojen rajaamisessa hyödynnettiin Ympäristöministeriön Talo 2000- nimikkeistöön pohjautuvaa ohjetta ja laskentaohjelman tukipalvelua.

Excel -taulukon tuonnin jälkeen kartoitettiin ne materiaalit, joita laskentaohjelma ei tunnistanut sekä tarkistettiin ohjelman tunnistamat materiaalit. Kartoitukseen ei pysty taulukon tuonnin jälkeen palaamaan, mutta ohjelma muistaa jo kartoitetut materiaalit. Jos esimerkiksi kartoitusvaiheessa huomaa, että ikkunat on ilmoitettu kappalemääränä, pystyy yksikkömuutoksen tekemään vain Excel -taulukossa, ja tämän jälkeen taulukko pitää tuoda ohjelmaan uudelleen.

Kartoituksen jälkeen täydennettiin rakennusmateriaalit -välilehdeltä talotekniikan arvot. Urakalaskelmassa oli esitetty asuinpinta-ala, jolle eri talotekniikan urakat oli laskettu, mutta tarkempia talotekniikan materiaaleja ei ollut eritelty. Annettu pinta-ala syötettiin taloteknisten järjestelmien kohdalle laskentaohjelmaan samalla tavalla kuin alustavassa laskennassa. Lisäksi perustuksiin lisättiin taulukkoarvojen avulla ne materiaalit ja rakenteet, joita urakalaskelmissa ei ollut eritelty. Tällaisia rakenteita olivat tyypillisesti esimerkiksi paalut, mitkä oli saatettu esittää urakalaskelmassa ainoastaan nimikkeellä ”maanrakennus, 1 erä”.

Kun kaikki materiaalit ja järjestelmät oli lisätty laskelmaan, linkitettiin materiaalit vielä oikeisiin Talo 2000 -nimikkeistön mukaisiin rakennusosiin niiltä osin, kun ohjelma ei ollut sitä tehnyt. Kun Excel -taulukossa luokaksi on esimerkiksi määriteltä *SLAB* ei laskentaohjelma tiedä onko kyse alapohjan, välipohjan vai yläpohjan materiaaleista. Tapauksissa, joissa ohjelma ei tunnista rakennusosia, se linkittää ne ensimmäiseen luokkaan eli maatoihin. Koska ohjelma kuitenkin ymmärtää luokkamäärittelyn perusteella, että *SLAB* kuvaa vaakasuuntaisia rakenteita, ei tämä vaikuta edellisessä luvussa esitettyyn pääluokkien ryhmittelyyn. Vaikutus näkyy myöhemmin tulosten tarkemmissa esittämissä tavoissa, mutta rakennusosien määrittely ei vaikuta kokonaistuloksiin.

Ohjelma laskee jokaiselle materiaalille lisäksi hukkaprocentin. Alustavassa laskennassa ja tietomallien kohdalla tätä hukkaprocenttia ei muutettu, koska lähtötietojen määrät perustuivat todellisiin määriin, ja näin ollen hukkaprocentti tuli ottaa mukaan materiaalien

kokonaismäärään. Tarkassa laskennassa lähtötietojen urakkalaskelmassa oli kuitenkin jo huomioitu materiaalien hukkaprosentit, joten tuotaessa materiaalmääriä laskentaohjelmaan, tuli nämä hukkaprosentit muuttaa arvon 0. Jos tätä korjausta ei olisi tehty, olisi materiaalien hukka huomioitu virheellisesti kahteen kertaan.

Kun rakennusosat oli linkitetty oikein ja hukkaprosentit korjattu, määriteltiin materiaaleille vielä käyttöiät. Ohjelma antaa rakennuksen runko- ja perustusrakenteille automaattisesti rakennuksen käyttöiän kanssa yhtä pitkän käyttöiän. Pintamateriaaleille ja muille osille ohjelma määrittää käyttöikäarviot. Näitä arvioita korjattiin tarvittaessa niin, että käyttöiät vastasivat RT-kortissa ”Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot” (RT 18-10922. 2008) esitettyjä rakenteiden ja materiaalien käyttöikäjä.

Päävaiheiden suorittamisen jälkeen kaikkien laskentatapojen tulosten luotettavuus ja kattavuus tarkistettiin työkalua hyödyntämällä. Alustavan laskennan tuloksille ohjelma antoi luotettavuuden arvosanaksi B, tietomalliin pohjautuvalle laskennalle keskimäärin arvosanan D ja tarkan laskennan tuloksille arvosanan B. Tarkan laskennan osalta kattavuuden ja luotettavuuden tarkistuksessa esiintyneet puuttuvat elementit täydennettiin ja tarkennettiin niin, ettei laskentaohjelma enää huomauttanut merkittävistä poikkeamista laskennassa. Saatujen tulosten luotettavuutta on käsitelty laajemmin luvussa 6.4.

6. LASKENNAN TULOKSET

6.1 Alustava laskenta

Laskenta suoritettiin kaikille kohteille luvuissa 5.2 ja 5.3 esitetyillä menetelmillä ja periaatteilla. Laskentaohjelma antaa kullekin suunnitelmalle elinkaaren hiilijalanjäljen ja materiaalien hiilijalanjäljen, jolle se antaa myös kirjaimella kuvatun vertailutason. Lisäksi laskentaohjelma antaa tuloksen siitä, miten elinkaaren hiilijalanjälki on jakautunut elinkaarivaiheisiin A, B ja C, ja miten ennen käyttöä syntyvät päästöt ovat jakautuneet eri rakennusosille. Alustavan laskennan avulla saadut tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4: Alustavan laskennan tulokset, joissa materiaalien hiilijalanjäljen kohdalla oleva kirjain (C-E) kuvaa sitä, miten rakennuksen materiaalien päästöt vertautuvat muihin hankkeisiin.

		Materiaalien hiilijalanjälki (A1-A4, B4-B5, C1-C4) kg CO ₂ e/m ²		Elinkaaren hiilijalanjälki (A-C summa) kg CO ₂ e/m ² /a		Päästöjen jakautuminen rakenteille (A1-A3)	
Kohde 1	AB	D	417	12,77	Ennen käyttöä (A) 3,85 Käytön aikana (B) 8,58 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -0,81	Perustukset ja maanalaiset rakenteet 20 % Pystyrakenteet ja julkisivu 27 % Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 33 % Muut rakenteet ja materiaalit 13 % Rakennuksen talotekniikka 7 %	
	C	E	436	13,01	Ennen käyttöä (A) 4,03 Käytön aikana (B) 8,65 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -0,81	Perustukset ja maanalaiset rakenteet 19 % Pystyrakenteet ja julkisivu 30 % Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 31 % Muut rakenteet ja materiaalit 13 % Rakennuksen talotekniikka 7 %	
Kohde 2		C	347	10,74	Ennen käyttöä (A) 3,39 Käytön aikana (B) 7,01 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -3,66	Perustukset ja maanalaiset rakenteet 28 % Pystyrakenteet ja julkisivu 18 % Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 33 % Muut rakenteet ja materiaalit 13 % Rakennuksen talotekniikka 8 %	
Kohde 3		E	443	18,73	Ennen käyttöä (A) 4,06 Käytön aikana (B) 14,33 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -0,93	Perustukset ja maanalaiset rakenteet 17 % Pystyrakenteet ja julkisivu 24 % Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 36 % Muut rakenteet ja materiaalit 16 % Rakennuksen talotekniikka 7 %	

Ensimmäisen sarakkeen taso perustuu sitoutuneen hiilen vertailuarvoihin (benchmark), joiden pohjana käytettiin tässä tutkimuksessa Suomen asuntorakennuskantaa. Taulukosta 4 nähdään, että kohde 3 ja kohde 1 C kuuluvat luokkaan E, kohde 1 AB luokkaan D ja kohde 2 luokkaan C. Kohteen 3 materiaalien hiilijalanjälki on suurempi kuin muiden kohteiden, ja kohteen 2 materiaalien hiilijalanjälki on pienin. Elinkaaren hiilijalanjäljen arvot, jotka on esitetty taulukon toisessa sarakkeessa korreloivat materiaalien hiilijalanjäljen kanssa.

Koko rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki koostuu moduulien A-C päästöjen summasta. Hiilijalanjäljen kokonaissumman vieressä on esitetty päästöjen jakautuminen moduuleille

rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa sekä hiilikädenjälki, jossa on huomioitu muun muassa rakennuksen ilmaston lämpenemistä hidastavat vaikutukset. Taulukosta 4 nähdään, että rakennuksissa 1 AB, 1 C ja 2 ennen käyttöä syntyvien päästöjen osuus on noin 30% ja käytön aikana syntyvien päästöjen osuus 66%. Kohteessa 3 moduulin A päästöjen osuus on 22% ja moduulin B 77%. Moduulissa A suurin osa päästöistä (noin 90%) syntyy materiaalien valmistuksesta ja moduulissa B suurin osa (noin 90%) syntyy energian käytöstä. Puurakenteisen kohteen 2 hiilikädenjälki on selkeästi betonirunkoisia taloja suurempi.

Viimeisessä sarakkeessa on esitetty päästöjen jakautuminen eri rakenteisiin. Betonirunkoisissa rakennuksissa (kohteet 1AB, 1C ja 3) suurin osa päästöistä on sitoutunut rakennukseen runkoon eli vaaka- ja pystyrakenteisiin. Rakennukseen runkoon on sitoutunut näissä kohteissa yhteensä noin 60% päästöistä. Perustuksiin on betonirunkoisissa kohteissa sitoutunut noin 20%. Muihin rakenteisiin ja materiaaleihin, joihin kuuluvat esimerkiksi portaikot, parvekkeet, ikkunat ja pintamateriaalit, on sitoutunut betonirunkoisissa rakennuksissa noin 15%. Rakennuksen talotekniikkaan on sitoutunut 7% päästöistä.

Puurunkoisessa kohderakennuksessa 2 päästöjen jakauma eroaa selvästi betonirunkoisista. Kuten betonirunkoisissa rakennuksissa, vaakarakenteisiin on sitoutunut suuri osa päästöistä. Pystyrakenteisiin ei ole kuitenkaan sitoutunut yhtä paljon päästöjä kuin muissa kohteissa, vaan lähes kolmasosa päästöistä on sitoutunut rakennuksen perustuksiin. Pystyrakenteisiin ja muihin rakenteisiin on sitoutunut yhteensä lähes kolmasosa ja rakennuksen talotekniikkaan 9% päästöistä.

Laskentaohjelma koostaa kustakin kohteesta merkittävimmät päästöjä aiheuttavat materiaalit. Kaikkien kohteiden hiili-intensiivisin materiaali on valmisbetoni, jonka osuus päästöistä vaihtelee 23 ja 30 prosentin välillä. Betonirunkoisissa kohteissa viisi merkittävintä materiaalia päästöjen kannalta ovat valmisbetoni, ontelolaatat, rakenneteräs, ikkunat ja betonirauditus. Betonirunkoisissa kohteissa 1 AB, 1 C ja 3 jakauma näiden materiaalien välillä on hyvin samankaltainen ja viisi merkittävintä materiaalia muodostavat yhteensä noin 70% päästöistä. Kohteissa 1 AB ja 1 C valmisbetonin osuus on noin 30% ja ontelolaattojen osuus noin 19%, kun taas kohteessa 3 valmisbetonin ja ontelolaattojen osuus on täysin sama, 26,1%.

Kohteessa 2 valmisbetonin osuus päästöistä on 23% ja neljä muuta merkittävää päästöjen aiheuttajaa ovat rakenneteräs, eristeet, ontelolaatta ja kipsilevy. Nämä materiaalit aiheuttavat yhteensä 54% päästöistä. Ikkunat, jotka betonirunkoisissa kohteissa ovat neljänneksi suurimpia päästöjen aiheuttajia, aiheuttavat puurunkoisessa rakennuksessa kuudenneksi eniten päästöjä.

6.2 Tietomallien pohjalta toteutettu laskenta

Tietomallien pohjalta tehdyn laskennan tulokset poikkeavat selkeästi alustavan laskennan tuloksista, ja näissä tuloksissa hajonta kohteiden välillä on suurempaa. Laskennan lähtötietona käytettiin arkkitehtimallia ja laskennan periaatteet on esitetty tarkemmin luvussa 5.3.

Tietomallin pohjalta toteutetun laskennan tulokset on esitetty taulukossa 5. Taulukon ensimmäisen sarakkeen kirjaimet kuvaavat laskentaohjelman vertailutasoa. Taulukosta nähdään, että kohteiden elinkaarien hiilijalanjäljen suuruusjärjestys ei ole sama kuin alustavassa laskennassa. Taulukosta 4 poiketen kohteen 2 materiaalien hiilijalanjälki on suurempi kuin kohteissa 1 AB ja 1 C. Kohteen 1 C materiaalien hiilijalanjälki on nyt pienin, mutta kohteen 3 materiaalien päästöt ovat edelleen suurimmat. Kohteiden 1 AB ja 1 C vertailutaso on parantunut ja kohteen 3 taso on pysynyt muuttumattomana eikä materiaalien hiilijalanjäljen suuruus ole juurikaan muuttunut. Kohteen 2 vertailutaso on kuitenkin laskenut tasolta C tasolle E ja materiaalien hiilijalanjälki on kasvanut yli 25%.

Taulukko 5: Tietomallin pohjalta toteutetun laskennan tulokset.

	Materiaalien hiilijalanjälki (A1-A4, B4-B5, C1-C4) kg CO ₂ e/m ²		Elinkaaren hiilijalanjälki (A-C summa) kg CO ₂ e/m ² /a		Päästöjen jakautuminen rakenteille (A1-A3)	
	AB	C				
Kohde 1	AB	C	326	11,44	Ennen käyttöä (A) 3,14 Käytön aikana (B) 7,96 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -1,05	Perustukset ja maanalaiset rakenteet 28 % Pystyrakenteet ja julkisivu 31 % Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 32 % Muut rakenteet ja materiaalit 0 % Rakennuksen talotekniikka 8 %
	C	C	320	11,45	Ennen käyttöä (A) 3,05 Käytön aikana (B) 8,06 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -0,96	Perustukset ja maanalaiset rakenteet 29 % Pystyrakenteet ja julkisivu 33 % Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 28 % Muut rakenteet ja materiaalit 1 % Rakennuksen talotekniikka 9 %
Kohde 2		E	435	11,09	Ennen käyttöä (A) 3,97 Käytön aikana (B) 6,79 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -7,39	Perustukset ja maanalaiset rakenteet 18 % Pystyrakenteet ja julkisivu 18 % Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 54 % Muut rakenteet ja materiaalit 4 % Rakennuksen talotekniikka 7 %
Kohde 3		E	438	18,43	Ennen käyttöä (A) 4,29 Käytön aikana (B) 13,81 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -3,23	Perustukset ja maanalaiset rakenteet 16 % Pystyrakenteet ja julkisivu 36 % Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 42 % Muut rakenteet ja materiaalit 0 % Rakennuksen talotekniikka 6 %

Koska kohteen 2 materiaalien hiilijalanjälki on kasvanut selvästi, on myös kohteiden 2 ja 1 AC elinkaarien hiilijalanjäljen välinen ero pienentynyt. Betonirunkoisten kohteiden 1 ja 3 rakennusten elinkaaren hiilijalanjälki on jakautunut elinkaaren vaiheille lähes samassa suhteessa kuin alustavan laskennan tuloksissa. Ainoastaan kohteen 3 hiilikädenjälki on kasvanut selvästi. Kohteen 2 puurunkoisen rakennuksen moduulien A ja B päästöjakauma on selvästi tasaantunut ja käytönaikaisten päästöjen osuus on vain 56% ja ennen käyttöä syntyvien päästöjen osuus 41%.

Myös päästöjen jakauma rakenteiden välillä poikkeaa selkeästi alustavan laskennan tuloksista. Kohteiden jakaumat eivät muistuta toisiaan, ja esimerkiksi päästöjen kannalta merkittävin rakenne vaihtelee kohteittain. Kohteen 1 kummassakin rakennuksessa päätöt ovat jakautuneet melko tasaisesti perustuksille, pystyrakenteille ja vaakarakenteille. Muille rakenteille ja materiaaleille laskentaohjelma on tietomallin pohjalta kartoittanut vain 0-1% osuuden. Rakennuksen talotekniikan osuus kohteen 1 rakennuksissa on 8-9%.

Kohteessa 2 vaakarakenteet aiheuttavat yli puolet päästöistä, ja pystyrakenteet sekä perustukset yhteensä noin 40%. Muiden rakenteiden osuus päästöistä on 4% ja rakennuksen talotekniikan osuus on 7%. Kohteen 3 jakauma muistuttaa jakaumaltaan eniten alustavan laskelman tuloksia. Vaakarakenteiden osuus päästöistä on 42%, pystyrakenteiden 36% ja perustusten 16%. Muiden rakenteiden ja materiaalien osuus päästöistä on 0% ja rakennuksen talotekniikan osuus 6%.

Tietomallin pohjalta toteutetun laskennan tuloksissa on enemmän hajontaa merkittävimpien materiaalien osalta kuin alustavassa laskennassa. Tuloksista pystytään kuitenkin erittelemään selvästi merkittävimmiksi päästöjen aiheuttajaksi kaikissa kohteissa betoni ja teräs sekä betonirunkoisissa kohteissa betonielementit. Kohteessa 3 ontelolaattojen osuus on kuitenkin pienentynyt ja vaikka kipsilevy sekä puutavara on lueteltu kohteessa 2 merkittäviin päästöihin, on niiden prosenttiosuus selvästi pienempi kuin alustavassa laskennassa.

6.3 Tarkka laskenta

Urakkalaskelman pohjalta luotu, todellisiin määriin perustuva tarkka laskenta on lähtötiedoiltaan ja tarkastelultaan laajin laskentamenetelmä. Laskennan periaatteet on esitetty aiemmin luvussa 5.3 ja laskennan tulokset on esitetty taulukossa 6 seuraavalla sivulla.

Tarkan laskennan tuloksissa on enemmän samankaltaisuuksia alustavan laskennan, kuin tietomallin pohjalta tehdyn laskennan kanssa. Vertailuarvot, jotka on esitetty taulukon ensimmäisessä sarakkeessa, ovat huonontuneet, mutta niiden suuruusjärjestys on alustavassa laskelmassa ja tarkassa laskelmassa yhtäläinen. Kohteiden 1 AB, 1 C ja 2 vertailuarvot ovat laskeneet alustavaan laskentaan verrattuna yhden tason. Rakennuksen 1 AB materiaalien hiilijalanjälki on kasvanut 12% ja rakennuksen 1 C 14%. Kohteen 2 hiilijalanjälki on kasvanut 14%. Kohteen 3 vertailuarvo on laskenut kaksi tasoa, ja kohteen materiaalien hiilijalanjälki on noussut 25% alustavaan laskentaan verrattuna.

Parhaiten vertailussa pärjänneiden kohteiden 1 AB ja 2 materiaalien hiilijalanjäljen välinen ero on pysynyt lähes samana kuin alustavassa laskennassa, kun taas kohteiden 1 AB ja 1 C välinen ero on kasvanut lähes 50%. Alustavaan laskentaan verrattuna materiaalien pienimmän hiilijalanjäljen ja suurimman hiilijalanjäljen ero on kasvanut merkittävästi, sillä kohteen 3 päästöt ovat kasvaneet selkeästi enemmän kuin kohteen 2 päästöt.

Taulukko 6: Tarkan laskennan tulokset.

		Materiaalien hiilijalanjälki (A1-A4, B4-B5, C1-C4) kg CO ₂ e/m ²	Elinkaaren hiilijalanjälki (A-C summa) kg CO ₂ e/m ² /a	Päästöjen jakautuminen rakenteille (A1-A3)
Kohde 1	AB	E	466	12,8
				Ennen käyttöä (A) 4,35 Käytön aikana (B) 8,11 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -1,34
Kohde 2	C	F	496	13,21
				Ennen käyttöä (A) 4,56 Käytön aikana (B) 8,31 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -1,59
Kohde 3		D	395	11,17
				Ennen käyttöä (A) 3,78 Käytön aikana (B) 7,06 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -3,79
Kohde 3		G	552	19,44
				Ennen käyttöä (A) 5,02 Käytön aikana (B) 14,07 Käytön jälkeen (C) 0,34 Hiilikädenjälki (A-D summa): -1,07
				Perustukset ja maanalaiset rakenteet 17 %
				Pystyrakenteet ja julkisivu 29 %
				Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 30 %
				Muut rakenteet ja materiaalit 16 %
				Alue- ja piharakentaminen 2 %
				Rakennuksen talotekniikka 6 %
				Perustukset ja maanalaiset rakenteet 15 %
				Pystyrakenteet ja julkisivu 32 %
				Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 29 %
				Muut rakenteet ja materiaalit 16 %
				Alue- ja piharakentaminen 2 %
				Rakennuksen talotekniikka 5 %
				Perustukset ja maanalaiset rakenteet 15 %
				Pystyrakenteet ja julkisivu 23 %
				Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 37 %
				Muut rakenteet ja materiaalit 11 %
				Alue- ja piharakentaminen 5 %
				Rakennuksen talotekniikka 8 %
				Perustukset ja maanalaiset rakenteet 16 %
				Pystyrakenteet ja julkisivu 34 %
				Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit 33 %
				Muut rakenteet ja materiaalit 9 %
				Alue- ja piharakentaminen 2 %
				Rakennuksen talotekniikka 6 %

Koko elinkaaren hiilijalanjälkeä kuvaavan kolmannen sarakkeen arvot ovat samassa suuruusjärjestyksessä kuin alustavassa laskelmassa. Suurin hiilijalanjälki on kohteella 3, kohteen 1 rakennusten elinkaaren hiilijalanjälki on samaa suuruusluokkaa ja kohteella 2 on pienin elinkaaren hiilijalanjälki. Päästöjen jakautuminen moduuleille A ja B muistuttaa kaikissa kohteissa alustavan laskennan tulosten jakaumaa, mutta ennen käyttöä syntyvien päästöjen osuus on noussut kaikissa kohteissa noin 4 prosenttiyksikköä alustavaan laskentaan verrattuna.

Kohteissa 1 AB, 1 C ja 2 ennen käyttöä syntyvien päästöjen osuus on keskimäärin 35%, ja pelkästään materiaalien valmistuksen osuus koko elinkaaren hiilijalanjäljestä on keskimäärin 30%. Kohteessa 3 käytönaikaisten päästöjen osuus on suurempi ja ennen käyttöä syntyvien päästöjen osuus on noin 26%. Materiaalin valmistuksen päästöt ovat kohteessa 3 yhteensä 24%. Puurunkoisen rakennuksen hiilikädenjälki on keskimäärin noin kolminkertainen betonirunkoiseen rakennukseen verrattuna.

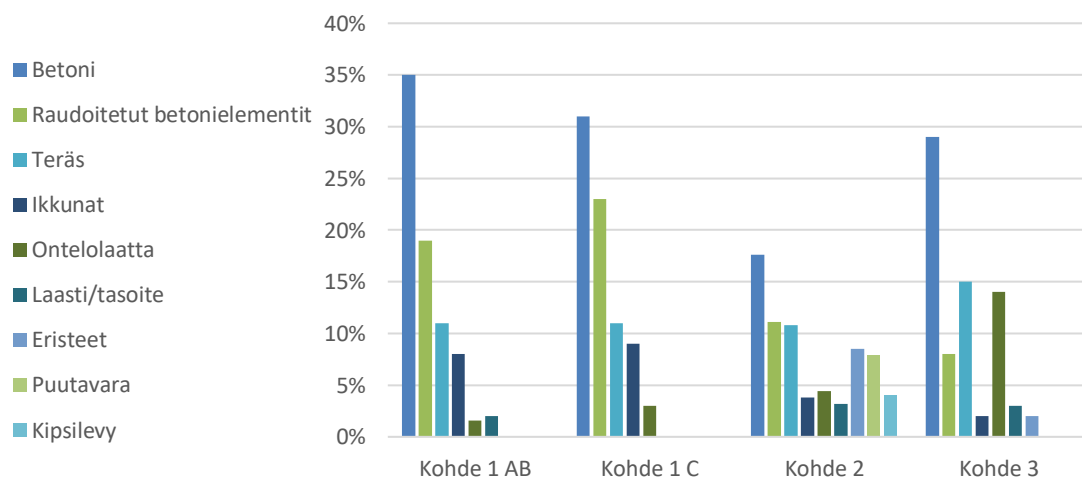
Viimeisestä sarakkeesta nähdään, että tarkan laskennan vaiheessa rakenteisiin on lisätty uusi elementti: alue- ja piharakentaminen. Rakennuksen osa on pystytty ottamaan

mukaan tarkan laskennan vaiheeseen, koska lähtötiedot ovat olleet tarkemmat. Kuten muissakin tulososioissa, päästöjen jakauma muistuttaa enemmän alustavan laskennan, kuin tietomallin pohjalta tehdyn laskennan tuloksia.

Betonirunkoisissa kohteissa 1 AB, 1 C ja 3 pystyrakenteet ja vaakarakenteet muodostavat tasaisesti suurimman osan rakenteiden päästöistä. Perustukset muodostavat 15-17%, alue- ja piharakentaminen 2% ja rakennuksen talotekniikka noin 6%. Sen sijaan muiden rakenteiden ja materiaalien osuus päästöistä eroaa hieman kohteiden 1 AB ja 1 C sekä kohteen 3 välillä. Kohteissa 1 AB ja 1 C rakennuksissa muut rakenteet ja materiaalit muodostavat 16% päästöistä, kun taas kohteessa 3 osuus on 9%.

Puurunkoisessa kohteessa 2 jakauma on hieman erilainen, sillä vaakarakenteiden osuus kokonaispäästöistä on korostunut. Vaakarakenteiden osuus on 37%, pystyrakenteiden osuus 23% ja perustusten osuus 15%. Muiden rakenteiden ja materiaalien osuus on 11%, alue- ja piharakentamisen 5% ja rakennuksen talotekniikan 8%. Kaikissa kohteissa perustukset ja runko muodostavat lähes tai hieman yli 80% päästöistä. Tarkan laskennan tuloksista saatu vaaka- ja pystyrakenteiden sekä muiden rakenteiden päästöjen tarkempi jakautuminen rakennusosiin on esitetty liitteessä B.

Kuten aiempienkin laskentojen tuloksissa, myös tarkan laskennan tuloksissa merkittävin materiaali on betoni. Betonin osuus materiaalien päästöistä on betonirunkoisilla taloilla keskimäärin 30% ja puurunkoisella talolla noin puolet vähemmän. Muita merkittäviä materiaali-päästöjen lähteitä ovat raudoitetut betonielementit, teräs ja esimerkiksi ikkunat, eristeet sekä puutavara. Päästöjen jakautuminen materiaaleittain on esitetty kuvassa 8.

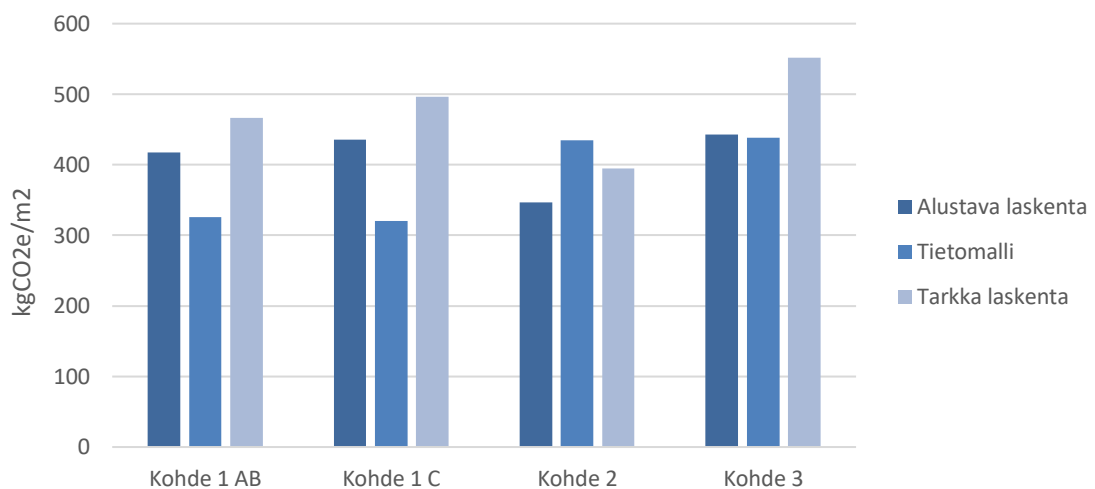


Kuva 8: Merkittävimmät materiaalit kohteittain.

Kuvan 8 kaaviossa on otettu huomioon jokaisen kohteen ne materiaalit, jotka muodostavat vähintään 70% koko kohteen päästöistä. Kuten aiemmin todettiin, betoni on selvästi suurin päästöjen aiheuttaja. Kohteissa 1 ja 2 toiseksi merkittävimpiä päästölähteitä

ovat raudoitetut betonielementit ja kohteessa 3 päästöistä toiseksi suurimman osuuden hiilijalanjäljestä aiheuttaa teräs. Kohteen 2 merkittävimpiä päästöjä tarkasteltaessa huomataan, että 70% päästöistä jakautuu puurakenteisessa talossa useammille materiaaleille kuin betonirunkoisissa. Kohteessa 3 ontelolaattojen osuus on luonnollisesti suurempi, sillä niitä on kohteessa enemmän. Sen lisäksi suuren tiilimuurauksen määrä näkyy kohteessa 3 suurena laastin määränä.

Kuvassa 9 on esitetty kootusti kaikkien kohderakennusten materiaalien hiilijalanjäljen suuruudet, jotka on esitetty aiemmin taulukoissa 4, 5 ja 6. Kuvassa on esitetty kaikkien kohteiden tulokset eri laskentamenetelmillä, jotta laskentamenetelmien välisiä eroja pystytään havainnoimaan paremmin.



Kuva 9: Rakennusmateriaalien hiilijalanjälki eri laskentamenetelmillä laskettuna.

Kuvasta 9 nähdään, että kohteilla 1 AB ja 1 C jakauma eri laskentamenetelmien välillä on hyvin samanlainen. Kohteen 3 jakauma on suuruusjärjestykseltään sama, mutta ero karkean laskennan ja tietomalliin pohjautuvan laskennan välillä ovat pienempi. Sen sijaan kohteen 2 tuloksissa tietomallin osuus on korostunut, ja tietomallin avulla saatu materiaalien hiilijalanjälki on selkeästi suurempi kuin muiden laskentamenetelmien avulla saatu.

6.4 Tulosten luotettavuuden arviointi

Tulosten luotettavuuden arviointi on pääsääntöisesti tehty laskentaohjelman työkalulla, jonka toimintaa on esitelty luvussa 5.2. Alustavassa laskennassa tai tietomallin pohjalta tehdyssä laskennassa ei erityisemmin hyödynnetty tätä työkalua, sillä niiden avulla haettiin ainoastaan tutkia miten hyvin ne vastaavat tarkan laskennan arvoja.

Tarkassa laskennassa työkalua hyödynnettiin, ja sen avulla pystyttiin osoittamaan laskennan aikana tapahtuneita virheitä ja korjaamaan niitä. Laskennan toteuttamisessa käytettiin paljon manuaalista työtä, jolloin inhimillisten virheiden todennäköisyys on suurempi ja esimerkiksi näppäily- tai kopiointivirhe saattaa vääristää tuloksia. Lisäksi virhettä saattaa syntyä yksikköjen muunnoksista, joita esimerkiksi väliseinärankojen, sahatavaran ja tiilien kohdalla jouduttiin tekemään. Virhettä näissä yksikkömuunnoksissa saattavat aiheuttaa sekä laskuvirheet että yksikkömuunnokseen käytetyn datan luotettavuus. Sahatavaran määrän muuttaminen juoksumetreistä tilavuuden yksikköön tai tiilien määrän muuttaminen kappaleista tilavuuden yksikköön ei sisällä datavirhettä, sillä sahatavaran poikkileikkauksen pinta-ala ja tiilien mitat oli esitetty lähdemateriaalissa eli urakkalaskelmassa selkeästi. Sen sijaan esimerkiksi väliseinien teräsrankojen muuttaminen juoksumetreistä kiloiksi saattaa sisältää datavirhettä, sillä määrän arvioimiseen on käytetty väliseinärankojen keskimääräistä massan arvoa.

Laskentaohjelman työkalulla pystyttiin osoittamaan, että kohteiden 1 AB ja 1 C tiilien laskennassa oli tapahtunut virhe, sillä ohjelma ilmoitti pystyrakenteiden määrän olevan suhteellisen suuri rakennuksen kokoon verrattuna. Rakennusmateriaalien listasta nähtiin, että pelkät tiilet aiheuttivat 23% kaikista materiaalien päästöistä ja näin huomattiin, että tiilien muunnoksessa oli tapahtunut laskuvirhe. Laskuvirheen korjauksen jälkeen tiilien todellinen osuus päästöistä oli noin 0,3%.

Laskuvirheiden ja datavirheiden lisäksi virhettä saattavat aiheuttaa myös väärin tehdyt kartoitukset. Kohteessa 3 laskentaohjelma oli virheellisesti kartoittanut väliseinärankojen materiaalin rakenneteräksenä, jonka hiilijalanjälki on 3,21 kg CO₂e/kg. Väliseinien teräsrankojen hiilijalanjälki on keskimäärin 1,04 kg CO₂e/kg ja virheen korjaamisen jälkeen kohteen päästöt tippuivat noin 11%.

Virhettä saattavat lisäksi aiheuttaa kaikissa laskentamenetelmissä virheet lähtötiedoissa. Jos tietomallissa materiaalien määrä on virheellinen, ovat myös tulokset virheellisiä. Alustavassa laskennassa tulosten luotettavuuteen taas vaikuttaa se, mihin materiaalivaihto perustuvat ja onko materiaalien osuudet jaoteltu oikein. Tarkassa laskennassa on tärkeää, ettei urakkalaskelma sisällä virheitä, ja että tiedetään esimerkiksi se, sisältävätkö urakkalaskelmassa esitetyt määrät hukkaa vai eivät.

Laskentaohjelman avulla on pystytty hyvin eliminoimaan suurimmat virhelähteet ja korjaamaan huomattavasti tuloksia vääristävät tekijät. Virheiden seulontaa ja tarkistamista tehtiin niin, että kaikkien kohteiden tarkan laskennan kattavuuden ja luotettavuuden arvioinnissa ei enää esiintynyt merkittäviä huomautuksia. Kohteiden 1 AB, 1 C ja 3 luotettavuuden ja kattavuuden arvioinnin arvosanaksi saatiin A. Kohteen 2 arvosanaksi saatiin

B, sillä ohjelma arvioi kipsilevyn määrän olevan poikkeuksellisen suuri. Asia varmistettiin laskentaohjelman neuvontapalvelusta, ja etenkin puukerrostaloissa kipsilevyn määrä saattaa poiketa selkeästi laskentaohjelman vertailutasosta, jolloin ohjelma arvioi luotettavuuden huonommaksi. Tuloksissa saattaa lisäksi esiintyä pieniä virheitä, joita ohjelma ei tunnista ja tuloksia saattavat vääristää materiaalien yleistyksset ja käyttäjän väärin karjoittamat materiaalit.

Kuvasta 9 nähdään, että kohteissa 1 ja 2 alustavan laskennan ja tarkan laskennan tulokset muistuttavat enemmän toisiaan kuin tietomallin avulla saatuja tuloksia. Sen sijaan kohteessa 3 sekä alustavan laskennan että tietomallin pohjalta määritetyt materiaalien hiilijalanjäljet ovat selkeästi pienemmät kuin tarkan laskennan avulla saatu. Tietomallien avulla saatujen tulosten suuruusjärjestys poikkeaa selvästi muiden laskentamenetelmien perusteella saadusta järjestyksestä, joten voidaan päätellä alustavan ja tarkan laskennan tulosten olevan todennäköisesti luotettavampia. Tietomallin lähtötietona on myös käytetty arkkitehtimallia, joten materiaalien osalta on jouduttu tekemään enemmän oletuksia kuin muissa laskentamenetelmissä.

Tarkan laskennan tuloksista kohteiden 1 AB, 1 C ja 3 tuloksia voidaan pitää luotettavimpina kuin kohteen 2 tuloksia, sillä kohteen 2 lähtötiedot olivat vajaampia kuin muiden kohteiden. Kaikissa kohteissa on käytetty paalutuksen ja talotekniikan osalta laskentaohjelman antamia oletusarvoja, jotka perustuvat liitteessä A esitettyyn Ympäristöministeriön ohjeeseen. Lisäksi kohteessa 2 oletusarvoja on käytetty myös rungkon materiaalien arvioinnissa. Näin ollen tulosten vääristyminen on todennäköisempää, sillä kaikki tulokset eivät perustu tarkkoihin arvoihin.

Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että tarkan laskennan tuloksia voidaan pitää luotettavina ja vertailukelpoisina. Kohteiden keskinäistä vertailukelpoisuutta lisää se, että laskennat on suoritettu samoja periaatteita ja samaa laskentaohjelmaa käyttäen. Lisäksi laskennan on suorittanut sama henkilö, joten jokaisessa laskennassa käytetyt oletukset ja toimintamallit ovat yhdenmukaisia.

7. TULOSTEN ANALYYSINTI

7.1 Merkittävimmät päästölähteet ja niiden vertailu

Koska tarkalla laskennalla saavutettuja tuloksia voidaan pitää luotettavimpina ja koska empiirisen osion pääpaino on ollut tarkassa laskennassa, käytetään tulosten tarkasteluun pääasiassa tarkan laskennan tuloksia, jotka on esitetty luvussa 6.3. Tarkempia tuloksia on lisäksi esitetty liitteissä B ja C.

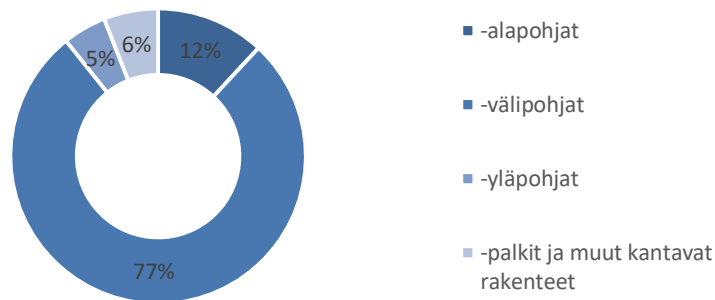
Taulukosta 6 nähdään selvästi, että kaikissa laskennan kohteissa päästöjen pääpaino on rakennuksen rungossa. Kaikissa kohderakennuksissa rungon osuus päästöistä on 60-70% ja voidaan todeta, että tutkimustulokset tukevat teoriassa esitettyä väitettä siitä, että rakennuksen runko muodostaa suurimman osan päästöistä. Taulukko 6 ja luvussa 3.3 esitetty kuva 4 eivät kuitenkaan ole täysin verrannollisia, sillä taulukossa rakennusosaan ”pystyrakenteet ja julkisivu” sisältyvät myös ei-kantavat väliseinät, kun taas kuvassa 4 väliseinät on sisällytetty täydentäviin rakenteisiin. Luvussa 3.3. rungon osuus päästöistä on noin 10% pienempi kuin tutkimustulosten laskuissa, ja ei-kantavien väliseinien sijoittaminen pystyrakenteiden sijaan muihin rakenteisiin pienentäisi tätä eroa. Liitteestä C nähdään lisäksi, että merkittävimmät rakennusosat ovat kaikissa kohteissa välipohjat ja ulkoseinät, mikä vastaa Ruuskan & Häkkisen (2014, s.321) saamaa tulosta suurimmista runkovaiheen päästölähteistä.

Päästöjen jakautumisen lisäksi tutkimustulokset tukevat teoriaosuuden väitettä myös siitä, että betoni ja teräs ovat selvästi suurimmat materiaalipäästöjen aiheuttajat. Kuvassa 8 on esitetty materiaalirivit, jotka hallitsevat vähintään 70 prosentin osuutta kunkin kohteen päästöistä. Kun materiaalirivejä arvioidaan tarkemmin, ja otetaan huomioon se, että suurin osa betonielementtien ja ontelolaattojen materiaaleista on betonia ja terästä, voidaan todeta, että betoni ja teräs muodostavat kaikissa kohteissa lähes puolet kaikista materiaalipäästöistä. Betonirunkoisissa kohteissa betonin ja teräksen osuus päästöistä lähentelee 70 prosenttia.

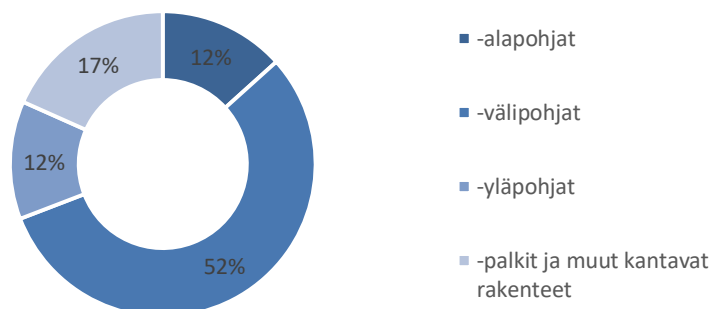
Betonin ja teräksen merkittävä vaikutus päästöissä voidaan nähdä myös siinä, että näitä materiaaleja eniten sisältävien rakennusosien osuus korostuu. Betonirunkoisissa kohteissa perustukset ja runko muodostuvat pääasiassa teräsbetonirakenteista. Koska pystyrakenteiden ja vaakaranteiden materiaalimäärät ovat kuitenkin suurempia kuin perustuksissa, korostuvat näiden rakennosien päästöt myös tuloksissa. Liitteen B kaavioista, jotka on myös esitetty kuvassa 10 nähdään, että betonirakenteisilla kerrostaloilla vaakarakenteiden päästöt jakaantuvat määrien kanssa samassa suhteessa. Puurunkoisessa

talossa päästöjen jakaantuminen ala-, väli- ja yläpohjille sekä muille vaakarakenteille on kuitenkin tasaisempi. Tämä johtuu siitä, että välipohjamateriaaleista suurin osa on puuta, kun taas alapohja ja palkit ovat kokonaan betonia, ja yläpohjasta lähes puolet (40%) on betonia. Näin ollen ne rakennusosat, joissa on käytetty hiili-intensiivisempää materiaalia, erottuvat suurempina osuuksina, kuin jos kaikki rakennusosat ovat samaa materiaalia.

Vaakarakeet, 1AB



Vaakarakeet, 2



Kuva 10: Kerrostalon hiilijalanjäljen jakaantuminen vaakarakenteiden eri osille kohteissa 1 AB (ylempänä) ja 2 (alempana). (Liite B)

Sen lisäksi että puurunkoisen kerrostalon hiilijalanjäljen jakautuminen materiaaleille poikkeaa selvästi betonirunkoisen kerrostalon jakaumasta, ovat puurunkoisen talon materiaalien kokonaispäästöt selkeästi pienemmät kuin betonirunkoisten. Kohteet 1 AB ja 2 ovat suuruusluokaltaan lähimpänä toisiaan ja tuloksista nähdään, että puurunkoisen kohteen 2 materiaalien hiilijalanjälki on noin 15% pienempi kuin betonirunkoisen kohteen 1 AB. Ero puurungon ja betonirungon välillä näkyy koko elinkaaren hiilijalanjäljessä erityisesti moduulissa A, johon vaikuttavat vahvimmin tuotteiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt. Puurunkoisen ja betonirunkoisen kerrostalon ero näkyy myös rakennusten hiili-

kädenjäljessä, joka on puurunkoisella talolla noin kolminkertainen betonirunkoisiin kerrostaloihin verrattuna. Ero betonirunkoisen ja puurunkoisen rakennuksen välillä on siis selkeä, mutta ei yhtä suuri kuin Ruuska & Häkkinen (2014, s.322) ovat väittäneet.

Kipsilevyn määrän todettiin erottuvan puurunkoisessa kohteessa 2 laskentaohjelman normaalin vaihteluvälin määrästä. Kipsilevystä suurin osa on palokipsilevyä, jota käytetään puurunkoisessa talossa suojaamaan rakenteita, ja vaikka sen määrä on suuri, ei se erotu selvästi materiaalien hiilijalanjäljessä. Kipsilevyjen suuri määrä nostaa hankkeen päästöjä jonkin verran, mutta puurungon tuoma säästö hiilidioksidipäästöissä betonirunkoon verrattuna on merkittävämpi.

Kohteen 1 rakennukset AB ja C koostuvat pääasiassa samankaltaisista materiaaleista ja ne on toteutettu samoilla rakenneratkaisuilla, mutta tuloksissa voidaan huomata selkeä ero etenkin materiaalien hiilijalanjäljessä. Koska rakenteiden tai päästöjen jakaumat eivät selkeästi eroa toisistaan (liitteet B ja C), voidaan päätellä eron johtuvan rakennusten muodoista. Kummatkin rakennukset ovat melko symmetrisiä, mutta rakennus 1 C on korkeampi ja siinä on enemmän asuntoja. Muita materiaaleja on kohteissa suurin piirtein bruttoalojen suhteessa (1 AB:ssä enemmän, 1 C:ssä vähemmän), mutta hormien määrä on kohteessa 1 C suurempi. Tämä johtuu siitä, että rakennuksessa 1 C hormoneja on kahdessa kerroksessa enemmän kuin rakennuksessa 1 AB ja siitä, että rakennuksessa 1 C on enemmän asuntoja, joten hormoneja on suhteessa kerrosalaan enemmän kuin rakennuksessa 1 AB. Taulukosta 6 nähdään, että kohteen 1 AB elinkaaren hiilijalanjälki on pienempi, sillä sekä ennen käyttöä että käytön aikana syntyvien päästöjen määrä on pienempi kuin kohteessa 1 C.

Kohteissa 1 AB ja 1 C muiden rakenteiden ja materiaalien osuus on tulosten mukaan selkeästi suurempi verrattuna kohteeseen 3. Rakennuksissa 1 AB ja 1 C on kuitenkin paljon enemmän parvekkeita kuin kohteessa 3 ja kaikki parvekkeet on lasitettu, jolloin kategoriassa sekä parvekelaattojen että ikkunoiden ja ovien määrät ovat suuremmat.

Tuloksia tarkasteltaessa huomio kiinnittyy kohteen 3 selkeästi suurempiin päästöihin muihin kohteisiin verrattuna. Keskeisimmät erot kohteiden 1 ja kohteen 3 välillä ovat välipohjan rakennetyyppi ja ulkoverhouksen materiaali. Kohteessa 3 välipohjien pääsiasiallinen tyyppi on ontelolaatta ja ulkoverhouksesta 72% on muurattua, kun taas kohteissa 1 AB ja 1 C välipohjatyypin on paikallavalettu teräsbetoni-laatta ja tiiliverhouksen osuus julkisivumateriaaleista on alle puolet.

Koska tiilen ilmastovaikutus on samaa suuruusluokkaa kuin betonilla (Brick Development Association, 2017), vaikuttaa sen suurempi osuus ulkoverhouksessa suoraan tuloksiin. Lisäksi julkisivumuurausten määrän lisääntyessä myös muurauslaastin määrä

lisääntyy, mikä lisää entisestään tiiliverhouksen päästöjä esimerkiksi ohutrapatun ulkoseinän päästöihin verrattuna.

Jos vertaillaan bruttoalaltaan toisiaan vastaavia kohteita 1 C ja 3, joissa myös välipohjien määrät ovat samaa suuruusluokkaa, voidaan tuloksista eritellä välipohjien pääasiallisten tyyppien ontelolaattakentän ja paikallavaletun teräsbetonilaatan päästöeroja. Laskentaohjelman mukaan kohteen 1 C paikallavaletun teräsbetonilaatan vaikutus elinkaaren hiilijalanjälkeen on +0,78 kg CO₂e/m²/a. Kohteen 3 ontelolaattojen vaikutus elinkaaren hiilijalanjälkeen on +0,64 kg CO₂e/m²/a.

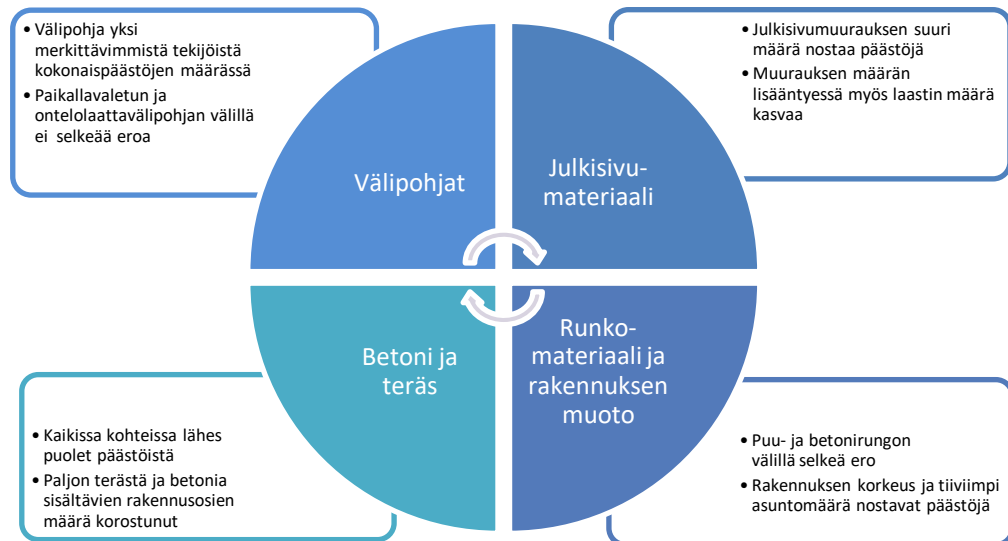
Ontelolaattavälipohjan muut materiaalit kuitenkin nostavat päästöjä niin, että todellisuudessa ontelolaattavälipohjan vaikutus päästöihin ylittää paikallavaletun teräsbetonilaatan vaikutukset. Tällaisia muita materiaaleja ovat esimerkiksi ontelokentän juotoksiin käytettävät raudoitteet ja betoni sekä rakennetta tukevat teräksiset liittopalkit. Lisäksi ontelolaattojen ja ontelokentän pinta on valmistuessaan paljon epätasaisempi kuin paikallavaletun teräsbetonilaatan, joten tasoittamista varten joudutaan käyttämään paksumpi kerros pintamassaa kuin paikallavaletussa laatassa. Näiden materiaalien vaikutus ilmastoon lämpenemiseen lähes kaksinkertaistaa tämän välipohjarakenteen vaikutuksen pelkkiin ontelolaattoihin verrattuna.

Kun huomioidaan kaikki rakenteeseen kuuluvat osat, on paikallavaletun teräsbetonilaatan hiilijalanjälki pienempi kuin ontelolaattakentän. Toisaalta pitkän tähtäimen näkökulmasta ontelolaatoin toteutettu välipohja on parempi, sillä sen uudelleenkäyttöpotentiaali on suurempi kuin paikallavaletulla välipohjalla, mikä joudutaan purkamaan hajottamalla. Sen sijaan ontelolaattojen uudelleenkäytettävyyden on arvioitu kosteusvauriot, betonin vauriot ja irrotettavuus huomioiden olevan hyvää tasoa (Annala et al. 2015, s.66). Ontelolaattojen uudelleenkäytettävyys ei suoraan näy taulukon 6 hiilikädenjälkien suuruuksissa, sillä moduulin D laskennassa on huomioitu kaikki rakenneosat. Jos tarkastellaan pelkästään paikallavaletun välipohjan ja ontelolaattavälipohjan uudelleenkäytöstä ja kierrätyksestä saatavia hyötyjä, on ontelolaattavälipohjasta saatava hyöty noin kymmenkertainen paikallavalettuun välipohjaan verrattuna.

Jos huomioidaan se, että ontelolaatat voidaan kierrättää rakennuksen purkuvaiheessa ja näin pystytään vähentämään uusien tuotteiden tuotantoa, on ontelolaatoilla toteutetun välipohjan ympäristövaikutus todellisuudessa pienempi kuin jos tätä vaikutusta ei oteta huomioon. Lisäksi on huomioitava, että kattavampaa tutkimustulosta varten tulisi vertailla useampia kohteita.

Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että merkittävin osa päästöistä syntyy rakennuksen runkoon sitoutuneista materiaaleista, ja liitteessä B esitettyjen kuvaajien

avulla pystytään lisäksi tarkentamaan, että keskeisimpiä rakennusosia ovat kantavat pystyrakenteet, ulkoseinät ja julkisivut sekä välipohjat. Merkittävimiksi yksittäisiksi materiaaleiksi osoittautuivat betoni ja teräs. Kohteiden keskinäisessä vertailussa huomattiin sekä välipohjamateriaalilla, ulkoverhouksen materiaalilla että rakennuksen muodolla ja materiaalilla olevan selkeä yhteys päästöjen määrään. Suurimmat materiaalipäästöjen aiheuttajat on esitetty kootusti kuvassa 11.

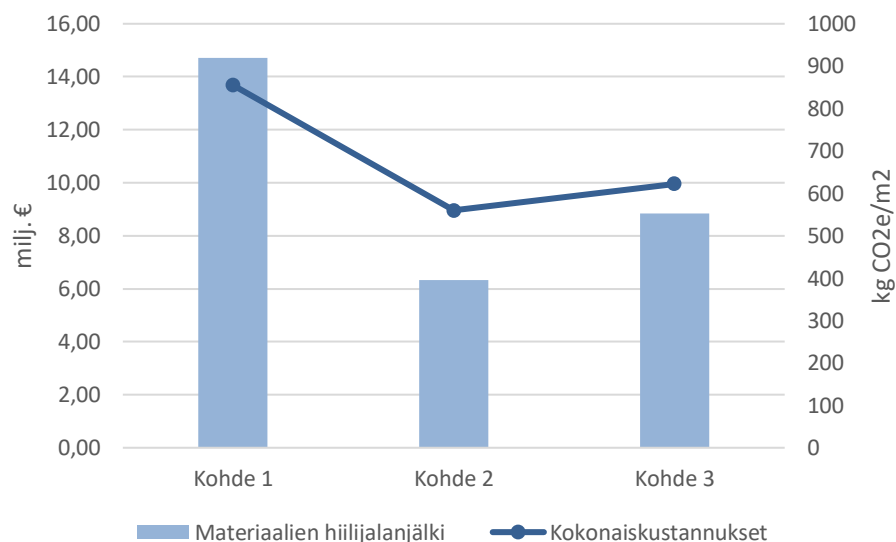


Kuva 11: Tutkimuksessa esiin nousseet merkittävät päästöjen aiheuttajat.

One Click LCA:n antamien tulosten esitystapa poikkeaa luvussa 3.2 esitetyistä tutkimustuloksista, mutta kohteiden kokonaispäästöt voidaan muokata niin, että ne vastaavat Säynäjoen et al. (2011, s.122) saamaa tutkimustulosta rakennuksen kokonaispäästöistä. Vuonna 2011 toteutetussa tutkimuksessa päästöjen arvoksi saatiin 1,6 t CO₂e neliometriä kohti. Tässä tutkimuksessa kohteiden elinkaarien kokonaispäästöjen arvot vaihtelevat neliometriä kohden 1,1 ja 1,9 t CO₂e välillä. Voidaan siis todeta tämän tutkimuksen tulosten tukevan väitettä päästöjen suuruusluokasta. Lisäksi materiaalien valmistuksen osuuden koko elinkaaren päästöistä todettiin olevan keskimäärin 28%, mikä vastaa Ruuska & Häkkisen (2014) kuvassa 2 esitettyä tutkimustulosta.

7.2 Hiilijalanjäljen ja kustannusten välinen korrelaatio

Koska tutkimuksen toimeksiantajana on rakennusliike, jonka liiketoiminnan ytimessä ovat asuinkerrostalot, haluttiin tutkia sitä, millainen yhteys kohteiden päästöillä ja kustannuksilla on. Kuvassa 12 on esitetty kohderakennusten kokonaiskustannukset sekä tarkan laskennan perusteella määritetty kohteiden rakennusmateriaalien hiilijalanjälki.



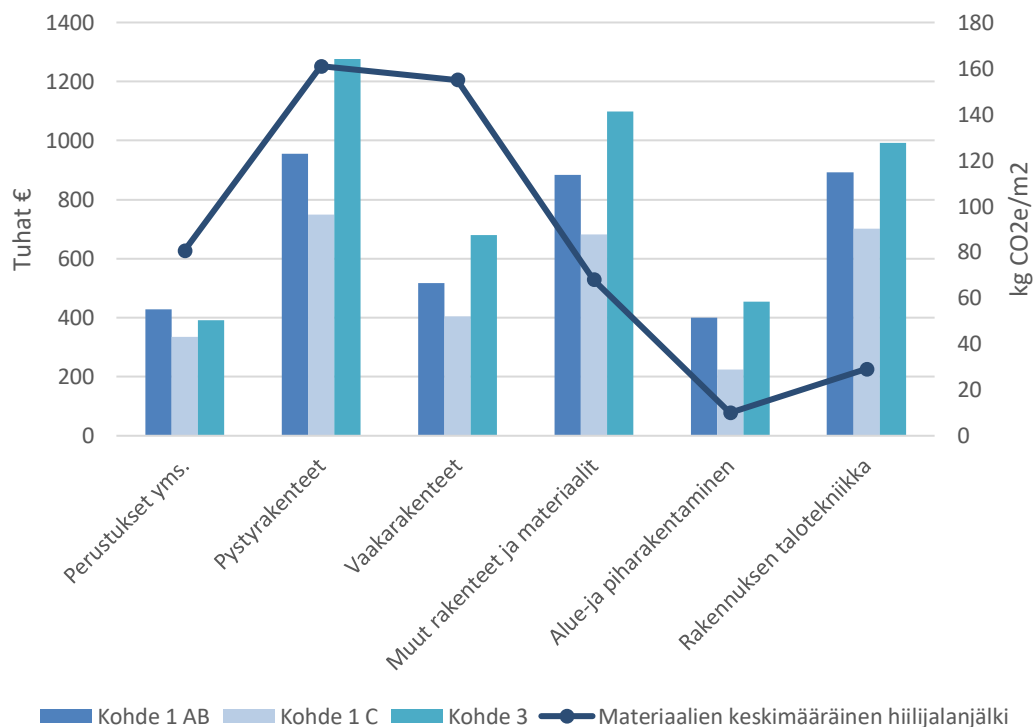
Kuva 12: Kohderakennusten tarkan laskennan avulla määritetyn materiaalien hiilijalanjäljen ja kokonaiskustannusten suhde.

Hiilijalanjäljen ja kokonaiskustannusten kuvan 12 vertailussa on rakennukset 1 AB ja 1 C on esitetty yhtenä kohteena, sillä lähtötiedoissa ei ole eritelty kaikkia kustannuksia rakennusosittain, eikä kustannusten jakaminen bruttoalojen suhteessa kuvaisi välttämättä todellista tilannetta. Esimerkiksi hallinto- ja työmaakulujen jakautuminen ei välttämättä noudata bruttoalojen suhdetta. Materiaalien hiilijalanjälki on kohteeseen 1 laskettu rakennusten 1 AB ja 1 C hiilijalanjälkien summana.

Kuvan 12 perusteella voidaan todeta, että hankkeiden kokonaiskustannukset ja materiaalien hiilijalanjälki korreloivat melko hyvin toistensa kanssa. Kohteessa 1 kustannusten ja päästöjen suhde eroaa kohteiden 2 ja 3 suhteista. Tämä voi kuitenkin selittyä esimerkiksi sillä, että materiaalien hiilijalanjälki on kuvaajassa kuvattu suurempana kuin se todellisuudessa on, sillä rakennukset on laskettu erillisinä, ja näin ollen tuloksissa saattaa olla päällekkäisyyksiä esimerkiksi työmaatoimintojen päästöjen osalta. Toisaalta taas

kohteen 1 kokonaiskustannukset voivat olla suhteessa pienemmät muihin kohteisiin verrattuna, sillä esimerkiksi urakkasopimuksissa ja materiaalihankinnoissa on voitu hyödyntää erilaisia paljousalennuksia hankkeen suuren koon vuoksi.

Koska kokonaiskustannukset eivät kuitenkaan anna tarkkaa kuvaa siitä, miten kustannukset ovat jakautuneet materiaaleittain, haluttiin tätä tutkia tarkemmin. Kohde 2 on puurakenteisilla moduuleilla toteutettava rakennushanke, joten kustannuksissa ei ole eritelty esimerkiksi ulkoseinien, ikkunoiden tai pintamateriaalien osuuksia. Näin ollen kohteen 2 kustannuksia ei pystytä vertailemaan muihin kohteisiin yhtä tarkasti kuin muita kohteita keskenään. Betonirunkoisten rakennusten kustannukset pystyttiin erittelemään niin, että voidaan vertailla rakennusosien päästöjen ja kustannusten suhdetta. Kohteiden 1 AB ja 1 C materiaalikustannukset saatiin lähtötiedoista niin, että niitä voidaan käsitellä erillisinä. Kuvassa 13 on esitetty materiaalien keskimääräisen hiilijalanjäljen ja kustannusten suhteet rakennusosittain sekä kohteittain betonirunkoisissa rakennuksissa.



Kuva 13: Kustannusten ja materiaalien hiilijalanjäljen jakautuminen rakennusosittain ja kohteittain betonirunkoisissa rakennuksissa. Materiaalien hiilijalanjälki kuvaa kaikkien kohteiden hiilijalanjäljen keskiarvoa rakennusosissa.

Toisin kuin kokonaiskustannuksissa, kustannukset ja materiaalien hiilijalanjälki eivät ole yhteydessä toisiinsa kuvan 13 perusteella. Suurimmat erot kustannusten ja materiaali-päästöjen välillä esiintyvät vaakarakenteissa ja rakennuksen talotekniikassa. Vaakarakenteiden päästöt ovat hallitsevassa osassa kokonaispäästöjä, mutta niiden kustannukset ovat kaikissa hankkeissa vasta neljänneksi suurimmat. Sen sijaan talotekniikan

päästöt ovat suhteellisen pienet, mutta niiden kustannukset ovat selkeästi korkeammalla. Parhaiten päästöjen kanssa korreloivat pystyrakenteiden sekä alue- ja piharakentamisen kustannukset. Pystyrakenteet hallitsevat suurta osaa sekä kustannuksista että päästöistä, kun taas alue- ja piharakentamisen osuus kummastakin on alle 10%.

Perustusten ja vaakarakenteiden kustannusten suhteellisen pientä määrää voi selittää esimerkiksi se, että niiden valmistamiseen käytettävät materiaalit ja toteutustavat ovat halvempia kuin muihin rakennuksen osiin käytetyt. Kustannukset jakautuvat tasaisesti työn ja materiaalien välillä, ja koska betoni on halpa, mutta hiili-intensiivinen materiaali, näkyy sen vaikutus vahvasti päästöissä, muttei kustannuksissa.

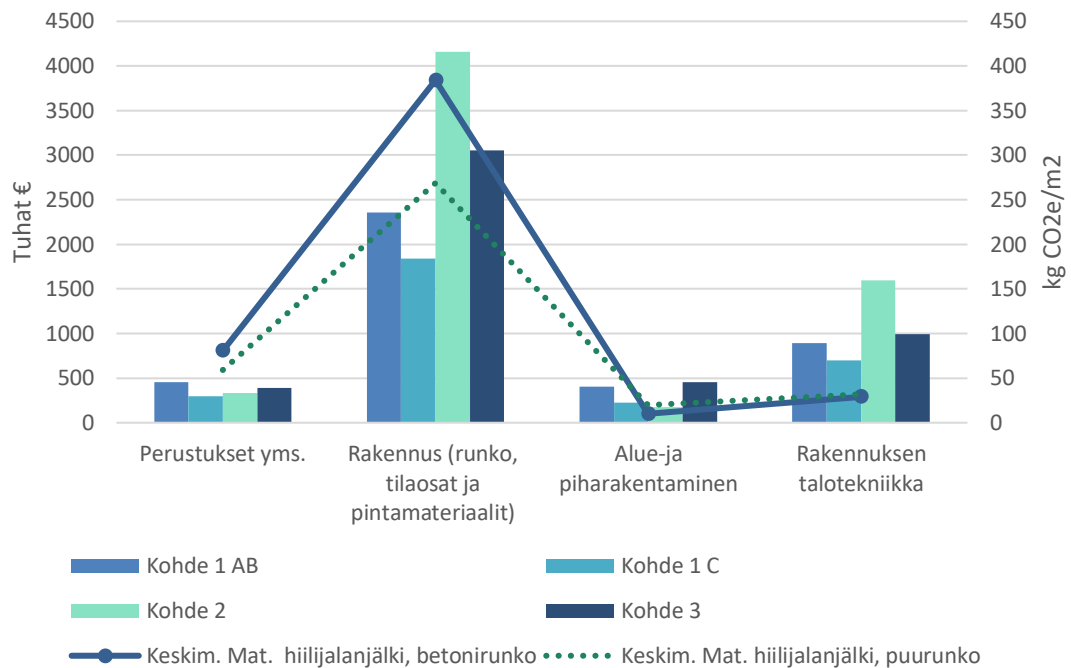
Muiden materiaalien ja rakenteiden kustannukset ovat melko suuria, koska tähän osaan sisältyvät parvekkeet, runkoportaat, pintamateriaalit sekä ikkunat ja ovet. Vaikka osan päästöt eivät olekaan hankkeessa merkittäviä, sisältää osa paljon kustannusten kannalta suuria eriä. Samalla tavalla rakennuksen talotekniikan kokonaiskustannukset koostuvat talotekniikan eri alojen urakoista, joissa suurin osa kustannuksista syntyy tehtävästä työstä, ei materiaaleista. Näin ollen rakennuksen talotekniikan kustannukset ovat suuret, mutta vain pieni osa niistä liittyy materiaaleihin, ja vain materiaalien vaikutus näkyy päästöissä.

Pystyrakenteiden päästöistä suurin osa (liite B) muodostuu ulkoseinistä ja kantavista väliseinistä eli rakenteista, jotka pääosin ovat elementtejä. Elementtien pääasiallisia materiaaleja ovat hiili-intensiiviset betoni ja teräs, joiden vaikutus näkyy päästöjen suurena määränä. Koska elementtien kustannuksiin sisältyvät materiaalien lisäksi myös valmistus- ja asennustyö, ovat myös niiden kustannukset korkealla. Myös luvussa 7.1 käsitelty julkisivumuurausten vaikutus näkyy sekä päästöissä että kustannuksissa, sillä muuraus on hitaampaa kuin esimerkiksi ohutrappaus ja näin ollen myös kalliimpaa.

Jotta myös puurakenteisten ja betonirakenteisten kohteiden kustannusten ja päästöjen suhdetta pystytään vertailemaan, on kuvassa 14 esitetty kaikkien kohteiden kustannusten ja materiaalipäästöjen määrät niin, että kohteet on jaoteltu neljään osaan: perustuksiin, piharakenteisiin, rakennuksen talotekniikkaan sekä varsinaiseen rakennukseen. Päästöjen määriin on laskettu mukaan rakennusten pysty- ja vaakarakenteet sekä muut rakenteet ja materiaalit. Näin pystytään käytettävissä olevalla tiedolla vertailemaan puu- ja betonirunkoisia kohteita.

Kuvan 14 kuvaajasta nähdään, että kun rakennuksen kaikki osat on yhdistetty yhdeksi osaksi, kustannuksilla ja materiaaleilla on selkeämpi yhteys toisiinsa kuin kuvan 13 ku-

vaajassa. Tämä johtuu siitä, että nyt samassa osassa ovat kustannusten kannalta suurimmat tekijät eli pystyrakenteet ja muut materiaalit sekä materiaalipäästöjen kannalta merkittävimmät osat eli pysty- ja vaakarakenteet.



Kuva 14: Betonirunkoisten ja puurunkoisten kohteiden kustannukset ja keskimääräiset materiaalien hiilijalanjäljet jaettuna osiin.

Suurin ero betonirunkoisten ja puurunkoisen kohteen välillä on varsinaisen rakennuksen päästöissä ja kustannuksissa. Puurakenteisen kohteen rungon osuus päästöistä on pienempi kuin muiden kohteiden, mutta sen kustannukset ovat selkeästi suuremmat. Perustusten kustannukset ja päästöt taas ovat lähes samaa luokkaa. Talotekniikan päästöt ovat kohteissa keskimäärin yhtä suuret, mutta puurakenteisessa kohteessa talotekniikan kustannukset ovat suuremmat kuin muissa kohteissa.

Eroa rakennuksen osalta voi selittää se, että puurunkoinen kohde on rakennettu käyttäen valmiita moduuleja, joiden hankintakustannukset asennuksineen ja valmistamiskuluineen ovat korkeammat. Asennuksiin ja valmistamiseen käytettävät työresurssit eivät kuitenkaan näy materiaalipäästöjen määrissä, mikä selittää suurta hajontaa kustannusten ja päästöjen välillä. Perustusten ja alue- sekä piharakentamisen päästöjen ja kustannusten yhteyden samankaltaisuutta runkoratkaisujen välillä selittää se, että niihin käytetyt materiaalit ovat pääosin samoja. Koska perustukset ja alueosat tehdään pääosin samoin työtavoin ja niissä käytetään samanlaisia materiaaleja, on kustannusten ja materiaalien jakauma kohteiden välillä samanlainen.

Puurakenteisessa kohteessa talotekniikan selvästi suuremmille kustannuksille voi syynä yksinkertaisesti olla haastavamman kohteen taloteknisten töiden hinta. Koska päästöjen suuruus ei juurikaan eroa talotekniikan osalta, voidaan päätellä, etteivät korkeammat kustannukset ole suoraan yhteydessä materiaaleihin vaan työn hintaan.

Yleisesti voidaan sanoa, että kustannukset ja materiaalien päästöt korreloivat toistensa kanssa parhaiten silloin, kun kustannuksista suurin osa muodostuu materiaalikustannuksista. Jos taas kustannuksien suurin erä koostuu työstä ja sen hinnasta, eivät päästöt ole yhtä vahvasti yhteydessä kustannuksiin. Tarkasteltaessa laajempia kokonaisuuksia, voidaan todeta, että sekä puurunkoisilla että betonirunkoisilla rakennuksilla suurin osa päästöistä ja kustannuksista muodostuu varsinaisesta rakennuksesta. Tämä johtopäätös on hyvin looginen, sillä suurin osa materiaaleista on sitoutunut rakennukseen ja suurin osa myös työstä liittyy siihen.

Vaikka puurakenteisen kohteen rakennuksen kustannukset ovat lähes 40% suuremmat kuin kalleimman betonirakenteisen kohteen, nähdään kuvasta 12 että puurunkoisen rakennuksen kokonaiskustannukset ovat kuitenkin selkeästi pienemmät. Koska materiaalikustannusten nähdään olevan korkeammat, voidaan todeta, että pienemmät kokonaiskustannukset johtuvat työmaan pienemmistä hallinto- ja työkuluista. Moduulit sisältävät itsessään jo joitakin sisätöitä, joten niihin ei erikseen kulu resursseja. Lisäksi moduuleilla rakennetun kerrostalon rungon rakennusaika on selvästi lyhyempi kuin betonirunkoisilla taloilla.

7.3 Materiaalipäästöjen optimointi

Tässä luvussa keskitytään ratkaisuihin, joilla pystyttäisiin pienentämään asuinkerrostalojen hiilijalanjälkeä tehokkaasti ja kohdeyrityksen tavoitteita tukien. Päästöjen optimoinnissa on hyödynnetty luvussa 5.2. esiteltyä laskentaohjelman työkalua, jossa karkean laskennan tasolla voidaan reaaliaikaisesti verrata erilaisten ratkaisujen vaikutusta päästöihin. Laskentaohjelma antaa materiaali muutosten vaikutukset kokonaispäästöihin prosentteina, mutta koska kuvasta 9 nähdään, että alustava laskelma arvioi materiaalien päästöt hieman alakanttiin, ei tässä luvussa keskitytä tarkkoihin arvoihin vaan ainoastaan niiden osoittamaan suuntaan.

Merkittävimmiä rakennusosiksi muodostuivat tulosten pohjalta ulkoseinät ja välipohjat. Lisäksi betoni ja teräs osoittautuivat merkittäviksi päästölähteiksi kaikissa tutkimuksen kohderakennuksissa. Koska merkittävimmät ongelmakohdat on tunnistettu, pyritään löytämään näille kohdille ratkaisuja. Lisäksi käsitellään muita rakennusosia, joiden vertailun laskentaohjelman työkalu mahdollistaa.

Kohteessa 3 tiiliverhouksen suuri osuus julkisivurakenteissa vaikutti merkittävästi rakennuksen hiilijalanjälkeen. Myös kohteen 1 rakennuksissa lähes puolet ulkoverhouksen materiaalista on tiiltä. Vaihtoehtoisia laskentaohjelman tarjoamia ulkoverhousmateriaaleja ovat ohutrappaus, puujulkisivuverhoilu ja luonnonkivijulkisivu. Jos tiilijulkisivun osuus (72%) korvataan ohutrappauksella, pienenee hankkeen elinkaaren hiilijalanjälki ohjelman mukaan hieman. Jos tiilijulkisivun korvaamiseen taas käytettäisiin puuverhoilua vähenevät päästöt enemmän kuin ohutrappauksen kanssa. Luonnonkivien käyttäminen tiilien sijasta taas nostaa hankkeen kokonaispäästöjä hieman. Kohteessa 1 AB, jossa julkisivumuurausten osuus on selkeästi pienempi kuin kohteessa 3, muutokset hankkeen kokonaispäästöissä ovat samansuuntaisia, mutta niiden vaikutus on selkeästi pienempi.

Tiiliverhouksen korvaaminen muilla materiaaleilla siis vaikuttaa rakennuksen päästöihin, mutta on otettava huomioon myös materiaalien käyttöikä. Julkisivumuurausten etuna on sen pitkä käyttöikä, joka on sekä tavanomaisissa olosuhteissa, että vähäisesti rasitetuissa olosuhteissa yhtä pitkä kuin rakennuksen käyttöikä. Tutkimuksen kohteissa käyttöikäksi määritettiin rakennesuunnitelmien perusteella 100 vuotta. Lautaverhouksella ja rappauksella, joiden todettiin vähentävän hankkeiden päästöjä, käyttöiät vaihtelevat 30 vuodesta 70 vuoteen. Tavanomaisissa olosuhteissa kummankin materiaalin käyttöikäksi on määritetty 50 vuotta ja vähäisesti rasitetuissa olosuhteissa 70 vuotta. (RT-18-10922. 2008, s.6)

Materiaalipäästöjä on siis mahdollista pienentää ulkoverhouksen materiaalia vaihtamalla, mutta materiaalien elinkaari-vaikutus on huomioitava päätöksenteossa. Julkisivujen rasitukseen vaikuttavat esimerkiksi julkisivujen ilmansuunta sekä rakennuksen korkeus ja sijainti (RT-18-109222. 2008, s.6). Jos olosuhteiden arvioidaan olevan vähäisesti rasittavia, on tiiliverhouksen korvaaminen puisella julkisivumateriaalilla järkevämpää, kuin silloin, jos olosuhteiden arvioidaan olevan tavanomaiset tai haastavat. Lisäksi julkisivumateriaalin vaihtamismahdollisuuksissa on otettava huomioon muun muassa asemakaavojen vaikutus.

Koska paikallavaletun teräsbetoni- ja ontelolaattakentän välillä ei todettu olevan todellista eroa, on välipohjien päästöjä pyrittävä vähentämään muuten kuin rakennetyyppejä vaihtamalla. Betonirunkoisen kerrostalon kantavien rakenteiden, kuten välipohjien, ulkoseinien tai kantavien väliseinien pääasiallista materiaalia ei pystytä suoraan korvaamaan toisella materiaalilla, joten on pyrittävä vähentämään esimerkiksi betonin synnyttämiä päästöjä. Laskentaohjelma ei anna mahdollisuutta tehdä tätä suoraan karkean laskennan optimoinnissa, mutta tarkan laskennan tulossivulla ohjelma ehdottaa suurimmille materiaalipäästöjen lähteille ympäristötehokkaita vaihtoehtoja.

Esimerkiksi betonille, jonka osuus hankkeiden materiaalipäästöistä on merkittävä, ohjelma ehdottaa päästöjen vähentämiseksi useita vaihtoehtoja. Tavanomaisen betonin korvaajaksi ohjelma esittää betoneita, joissa on käytetty 30% masuunikuonaa tai betoneita, joiden tuotantotapojen päästöt ovat pienempiä. Samoja keinoja vähäpäästöisemmän betonin saavuttamiseksi ehdottavat myös Maries et al. (2013, s.203,205) ja Nazari & Sanjayan (2017, s.85). Kun betonissa käytetään lisäaineita, on varmistettava, että betoni ja siitä valmistetut rakenteet täyttävät vaadittavat lujuusvaatimukset.

Toiselle materiaalipäästöjä hallitsevalle materiaalille eli teräkselle laskentaohjelma ehdottaa myös vaihtoehtoisia ratkaisuja. Ohjelman määrittämä tavanomainen betoniteräs sisältää kierrätettyä materiaalia 60 prosenttia. Kierrätetyn materiaalin osuutta kasvattamalla 60 prosentista 81 prosenttiin, voidaan teräksen päästöjä pienentää laskentaohjelman mukaan selvästi.

Laskentaohjelman työkalun avulla testattiin myös ulkoseinien eristemateriaalin, kantamattomien väliseinien rankamateriaalin sekä parvekelaattojen pääasiallisen materiaalin vaihtamista. Ulkoseinäelementtien eristemateriaalin vaihtaminen mineraalivillasta polyuretaanieristeeseen (PUR) tai EPS -eristeeseen vaikutti kohteen 1 rakennuksissa kokonaispäästöihin keskimäärin puoli prosenttia eikä eristeiden välillä ollut selkeää eroa. Kohteessa 3 eristemateriaalin vaikutus oli suurempi ja PUR -eristeen käyttö vähensi hankkeen päästöjä laskentaohjelman mukaan enemmän kuin EPS- eristeen käyttö mineraalivillan tilalla.

Päästöjen määrään vaikuttaa esimerkiksi se, että kovien eristeiden paksuus ei sandwich-elementeissä ole yhtä suuri kuin mineraalivillalla, ja näin ollen materiaalia kuluu vähemmän. Eristemateriaalilla ei ole RT 18-10922 (2008, s.6) -kortin mukaan vaikutusta ulkoseinien käyttöikään, mutta EPS ja PUR -eristeillä on huonompi ääneneristävyyttä liikennemelulle ja heikompi palonkestävyys kuin mineraalivillalla. Mineraalivillan käyttäminen sandwich-elementtien eristemateriaalina on lisäksi halvempaa kuin kovien eristeiden. (Suikka. 2010, s.26,28)

Väliseinien teräsrankarakenteen korvaaminen kokonaan puukoolauksella vähentää rakennuksen päästöjä keskimäärin noin prosentin. RT 18-10922 (2008, s.10) antaa väliseinien käyttöiksi rakennuksen käyttöiän rankamateriaalista riippumatta. Puurungon asentaminen on hieman hitaampaa kuin teräsrunгон ja esimerkiksi kohteen 3 sisäseinien määrällä laskettuna teräsrunгон korvaaminen puurungolla kasvattaisi työvaiheen kestoa suunnilleen yhden työviikon verran (Ratu 0426. 2014, s.4). Betonisten parvekelaattojen korvaaminen puisilla vähentää rakennuksen päästöjä myös noin prosentin.

Puurakenteisten parvekkeiden käyttöikä on normaaleissa olosuhteissa 50 vuotta. Betonirakenteisen parvekkeen käyttöikä on yhtä suuri, mikäli siinä ei ole vedeneristystä tai vedeneristys on pintalaatan alla. Nämä koskevat kuitenkin pääasiassa vuosina 1940-1980 rakennettuja parvekkeita, ja mikäli vedeneristys on laatan pinnassa, on parvekkeen käyttöikä normaaliolosuhteissa yhtä pitkä kuin rakennuksen. (RT 18-10922. 2008, s.8)

7.4 Laskentaohjelman kehitysehdotukset ja toiminta

Koska laskentaohjelma on tarkoitus ottaa kohdeyrityksessä strategisten tavoitteiden saavuttamisen tueksi, on sen käytettävyys keskeinen tekijä ohjelman käyttöönotossa. Erityisesti tarkan laskennan automatisointia pyritään kehittämään, jotta laskennan tekeminen olisi nopeaa ja siinä pystyttäisiin hyödyntämään jo olemassa olevia urakkalaskelmapohjia ja muita lähtötietoja.

Kuvan 9 avulla voidaan päätellä, että alustavan laskennan materiaali- ja päästöjen tulokset olivat lähempänä tarkan laskennan tuloksia kohteissa 1 AB, 1 C ja 2 kuin kohteessa 3. Tätä selittävät esimerkiksi se, että kohteen 1 rakennusten pohjien muoto on symmetrisempi kuin kohteessa 3, jossa pohja ei ole suorakulmion muotoinen. Vaikka alustavan laskennan määrien arvioinnissa käytettiin apuna tietomallia, arvioi ohjelma bruttopinta-alojen ja kerrosmäärän avulla esimerkiksi talotekniikan oletusarvojen määrät. Kohde 3 ei myöskään ole tavanomainen asuntokohde, joten sen materiaalit saattavat poiketa selvästikin laskentaohjelman oletusarvoista.

Karkeassa eli alustavassa laskennassa saadut koko elinkaaren hiilijalanjäljet kuitenkin olivat hyvin lähellä tarkan laskennan tuloksia kaikissa kohteissa, joten alustavan laskennan elinkaaren hiilijalanjälkiarviota voidaan pitää luotettavana. Alustavan laskennan tulosta materiaalien hiilijalanjäljestä ei voida kuitenkaan pitää luotettavana, vaan laajemmalla otannalla tehtyjen laskelmien pohjalta alustavan laskennan materiaali- ja päästöille tulisi esimerkiksi kehittää kerroin, jonka avulla todellisia materiaali- ja päästöjä pystyttäisiin arvioimaan paremmin.

Tietomalliin pohjautuvan laskennan etuna on sen nopeus ja suurempi tarkkuustaso kuin alustavassa laskennassa. Tietomallien tulosten luotettavuus on kuitenkin vahvasti riippuvainen siitä, miten kattava tietomalli on. Virheet tietomallissa tai puutteet materiaali-merkinnöissä voivat vääristää tuloksia vahvasti, sillä virheelliset määrät ja väärin kartoitetut materiaalit vaikuttavat suoraan laskennan tuloksiin. Tässä tutkimuksessa käytettiin lähdeaineistona lisäksi arkkitehtimallia, joka ei sisällä kaikkea tietoa. Yhdistelmämallin käytössä ongelmia taas voi seurata siitä, että eri lähteistä yhdistetyt tietomallit saattavat sisältää päällekkäistä tietoa.

Tarkan laskennan suorittaminen oli laskennan hitain ja haastavin vaihe, sillä tietojen siirtämiseen ja erittelyyn kului paljon aikaa. Hiilijalanjälkilaskennan automatisoinnin pääpainoksi tulisivin ottaa laskentaohjelman ja olemassa olevan tietokannan yhteensovittaminen. Tutkimuksen empiirisessä osiossa havaittiin kaksi keskeistä ongelmaa ohjelman käytössä: lähtötietona käytetty urakkalaskelma sisälsi tietoja ja panoksia, joita ei oteta hiilijalanjälkilaskennassa huomioon. Lisäksi urakkalaskelma ja One Click LCA -laskentaohjelma käyttävät joillekin materiaaleille eri yksiköitä, jolloin yksiköiden muuntaminen hidastaa työskentelyä ja lisää virheiden mahdollisuutta. Kuvassa 15 on esitetty tiivistetysti kaikkien laskentamenetelmien vahvuudet ja kehitettävät tekijät.



Kuva 15: Eri laskentamenetelmien vahvuudet ja heikkoudet.

Tarkan laskennan etuina ovat tulosten luotettavuus sekä se, että suurien virheiden havainnointi ja korjaaminen on helppoa. Laskennan toteuttaminen sisältää kuitenkin paljon manuaalista ja hidasta työskentelyä, jossa laskijan on tunnettava melko hyvin sekä hiilijalanjälkilaskennan periaatteet että rakentamisen tuotantotavat. Laskijan on esimerkiksi tunnettava liitteessä A esitetyt osat, jotka jätetään laskennasta pois. Rakentamisen tuotantotapojen tuntemus taas lisää laskennan toteuttamisen nopeutta, sillä laskija tunnistaa mitä materiaaleja on esimerkiksi ontelosaumojen juotoksissa käytetty itse juotokseen ja mitä materiaaleja on käytetty juotosmuottiin.

Koska urakkalaskelmaa käytetään pääasiassa kustannusten arviointiin ja hinnoitteluun, vaikuttaa esimerkiksi materiaalien yksiköiden muuttaminen laajasti muuhun tuotantoon.

Tästä syystä urakkalaskelmaa ei ole järkevää muokata, vaan automatisoinnin edistämiseksi tulisi kehittää työkaluja, joiden avulla lähtötietojen ja laskentaohjelman yksiköt pystytään yhdenmukaistamaan. Yksiköiden yhdenmukaistamista voitaisiin tehdä esimerkiksi niin, että hiilijalanjäljen laskentaohjelmaan syötettäisiin kohdeyrityksen yleisesti käyttämiä materiaaleja samassa yksikössä, kuin ne on urakkalaskelmassa esitetty. Esimerkiksi jos kaikissa kohteissa poikkeuksetta käytettävien väliseinärakojen materiaali pystyttäisiin viemään laskentaohjelmaan juoksumetreinä, nopeuttaisi ja helpottaisi se laskennan tekemistä merkittävästi.

Hiilijalanjälkilaskennan automatisoinnin ja nopeuttamisen edellytyksenä on myös se, että urakkalaskelmasta pystyttäisiin suodattamaan ne panokset, joita ei oteta laskennassa huomioon. Kun muottimateriaalit ja kiinnikkeet jäisivät automaattisesti tiedoista pois, vähentäisi se työmäärää laskentavaiheessa. Lisäksi laskennan nopeuttamisen ja tehostamisen kannalta olisi oleellista, että laskentaohjelma tunnistaisi urakkalaskelman rivit niin, että se pystyisi yhdistämään materiaalit suoraan oikeisiin rakennuksen osiin. Urakkalaskelma noudattaa pääsääntöisesti Talon 2000 -nimikkeistöä, joten pohja rakennusosien jaolle on jo olemassa.

Jos urakkalaskelma ja laskentaohjelma pystyttäisiin yhdistämään niin, että laskentaohjelma tunnistaisi laskennasta automaattisesti pois jätettävät rakennusmateriaalit, yksiköt ohjelman ja lähtötietojen välillä olisivat yhdenmukaiset ja ohjelma osaisi lukea urakkalaskelman avulla mihin rakennusosiin materiaalit kuuluvat, olisi tarkan laskennan toteuttaminen huomattavasti nopeampaa ja luotettavampaa. Näiden kohtien jälkeen laskentaan jäisi tehtäväksi enää materiaalien kartoittaminen. One Click LCA kuitenkin muistaa aiemmat kartoitukset ja näin ollen ihannetilanteessa kartoittamista olisi joka rakennuksen laskennan kohdalla entistä vähemmän.

Karkean laskennan työkalua voidaan ja sitä kannattaa hyödyntää hankkeen alkuvaiheessa, jotta pystytään vertailemaan erilaisia vaihtoehtoja ja löytämään parhaiten kohdeyrityksen strategiaa tukevia ratkaisuja. Alustavan laskennan käytössä on kuitenkin otettava huomioon, että se ei anna materiaalien hiilijalanjäljelle todellista arvoa. Tarkan laskennan tuloksilla päästään tarkimpiin tuloksiin, mutta laskelmaa ei pystytä hyödyntämään yhtä aikaisessa vaiheessa kuin alustavaa laskelmaa. Tarkan laskennan tuloksia pystytään kuitenkin hyödyntämään hankkeiden välisessä vertailussa ja niiden avulla pystytään optimoimaan tulevien hankkeiden päästöjä. Näin ollen kummankin laskentatyyppin kehittäminen on käyttöönoton kannalta tärkeää.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Johtopäätökset

Tutkimustulosten analysoinnin perusteella voidaan sanoa, että materiaalien osuus kerrostalon hiilijalanjäljestä on merkittävä ja että sen suuruuteen vaikuttaa viisi keskeistä tekijää. Näitä ovat julkisivumateriaali, välipohja, rakennuksen pääasiallinen runkomateriaali sekä rakennuksen muoto ja rakennuksessa käytetyn betonin ja teräksen määrä. Päästöjen kannalta merkittävimmät materiaalit ja rakennusosat eivät kuitenkaan ole merkittävimpiä kustannustekijöitä kerrostalohankkeessa, vaan päästöt ja kustannukset jakaantuvat rakennusosille eri tavalla. Taulukossa 7 on esitetty edellä mainitun viiden tekijän vaihtoehtoisten ratkaisujen vaikutukset kustannuksiin ja päästöihin.

Taulukko 7: Rakennusosien ja materiaalien vaihtoehtoisten ratkaisujen vaikutukset päästöihin ja kustannuksiin.

Rakennusosa/materiaali ja vaihtoehtoiset materiaalit	Vaikutus päästöihin	Vaikutus kustannuksiin	Huomioitavaa
Paikallavalettu välipohja			
-ontelolaattavälipohja	- / 0	+	Vaikutus päästöihin pienenee, mikäli huomioidaan ontelolaattojen uudelleenkäyttömahdollisuus.
-puurankainen välipohja	-	- / +	Materiaalien kustannukset kasvavat, mutta hankkeen kokonaiskustannukset saattavat olla pienemmät.
Tiilimuurattu julkisivu			
-ohutrappaus	-	-	Tiilimuurauksen pitkän käyttöiän ja harvemman huoltotiheyden vaikutus sekä päästöihin että kustannuksiin arvioitava kohdekohtaisesti.
-puujulkisivuverhoilu	-	-	
-luonnonkivijulkisivu	+	+	
Betonirunkoinen kerrostalo			
-puurunkoinen moduulikerrostalo	-	- / +	Materiaalien kustannukset kasvavat, mutta hankkeen kokonaiskustannukset saattavat olla pienemmät.
Kerrostalo, jossa suuri kerrosala ja vähemmän asuntoja			
-enemmän asuntoja pienempää kerrosalaa kohti	+	- / +	Kustannuksiin vaikuttavat merkittävästi koko hankkeen laajuus sekä työkustannusten suuruus.
Tavallinen betoni, tavallinen teräs *			
-betoniin lisätty masuunikuonaa	-	+	Hintavaikutus riippuu alueesta ja toimittajasta.
-teräksen kierrätysprosentti suurempi	-	0	Teräksestä suuri osa jo kierrätettyä, hintavaikutus toimittajakohtainen.

+ : päästöt/kustannukset kasvavat
 - : päästöt/kustannukset vähenevät

Välipohjamateriaali tuottaa suuren osan päästöistä, mutta sen vaikutus kustannuksiin ei ole yhtä merkittävä. Välipohjan päästöjä pystytään vähentämään pienentämällä pääasiallisten materiaalien eli betonin ja teräksen päästöjä. Paikallavaletun välipohjan korvaaminen ontelolaattavälipohjalla ei tulosten perusteella merkittävästi vaikuta päästöjen suuruuteen. Taulukosta 7 nähdään että betonin päästöjen vähentäminen saattaa nostaa hankkeen kustannuksia. Myös ontelolaattavälipohjan kustannukset ovat suuremmat kuin paikallavaletun välipohjan. Välipohjamateriaalin vaihtaminen moduulirakenteiseen puuvälipohjaan laskee päästöjä, ja vaikka materiaalikustannukset kasvavat, voidaan moduulien avulla saavuttaa kokonaiskustannuksissa säästöjä. Suomesta käytetystä rakenne-teräksestä suuri osa on jo täysin kierrätettyä, joten teräksen päästöjä pystytään pudottamaan ilman, että sillä on vaikutusta kustannuksiin.

Ulkoseinien vaikutus sekä päästöihin että kustannuksiin on huomattava, sillä kustannuksista suuri osa muodostuu päästöintensivisistä materiaaleista. Taulukossa 7 on esitetty julkisivumuuraukselle vaihtoehtoisia materiaaleja, ja näyttäisi siltä, että muurauksen korvaaminen ohutrappauksella tai puuverhoilulla vaikuttaisi sekä päästöihin että kustannuksiin positiivisesti. Tarkastelussa on kuitenkin huomioitava tiilimuurauksen pitkän käyttöajan vaikutus päästöihin ja kustannuksiin, sillä esimerkiksi puujulkisivun lyhyempi käyttöikä nostaa materiaalin todellisia päästöjä ja tiheämpi huoltotarve nostaa kustannuksia. Tiilimuurauksen korvaamisella luonnonkivillä ei saavuteta hyötyä päästöissä eikä kustannuksissa.

Jos rakennuksen koko rungon pääasiallinen materiaali vaihdetaan betonista puuhun ja erityisesti puurakenteisiin moduuleihin, pystytään päästöjä vähentämään selvästi. Moduulien valmistus- ja materiaalikustannukset ovat betonirunkoa korkeammat, mutta rakennuksen kokonaiskustannukset jäävät todennäköisesti pienemmiksi. Tuloksien perusteella pystytään näin ollen sanomaan, että puurakenteisista moduuleista rakennetulla kerrostalolla päästään sekä pienempiin päästöihin että kokonaiskustannuksiin. Puukerrostalojen rakentaminen rajoittaa kuitenkin esimerkiksi kerrosmäärää ja paloturvallisuusvaatimuksia on enemmän.

Mitä tiheämmin rakennuksessa on asuntoja ja mitä enemmän niitä on yhdessä kerroksessa, sitä enemmän tarvitaan esimerkiksi talotekniikkahormeja. Materiaalinkulutus kasvaa ja näin ollen myös rakennuksen päästöt kasvavat suhteessa rakennukseen, jossa hormien tarve on pienempi. Hormien lisääntymiseen ja suuremman asuntomäärän suoraa kustannusvaikutusta on vaikeampi arvioida, sillä koko hankkeen laajuus vaikuttaa siihen. Kustannusvaikutusta voi tasoittaa myös suuremman asuntomäärän korkeampi myyntivoitto.

Betonin ja teräksen päästöjen vähentämistä voidaan välipohjien lisäksi hyödyntää myös esimerkiksi perustuksissa. Seosaineiden lisääminen betoniin nostaa sen kustannuksia ja vähentää päästöjä. Betonia kuluu kuitenkin melko paljon, joten on rakennusosittain arvioitava todellinen kustannusvaikutus. Kohdekohtaisesti voitaisiin tarkastella esimerkiksi sitä, voitaisiinko kokonaisbetonimäärästä osa korvata vähäpäästöisemmällä betonilla, jotta vaikutus kustannuksiin ei kasvaisi liian suureksi. Pieni vaikutus kustannuksiin tarkoittaa toisaalta myös pientä vaikutusta päästöihin, joten ideaalisen tasapainon löytäminen olisi tärkeää.

Tutkimuksessa käytetyn laskentaohjelman todettiin soveltuvan hyvin kerrostalojen hiilijalanjäljen laskentaan. Ohjelman tuottaman karkean laskennan tuloksia ei kuitenkaan voida pitää täysin paikkansa pitävinä, sillä ne arvioivat materiaalipäästöjen suuruuden alakanttiin. Sen sijaan karkean laskennan tulokset soveltuvat hyvin koko elinkaaren aikaisten päästöjen arviointiin hyvin. Tutkimuksen pääpainona toiminut tarkka laskenta antaa luotettavan tuloksen hankkeen päästöistä, mutta sen tehokas käyttöönotto kohdeyrityksessä vaatii lähtötietojen ja laskentaohjelman yhtenäistämistä.

8.2 Jatkotutkimusehdotukset

Rakentamisen hiilijalanjälkeä ei ole vielä tutkittu kovinkaan paljon, ja aiheesta pysyttäisiin toteuttamaan vielä useita jatkotutkimuksia. Tutkimustulosten vahvistamiseksi laskentakantaa voitaisiin laajentaa useampiin rakennuksiin ja esimerkiksi erilaisilla välipohjaratkaisuilla toteutettuja rakennuksia olisi hyvä olla tutkimuksessa mukana useampia. Toisaalta tutkimukseen voitaisiin valita rakennetyypeiltään ja kooltaan samankaltaisia rakennuksia, jotta voitaisiin verrata yksityiskohtaisempien erojen merkitystä hiilijalanjäljen suuruuteen.

Koska tässä tutkimuksessa keskityttiin pääasiassa alustavaan ja tarkkaan laskentaan, olisi tietomallin avulla toteutettavaa laskentaa syytä tutkia tarkemmin. Jatkotutkimuksessa voitaisiin selvittää esimerkiksi eri suunnittelualojen tietomallien (arkkitehtimalli/ rakennemalli) soveltuvuutta laskennan lähtötiedoksi. Myös tietomallin sisältöön ja laskennan toteuttamiseen voitaisiin perehtyä ja tarkastella esimerkiksi sitä, miten tietomallin tiedot saataisiin tuotua laskentaohjelmaan parhaiten.

Tässä tutkimuksessa saatiin viitteitä siitä, että rakennuksen muodolla ja asuntojen määrällä on merkitystä päästöihin ja karkean laskennan tulosten luotettavuuteen. Erityisesti päästöjen ja kustannusten välisen yhteyden näkökulmasta tätä aihetta tulisi tutkia tarkemmin ja selvittää, millainen yhteys rakennuksen muodolla on erityisesti materiaali-päästöihin.

Laskentaohjelmana käytetty OneClick LCA ei ota suoraan kantaa siihen, miten eri rakennusten rakentamisaikaiset päästöt eroavat toisistaan. Rakentamisajankohdan päästövaikutusten tutkiminen ja vertailu saattaisi kiinnostaa erityisesti rakennusliikkeitä, ja tietoa esimerkiksi siitä, miten rakentamisen aloitusajankohta vaikuttaa työmaa-aikaiseen energiankulutukseen voitaisiin hyödyntää päätöksenteossa. Teoriaosuudessa saatiin viitteitä siitä, että rakennuspaikalla ja perustamistavalla saattaa olla suuri merkitys rakennushankkeen päästöihin. Infrarakentamisen hiilijalanjälkilaskentaa tulisikin kehittää, jotta maaperän vaikutukset rakennuksen kokonaispäästöihin pystyttäisiin arvioimaan.

9. YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa haluttiin selvittää kerrostalon hiilijalanjäljen suuruutta, laskennan toteuttamista ja suuruuteen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksen lähtökohtana olivat toimeksiantajana toimivan kohdeyrityksen strategiset tavoitteet sekä kiristynyt lainsäädäntö ja säädökset ilmastonmuutoksen hidastamiseen liittyen. Tutkimuksessa pyrittiin ensisijaisesti vertailemaan erilaisia rakenneratkaisuja ja materiaaleja sisältävien rakennusten välisiä eroja. Tutkimus rajattiin koskemaan kerrostaloja ja pääpaino tutkimuksen toteutuksessa ja tulosten tarkastelussa oli materiaalien aiheuttamalla hiilijalanjäljellä.

Tuloksia saatiin sekä kirjallisuustutkimuksella että toteutetun laskennan avulla, ja pääpaino tulosten analysoinnissa on laskennan tuloksissa. Laskenta toteutettiin One Click LCA -ohjelmistolla, ja tutkimuksen avulla haluttiin selvittää myös laskentaohjelman käytettävyyttä ja kehityskohtia. Hiilijalanjäljen laskenta toteutettiin neljälle kohdeyrityksen rakennukselle, joiden rakennetyypit ja -materiaalit erosivat toisistaan. Laskenta toteutettiin kolmella eri menetelmällä, joiden lähtötiedot poikkesivat toisistaan.

Kirjallisuustutkimuksen ja toteutetun laskelman perusteella voidaan sanoa, että kerrostalon koko elinkaaren hiilijalanjäljen suuruus on keskimäärin 1,1-1,9 t CO₂e neliometriä kohti. Materiaalien valmistuksen osuus koko elinkaaren aikaisista päästöistä on noin 28%, joten hankkeen materiaaleilla on suuri merkitys koko kerrostalon hiilijalanjäljen suuruuteen.

Laskennan tulosten perusteella tultiin siihen tulokseen, ettei paikallavaletun välipohjalaatan ja ontelolaattavälipohjan välillä ollut juurikaan eroa päästöjen lopullisessa määrässä, mutta välipohja on yksi hallitsevimista rakennusosista materiaalien hiilijalanjäljessä. Merkittäviksi tekijöiksi päästöjen kannalta nousivat myös tiilimuurauksen ja betonin sekä teräksen suuret määrät. Vastaavasti moduulirakenteisen puukerrostalon päästöt olivat selvästi betonirakenteista rakennusta pienemmät.

Päästöjen määrän lisäksi haluttiin selvittää millainen yhteys päästöjen määrällä ja kustannuksilla on. Tutkimuksessa tultiin siihen lopputulokseen, että kustannuksilla ja päästöillä on sitä suurempi yhteys, mitä suurempi osuus kustannuksista syntyy materiaaleista. Parhaiten kustannukset ja materiaalipäästöt olivat yhteydessä toisiinsa ulkoseinien kohdalla, kun taas vaakarakenteiden ja rakennuksen talotekniikan kohdalla päästöt ja kustannukset erosivat selkeästi toisistaan. Lisäksi kustannusanalyysin ja tulosten perusteella tehtiin johtopäätös, että betonin päästöjen vähentäminen nostaa kustannuksia,

kun taas julkisivumuurauksen vaihtaminen muuhun julkisivumateriaaliin saattaa vähentää sekä kustannuksia että päästöjä. Rakenneteräksen päästöjä pystytään vähentämään ilman kustannusvaikutuksia ja moduuleilla toteutetun puukerrostalon todettiin pienentävän sekä materiaalien hiilijalanjälkeä että rakennushankkeen kokonaiskustannuksia.

Laskentaohjelmaa analysoitaessa päädyttiin siihen, että ohjelma soveltuu hyvin kohdeyrityksen käyttöön tulevaisuudessa. Laskennan automatisoinnin parantamiseksi joudutaan kuitenkin tekemään joitakin toimenpiteitä esimerkiksi yksiköiden yhtenäistämisen suhteen. Karkean laskennan tuloksia ei voida pitää materiaalin hiilijalanjäljen laskennan osalta täysin luotettavina, sillä kaikkien kohteiden alustavan laskennan tulokset erosivat tarkassa laskennassa saaduista tuloksista. Karkean laskennan tulosten luotettavuuden parantamiseksi on alustavan laskennan ja tarkan laskennan tulosten eroja analysoitava laajemman otoksen avulla, kuin mitä tässä tutkimuksessa on käsitelty. Tietomalliin pohjautuvan laskennan tuloksen luotettavuuden todettiin perustuvan pitkälti siihen, miten tarkka lähtötietona käytetty tietomalli on. Tarkan laskennan tutkimustuloksia voidaan pitää luotettavina, ja tulosten luotettavuutta arvioitiin eri keinoin.

LÄHTEET

- Aalto-yliopisto. Kestävän kehityksen opetus. Viitattu 13.1.2020. Saatavissa: <https://www.aalto.fi/fi/kestava-kehitys/kestavan-kehityksen-opetus>
- Annala, P., Huuhka, S., Köliö, A., Lahdensivu, J., Pakkala, T. & Pikkuvirta, J. (2015) Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet. Tampereen Teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 162, 78 s. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/116584>
- Brick Development Association. (2017) Environmental Product Declaration, EPD No.: 000002. 12 s. Saatavissa: <http://www.greenbooklive.com/search/scheme.jsp?id=283>
- Euroopan komission tiedonanto. Annettu Brysselissä 28.11.2018. Puhdas maapallo kaikille, Eurooppalainen visio kukoistavasta, nykyaikaisesta, kilpailukykyisestä ja ilmastoneutraalista taloudesta. 28 s. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN>
- Euroopan komission tiedonanto. Annettu Brysselissä 8.3.2011. Etenemissuunnitelma – siirtyminen kilpailukykyiseen vähähiiliseen talouteen vuonna 2050. 17 s. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:FI:PDF>
- European Commission. 2020. Building sustainability performance – Level(s). Viitattu 19.4.2020. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/environment/eusss/buildings.htm>
- HE 200/2016. (2016) Hallituksen esitys eduskunnalle Pariisin sopimuksen hyväksymisestä ja sopimuksen lainsäädännön alaan kuuluvien määräysten voimaansaattamisesta 200/2016 vp, 61 s.
- Maries, A., Hills, C.D., Carey, P. & Ostle, S.-J. (2013) Linked low carbon manufacture of cement and precast concrete. *Advances in Applied Ceramics*, 2012. Vol. 112, No. 4. 5 s.
- Nazari, A. & Sanjayan, J. (2017) *Handbook of Low Carbon Concrete*. 413 s.
- Ratu 0246. (2014) Levyrakentaminen, väliseinät. TALO- Ratu-ohje, menekit ja menetelmät. 21 s.
- RT 18-10922. (2008). Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot. 32 s.
- Ruuska, A. & Häkkinen, T. (2014) The significance of various factors for GHG emissions of buildings. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2015. Vol 8, No.4-5. 13 s.
- Ruuska, A., Häkkinen, T., Vares, S., Korhonen, M., & Myllymaa, T. (2013) Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset. Ympäristöministeriön raportteja 8/2013. Helsinki. 40 s. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B1FAF46B2-2649-41ED-B3AA-5EA789C9512F%7D/37571>
- SFS-EN 15643-1:2010 (E). (2012) Sustainability of construction works. Sustainability Assessment of Buildings. Part 1: General Framework.

SFS-EN 15804:2012 +A2. (2019) Sustainability of Construction works. Environmental Product Declarations. Core Rules for the Product Category of Construction Products.

SFS-EN 15942:2011: E (2012) Sustainability of Construction Works. Environmental Product Declarations. Communication Format Business-to-Business.

SFS-EN 15978:2011 (E). (2012) Sustainability of Construction Works. Assessment of Environmental Performance of Buildings. Calculation Method.

Suikka, A. (2010) Betonisandwich -elementit. 28 s. Viitattu 2.4.2020. Saatavissa: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/julkisivut/julkisivujarjestelmat/sandwichjulkisivut>

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, 2012. Vol. 7. 9 s.

Säynäjoki, A., Heinonen, J. & Junnila, S. (2011) Carbon Footprint Assessment of a Residential Development project. International Journal of Environmental Science and Development, 2011. Vol 2, No. 2. 8s.

Tampereen yliopisto. (2020) Sustainable Urban Development - Technology. Viitattu 13.1.2020. Saatavissa: <https://www.tuni.fi/fi/tule-opiskelemaan/sustainable-urban-development-technology>

Tampereen yliopisto. (2019) Kiertotalous talonrakentamisessa. Viitattu 13.1.2020. Saatavissa: <https://www.tuni.fi/fi/tule-opiskelemaan/kiertotalous-talonrakentamisessa>

Valtioneuvoston julkaisuja 31. (2019) Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019 Osallistava ja osaava Suomi -sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. Helsinki. 216 s. Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161931/VN_2019_31.pdf?sequence=1&isAllowed=y

World Green Building Council. (2019). Bringing embodied carbon upfront. Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon. 35 s. Saatavissa: <https://www.worldgbc.org/news-media/bringing-embodied-carbon-upfront>

YIT, a. (2019): Strategia vuosille 2020-2022 - kestävä kaupunkikehitys vauhdittaa suorituskykyä yli suhdanteiden. Viitattu 13.1.2020. Saatavissa: <https://www.yit-group.com/fi/sijoittajat/yit-sijoituskohteena/strategia#>

YIT, b. (2019) Kestävän kehityksen johtaminen. Viitattu 16.1.2020. Saatavissa: <https://www.yitgroup.com/fi/kestavakehitys/kestavan-kehityksen-johtaminen>

Ympäristöministeriön julkaisuja 22. (2019) Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä. 58 s. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisuuden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ympäristöministeriö. (1994) Professori Pentti Malaskan johtaman työryhmän laatima muistio kestävän kehityksen määritelmästä. 9 s. Saatavissa: https://www.ym.fi/fi-fi/ym-paristo/kestava_kehitys/mita_on_kestava_kehitys#Ekologinen%20kest%C3%A4vyys

LIITE A: YMPÄRISTÖMINISTERIÖN LASKENTAOHJEET

Arvioitavat rakennusosat

TONTTI		
	Sisältyy arviointiin	Ei sisälly
Maaosat	Raivaukset, kaivannot, kanaalit, täyttöosat, penkereet, kuivatusosat	Alueen varusteet
Tuennat ja vahvistukset	Paalut, pysyvät tuennat, vahvistukset	Kasvillisuus
Päällysteet	Liikennealueiden päällysteet, paikoitusalueiden päällysteet, oleskelu- ja leikkialueiden päällysteet	Kasvillisuuden, maaperän tai vesistöjen muutoksista aiheutuvat ilmastovaikutukset
Alueen rakenteet	Pihavarastot, pihakatokset, portaat, luiskat ja terassit	
KANTAVAT RAKENTEET		
	Sisältyy arviointiin	Ei sisälly
Perustukset	Anturat, perusmuurit, -pilarit ja -palkit	
Alapohjat	Alapohjalaatat, alapohjakanaalit	Tuotteisiin kuulumattomat erilliset naulat, ruuvit, liimat, tiivisteet, saumaukset ja muut kiinnikkeet
Runko	Väestönsuojat, kantavat seinät, pilarit, palkit, välipohjat, runkoportaat	
Julkisivut, ovet ja ikkunat	Ulkoseinät, ikkunat, ulko-ovet	
Ulkotasot	Parvekkeet, katokset, erityiset ulkotasot	
Kattorakenteet	Vesikattorakenteet, räystäsrakenteet, vesikatteet, lasikattorakenteet, kattoikkunat ja -luukut	
TÄYDENTÄVÄT RAKENTEET		
	Sisältyy arviointiin	Ei sisälly
Väliseinät ja ovet	Väliseinät, lasiväliseinät, väliovet, erityisovet	Pintamateriaalit ja listat
Portaat	Tilaportaat	Pintakäsittelyt ja maalaukset

Pintarakenteet	Lattioiden pintarakenteet, sisäkattorakenteet, seinien pintarakenteet	Tuotteisiin kuulumattomat erilliset naulat, ruuvit, liimat, tiivisteet, saumat ja muut kiinnikkeet
Tyypilliset kiintokalusteet Hornit ja tulisijat	Vakiokiintokalusteet	
Tilaelementit	Kylpyhuone-elementit, saunaelementit, talotekniikan elementit, hormielementit	

TALOTEKNIikka

	Sisältyy arviointiin	Ei sisälly
Lämmitysjärjestelmät	Keskusosat (kattilalaitteistot, poltinlaitteistot, savupiiput, maa- ja ilmalämpöpumppulaitteistot, aurinkolämpölaitteistot), siirto-osat (vaihtoverkostot, liuosputkistot, ilmakeinavat), pääteosat (patterit, säteilylämmittimet, lattialämmitysputkistot, tuloilmalämmittimet), alueosat (verkostot, lämpökeskukset, piiput, polttoaineiden varastot, aurinko-, lämpöpumppu- ja yhdistelmälämmitysjärjestelmien laitteistot, lämmön varastointilaitteistot, putkistot)	Tietotekniset järjestelmät
Vesi- ja viemärijärjestelmät	Siirto-osat (säiliöt ja varaajat), pääteosat (sekoittimet, hanat, altaat, wc-istuimet, virtsalot, ammeet, suihkualtaat, -kaapit), alueosat (talovesijohdot, tonttijohdot, jätevesiviemärit, tarkastuskaivot, hulevesikaivot, sadevesiviemärit)	Taloautomaatio

Ilmastointijärjestelmät	Keskusosat (koneet osineen, poistoilmakoneet, kierrätysilmakoneet, tuloilmakoneet, lämmöntalteenottolaitteistot, jäteilman puhdistuslaitteistot), siirto-osat (putket ja kanavat), pääteosat (poistoilmaikkunat), alueosat (ulko- ja jäteilmakuilut ja -kanavat, talteenottolaitteistot, suodatinlaitteistot, ulkoilma- ja ulospuhalluslaitteet)	Varavirtajärjestelmät
Jäähdytysjärjestelmät	Keskusosat (koneet, laitteet, pumput, höyrystimet, lämmönsiirtimet, lauhduttimet, säiliöt), siirto-osat (putkistot), pääteosat (patterit, ilmastointikoneet, ilmastointipalkit), alueosat (verkosto, keskukset, putkistot)	Liukuportaatt
Sprinklerit	Vesijohdot, sprinkleriputkistot	Erilliset koneet ja laitteet
Sähköjärjestelmät	Tuotanto ja liittäminen, pääjakelu, sähköistys, valaistusjärjestelmät, sähkölämmitysjärjestelmät	
Hissit		

TYÖMAA

Sisältyy arviointiin	Ei sisälly
Työmaalla kulutettu energia	Telineet, suojaukset
	Väliaikaiset rakenteet, muotit ja tekniset laitteet
	Työmaatilojen elinkaari
	Työmaan henkilöliikenne

Perustuu lähteeseen Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.18,43

Taloteknisten järjestelmien päästötietoja

Tavanomaisia järjestelmiä	
(pinta-aratiedot ilmoitettu rakennuksen huonealaa kohti)	
Hissi	7585,00 kg CO ₂ /kpl
Sähköasennukset ja kaapeloinnit	5,28 kg CO ₂ /m ²
Sprinklerijärjestelmä	5,85 kg CO ₂ /m ²
Vesi- ja viemäri-laitteistot	
(pinta-aratiedot ilmoitettu rakennuksen huonealaa kohti)	
Vesijohtojärjestelmä	2,70 kg CO ₂ /m ²
Viemäriputkisto	0,52 kg CO ₂ /m ²
Lämmitys-järjestelmä	
(pinta-aratiedot ilmoitettu rakennuksen huonealaa kohti)	
Patteriverkosto	6,67 kg CO ₂ /m ²
Lämmönjakokeskus	0,53 kg CO ₂ /m ²
Ilmanvaihtojärjestelmä	6,97 kg CO ₂ /m ²
Aurinkopaneelit	
(pinta-aratiedot ilmoitettu aurinkopaneelin keräinpinta-alaa kohti)	
Kiteinen aurinkopaneeli	242,00 kg CO ₂ /m ²
Ohutkalvopaneeli	67,00 kg CO ₂ /m ²
Verkkoinvertteri	22,00 kg CO ₂ /kpl

Neliömetrikohtaiset tiedot on ilmoitettu lämmitettyä huonealaa kohti. Jos laskennassa käytetään kerrosalaa, jaetaan nämä luvut jakajalla 1,18.

Elinkaarivaiheiden päästöjen taulukkoarvot

Elinkaaren vaihe (moduuli)		Tyypilliset päästöt (kgCO ₂ e/m ²) (lämmitetty nettoala)	
A1-3	Valmistus	Lasketaan hankekohtaisesti	
A4	Kuljetus työmaalle	10,2	Keskimääräinen kuljetusetäisyys Suomessa
A5	Uudisrakennustyömaan toiminnot	27,3	Työmaan energian ja polttonesteiden kulutus
B3-4	Korjausten energiankulutus	2,16	Materiaalien valmistus arvioitava erikseen
B6	Energian käyttö	Lasketaan hankekohtaisesti	
C1	Purkutyömaan toiminnot	7,8	Työmaan energian ja polttonesteiden kulutus
C2	Kuljetus jatkokäsittelyyn	10,2	Keskimääräinen kuljetusetäisyys Suomessa
C3-4	Jätteenkäsittely ja loppusijoitus	15,6	
Yhteensä		73,26	

Tulokset jyvitetään rakennuksen käyttöiälle (kgCO₂e/m²/a).

Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.45

Tuotteiden vaihtovälin laskenta

Rakennustuotteiden vaihtojen tarkka arviointi voidaan tehdä kaavalla:

$$\text{Vaihtoväli} = \left[\left(\frac{\text{Rakennuksen tavoitekäyttöikä vuosina}}{\text{Tuotteen suunnittelukäyttöikä vuosina}} \right) - 1 \right]$$

Esimerkki:

Rakennuksen tavoitekäyttöikä on 100 vuotta. Rakennustuotteen suunniteltu käyttöikä on 30 vuotta. Tuote vaihdettaisiin näin ollen:

$$\left[\left(\frac{100}{30} \right) - 1 \right] = 2,3 \text{ kertaa}$$

Energiamuotojen päästökertoimet

	ENERGIAMUOTO				
	Sähkö	Kaukolämpö	Kauko-jäähdytys	Fossiiliset polttoaineet	Uusiutuvat polttoaineet
2020	121	130	130	260	0
2030	57	93	93	260	0
2040	30	63	63	260	0
2050	18	37	37	260	0
2060	14	33	33	260	0
2070	7	22	22	260	0
2080	4	15	15	260	0
2090	2	10	10	260	0
2100	1	7	7	260	0
2110	1	4	4	260	0
2120	0	3	3	260	0

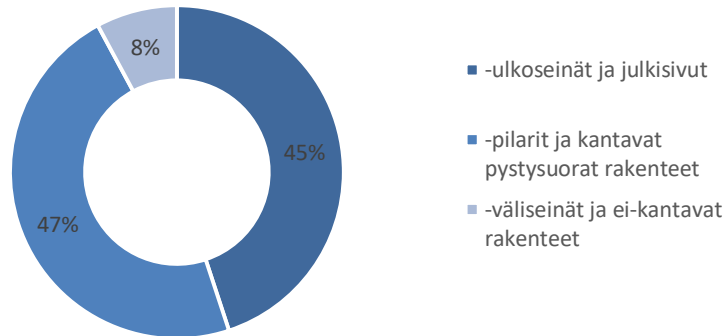
Päästökertoimet (g CO₂/kWh)

Ympäristöministeriön julkaisuja. 2019, s.46

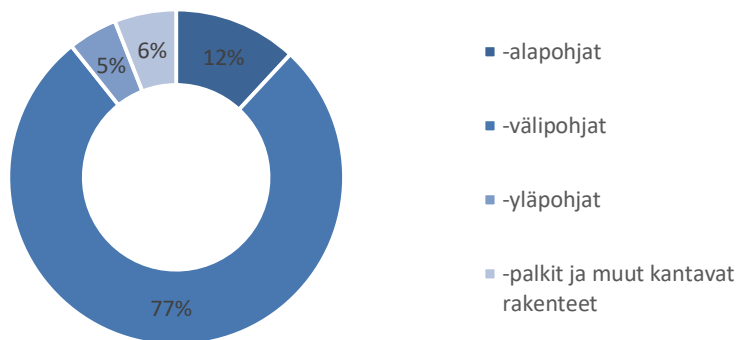
LIITE B: RAKENNUSOSIEN PÄÄSTÖJAKAUMA KOHDERAKENNUKSISSA

Kohde 1 AB: Materiaalipäästöjen jakautuminen rakenteille, kun rakenteiden käyttöiät on huomioitu.

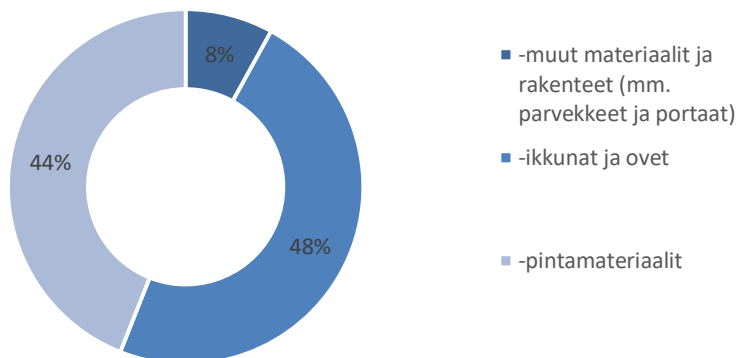
Pystyrakenteet



Vaakarakenteet

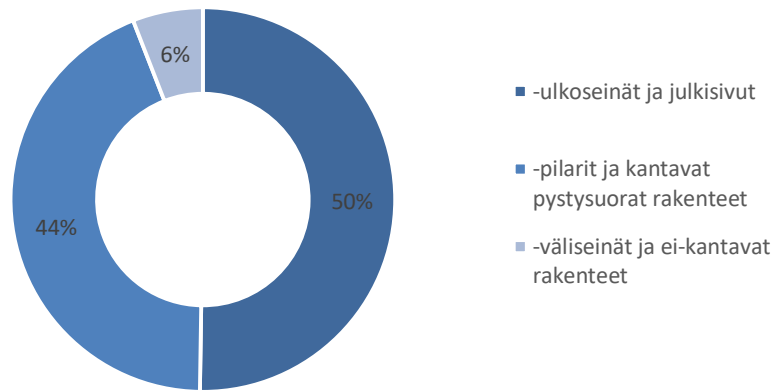


Muut materiaalit ja rakenteet

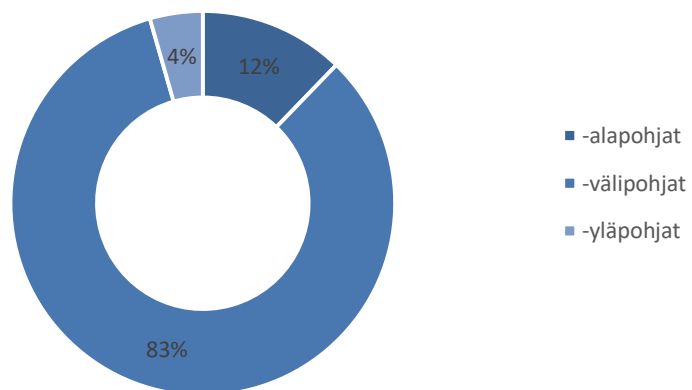


Kohde 1 C: Materiaalipäästöjen jakautuminen rakenteille, kun rakenteiden käyttöiät on huomioitu.

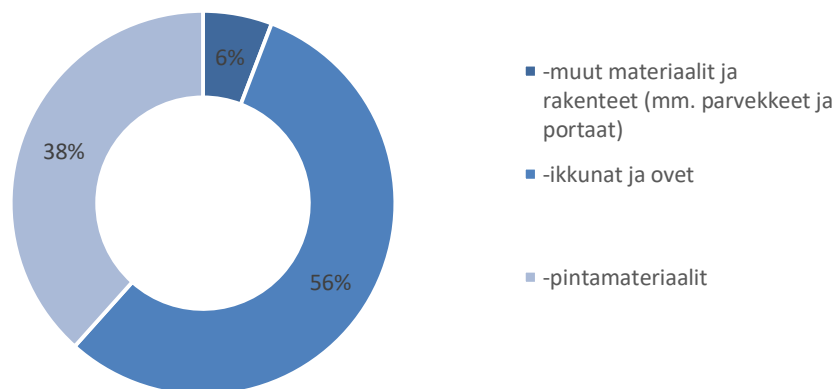
Pystyrakenteet



Vaakarakenteet

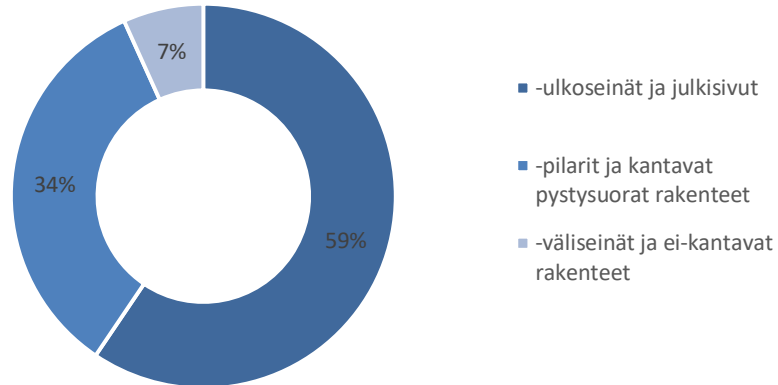


Muut materiaalit ja rakenteet

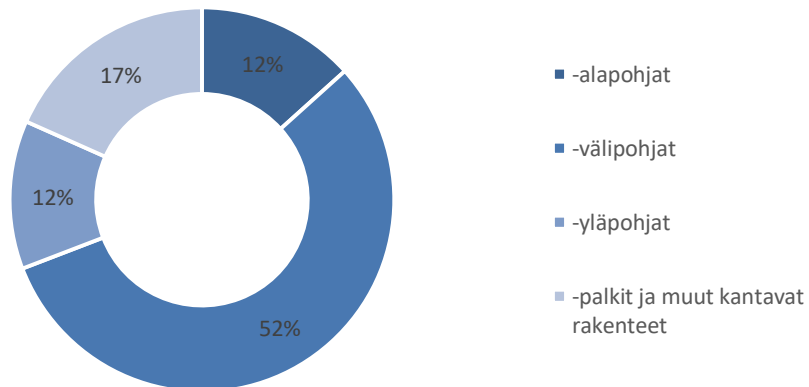


Kohde 2: Materiaalipäästöjen jakautuminen rakenteille, kun rakenteiden käyttöiät on huomioitu.

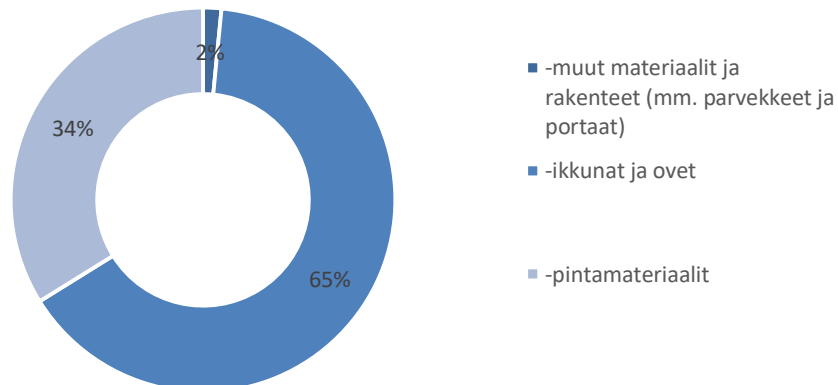
Pystyrakenteet



Vaakarakenteet

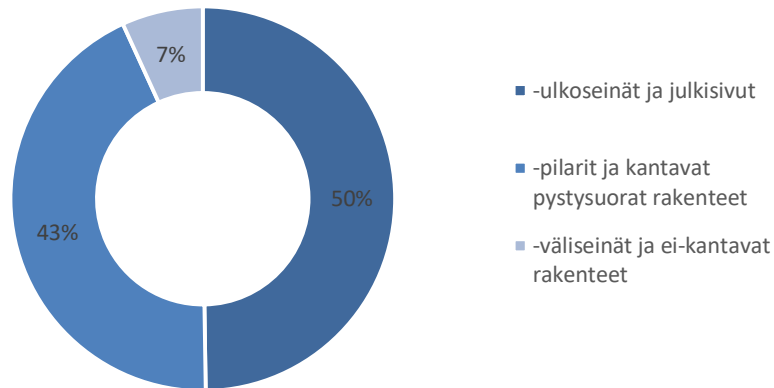


Muut materiaalit ja rakenteet

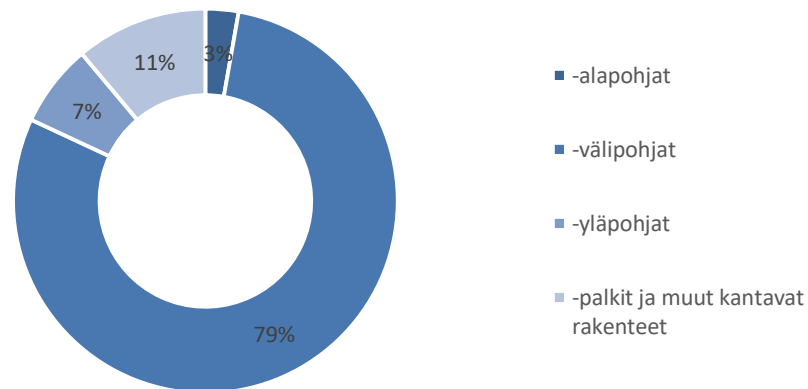


Kohde 3: Materiaalipäästöjen jakautuminen rakenteille, kun rakenteiden käyttöiät on huomioitu.

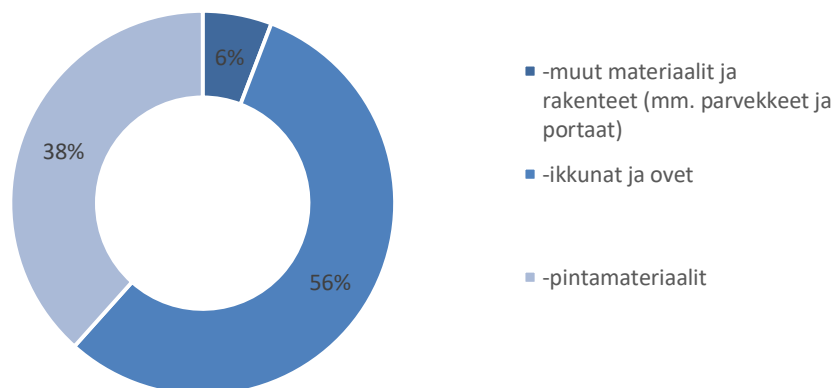
Pystyrakenteet



Vaakarakenteet



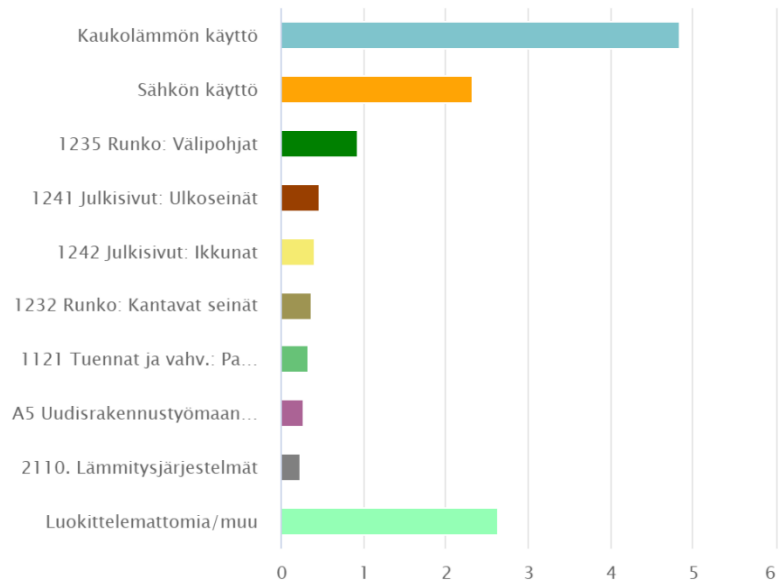
Muut materiaalit ja rakenteet



LIITE C: KOHDERAKENNUSTEN ELINKAAREN HIILIJALANJÄLJEN TARKEMPI JAKAUTUMINEN

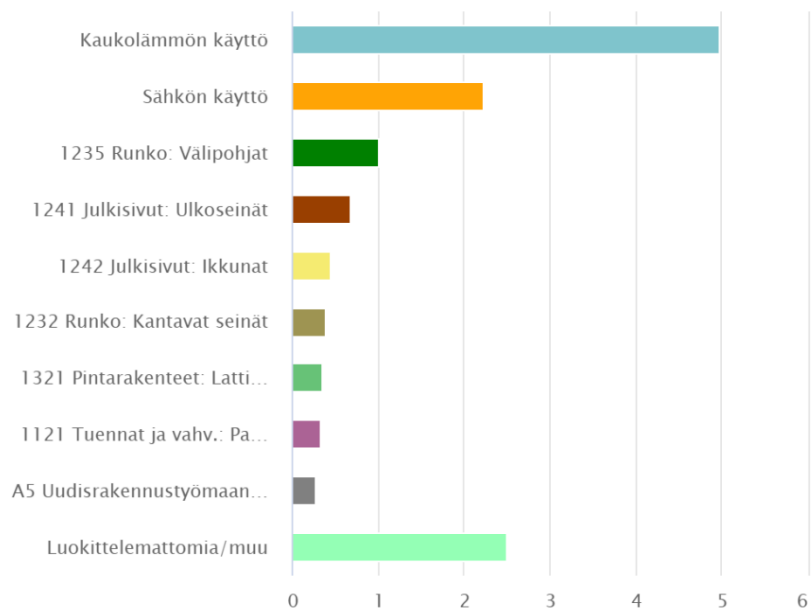
Kohde 1 AB

Ilmaston lämpeneminen, kg CO₂e/m²/a - Rakennuksen osat

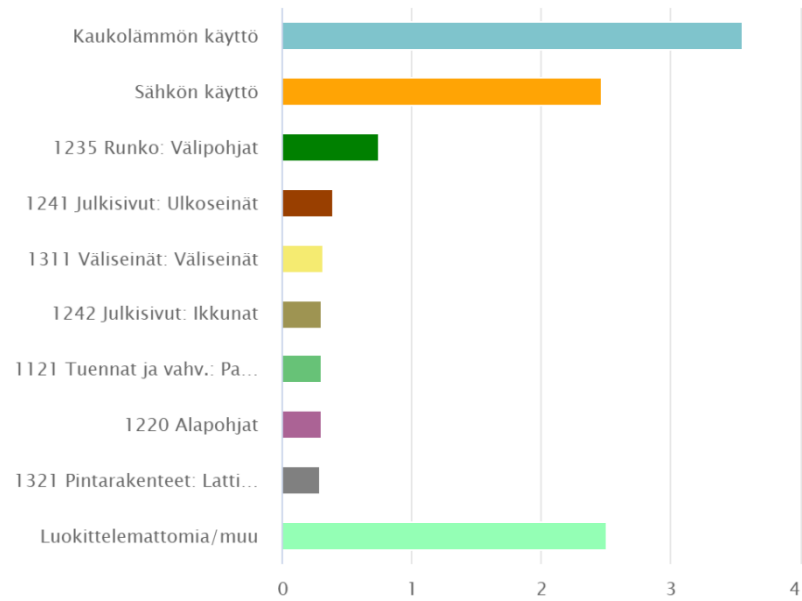


Kohde 1 C

Ilmaston lämpeneminen, kg CO₂e/m²/a - Rakennuksen osat



Kohde 2

Ilmaston lämpeneminen, kg CO₂e/m²/a - Rakennuksen osat

Kohde 3

Ilmaston lämpeneminen, kg CO₂e/m²/a - Rakennuksen osat