

Tatu Tikkanen

**RAKENNUSMATERIAALIEN VAIKUTUS
KERROSTALORAKENTAMISEN
KASVIHUONEPÄÄSTÖIHIN**

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Lokakuu 2020

TIIVISTELMÄ

Tatu Tikkanen: Rakennusmateriaalien vaikutus kerrostalorakentamisen kasvihuonepäästöihin

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Vastuuohjaaja ja tarkastaja: Professori Kalle Kähkönen

Lokakuu 2020

Ilmastonmuutos ja siitä johtuva ilmaston lämpeneminen ovat yksi aikamme suurimpia globaaleja ongelmia. Rakennusten osuus globaaleista kasvihuonepäästöistä on suuri, mutta rakentamisen pitäisi olla myös yksi tehokkaimmista sektoreista vähentää päästöjä. Kun asuinrakennuksista tehdään entistä energiatehokkaampia, materiaali pohjaisten kasvihuonepäästöjen osuus elinkaaren päästöistä kasvaa. Rakennusmateriaalien vaikutukset kasvihuonepäästöihin on oleellista tunnistaa, koska niiden vähentäminen on ratkaisevassa roolissa rakennusalan tavoitteissa kohti vähäpäästöisyyttä.

Diplomityössä tehtiin kirjallisuusselvitys ja kartoitettiin nykytilanne rakentamisen kasvihuonepäästöistä ja niiden jakautumisesta rakennushankkeessa. Kirjallisuudesta etsittiin myös keinoja päästöjen vähentämiseksi ja käsiteltiin rakennuksen vähähiilisuuden arvioinnin keinoja. Rakennusmateriaaleihin sitoutuneeseen hiileen ja kasvihuonepäästöihin perehdyttiin erityisesti kolmen yleisimmän materiaalin eli betonin, teräksen ja puun osalta. Näitä materiaaleja myös vertailtiin keskenään. Lisäksi esiteltiin keinoja rakennuksen kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi materiaalivalinnoin.

Kerrostalorakentamisen kasvihuonepäästöjä selvitettiin mallintamalla kohdeyrityksen keskiarvoinen asuin kerrostalo hiilijalanjäljen laskentaohjelmaan. Mallinnuksen avulla haluttiin selvittää rakennuksen kasvihuonepäästöihin eniten vaikuttavat rakennusmateriaalit ja -tuotteet. Mallinnetun keskiarvoisen kerrostalon materiaali pohjaisista päästöistä valmisbetoni käsitti 24,5 % ja ontelolaatat 20,0 % kokonaishiilidioksidiekvivalentista. Kolme vaikuttavinta materiaalia, eli valmisbetoni, ontelolaatat ja betonielementtiseinät käsittivät 57,0 % materiaali pohjaisista kasvihuonepäästöistä. Mallinnuksessa betoni aiheutti toiseksi eniten (20,0 %) koko elinkaaren päästöistä, kun energia ja vesi aiheuttivat 57,6 %.

Keskiarvoisesta kerrostalosta mallinnettiin vaihtoehtoisia teoreettisia skenaarioita erilaisin materiaaliratkaisuilla. Skenaarioita vertailtiin keskenään ja etsittiin mahdollisimman hyviä ratkaisuja ympäristöarvoiltaan ja kustannuksiltaan. Käyttämällä vähäpäästöistä betonia vaaka- ja pystyrakenteissa sekä perustuksissa saatiin materiaali pohjaisia kasvihuonepäästöjä vähennettyä noin 20 % tavanomaiseen betoniin verrattuna. Jos korvattiin pelkät välipohjat vähäpäästöisemmällä betonilla, vähennys oli noin 7 %. Kun verrattiin ontelolaattavälipohjaa ympäristöystävällisempään ontelolaattavälipohjaan, päästöjen vähennys oli noin 6 %. Puurunkorakenteisen mallinnuksen huomattiin vähentävän materiaali pohjaisia päästöjä noin 30 % verrattuna alkuperäiseen skenaarioon. Tulosten realismia vertailtiin myös kirjallisuudessa esitettyihin tutkimuksiin.

Materiaaliperäisiin kasvihuonepäästöihin voidaan tehokkaimmin vaikuttaa aikaisin suunnitteluvaiheessa. Rakennuttajan, suunnittelijan ja materiaali toimittajien välinen yhteistyö on oleellista, kun halutaan kevyitä, energiatehokkaita ja ympäristöystävällisiä materiaaliratkaisuja. Materiaali peräisille kasvihuonepäästöille ei kuitenkaan tule asettaa liian korkeita päästövähennysvaatimuksia elinkaaren kasvihuonepäästöjen kustannuksella. Myöskään pelkillä rungon toimenpiteillä ei tutkimuksen perusteella päästä kohdeyrityksen tai rakennusalan päästötavoitteisiin. Aiheesta suositellaan tehtävän jatkotutkimusta ottaen huomioon diplomityöstä ulos rajatut tekijät kustannus-ympäristösuhteiden tarkemmaksi selvittämiseksi.

Avainsanat: elinkaaren päästöt, hiilijalanjälki, ilmastonmuutosvaikutus, kestävä rakentaminen, kasvihuonepäästöt, rakennusmateriaalien kasvihuonepäästöt, sitoutuneet kasvihuonepäästöt

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Tatu Tikkanen: The Effect of Building Materials on Greenhouse Emissions of Construction of Apartment House

Master of Science Thesis

Tampere University

Degree Program in Civil Engineering

Responsible Supervisor and Examiner: Professor Kalle Kähkönen

October 2020

Climate change and global warming caused by it is one of the greatest problems of our era. A large portion of global greenhouse emissions is accounted to construction, yet it should be one of the most efficient sectors in reducing them. When residential buildings are built more energy efficient, the portion of material-related greenhouse emissions increases. The effects of building materials on greenhouse emissions are crucial to identify because reducing them is a key factor in the aim towards less emissions of construction.

A literature research and present state mapping regarding greenhouse emissions of buildings and their division in construction project was done in the Thesis. Means to reduce emissions was searched from literature and ways to evaluate low-carbon buildings was addressed. Embodied carbon of building materials and their greenhouse emissions was explored specifically on three of the most common materials i.e. concrete, steel and timber. These materials were as well compared between each other. Additionally, means of reducing greenhouse emissions by material choice was presented.

Greenhouse emissions of apartment buildings were examined by modelling an average residential building built by subject company to a carbon footprint calculation program. The purpose of the modelling was to research the building materials and products which factor the most to greenhouse emissions of a building. Of carbon dioxide equivalent ready-mixed concrete consisted of 24,5 % and hollow-core slabs 20,0 % of material-related emissions of the modelled average building. The three materials which had most impact, ready-mixed concrete, hollow-core slabs and concrete element walls accounted for 57,0 % of material-related emissions. Concrete caused the second most (20,0 %) of life cycle emissions, when energy and water caused 57,6 %.

Alternative theoretical scenarios with various material solutions were modelled based on the average apartment building. Scenarios were compared with each other with an intent of finding the most potential environmental and financial conclusions. Using low-emission concrete in horizontal and vertical structures as well as foundations the material-related emissions did decrease by circa 20 % compared to ordinary concrete. If only floor was substituted with low emission concrete the decrease was approximately 7 %. Comparing hollow-core slab with environmentally friendly alternative the emissions decreased by circa 6 %. Timber frame modelling was discovered to reduce material-related emissions by approximately 30 % when compared to original scenario. The reality of the results was also compared to researches expressed in literature.

The most efficient way to have an impact on material-related greenhouse emissions is early in the design phase. Co-operation of developer, designer and material supplier is essential when material conclusions are wanted lightweight, energy efficient and environmentally friendly. However, demands of decreasing material-related emissions should not be set too eminent at the cost of life cycle emissions. According to research, actions on purely framework are not sufficient either to match the emission reducing targets of subject company or those of construction business. It is suggested that additional research considering the restricted factors in this thesis is done on the matter to further resolve expense-environment relations more specifically.

Key words: life cycle emissions, carbon footprint, climate change effect, sustainable construction, greenhouse emissions of building materials, embodied greenhouse emissions

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

ALKUSANAT

Kiinnostukseni ympäristöystävällistä rakentamista kohtaan on kasvanut viime vuosien aikana. Sen takia olikin hienoa päästä tekemään diplomityötä näin mielenkiintoisesta ja ajan-kohtaisesta aiheesta. Kiitos YIT:lle tästä mahdollisuudesta, ja kiitokset myös ohjaajalleni Mika Niemiselle sekä Mika Toivoselle ja Elina Virolaiselle. Kiitän myös vastuuhjaajaani, professori Kalle Kähköstä sekä muita korvaamattomia kommentteja ja ohjeistusta antaneita.

Kevät muutti lähes kaikkien arkea tavalla tai toisella. Etätyösuositusten jälkeen tätä diplomityötä tulikin kirjoitettua lähinnä kalliolaisen kaksion keittiön pöydän ääressä puisella, lopun viimein kohtalaisen epämukavalla tuolilla. Laadukkaasta musiikista oli paljon apua tässä kirjoitusprosessissa, joten lienee paikallaan kiittää muusikoita ja kulttuurikenttää.

Haluan kiittää hienoja ystäviäni. Suuri kiitos myös perheelleni tuesta vuosien varrella. Kiitos erityisesti Maijulle henkisestä tuesta ja seurasta, selkärangan tarjoamisesta paikoitellen katki menneen tilalle ja lopuksi työn oikolukemisesta.

Kuten diplomityön tuloksistakin voidaan päätellä, rakennusalan on aika toimia ilmaston lämpenemisen pysäyttämiseksi. Toivon, että tulevaisuudessa meillä on vielä maapallo, jolla voimme elää.

Helsingissä, 25.10.2020.

Tatu Tikkanen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	3
1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne	4
2. RAKENNUSTEN KASVIHUONEPÄÄSTÖT	5
2.1 Kasvihuonepäästöjen muodostuminen	5
2.2 CO ₂ -ekvivalenttiajattelu	7
2.3 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen arviointi	8
2.4 Ympäristöseloste EPD	12
2.5 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen jakautuminen	14
2.6 Kasvihuonepäästöjen pienentämisen keinoja	22
3. RAKENNUSMATERIAALEIHIN SITOUTUNUT HIILI JA KASVIHUONEPÄÄSTÖT	27
3.1 Sementtipohjaisten materiaalien kasvihuonepäästöt	28
3.2 Teräsmateriaalien kasvihuonepäästöt	30
3.3 Puumateriaaleihin sitoutunut hiili	31
3.4 Materiaalien vertailu ja kasvihuonepäästöjen vähentäminen materiaalivalinnoin	34
4. KASVIHUONEPÄÄSTÖJEN SIMULOINTI	39
4.1 Simulointi OneClick LCA -ohjelman avulla	39
4.2 Indeksitalo sekä sen perustiedot ja käytetyt arvot	41
4.3 Indeksitalon mallinnuksen tulokset	44
4.4 Kasvihuonepäästöihin eniten vaikuttavat tuotteet ja materiaalit	47
5. KASVIHUONEPÄÄSTÖJEN VERTAILU	53
5.1 Vaihtoehtojen mallinnus	53
5.2 Ontelolaattavälipohjan ja paikallavälipohjan mallinnus	55
5.3 Mallinnetut skenaariot ja analyysi	57
5.4 Materiaalitoimittajien ratkaisuja hiilijalanjäljen pienentämiseksi	63
6. KUSTANNUKSET JA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	65
6.1 Kustannuslaskennan lähtökohdat	65
6.2 Mallinnettujen skenaarioiden kustannus-ympäristösuhteet	66
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	72
LÄHTEET	75
LIITE A: ILMASTONMUUTOSVAIKUTUS (CO ₂ E) ELEMENTEITTÄIN	80

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CEN	European Committee for Standardization.
CO ₂ e	Hiilidioksidiekvivalentti. Kuvastaa kaikkien ilmakehään vapautuneiden kasvihuonekaasujen yhteenlaskettua summaa. Ilmastoa lämmittävä vaikutus saadaan laskettua suhteuttamalla muut kaasut hiilidioksiidiin tietyillä kertoimilla.
CO ₂ -päästöt	Ihmisen toiminnan takia aiheutuneet hiilidioksidipäästöt ilmakehään.
elinkaaren päästöt	Rakennuksen elinkaaren moduuleiden A-C aikana syntyneiden kasvihuonepäästöjen summa.
EPD	engl. Environmental Product Declaration, suomeksi ympäristöseloste tai ympäristötuoteseloste.
hiilijalanjälki	Kuvaa henkilön, organisaation tai tapahtuman suoraan tai epäsuoraan tuottamia kasvihuonepäästöjä.
ISO	Organization for Standardization.
kasvihuonekaasut	Ilmakehässä oleva kaasu, joka absorboi ja uudelleensäteilee lämpöä ja siten tekee maan ilmakehästä lämpimämmän kuin mitä se olisi ilman kyseistä kaasua.
kasvihuonepäästöt	Ihmisen toiminnan takia ilmakehään vapautuneet kasvihuonekaasut.
kehdosta portille	Tuotteen elinkaari raaka-aineen hankinnasta valmiiksi tuotteeksi.
kestävä	engl. sustainable. Luonnonvaroja järkevästi käytävä, resurssitehokas, pitkäikäinen, ekologinen, ilmastonmuutosta hillitsevä. Kestävän kehityksen periaatteiden mukainen tuote tai toiminta.
LCA	engl. Life Cycle Assessment eli elinkaariarviointi. Rakennuksen elinkaariarviointi ottaa huomioon rakennushankkeen suorat ja epäsuorat ilmastovaikutukset raaka-aineiden hankinnasta purkuun asti.
nollaenerginen	Energiankulutukseltaan vähintään passiivitasoinen rakennus, jossa tuotetaan mahdollisimman paljon uusiutuvaa energiaa.
passiivirakennus	Rakennus, jonka lämmitykseen kuluu energiaa Etelä-Suomessa maksimissaan 20 kWh/m ² /a, Pohjois-Suomessa 30 kWh/m ² /a.
päästöt	Ilman etuliitettä pelkillä päästöillä tarkoitetaan kasvihuonepäästöjä.
sitoutuneet päästöt	Materiaaliperäiset kasvihuonepäästöt eli päästöt, jotka aiheutuvat materiaalin valmistuksesta, kuljetuksesta, korvaamisesta sekä niiden hävittämisestä.

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Tämän diplomityön aihe on rakennusmateriaalien vaikutus kasvihuonepäästöihin kerrostalorakentamisessa. Aihetta tutkitaan, koska kasvihuonepäästöjen pienentäminen on tärkeää globaalissa ilmastonmuutoksen torjunnassa. Ilmastonmuutos on monien tutkijoiden mielestä aikamme tärkein globaali haaste, joka meidän tulee ratkaista. World Green Building Councilin raportin mukaan tällä hetkellä rakennukset aiheuttavat 39 % maailman energiaan liittyvistä hiilidioksidipäästöistä. 28 % aiheutuu toiminnallisista päästöistä eli rakennuksen lämmityksestä, jäähdytyksestä ja sähköistyksestä, loput 11 % aiheutuvat rakentamisesta. (Adams et al. 2019)

Ihmisen toiminnan takia ilmakehään vapautuneet kasvihuonekaasut eli kasvihuonepäästöt kiihdyttävät ilmastonmuutosta. Ihmisen toiminnan on arvioitu nostaneen maapallon keskilämpötilaa jo noin 1,0 °C:lla verrattuna esiteolliseen aikaan. Maapallon keskilämpötila nousee 1,5 °C:een vuosien 2030 ja 2052 välillä, jos ilmaston lämpeneminen jatkuu samalla tahdilla kuin nyt. Mikäli kasvihuonepäästöjä ei vähennetä, maapallon keskilämpötila voi jatkaa nousuaan 2,0 °C:een. Tällöin ilmaston lämpenemisen aiheuttamat ilmiöt olisivat vieläkin radikaalimpia ja tuhoisampia kuin mitä ne olisivat, jos ilmaston lämpeneminen saadaan pysäytettyä. (IPCC 2018)

Jos ihmisen toiminta ei muutu, maan, rannikoiden ja merien biodiversiteetit ja ekosysteemit kokevat paljon suurempia muutoksia kuin mitä ne tähän mennessä ovat joutuneet kokemaan. Tämä tarkoittaisi esimerkiksi sitä, että tulevaisuudessa yhtenä kesänä vuosikymmenessä Pohjoisnavalla ei olisi lainkaan jäätä, äärimmäinen kuivuus tekisi useita asuinalueita asuin- kelvottomaksi, sään ääri-ilmiöt yleistyisivät ja merivedet happamoituisivat. Myös meriveden pinta nousisi, mistä aiheutuisi esimerkiksi rannikoiden, suistoalueiden ja saarien tulvimista ja suolaveden aiheuttamia ongelmia niin luonnollisissa ekosysteemeissä kuin ihmisten asuttamilla alueilla. Lisäksi useita kasvi- ja eläinlajeja kuolisi sukupuuttoon. Jos ilmaston lämpeneminen voidaan pysäyttää 1,5 °C:een, joitakin näistä ja monista muista ilmiöistä voidaan vielä peruuttaa tai ainakin osittain lieventää. (IPCC 2018)

Pääministeri Sanna Marinin vuoden 2019 hallitusohjelman kohdan 3.1 ”Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi” tavoitteen 1 mukaan Suomi on hiilineutraali vuonna 2035. Tavoite 4 on pienentää asumisen ja rakentamisen hiilijalanjälkeä. Tämän tavoitteen

aikaan saamiseksi hallitus aikoo luoda hiilineutraaliuteen tähtäävän suunnitelman alan toimijoiden kanssa. Hallitus aikoo myös jatkaa vähähiilisen rakentamisen tiekartan toimeenpanoa sekä kehittää rakennuksen elinkaaren aikaiseen hiilijalanjälkeen perustuvaa säädösohjausta. Lisäksi materiaalien kierrätystä ja kiertotaloutta tehostetaan rakennusallalla. (Valtioneuvosto 2019) Lähitulevaisuudessa sekä globaalit että valtiolliset säännökset ja velvoitteet kiristyvät päästöjen vähentämisen osalta.

Vuoteen 2025 mennessä maailman väkiluvun ennustetaan nousevan kymmeneen miljardiin, ja maailman rakennuskannan tuplaantuvan. Ennen rakennuksen käyttövaihetta aiheutuvat CO₂-päästöt (engl. upfront carbon) aiheuttavat puolet koko uusien rakennusten CO₂-päästöjen määrästä tämän hetken ja vuoden 2050 välillä. (Adams et al. 2019)

Koska rakentaminen aiheuttaa suuren osan kaikista kasvihuonepäästöistä, sen pitäisi olla myös tehokkaimpia sektoreita vähentää niitä. Rakentamisen elinkaaren aikana noin 30% hiilidioksidipäästöistä muodostuu materiaalien valmistamisesta (raaka-aineiden hankinta ja valmistus), kuljetuksesta ja työmaan aikaisesta rakentamisesta (Ruuska & Häkkinen 2013). Rakennusten osuus Euroopassa on noin 40 % kaikesta energiankulutuksesta ja lisäksi rakennukset aiheuttavat 36 % kaikista hiilidioksidipäästöistä Euroopassa (Euroopan komissio 2016). Betonirakentamisesta aiheutuvat päästöt ovat yksi merkittävimpiä kasvihuonepäästöjen lähteistä rakentamisessa (Ruuska & Häkkinen 2015).

Aiempaa tutkimusta aiheesta on tehty jonkin verran, ja varsinkin 2010-luvulla Suomessa esimerkiksi on tehty paljon selvitystä rakentamisen kasvihuonepäästöihin liittyen (ks. esim. Häkkinen et al. 2015; Pasanen et al. 2011; Punkki et al. 2010; Ruuska & Häkkinen 2013, 2014, 2015; Ruuska et al. 2013; Säynäjoki et al. 2011, 2012; Vares et al. 2017). Rakennusalan yritykset ovat myös enenevässä määrin kiinnostuneita rakennusalan aiheuttamista kasvihuonepäästöistä ja ympäristöystävällisestä rakentamisesta. Viimeisen kymmenen vuoden aikana myös tutkimuksen määrä on lisääntynyt suuresti kaikkialla maailmassa.

Tämä työ on tehty toimeksiantona rakennusyritys YIT Suomi Oyj:lle. YIT Suomi Oyj on suuri suomalainen rakennusalan yritys, jolla on toimintaa asunto-, toimitila- ja infrarakentamisen sektoreilla. Kohdeyritys on ottanut yhdeksi strategian painopisteeksi kasvihuonepäästöjen vähentämisen, sekä luvannut pienentää omasta toiminnasta johtuvia kasvihuonepäästöjä 50 % vuoteen 2030 mennessä, vuoden 2019 tasoon verrattuna. Lisäksi tavoitteena on mahdollistaa omaperusteisten hankkeiden ilmastoneutraali käyttö vuoteen 2030 mennessä, sekä raportoida omaperusteisten hankkeiden kohdekohtaiset kasvihuonepäästöt vuodesta 2020 alkaen. (YIT Suomi Oyj 2020)

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Rakennuksen elinkaareissa käyttövaihe on perinteisesti ollut ympäristökuormituksiltaan suurin. Tilanne kuitenkin muuttuu tulevaisuudessa muutamasta eri syystä. Asuinrakennuksista tehdään entistä energiatehokkaampia, jolloin asuntojen energiankulutus pienenee ja luonnollisesti myös kasvihuonepäästöt pienenevät. Lisäksi energian ominaispäästöt pienentyvät, mikäli vihreän energian markkinaosuus kasvaa. Nämä tekijät pienentävät käyttövaiheen kasvihuonepäästöjä, jolloin rakentamisvaiheen päästöt kasvavat suhteessa ja joissakin tapauksissa absoluuttisesti. Tällöin elinkaaren vaiheista rakentamisvaihe muodostuu entistä tärkeämmäksi kohteeksi vähentää kasvihuonepäästöjä. (Punkki 2019, Säynäjoki et al. 2012, Ruuska & Häkkinen 2015, Röck et al. 2020) Rakennusmateriaaleille on jo olemassa ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja, ja tulevaisuudessa niitä tulee markkinoille lisää. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset ovat rakennusalan toimijoille ajankohtainen ja kiinnostava asia, joten yhtenä tavoitteena tässä työssä on löytää tavanomaisesti käytetyille materiaaleille ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja. Tähän keskitytään erityisesti selvittämällä materiaalien ekologisuutta ja vertailemalla niitä keskenään.

Johtuen rakennuksen tuote- ja rakentamisvaiheen kasvavasta merkityksestä elinkaaren kasvihuonepäästöissä, tässä työssä käsitellään enimmäkseen materiaalien vaikutusta kasvihuonepäästöihin. Tässä diplomityössä selvitetään kasvihuonepäästöihin eniten vaikuttavat rakennusmateriaalit, sekä volyymilta että yksittäisen tuotteen ominaisuuksilta. Työssä päämielenkiinnon kohteina ovat kerrostalorakentamisessa yleisesti käytetyt betoni, betonirakenteet sekä niiden ympäristökuormat. Betonin lisäksi tutkitaan myös muita yleisiä rakennusmateriaaleja. Esimerkkiskenaarioiden avulla työssä pyritään esittämään ympäristö- ja kustannustehokkaimmat vaihtoehdot ympäristökuorman pienentämiseksi. Näitä tuloksia voidaan odotusarvoisesti käyttää vastaavalla tavalla myös muiden materiaalien käytön arviointiin.

Rakennusmateriaalien vaikutusta kasvihuonepäästöihin selvitetään erityisesti mallintamalla kohdeyrityksen tilastoima ja ylläpitämä keskiarvoinen kerrostalo OneClick LCA -ohjelmaan ja laskemalla erilaisia skenaarioita rakennusmateriaaleja vaihdellen. Keskiarvoisen kerrostalon mallintamiseen päädyttiin siksi, että kohdeyritystä kiinnosti sen aiheuttamat kasvihuonepäästöt, se kuvaa hyvin suuren rakennusyrityksen tuottamaa kerrostaloa ja saaduilla tuloksilla voi olla jopa yleistettävyyttä. Tässä diplomityössä selvitetään kerrostalon rakennusmateriaalien vaikutuksia päästöihin ja vertaillaan, miten päästöjä saadaan pienennettyä materiaalivalinnoilla. Mallinnus tapahtuu Bionovan suunnittelemana OneClick LCA -elinkaariarviointiohjelmalla, jota käytetään kasvihuonepäästöjen arviointiin ja laskentaan. Ohjelmalla voidaan mm. laskea rakennushankkeen kokonaispäästöjä. Kohdeyritys on ottanut ohjelman käyttöön kasvihuonepäästölaskennan työkaluna.

Diplomityössä vertaillaan rakennusmateriaalien kasvihuonepäästöjä sekä niiden ja kustannusten välistä suhdetta. Työssä selvitetään, mitkä rakennusmateriaalit, rakennustekniset ratkaisut ja valinnat vaikuttavat merkittävimällä tavalla ympäristökuormiin ja miten ne jakautuvat rakennuksen elinkaarelle. Työn yhtenä tavoitteena on myös löytää keskiarvokerrostalon kasvihuonepäästöihin eniten vaikuttavat rakennusmateriaalit ja -osat. Työssä tehdään vaihtoehtolaskelmia erilaisille skenaarioille ja pyritään selvittämään näiden skenaarioiden kustannusvaikutukset. Tavoitteena on löytää ratkaisuja, jotka ovat mahdollisimman edullisia sekä kustannuksiltaan että ympäristöhyödyiltään.

Diplomityö on tehty rakennetun ympäristön tiedekuntaan. Rakennettu ympäristö käsittää hyvin laajan alueen, joten tämän diplomityön tutkimus on rajattu niin, että se koskee talonrakentamista. Tarkemmin työ on rajattu koskemaan YIT Suomi Oyj:n Etelä-Suomen kerrostalorakentamista.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Tutkimusmenetelminä työssä käytetään empiiristä vertailua ja simulaatiota. Tässä hyödynnetään ympäristöselosteita sekä OneClick LCA -ohjelmaa kasvihuonepäästöjen arviointiin ja laskentaan. Rakennusmateriaaleja vertaillaan mallintamalla keskiarvollisen asuinkerrostalon rakennusmateriaalit ja -resurssit kyseiseen ohjelmaan. Lisäksi mallinnetaan kiinnostavat ja mielekkäät erilaisilla rakenneratkaisuilla tehdyt skenaariot. Vaihtoehtovertailun lisäksi selvitetään erilaisia keinoja päästöjen vähentämiseksi sekä näiden ympäristöarvojen ja kustannusten suhteita. Tutkimusmenetelmänä työssä haastateltiin myös betonialan toimijoita, jotka ovat kohdeyrityksen yrityskumppaneita. Haastatteluilla haluttiin selvittää, onko alan toimijoilla jo keinoja valmistaa betonia ympäristöystävällisesti ja mitkä ovat heidän näkökulmansa vähäpäästöiseen rakentamiseen. Haastatteluista saatuja vastauksia on käytetty työssä taustatietoina.

Diplomityön luvussa 2 esitellään aiempaa kirjallisuutta aiheesta sekä nykytilanteen kartoitus kasvihuonepäästöistä ja niiden jakautumisesta rakennushankkeessa. Lisäksi selvitetään keinoja kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi. Luvussa 3 selvitetään rakennusmateriaaleihin sitoutuneen hiilen aiheuttamia kasvihuonepäästöjä. Ensisijaisena empiirisenä tutkimusmenetelmänä on keskiarvokerrostalon kasvihuonepäästöjen simulaatio OneClick LCA -ohjelman avulla, joka esitellään luvussa 4. Luvussa analysoidaan myös simulaation tuloksia. Luvussa 5 keskiarvokerrostalon simulaatiolle mallinnetaan mielekkäitä vaihtoehtoja, joiden tuloksia vertaillaan keskenään. Luvussa 6 vertaillaan erilaisten vaihtoehtojen kustannusvaikutuksia sekä ympäristöhyötyjä. Luvussa 7 esitellään diplomityön johtopäätökset.

2. RAKENNUSTEN KASVIHUONEPÄÄSTÖT

Tässä luvussa käsitellään rakennusten kasvihuonepäästöjen muodostumista sekä perehdytään kasvihuonepäästöjen arvioinnin ja laskemisen keinoihin. Luvussa tarkastellaan rakennushankkeen kasvihuonepäästöjen jakautumista elinkaaren ajalle ja selvitetään kasvihuonepäästöjen kehityssuuntia. Lisäksi käsitellään kirjallisuudessa mainittuja tapoja vähentää kasvihuonepäästöjä. Teoreettisena viitekehysenä toimii aiheesta aiemmin tehty tieteellinen tutkimus.

Suomalaisista tutkijoista varsinkin Ruuska & Häkkinen (2013; 2014; 2015; Häkkinen et al. 2015) ovat tutkineet 2010-luvulla rakentamisen kasvihuonepäästöjä sekä rakennusmateriaalien aiheuttamia päästöjä ja pyrkineet selvittämään, millä toimenpiteillä näihin ongelmiin pitäisi vastata. Suomalaisista myös Säynäjoki, Heinonen ja Junnila (2011; 2012) ovat analysoineet elinkaaren kasvihuonepäästöjä erilaisissa skenaarioissa sekä tutkineet uuden asuinalueen aiheuttamaa hiilijalanjälkeä ja hiilijalanjäljen jakautumista rakennuksen elinkaarelle.

2.1 Kasvihuonepäästöjen muodostuminen

Kasvihuonekaasu (engl. greenhouse gas, lyh. GHG) on mikä tahansa ilmakehässä oleva kaasu, joka absorboi ja uudelleensäteilee lämpöä ja siten tekee maan ilmakehästä lämpimämmän kuin mitä se olisi ilman tätä kaasua. Pääasialliset kasvihuonekaasut maan ilmakehässä ovat vesihöyry, hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4), typpioksidi (N_2O) ja otsoni (O_3). Kasvihuonekaasuja on normaalistikin ilmakehässä ja niitä muodostuu myös luonnollisesti, mutta ihmisen toiminta lisää näiden kaasujen konsentraatiota ilmakehässä merkittävästi. Osittain tästä ilmiöstä johtuu ilmaston lämpeneminen ja ilmastonmuutos. (Brander 2012) Ihmisen toiminnan takia ilmakehään päässeitä kasvihuonekaasuja sanotaan kasvihuonepäästöiksi.

Eri kasvihuonekaasuilla on erilainen lämmityspotentiaali johtuen siitä, että ne absorboivat eri määriä lämpöä ja pysyvät ilmakehässä eri aikoja. Lämmityspotentiaali (engl. Global Warming Potential, lyh. GWP) kuvaa kasvihuonekaasun aiheuttamaa ilmakehän lämpenemistä tietyn ajanjakson aikana (yleensä 100 vuotta). Lämmityspotentiaali on indeksi, jossa hiilidioksidilla on indeksiarvo 1 ja muilla kasvihuonekaasuilla on kerroin, joka indikoi, kuinka paljon enemmän lämpenemistä sama massa tiettyä kaasua aiheuttaa hiilidioksidin verrattuna. Esimerkiksi 1 kg metaania vastaisi 28 kg:aa hiilidioksidia ($n \text{ kgGHG} \cdot \text{GWP} \rightarrow 1 \text{ kgCH}_4 \cdot 28 = 28 \text{ kgCO}_2e$). (Brander 2012)

Kioto protokolla on kansainvälinen sopimus kasvihuonepäästöjen kontrolloimiseksi, ja sopimuksessa kontrolloituja kasvihuonekaasuja kutsutaan Kioto kaasuiksi (engl. Kyoto Gases). (IPCC 2013) Alla olevassa taulukossa on lueteltu nämä kasvihuonekaasut, sekä havainnollistettu niiden lämmityspotentiaaleja.

	Kasvihuonekaasu (GHG)	Lämmityspotentiaali (GWP)
1.	Hiilidioksidi (CO ₂)	1 (indeksiarvo)
2.	Metaani (CH ₄)	28
3.	Typpioksidi (N ₂ O)	265
4.	Hydrofluorihielet (HFC)	4 ...12 400
5.	Perfluorihielet (PFC)	6 630...11 100
6.	Rikkiheksafluoridi (SF ₆)	23 500
7.	Typpitrifluoridi (NF ₃) ³	16 100

Taulukko 1. *Kioto protokollassa kontrolloidut kasvihuonekaasut (Kioto kaasut) ja niiden lämmityspotentiaalit. (IPCC 2013).*

Rakennusalan toimilla voitaisiin tehokkaasti globaalissa mittakaavassa vähentää kasvihuonepäästöjä ja sen myötä lieventää ilmastonmuutoksen vaikutuksia. Nykyisillä toimilla kuitenkin niin globaalit kuin rakennusalan aiheuttamat kasvihuonepäästöt kasvavat vuosittain. Ilmastonmuutoksen pysäyttäminen 1,5 asteeseen vaatisi, että vuoden 2010 päästöihin verrattuna päästöt laskisivat noin 45 prosentilla vuoteen 2030 mennessä, saavuttaen nettonollatason vuonna 2050. (Adams et al. 2019, s. 7; IPCC 2018) Nettonollatasolla tarkoitetaan tilannetta, jolloin kasvihuonepäästöt ja kasvihuonepäästöjen nielut sekä kasvihuonepäästöjen talteenotot ovat tasapainossa.

World Green Building Councilin ensimmäisenä tavoitteena on, että vuoteen 2030 mennessä uudet rakennukset ovat toiminnallisesti hiilineutraaleja. Toinen tavoite on, että rakennusala aiheuttaa vähintään 40% vähemmän sitoutuneita ts. materiaaliperäisiä kasvihuonepäästöjä eli päästöjä, jotka aiheutuvat materiaalin valmistuksesta, kuljetuksesta, korvaamisesta ja hävittämisestä. Kolmas tavoite on, että vuonna 2050 rakennusala ei tuota lainkaan sitoutuneita

päästöjä ja kaikki olemassa olevat sekä uudet rakennukset ovat toiminnallisesti nettonolla-päästöisiä. (Adams et al. 2019, s. 7)

2.2 CO₂-ekvivalenttiajattelu

Hiili on luonnossa yleinen epämetallinen alkuaine, jonka kemiallinen merkki on C ja järjes-tysluku 6. Hiiltä esiintyy orgaanisissa yhdisteissä ja kaikkialla, missä on elämää. Kasvihuo-nekaasujen kannalta oleellisia reaktioita ovat esimerkiksi hiilen yhdistyminen hapen kanssa, josta muodostuu hiilidioksidia (CO₂) ja hiilen yhdistyminen vedyn kanssa, josta muodostuu metaania (CH₄). Näistä hiilidioksidi on kvantitatiivisesti tarkastellen yleisin kasvihuonekaasu, jota päätyy ilmakehään ihmisen toiminnan seurauksena. Lisäksi sillä on kasvihuonekaa-suista suurin vaikutus ilmastonmuutokseen.

Tarkastellessa kasvihuonekaasuihin liittyviä asioita on ensin huomioitava, että terminä ”hiiltä” käytetään joskus kasvihuonekaasuista puhuttaessa harhaanjohtavasti tai virheellisesti. Esi-merkiksi hiilidioksidi saatetaan joko lyhentää ”hiileksi” tai tarkoittaa ”hiilellä” kasvihuonekaa-suja yleisesti, vaikka kaikki kasvihuonekaasut eivät sisällä hiiltä. Joskus saatetaan ilmaista päästöjä ”hiilenä” tai käyttää terminologiaa kuten ”matalahiilinen”. Jotkut raportit mainitsevat vain CO₂:n, jolloin saatetaan jopa vähätellä ilmastonmuutosvaikutusta tai käyttää termiä puh-taasti vahingossa kaikkien kasvihuonekaasujen sijasta. (Brander 2012)

Eksaktimpi ja tieteellinen tapa referoida kaikkia kasvihuonekaasuja onkin käyttää termiä ”hii-lidioksidiekvivalentti” tai lyhyemmin ”CO₂e” eli termiä, jossa kaikki kasvihuonekaasupäästöt on muunnettu vastaamaan CO₂-päästöjä. Hiilidioksidiekvivalentilla kuvataan ihmisen tuotta-mien kasvihuonekaasujen eli kasvihuonepäästöjen ilmastovaikutusta. Ilmastovaikutuksella tarkoitetaan tässä yhteydessä kasvihuonekaasujen yhteenlaskettua ilmastonlämmityspoten-tiaalia eli ilmastoa lämmittävää vaikutusta. (Brander 2012, Heljo et al. 2005)

Hiilidioksidiekvivalentti kuvaa erilaisia kasvihuonekaasuja yhtenä yksikkönä, eli se sisältää hiilidioksidin lisäksi kaikki ilmastoa lämmittävät kaasut, kuten metaanin, typpioksidin ja muut taulukossa 1 mainitut Kioton kaasut. Minkä tahansa kasvihuonekaasun ja sen määrän voi ilmoittaa hiilidioksidiekvivalenttina. CO₂e kuvaa, miten eri kaasut lämmittäisivät ilmastoa, jos ne olisivat hiilidioksidia tietyllä kertoimella ja kertoimena tässä käytetään kasvihuonekaasun lämmityspotentiaalia. Hiilidioksidiekvivalentin käyttäminen suureena on varsin hyödyllistä, sillä näin mahdollistetaan eri kasvihuonekaasujen ilmoittaminen yhtenä yksikkönä. Lisäksi sen avulla voidaan helposti vertailla eri kasvihuonekaasujen lämmityspotentiaalia. Hiilidiok-

siidioksidiekvivalenttien vertailussa täytyy kuitenkin varmistaa, että kaikissa vertailussa olevissa hiilidioksidiekvivalenteissa on otettu huomioon ja niihin on sisällytetty samat kasvihuonekaasut. (Brander 2012)

Hiilidioksidiekvivalentti voidaan laskea esimerkiksi yksittäiselle tuotteelle, tuotteen raaka-ainevaiheelle, rakennusvaiheelle tai rakennushankkeen koko elinkaarelle. Se on monipuolinen suure, joka mahdollistaa eri vaiheiden tai tuotteiden kasvihuonepäästöjen vertailun, sekä indikoi tuotteen tai vaiheen ympäristöystävällisyydestä. Rakennuksen elinkaarta tarkastellessa kaikki elinkaaren aikana syntyvät kasvihuonekaasupäästöt voidaan yhteismitallistaa kokonaishiilidioksidiekvivalentiksi, jolloin on mahdollista vertailla eri hankkeiden elinkaarien ympäristökuormia. (Brander 2012)

Ilmastoa lämmittävää vaikutusta ja kasvihuonepäästöjä voidaan myös kuvata ilmoittamalla esimerkiksi rakennusmateriaalin tai työvaiheen "kgCO₂e", eli kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia (Brander 2012). Hiilidioksidiekvivalenttia voi myös verrata eri suureita, kuten kuumiometriä, kilogrammaa tai vuotta kohden. Voidaan esimerkiksi ilmoittaa rakennushankkeen ilmastoa lämmittävä vaikutus hiilidioksidiekvivalenttina kohden rakennuksen pinta-alaa per vuosi, jolloin käytetty suure on "kgCO₂e/m²/a". Tässä diplomityössä käytetään näitä termejä ja suureita.

2.3 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen arviointi

Hiilijalanjälkeä käytetään kuvaamaan henkilön, organisaation tai tapahtuman suoraan tai epäsuoraan tuottamia kasvihuonepäästöjä (Adams et al. 2019). Hiilijalanjäljestä on kehittynyt yleisesti käytetty käsite, jota käytetään indikoimaan tiettyjen prosessien tai tuotteiden aiheuttamia kasvihuonepäästöjä. Harvemmin käytetty ilmaisu hiilikädenjälki on hiilijalanjäljen vastakohta, ja se kertoo tuotteen aikaansaamista positiivisista ympäristövaikutuksista, joita ei syntyisi ilman tuotteen käyttöä. Hiilikädenjälkeen sisältyy esimerkiksi rakennusmateriaaleihin varastoitunut biogeeninen hiili, materiaaleihin elinkaaren aikana sitoutunut hiilidioksidi ja elinkaaren ulkopuoliset hyödyt, kuten kierrätys ja rakennusmateriaalien uudelleenkäyttö. Koska hiilikädenjälki lasketaan nettomääränä, sitä ei yhdistetä hiilijalanjälkeen elinkaarianalyyssissä. (Ympäristöministeriö 2019, s. 30)

Hiilijalanjäljen määrittäminen perustuu elinkaarianalyyysiin (lyh. LCA, engl. termistä Life-Cycle Assessment), jossa ilmastonmuutosvaikutus on ainoa seurattava ryhmä. Elinkaarianalyyysin avulla voidaan kokonaisvaltaisesti mitata materiaalien ja toimintojen ympäristövaikutuksia. LCA mittaa myös epäsuorat ympäristövaikutukset, alkaen materiaalien valmistuksesta elin-

kaaren päättymiseen asti. (Säynäjoki et al. 2011, s. 116) Mitä suurempi hiilikädenjälki tuotteella on, sitä enemmän tuote sitoo päästöjä ja näin ollen on ystävällisempi ympäristölle. VTT:n tutkimuksen mukaan on nähtävissä, että hiilikädenjäljen käyttö terminä tulee yleistymään. (VTT 2018)

Kun elinkaarianalyysiä sovelletaan rakennushanketasolle, joudutaan jossain määrin valitsemaan elinkaarianalyysin tarkkuuden ja rakennushankkeen päästövähennysmahdollisuuksien välillä. Suurin päästöjenvähentämispotentiaali on aikaisin hankkeen suunnitteluvaiheessa. Tässä vaiheessa kovin eksaktia elinkaarianalyysiä ei voida kuitenkaan vielä tehdä, sillä kaikista käytettävistä tuotteista ei ole tietoja. Viime aikoina helppoon elinkaarianalyysiin on kehitetty monia eri työkaluja, joista jotkut on suunniteltu nimenomaan aikaisen analyysin tekemiseen. (Adams et al. 2019, s. 28) Tässä diplomityössä elinkaarianalyysiin käytetään OneClick LCA -ohjelmaa, joka esitellään luvussa 4.

Säynäjoen et al. (2011) mukaan kasvihuonepäästöjen lähteiden ja niiden määrien selvittäminen on elintärkeää kasvihuonepäästöjen vähentämisessä sekä ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. Koska on vaikeaa vähentää sellaista, mitä ei voi mitata, Suomen olosuhteisiin on kehitetty sopiva arviointimenetelmä. Ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisyys arviointimenetelmällä (2019) pyritään pienentämään rakennuksen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä huolellisen ennakkosuunnittelun avulla. Päästöjen arviointia on tarkoitus tehostaa sisällyttämällä menetelmä lähivuosina maankäyttö- ja rakennuslain uudistuksiin. Tällöin vähähiilisyys arviointi sisällytettäisiin rakennuslupaprosessiin. (Ympäristöministeriö 2019)

Rakennuksen vähähiilisyys arviointimenetelmä perustuu Euroopan komission laatimaan Levels-menetelmään. Sen pohjana on eurooppalaisia rakentamista koskevia standardeja, kuten EN 15643 -sarja, EN 15978, EN 15804 sekä aiheeseen liittyvää tieteellistä tutkimusta. Vähähiilisyys arviointi soveltuu kaikille rakennuksille, sekä uudis- että korjausrakentamisen hankkeisiin. Energiatohokkuuden arviointi on tarkoitus tehdä rinnan tämän arvioinnin kanssa. Arviointimenetelmä ei kuitenkaan sovellu suoraan infrapuolen hankkeiden arviointiin. Arviointi on tarkoitettu tehtäväksi rakennussuunnittelun aikana, koska silloin on käytettävissä tarpeeksi yksityiskohtaista tietoa rakennuksen materiaaleista ja energiantarpeesta. Ennen rakennussuunnittelua vähähiilisyttä voidaan arvioida esimerkiksi julkisten hankintojen tavoitteita asettaessa, jolloin voidaan käyttää hyödyksi tietoja vastaavien rakennushankkeiden hiilijalanjäljestä. (Ympäristöministeriö 2019) Diplomityössä käytettävä OneClick LCA -ohjelma on asetettu käyttämään Ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisyys arviointimenetelmää.

Rakennuksen elinkaaren vaiheet on määritelty standardin EN 15978 (2011) mukaan. Elinkaaren vaiheet ovat tuotevaihe, rakentaminen, käyttövaihe ja elinkaaren loppu. Standardi

määrittää rakennuksen vaiheiden rajat ja keskittyy rakennusten arviointiin, mutta ei ota kantaa energiatehokkuuteen (Säynäjoki et al. 2012, s. 318). Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmässä on kuvattu rakennushankkeen CEN/TC 350-standardiperheen mukainen elinkaarimalli. Elinkaarimalli ja standardin mukaiset elinkaaren vaiheet näkyvät kuvassa 1, joka pohjautuu Ympäristöministeriön (2019, s. 14) raporttiin.



Kuva 1. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (Ympäristöministeriö 2019, s. 14)

Rakennuksen vähähiilisyden arviointi tehdään rakennuksen koko elinkaaren ajalle. Arviointi huomioi koko rakennuksen, tontin rakenteet sekä keskeisen osan taloteknisistä järjestelmistä. Rakennuksen elinkaareen sisältyvät rakennustuotteiden raaka-aineet, valmistus, kuljetukset ja työmaatoiminnot sekä käyttö, korjaukset, purku ja kierrätys. Arviointiin ei kuiten-

kaan sisälly maaperä, tontin kasvillisuus tai rakentamisen aikaiset telineet ja suojaukset. Kuvassa 2 nähdään Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmässä arvioitavat rakennusosat.

	Sisältyy arviointiin	Ei sisälly arviointiin
Tontti	+ Maaosat + Tuennat ja vahvistukset + Päälysteet + Alueen rakenteet	- Alueen varusteet - Kasvillisuus - Kasvillisuuden, maaperän tai vesistöjen muutoksista aiheutuvat ilmastovaikutukset
Kantavat rakenteet	+ Perustukset + Alapohjat + Runko + Julkisivut, ovet ja ikkunat + Ulkotasot + Kattorakenteet	- Tuotteisiin kuulumattomat erilliset naulat, ruuvit, liimat, tiivisteet, saumat ja muut kiinnikkeet
Täydentävät rakenteet	+ Väliseinät ja ovet + Portaat + Pintarakenteet + Tyypilliset kiintokalusteet + Hormit ja tulisijat + Tilaelementit	- Pintamateriaalit ja listat - Pintakäsittelyt ja maalaukset - Tuotteisiin kuulumattomat erilliset naulat, ruuvit, liimat, tiivisteet, saumat ja muut kiinnikkeet
Talotekniikka	+ Lämmitysjärjestelmät + Vesi- ja viemärijärjestelmät + Ilmastointijärjestelmät + Jäähdytysjärjestelmät + Sprinklerit + Sähköjärjestelmät + Hissit	- Tietotekniset järjestelmät - Taloautomaatio - Varavirtajärjestelmät - Liukuportaat - Erilliset koneet ja laitteet
Työmaa	+ Työmaalla kulutettu energia	- Telineet, suojaukset - Väliaikaiset rakenteet, muotit ja tekniset laitteet - Työmaatilojen elinkaari - Työmaan henkilöliikenne

Kuva 2. Ympäristöministeriön vähähiilisyden arviointimenetelmässä arvioitavat rakennusosat. (Ympäristöministeriö 2019, s. 18)

Rakennustuoteteollisuus RT:n KEKRI-hankkeessa tarkasteltiin Ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmän (2019) uutta, vuodelle 2020 päivättyä luonnosta. Selvityksessä huomattiin, että merkittävimmin hiilijalanjälkilaskennan tuloksiin vaikuttivat käytettävän energiantuotannon päästökertoimet, laskentajakson pituus sekä lämmitysmuoto, jotka vaikuttivat käyttövaiheen energiankulutuksen kautta. Selvityksessä havaittiin

myös tarve ottaa mukaan erinäisiä muita elinkaariparametreja. Jotta hiilijalanjälkeä pystyttäisiin perustelemaan rakentamista ohjaavana elementtinä, täytyisi myös ottaa huomioon energialaskenta, sisäilmaolosuhteet sekä valittujen ratkaisujen vaikutus kokonaisuuteen. Vähähiilisyden tavoittelussa sekä vaatimusten ja raja-arvojen asettamisessa pitäisi ottaa huomioon myös terveellisyys, turvallisuus ja taloudellisuus. Hankkeessa aiotaan tuottaa vuoden 2020 loppuun mennessä ehdotus siitä, miten erilaiset epävarmuustekijät tulisi ottaa huomioon menetelmän jatkokehityksessä. (Rakennusteollisuus RT 2020)

World Green Building Councilin raportin (2019) mukaan elinkaarianalyseistä saatava data ja tulokset ovat tärkeitä rakennusten ja infrastruktuurin vähähiilisyden tavoittelussa. Elinkaarianalyysi (LCA) mahdollistaa materiaalin, tuotteen tai kokonaisen rakennushankkeen ympäristövaikutusten laajan skaalan laskennan. LCA:n käyttö mahdollistaa kasvihuonepäästöjen lisäksi muidenkin aspektien, kuten veden tai energian tarpeen tarkastelemisen koko elinkaarajan ajalta. LCA:ta käytetään globaalisti ja maailmanlaajuisia standardeja, kuten EN 15978 ja ISO 14040 on kehitetty tulosten konsistenssin ja vertailtavuuden varmistamiseksi. LCA on riippuvainen laadukkaasta raakadatasta, työkaluista, tulosten tulkinnasta, datan läpinäkyvyydestä sekä tuotannon ympäristöystävällisen johtamisen metodiikasta. Lisäksi standardit asettavat korkeat läpinäkyvyyden, laadun ja luotettavuuden tasot niiden mukaan tehdyille ympäristöselosteille. (Adams et al. 2019, s. 27–28)

2.4 Ympäristöseloste EPD

EPD (engl. Environmental Product Declaration) eli ympäristöseloste on elinkaarianalyysiin perustuva, vapaaehtoinen ja standardoitu tapa esittää olennaiset, varmennetut ja vertailukelpoiset tiedot valmistetun tuotteen tai tuoteryhmän ympäristövaikutuksista. Ympäristöselosteessa pyritään esittämään tuotteen tiedot ja laskennalliset ympäristövaikutukset mahdollisimman yksinkertaisesti. EPD:n voi verifioida standardien EN ISO 14025 ja ISO 21930:2007 mukaisesti. (Rakennustietosäätiö 2020) Adams et al. (2019, s. 27) väittää, että tuotteiden ja materiaalien elinkaarianalyysin tulokset liittyvät enenevässä määrin myös EPD:hen.

EPD-ympäristöselosteet ovat tyyppin III ympäristöselosteita, mikä tarkoittaa, että niissä esitetään määrällistä ympäristötietoa tuotteen elinkaaresta, jotta olisi mahdollista vertailla saman käyttötarkoituksen täyttäviä tuotteita rakennustasolla. Elinkaariarviointi on tehty standardeissa EN ISO 14044 ja 15804+A1 määritettyjen rakennussektorikohtaisten täsmennysten mukaan. Näitä täsmennyksiä ovat esimerkiksi järjestelmän rajat ja modulaarisuus. Standardeilla asetetaan korkea taso luotettavuudelle, laadulle ja läpinäkyvyydelle. Selosteet ovat kolmannen osapuolen verifioimia, ja niissä esitetyt tiedot on tarkastettu ja todettu luotettaviksi

ympäristötiedon lähteiksi. Vaikka standardeilla pyritään varmistamaan, että eri tuotteiden ympäristöselosteet ovat vertailukelpoisia, ympäristöselosteissa on silti eroavuuksia, jotka vaikuttavat tuotteiden vertailukelpoisuuksiin. (Rakennustietosäätiö 2020, Adams et al. 2019, s. 27–28)

Ympäristöselosteen luominen rakennustuotteille ja niiden käyttö suunnittelussa on useimmissa maissa vapaaehtoista, mutta kasvanut kysyntä ympäristöystävällisemmille tuotteille on aiheuttanut joillakin alueilla jopa eksponentiaalista kasvua uusien ympäristöselosteiden määrässä. Jotkut Euroopan maat, kuten Ranska, Alankomaat ja Suomi ovat siirtymässä kohti LCA:ta vaativia lakeja, mikä tarkoittaisi myös aiempaa suurempaa määrää ympäristöselosteita markkinoilla. (Adams et al. 2019, s. 27–28, Bionova 2020) Työn julkaisun hetkellä rakennustuotteiden EPD:tä on Suomessa tehty vain 83 kappaletta, kun esimerkiksi Norjassa niitä on yli 800 kappaletta (EPD-Norge 2020). Vertailun vuoksi rakennuksen sisäilman laadusta kertovia M1-päästöluokiteltuja tuotteita löytyy Suomessa RTS:n tietokannasta yli 5400.

Ympäristöselosteessa tuotteen tai tuoteryhmän elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia kuvataan standardin mukaisilla indikaattoreilla. Indikaattoreita ovat mm. a) ilmastonmuutosvaikutus, joka huomioi hiilijalanjäljen, b) otsonia tuhoavat aineet, jotka ohentavat otsonikerrosta, c) maaperää ja vesistöjä happamoittavat päästöt, jotka vahingoittavat ekosysteemejä ja rakennettua ympäristöä, d) rehevöitymistä aiheuttavat päästöt, jotka aiheuttavat happikatoa vesistöissä sekä e) uusiutumattomien energiavarojen ja mineraalivirtojen ehtyminen, joka aiheutuu näiden resurssien hyväksikäytöstä. (Adams et al. 2019, Rakennustietosäätiö 2020)

Suomessa käytetään pääosin Rakennustietosäätiö EPD-ympäristöselostetta (RTS EPD). Se on rakennusmateriaalien ympäristöseloste, joka voidaan laatia moneen eri käyttötarkoitukseen. Rakennustuotteen valmistaja voi tehdä selosteen a) yrityksen omaan käyttöön, jolloin voidaan tiedostaa omien tuotteiden ympäristövaikutukset, b) toisia yrityksiä varten, jolloin yritys esittää selosteessa näille yrityksille olennaiset tiedot tiedontarpeen kannalta tai c) kuluttajille, jolloin voidaan jättää kaikkein teknisimmät tiedot pois ja keskittyä kuluttajille olennaisiin asioihin, kuten hiilijalanjälkeen ja energiankulutukseen. Ensisijaisesti ympäristöselosteet laaditaan yritysten käyttöön. Ympäristöselosteet käsittävät kaiken tiedon, joka standardin EN 15804+A1 mukaan ympäristöselosteessa täytyy esittää yritysten välisessä viestinnässä. Selosteet voivat olla yhden tai useamman organisaation tuottamia selosteita yhdelle tuotteelle tai samankaltaisia tuotteita sisältävälle tuoteryhmälle. (Rakennustietosäätiö 2020)

Rakennustietosäätiö RTS:n hyväksymät EPD-ympäristöselosteet sisältävät kaikki standardinmukaiset tiedot, jotka pääpiirteittäin ovat seuraavat (Rakennustietosäätiö 2020):

- 1) Tuotteen tiedot: Tuotekuvaus, tuotteen ja sen käytön kuvaus, tuotestandardit, fyysiset ominaisuudet. Tuotteiden pääraaka-aineet ja tuoteseloste, joista ilmoitetaan tehtaalte tuodut. Lista tuotteiden sisältämistä REACH SVHC -aineista.
- 2) Elinkaariarvioinnin laskentaperusteet: Toiminnallinen tai ilmoitettu yksikkö. Tuotevaihe sisältää standardin mukaiset vaiheet A1 (Raaka-aineiden hankinta), A2 (Kuljetukset), A3 (Valmistus), A4 (Kuljetukset työmaalle), osan C1-C4 (Purkaminen, kuljetukset, purkujätteen käsittely ja loppusijoitus) sekä osan D uudelleenkäyttö, hyödyntäminen ja kierrätys. Rajauskriteerit, arvioinnin aikajakso otettava huomioon.
- 3) Elinkaariarvioinnin tulokset: Ympäristövaikutukset, luonnonvarojen käyttö, jättekategoriat, muut ympäristöindikaattorit. Muut ilmoitettavat tiedot eli päästöt maahan ja pintaveteen sekä sisäilmaemissiot. Tekniset lisätiedot eli rakennustason arviointia auttavat skenaariot, mitä on käytetty. Lisäksi ilmoitetaan käyttö, tuotteen kuljetus, hukka työmaalla, End-of-life, jätteen käsittely, uudelleenkäyttö, hyödyntäminen ja kierrätys. Näiden lisäksi voidaan ilmoittaa muita lisätietoja.

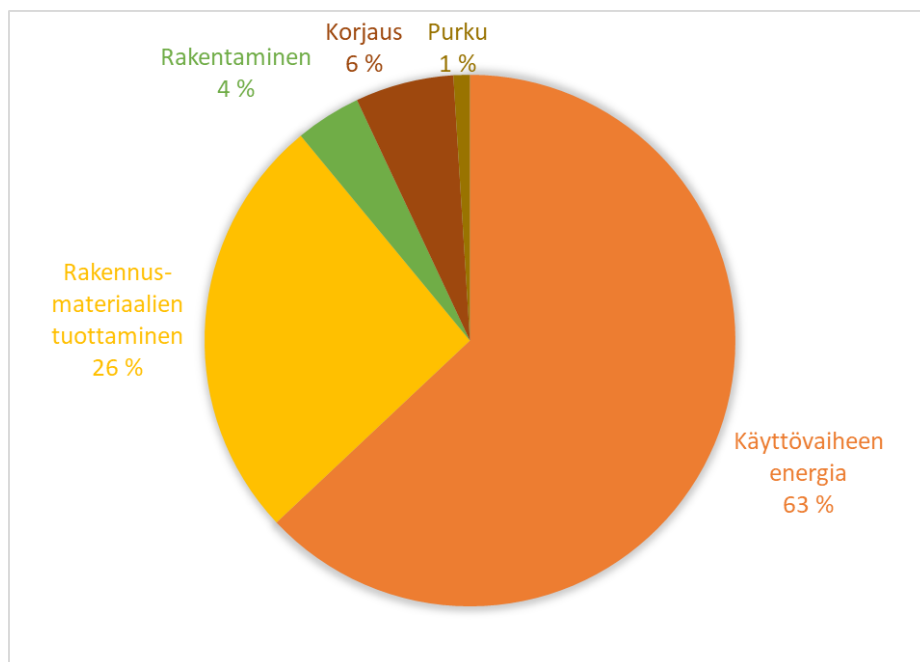
EPD-työkalujen tarkoituksena on vähentää ympäristövaikutuksen laskemiseen kuluva aikaa ja edistää itse EPD:n laadintaa. Tuotteita koskevien ympäristövaatimusten kiristyessä edellytetään nopeampia ja vaivattomampia tapoja laskea tuotteiden ympäristövaikutuksia. EPD-työkalut antavat valmistajille ympäristövaikutustietoa koko valmistusprosessin ajalta raaka-aineista loppusijoitukseen saakka, sekä hyödyntävät ajan tasalla olevaa tietoa raaka-aineiden ja prosessien ympäristövaikutuksesta. Työkalujen avulla yritys pystyy esimerkiksi jalostamaan tuotekehitysprosessia, kehittämään ympäristövaikutuksiltaan parempia tuotteita ja vertailemaan tuotetietoja rakennustasolla ja rakennusosatasolla. Jos EPD:t on tehty samalla EPD-työkalulla, yritys voi lisäksi varmistua siitä, että ne ovat keskenään vertailukelpoisia. (Rakennustietosäätiö 2020, Adams et al. 2019)

2.5 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen jakautuminen

Ruuskan & Häkkisen (2015) tekemän tutkimuksen mukaan rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki jakautuu seuraavasti: 26 % rakennusmateriaalien tuottaminen, 4 % rakentaminen, 63 % käyttövaiheen energia, 6 % korjaus, 1 % purku. Tutkimuksen tuloksia havainnollistetaan kuvassa 3. Käyttövaiheen energia on suurin kasvihuonepäästöjen aiheuttaja. Kun tarkastellaan energian aiheuttamia päästöjä, tulisi ottaa huomioon, että energian tuottamisen tavat vaikuttavat suuresti energiankulutuksen päästöihin. (Säynäjoki et al. 2012, s. 2) Lisäksi esimerkiksi Suomen hallitusohjelman (Valtioneuvosto 2019) ja Energiategorollisuuden (2020) ta-

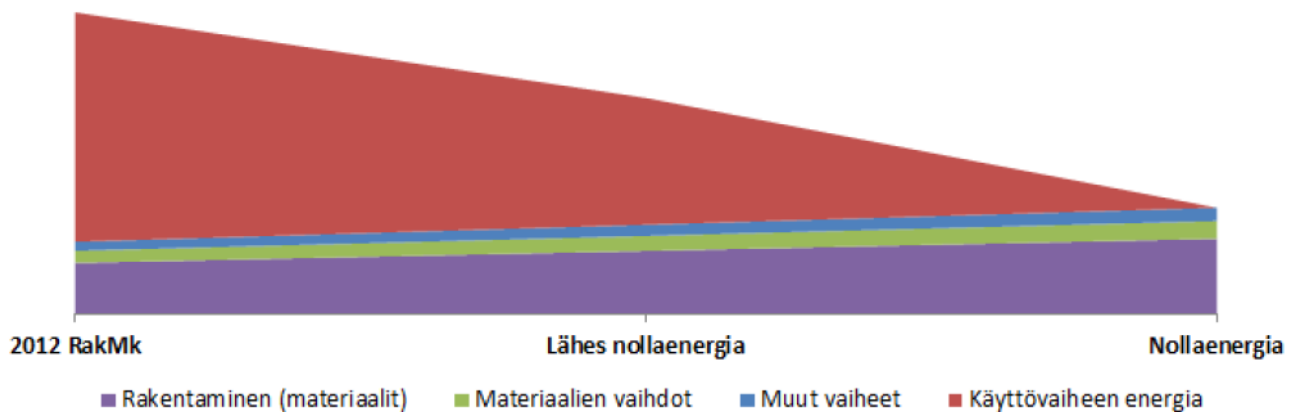
voitteet pienentävät toteutuessaan käyttövaiheen kasvihuonepäästöjä. Toiseksi suurin kasvihuonepäästöjen aiheuttaja on rakennushankkeen tuote- ja rakentamisvaihe eli moduuli A, jossa rakentaminen ja siihen käytetyt rakennusmateriaalit aiheuttavat 30 % koko elinkaaren kasvihuonepäästöistä.

Rakennusmateriaalien aiheuttamiin päästöihin on vasta viime aikoina alettu perehtyä eikä rakentamisvaiheen päästöjä ole vielä juurikaan säännelty, sillä suurin osa laeista on koskenut vain käyttövaiheen päästöjä. Sekä Punkki (2019), Säynäjoki et al. (2012) että Ruuska & Häkkinen (2015) ovat kaikki sitä mieltä, että lähitulevaisuudessa tuote- ja rakentamisvaihe eli elinkaaren vaiheet A1–A5 tulevat olemaan entistä suurempi kasvihuonepäästöjen lähde, johon tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota. Energiatehokkaammat rakennukset käyttävät vähemmän energiaa, joten ne aiheuttavat myös matalammat kasvihuonepäästöt elinkaarensa aikana. Rakennusmateriaalien ja ylläpidossa tarvittavien materiaalien päästötaso kasvaa sekä suhteellisesti että joissain tapauksissa absoluuttisesti rakennusten muuttuessa energiatehokkaammiksi. (Ruuska & Häkkinen 2015, s. 317; Bionova 2015) Materiaalien korkeampien päästöjen lisäksi teknisten järjestelmien aiheuttama hiilijalanjälki kasvaa (Bionova 2015).



Kuva 3. Keskiarvollinen rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen jakautuminen. (Ruuska & Häkkinen 2015)

Kuvassa 4 nähdään Bionovan (2015) laatima kuvaaja CO₂e-päästöjen kehityksestä, joka havainnollistaa edellä mainittuja väitteitä. Kuvaajan pystyakselilla on tietynä aikana rakennetun rakennuksen elinkaaren päästömäärä ja vaiheiden kasvihuonepäästöjen suhteet toisiinsa nähden. Vaaka-akselilla ovat energiatehokkuustavoitteet vuoden 2012 Suomen rakentamismääräyskokoelman tavoitteista nollaenergiarakennukseen. Rakennuksille oletettiin 50 vuoden elinkaari. Kuvaa tarkastellessa huomataan, että rakennusmateriaalien määrä kasvaa suhteellisesti ja absoluuttisesti sitä enemmän, mitä vähemmän energiaa rakennus käyttää. Myös materiaalien vaihtojen ja muiden vaiheiden aiheuttamat päästöt kasvavat hieman absoluuttisesti, mutta varsin paljon suhteellisesti.

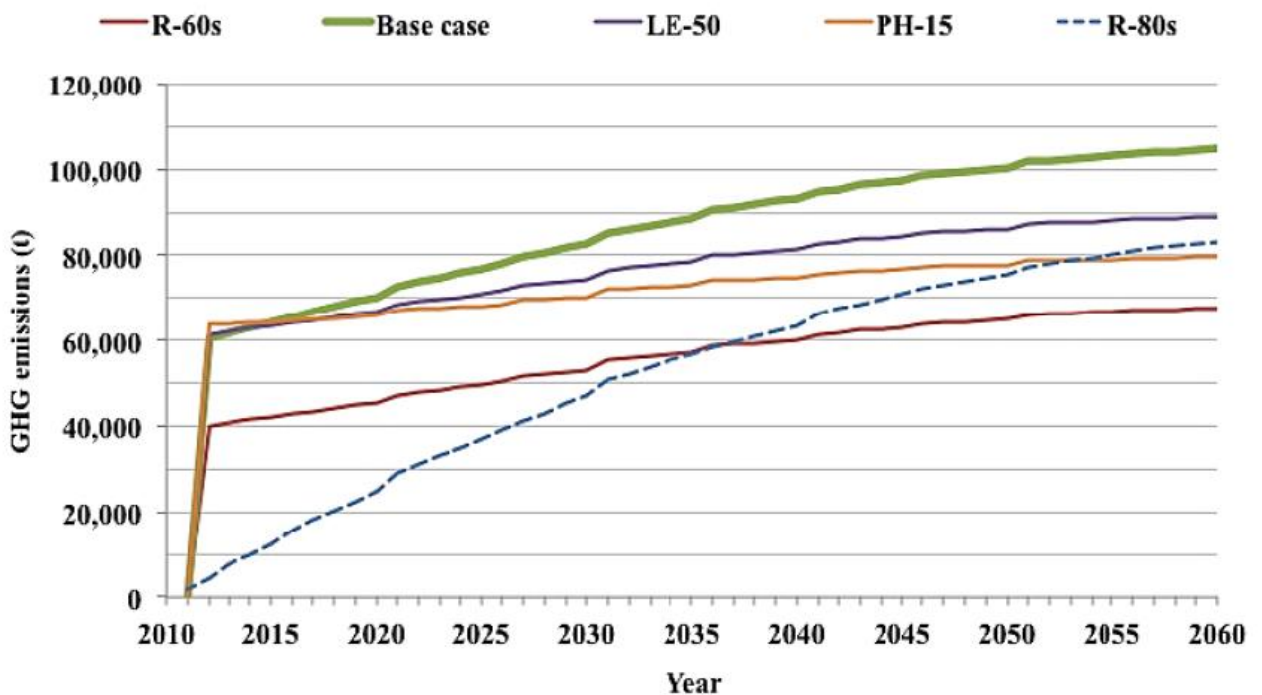


Kuva 4. Rakennuksen elinkaaren (50 v.) CO₂e -päästöjen kehitys (Bionova 2015).

Säynäjoki et al. (2012) tutki rakennusten kasvihuonepäästöjen jakautumista rakennuksen elinkaaren ajalle tyypillisellä uudisrakennusalueella, ja vertasi perustapausta neljään muihin mahdolliseen skenaarioon. Kyseessä oli suuren suomalaisen rakennusliikkeen rakentama uudisrakennusalue, jossa asuntoja rakennettiin 220 kappaletta 550 asukkaalle. Alue sijaitsee Etelä-Suomessa ja kokonaiskustannukset hankkeelle olivat 76,3 miljoonaa euroa, joista 91 % kului rakentamiseen sekä 9 % infrastruktuuriin. Tutkimuksen käyttövaiheen energiankulutuksen mallintamisessa hyödynnettiin Energiateollisuuden ennustetta, jonka mukaan energiantuotannon hiili-intensiteetti vähenee 85–90 % vuoteen 2050 mennessä. Rakennushankkeelle oletettiin 50 vuoden elinkaari, sillä tutkijat kokivat seuraavat vuosikymmenet hyvin relevanteiksi ilmastonmuutoksen migitaation osalta.

Kuvassa 5 on viisi eri skenaariota, joista ensimmäinen on perustapaus (base case), alue, jonne on rakennettu vuoden 2008 rakennusmääräysten maksimimäärän energiaa kuluttavia

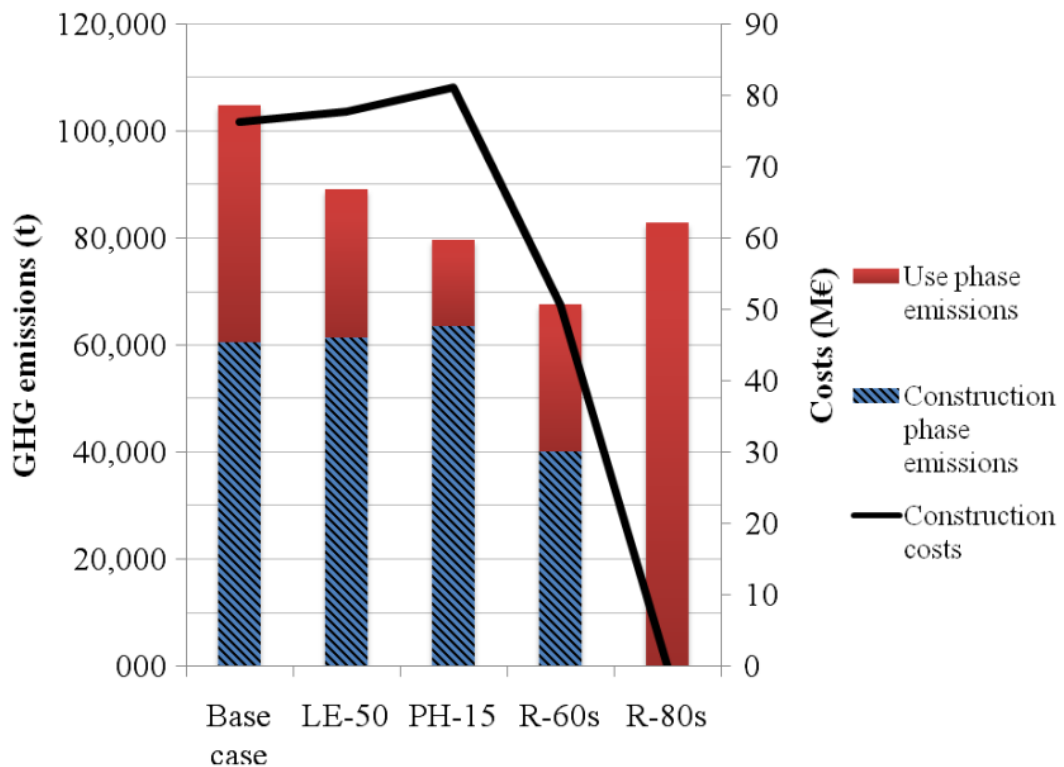
rakennuksia (100 kWh/m²). Toisena on 50 kWh/m² energiaa kuluttava matalaenergiarakennusalue (LE-50) ja kolmantena 15 kWh/m² kuluttava passiivienergiarakennusalue PH-15. Lisäksi tutkijat mallinsivat 1960-luvun rakennuksia sisältävän alueen (R-60s), jossa rakennukset perusparannettiin ja jonka oletettiin kuluttavan energiaa 50 kWh/m² eli saman verran kuin matalaenergiarakennusalue (LE-50). Viimeiseksi referenssialueeksi valittiin vuonna 1985 rakennettu tyypillinen kerrostaloalue (R-80s), jonka ei oletettu tarvitsevan suurta perusparannusta seuraavan 50 vuoden aikana, ja joka kuluttaa energiaa 195 kWh/m².



Kuva 5. Kumulatiiviset kasvihuonepäästöt 50 vuoden elinkaaren aikana viidelle eri skenaariolle. (Säynäjoki et al. 2012, s. 6)

Kun tarkastellaan Säynäjoen et al. (2012, s. 6) tutkimukseen pohjautuvaa kuvaa 5, huomataan, että kasvihuonepäästöjen osalta niin kutsuttu piikki on heti rakennuksen elinkaaren alkuvaiheessa, vaiheilla A1–A5. Tähän piikkiin vaikuttavat suurimmalta osalta rakennusmateriaalit ja niiden valmistuksen aiheuttamat kasvihuonepäästöt. Erilaiset rakennusmateriaalien avulla tehtävät energiaratkaisut vaikuttavat käyttövaiheen (moduuli B) lisäksi luonnollisesti rakennusvaiheen (moduuli A) kasvihuonepäästöihin. Tutkimuksen kaltaisen tyypillisen uudisrakennusalueen rakentaminen aiheutti 60 500 tonnia kgCO₂e kasvihuonepäästöjä.

Kahden muun uudisrakennusalueen rakennusvaiheen kasvihuonepäästöt ovat matalaenergiarakennuksilla (LE-50) 1,5 % ja passiivirakennuksilla (PH-15) 5 % suuremmat kuin perustapauksella. Perustapauksessa käyttövaiheen päästöt ovat kuitenkin uudisrakennusalueista suurimmat ja kuten huomataan, passiivirakennusalueen (PH-15) kasvihuonepäästöt kasvavat selvästi vähiten elinkaaren edetessä kohti viittäkymmentä vuotta. Huomataan, että 50 vuoden elinkaarella 1985 rakennettujen referenssirakennusten alue aiheuttaisi enemmän kasvihuonepäästöjä pelkästään käyttövaiheessa kuin passiivirakennusalue (PH-15) rakennus- ja käyttövaihe mukaan luettuna. (Säynäjoki et al. 2012)



Kuva 6. Rakennuksen elinkaaren kasvihuonepäästöjen jakautuminen rakentamisvaiheeseen (moduuli A) ja käyttövaiheeseen (moduuli B) välillä eri skenaarioissa, sekä skenaarioiden rakentamisen kokonaiskustannukset. (Säynäjoki et al. 2012)

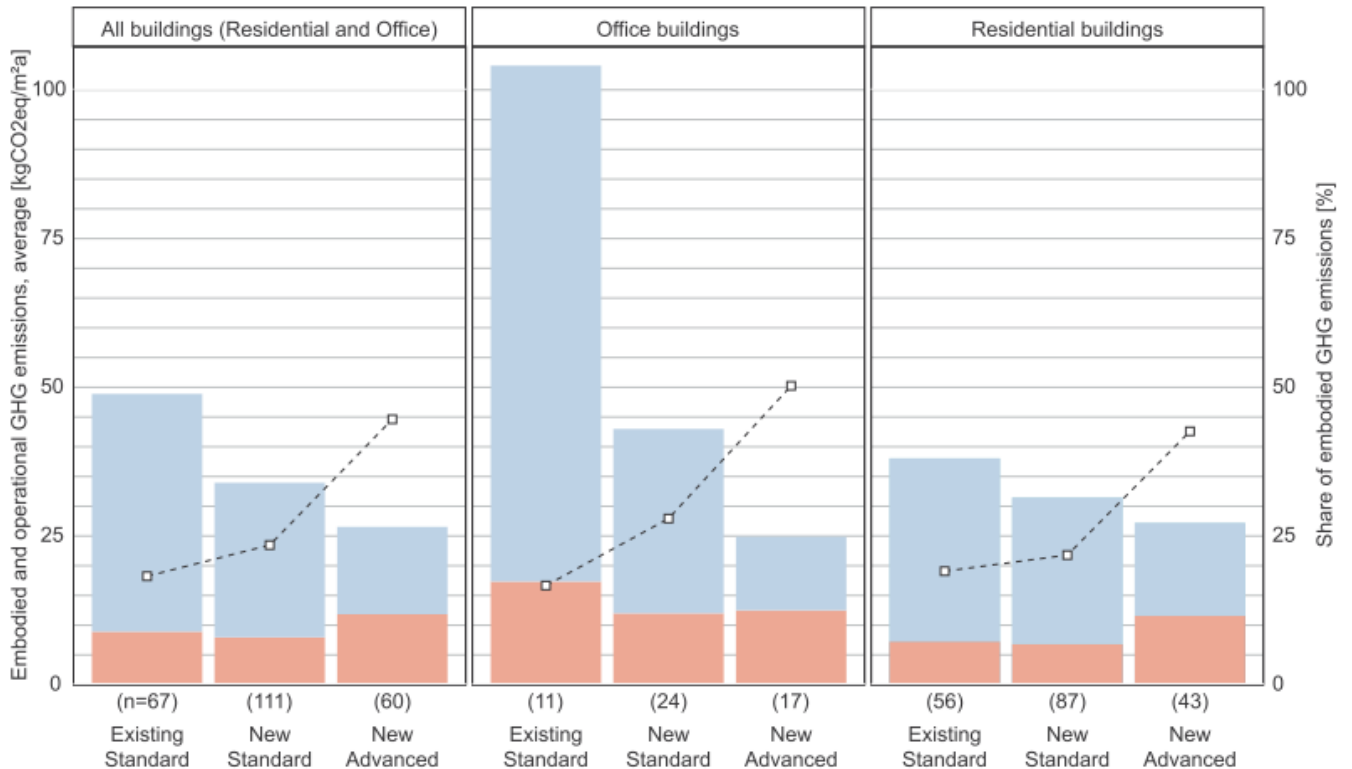
Kuvassa 6 nähdään Säynäjoen et al. (2012) tutkimuksen skenaarioiden kasvihuonepäästöjen jakautuminen rakennusvaiheeseen ja käyttövaiheeseen, sekä rakentamisen kulut miljoonissa euroissa. Huomataan, että passiivirakennusalueen (PH-15) 6,2 % perustapausta suuremmilla rakennuskustannuksilla rakennusvaiheen kasvihuonepäästöt nousivat noin 5 %, mutta kokonaisuudessa elinkaaren päästöt vähenivät yli 25 % verrattaessa perustapaukseen.

Säynäjoki et al. (2012) tutkimus osoittaa, että rakennusvaiheen päästöt ovat suurin osa koko elinkaaren aikaisista päästöistä, kun tavoitteet päästöjen vähentämiseksi otetaan mukaan. Tulos on siis uudisrakennuksille hieman erilainen kuin luvun alussa esitetty Ruuskan & Häkisen (2015) kasvihuonepäästöjen jakautumisen keskiarvomalli. Säynäjoen et al. (2012, s. 7) mukaan päästöjen minimoimiseksi rakentamisessa kannattaa käyttää rakennuksen energiatehokkuutta parantavia ratkaisuja.

Röck et al. (2020) tutkivat 238 tapauksen tutkimuksessaan rakennusten sitoutuneita kasvihuonepäästöjä. Nämä rakennukset valittiin sopivina 538 rakennuksen aineistosta. 238 rakennuksesta 175 oli eurooppalaisia, loput muista maanosista. Lisäksi rakennukset sijaitsivat erilaisilla ilmastovyöhykkeillä, suurin osa (153) lauhkealla vyöhykkeellä. Tutkijat jakavat tutkimansa rakennukset kolmeen eri tyyppiin. "Olemassa oleva tavanomainen" tarkoittaa rakennuksia, jotka on rakennettu esimerkiksi ennen rakennusmääräysten tiukentumista. Näitä olemassa olevia tavanomaisia rakennuksia on rakennuskannasta suurin osa. "Uusi tavanomainen" rakennus on nykyisten rakennus- ja energiamääräysten mukaan rakennettu rakennus ja "uusi kehittynyt" rakennus esimerkiksi passiivirakennus, matalaenergia- tai nollaenergiarakennus. Lisäksi tutkijat jakavat rakennukset toimisto- ja asuinrakennuksiin, sekä tarkastelevat niitä kokonaisuudessaan.

Kuvassa 7 trendiviiva osoittaa materiaaliperäisten kasvihuonepäästöjen suhdetta elinkaaren kokonaispäästöihin. Kuten huomataan, olemassa olevilla rakennuksilla suhde on pienempi kuin uusilla tavanomaisilla rakennuksilla ja kaikkein suurin suhde on uusilla kehittyneillä rakennuksilla. Tämä suhteellinen materiaaliperäisten kasvihuonepäästöjen nousu johtuu pääasiassa siitä, että käytön aikaiset kasvihuonepäästöt ovat pienentyneet sitä enemmän, mitä uudempi ja kehittyneempi rakennus on. Energiatehokkaampien rakennusten rakentaminen vaikuttaa sekä suhteelliseen materiaaliperäisten päästöjen nousuun että elinkaaren aikaisten päästöjen pienentymiseen, mistä voidaankin tehdä johtopäätös, että tutkituissa rakennuksissa energiatehokkuuden parantaminen vähensi elinkaaren kokonaispäästöjä. Tulokset ovat tutkijoiden mukaan samankaltaisia tutkimusaineiston rakennuksissa maanosaan katsomatta. Samansuuntaisia tuloksia on saatu myös muissa globaaleissa tai maanosakeskeisissä tutkimuksissa. (Röck et al. 2020)

a) Global trends in embodied and operational, life cycle GHG emissions



Kuva 7. Globaalit trendit rakennusten elinkaaren kasvihuonepäästöjen jakautumisessa, jaettuna sitoutuneisiin kasvihuonepäästöihin (punainen) ja käytön aikaisiin kasvihuonepäästöihin (sininen). Kuvassa vasemmalla kaikki rakennukset, keskellä toimistorakennukset ja oikealla asuinrakennukset. (Röck et al. 2020, s. 6)

Tutkimuksen tulos on tutkijoiden mukaan silmäänpistävä, sillä se osoittaa, että kaikentyyppiisillä standardeilla oli ja on edelleen mahdollista suunnitella elinkaaren päästöjä tarkastellen matalapäästöisiä rakennuksia. Nykystandardien mukaan rakennetuilla rakennuksilla osoitautui kuitenkin olevan pienemmät materiaaliperäiset päästöt sekä suurempi myötävaikutus käytönaikaisiin päästöihin. Vastaavasti saman kokoluokan päästöt aiheuttavilla uusien ja kehittyneempien standardien mukaisesti rakennetuilla rakennuksilla huomattiin olevan huomattavasti suuremmat absoluuttiset materiaaliperäiset päästöt. Tämä tarkoittaa, että paremman energiatehokkuuden avulla saadut ympäristöhyödyt aiheuttivat rakennusmateriaaleista ja taloteknisistä järjestelmistä johtuvaa sitoutuneiden kasvihuonepäästöjen kasvua. Joissakin harvoissa tapauksissa kasvu oli jopa suurempi kuin niistä aiheutunut energiatehokkuuden parantuminen. (Röck et al. 2020)

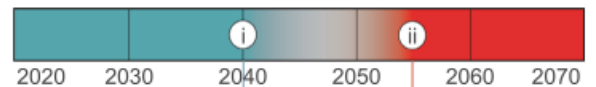
Tutkimuksessa huomattiin, että olemassa olevissa ja uusissa tavanomaisissa asuinrakennuksissa sitoutuneiden kasvihuonepäästöjen osuus oli keskiarvoltaan 20...25 % koko elin-

kaaren päästöistä. Edistyneissä asuinrakennuksissa kyseinen osuus oli 40...45 % ja ääripäätapauksissa jopa yli 90 %. Suurin osa tutkituista rakennuksista ylitti rajan 11,0 kgCO₂e/m²/a. Keskiarvopäästöt olivat 32 kgCO₂e/m²/a uusille tavanomaisille rakennuksille ja 27 kgCO₂e/m²/a uusille kehittyneille rakennuksille. (Röck et al. 2020)

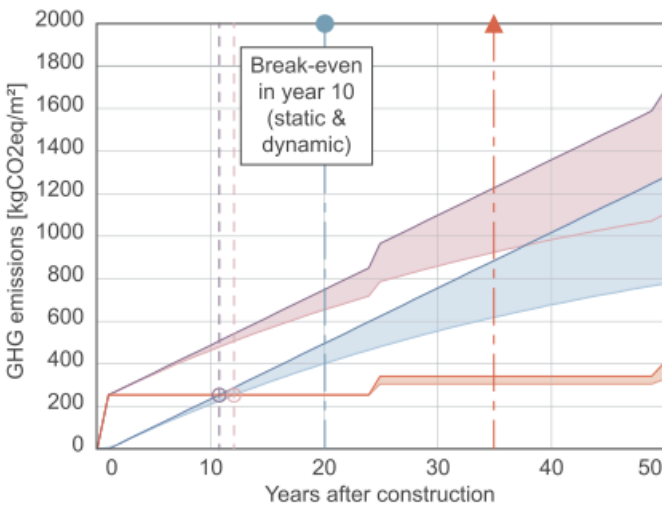
Kuvassa 8 on esitetty keskiarvoisten uusien standardirakennusten (kohta b) ja edistyneiden rakennusten (kohta c) kasvihuonepäästöjen jakautuminen elinkaaren ajalle. Kohdassa a nähdään IPCC:n (2018) 1,5 °C:n ja alle 2,0 °C:n polut. Kuvassa nähdään oranssilla sitoutuneet ja sinisellä käytön aikaiset kasvihuonepäästöt ja purppuralla yhdistelmäviiva, joka tarkoittaa koko elinkaaren kasvihuonepäästöjä. Lisäksi kuvassa nähdään logaritmisesti erkanevat viivat, joilla hahmotetaan käyttövaiheen päästöjä, mikäli IAE:n (2019) energiantuotannon päästövähennykset ovat tulevaisuudessakin vuosittain luokkaa 2,0 %. Energiaskenaarion toteutuessa kuvaajasta voidaan lukea, että 50 vuoden elinkaarella keskiarvoisen uuden standardirakennuksen kasvihuonepäästöt ovat ~1100 kgCO₂e/m² eli 22 kgCO₂e/m²/a. Tällöin keskiarvoisen uuden kehittyneen rakennuksen päästöt olisivat ~900 kgCO₂e/m² eli 18 kgCO₂e/m²/a. Ilman päästövähennystä luvut olisivat vastaavasti noin 34 kgCO₂e/m²/a ja 26 kgCO₂e/m²/a. (Röck et al. 2020)

a) Net global GHG emission pathways (acc. IPCC SR 1.5)

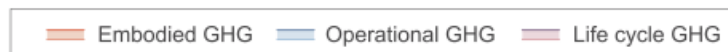
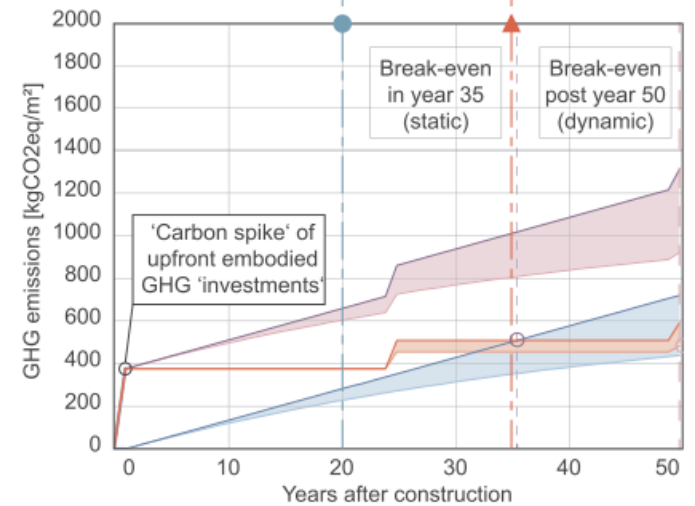
Target: Net zero life cycle GHG emissions, i.e. embodied and operational, by:
i) year 2040 for '1.5°C pathway' ii) year 2055 for 'well below 2°C' scenario



b) Average 'New standard' building



c) Average 'New advanced' building



Kuva 8. Sitoutuneiden ja käytönaikaisten kasvihuonepäästöjen suhteita keskiarvoisessa "uudessa tavanomaisessa" ja "uudessa kehittyneessä" rakennuksessa. Kuvassa nähtävillä IPCC:n (2018) tavoitteet päästövähennyksille. Tulevaisuuden käyttövaiheen päästöille on oletettu 2,0 % vähennys vuosittain. (Röck et al. 2020, s. 8)

Energiantuotannosta aiheutuvat kasvihuonepäästöt pienenevät maailmanlaajuisesti 2,0 % vuosittain vuosien 2014...2018 aikana (International Energy Agency 2019). Tämän trendin mukaisesti voidaan odottaa, että rakennuksen elinkaaren käyttövaiheen päästöt pienenevät ajan mukana. Odotettavaa on myös, että tulevaisuudessa huollosta ja rakennusmateriaalien korvauksista johtuvat kasvihuonepäästöt pienenevät, vaikkakin kuvasta 8 voidaan tulkita, että näiden vaikutukset kokonaispäästöihin eivät ole niin oleellisia kuin käyttövaiheen kasvihuonepäästöjen vähentäminen. (Röck et al. 2020, s. 8)

Rakentamisesta johtuvista sitoutuneista kasvihuonepäästöistä on kehittymässä suurin yksittäinen elinkaaren päästöjen aiheuttaja, koska energiantuotannosta aiheutuvat kasvihuonepäästöt pienenevät vuosittain. Tutkituissa rakennuksissa sitoutuneiden ja käytönaikaisten kasvihuonepäästöjen suhde näyttäisi olevan karkeasti yhtä suuri 50 vuoden elinkaarella. Sitoutuneiden päästöjen odotetaan myös kasvavan suhteessa käytönaikaisia päästöjä suuremmaksi ajan myötä, jolloin niiden merkitys vain kasvaa. Sitoutuneet kasvihuonepäästöt hallitsevat aikajanaa, jolloin ilmastonmuutokseen voidaan vielä tosiasiasa tehokkaasti vaikuttaa. Tutkimuksesta selviää myös, että 2,0 prosentin vuosittaisella energiantuotannon päästövähennyksellä päästään vain puoliväliin IPCC:n (2018) nollahiilisyystavoitetta vuodelle 2050. Jotta päästötavoitteisiin voidaan päästä sekä uudisrakentamisessa että olemassa olevilla rakennuksilla, se vaatii lisää panostusta rakennusmateriaalien ja -järjestelmien vähäpäästöisyyden kehittämiseen. Koska sitoutuneet kasvihuonepäästöt aiheutuvat ennen rakennuksen käyttövaihetta, niiden huomioiminen on erityisen tärkeää globaalin teollisuuden kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi. (Röck et al. 2020, s. 8–10)

2.6 Kasvihuonepäästöjen pienentämisen keinoja

Eri sektorit voivat vaikuttaa kasvihuonepäästöjen pienentämiseen erilaisilla toimenpiteillä. Kunnilla voi olla paikallisia hiilineutraaleja tavoitteita, kun taas valtion tavoitteet ovat valtakunnallisia. Sijoittajien tavoitteet taas liittyvät enimmäkseen omaisuuden arvoon. Kuntien keinoja tavoitteisiin pääsemiseksi ovat esimerkiksi kaavoittaminen ja hankintojen tekeminen. Sijoittajat voivat päästä tavoitteisiinsa silloin, kun yritykset päättävät vähähiilisyystoimistaan ja esimerkiksi hankkivat ympäristösertifikaatteja, jolloin yrityksiä täytyy tehdä tiettyjä toimenpiteitä ympäristöystävällisen rakentamisen eteen. Valtion tulee laatia regulaatioita päästökseen tavoitteisiin, jolloin kaikkien alan toimijoiden on noudatettava määräyksiä ja toimittava säädösten mukaisesti. Regulaatiot voivat olla valtiollisia toimenpiteitä, kuten Suomen tavoite hiilineutraaliudesta. Ne voivat olla myös peräisin korkeammalta taholta, kuten Suomen noudattamat Euroopan unionin säädökset tai kansainväliset ilmastositoumukset kuten Pariisin sopimus. (Adams et al. 2019)

Erinäiset valtiolliset tai globaalit säännöt, velvoitteet ja vaatimukset kiristyvät todennäköisesti entisestään päästöjen vähentämisen osalta. Ympäristöministeriön toimeenpaneman vähähiilisen rakentamisen tiekartan tavoitteena on saada rakennusten hiilijalanjälki osaksi rakentamismääräyksiä vuoteen 2025 mennessä (Bionova 2017, Ympäristöministeriö 2019). Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä, ja ilmastolakia uudistetaan sekä ohjausvaikutuksia vahvistetaan nykyisestä tavoitteen toteuttamiseksi (Valtioneuvosto 2019). Tavoite vuodelle 2050 päivitetään ja lakiin lisätään hiilineutraaliuspolkua vastaavat päästövähennystavoitteet vuosille 2030 ja 2040. Jotta ilmastolain tavoitteet voidaan toteuttaa, keskipitkän ja pitkän aikavälin ilmastosuunnitelmat uudistetaan sekä maankäytön ilmasto-ohjelma valmistellaan. Hallituksen esityksen uudistetuksi ilmastolaiksi on määrä valmistua 2021. (Ympäristöministeriö 2020)

Globaalisti rakentamiseen vaikuttavia säännöksiä ovat mm. Kioton pöytäkirja sekä erilaiset standardit kuten ISO-standardit ja CEN/TC 350. Euroopan unioni on sitoutunut globaaliin Pariisin sopimukseen, jossa pyritään rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousu 1,5 celsiusasteeseen suhteessa esiteolliseen aikaan. Sopimuksella myös vahvistetaan sopeutumiskykyä ja ilmastokestävyyttä sekä suunnataan rahoitusvirrat kohti vähäpäästöistä kehitystä. (Hallituksen esitys 200/2016) Suomi on sitoutunut EU:n ja kansainvälisten ilmastosopimuksien myötä merkittäviin kasvihuonekaasupäästövähennyksiin. Suomi pyrkii vähentämään koko maan kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjä 80 % vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 vertailutasoon nähden. Tämä tavoite vaikuttaa oleellisesti myös rakennusalaan. (Ympäristöministeriö 2019, Ilmastolaki 609/2015)

Malmqvist et al. (2020) ehdottaa case-tutkimuksensa pohjalta CO₂-päästöjen minimoimiseksi erilaisia suunnittelustrategioita. Niitä ovat:

- 1) Materiaalien vaihto, jossa luonnollisia materiaaleja käytettäisiin kantavissa rakenteissa. Lisäksi käytettäisiin kierrätettyjä, uudelleenkäytettyjä sekä innovatiivisia materiaaleja.
- 2) Resurssien käytön vähentäminen. Tällä tarkoitetaan esimerkiksi keveiden rakenteiden käyttämistä ja rakennuksen suunnittelua niin, että rakennusta voidaan käyttää joustavasti eri tarkoituksiin ja se on muokattavissa. Myös kätevän pohjaratkaisun rakennusmuoto ja suunnitteleminen vaikuttaa CO₂-päästöjen vähentämiseen positiivisesti. Resurssien käyttöä voidaan vähentää myös tekemällä ylläpito mahdollisimman helpoksi ja pieneksi sekä pidentämällä rakennuksen ja sen komponenttien käyttöaikaa. Viimeisenä resursseja voidaan vähentää käyttämällä rakennusmateriaaleja ja rakenteita uudelleen.
- 3) Rakennuksen elinkaaren rakennusvaiheen päästöjen vähentäminen.

- 4) Suunnittelussa otetaan huomioon materiaalien tai rakenteiden vaikutukset rakennuksen elinkaaren käyttöiän päättymisvaiheen (end-of-life) CO₂-päästöihin.

Ruuska & Häkkinen (2015, s. 327) toteavat tutkimuksensa pohjalta, että materiaalipohjaiset kasvihuonepäästöt käsittävät suuren osan rakennuksen elinkaaren päästöistä. Heidän mukaansa kestävästi rakennetuilla rakennuksilla (engl. sustainable buildings) tulisi olla matalat materiaaleihin sitoutuneet hiilidioksidipäästöt (engl. low embodied carbon) ja vain vähän kasvihuonepäästöjä käyttövaiheen aikana.

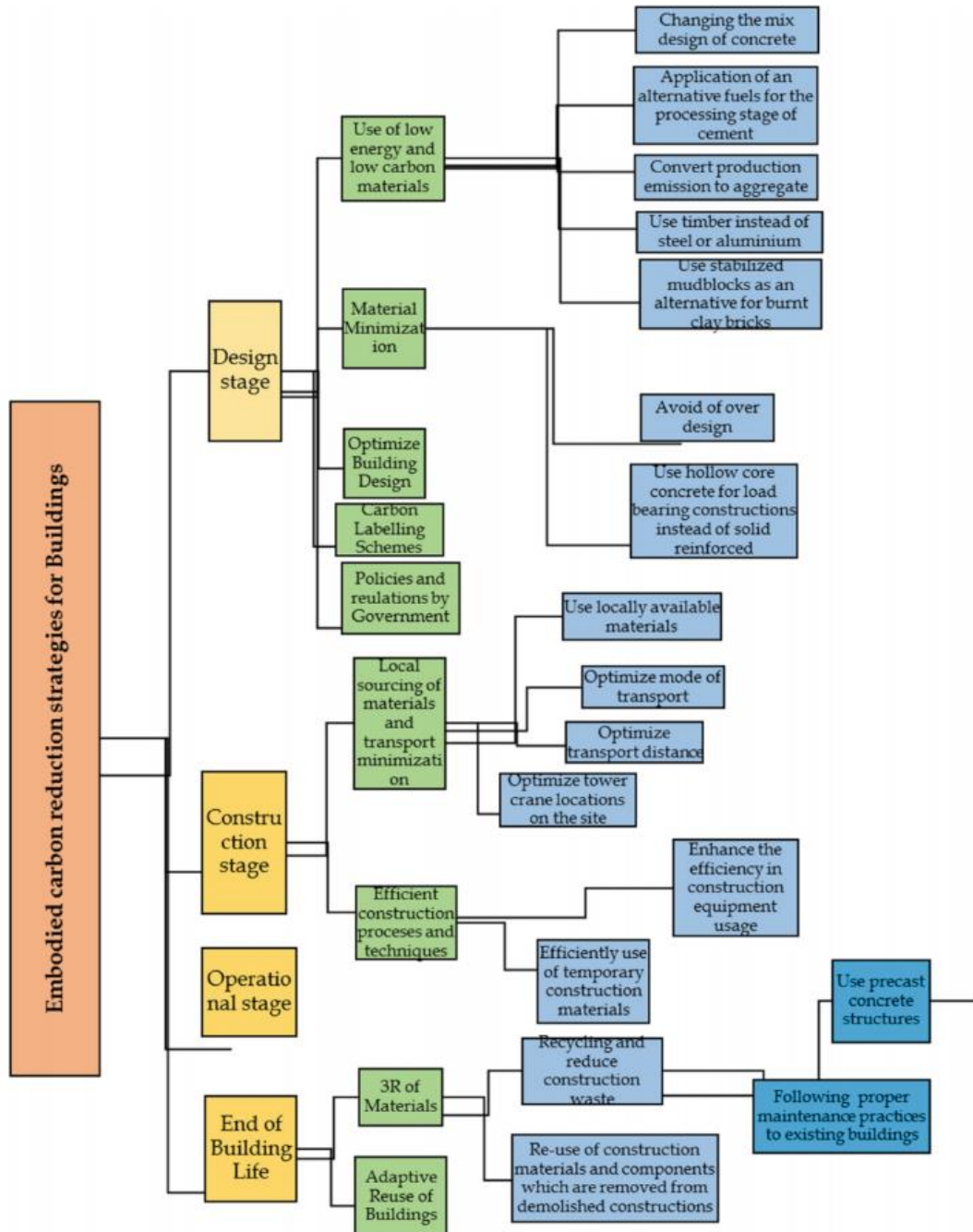
Rakennuksen energiatehokkuuden muutoksilla on suuri vaikutus tuloksiin. A-kategorian energiatehokkuuden rakennuksen parantaminen lähes-nolla-tasoon nosti materiaalien vaikutusta kokonaispäästöihin 37...53 %. Ilmiön voi osittain selittää sillä, että energiatehokkaammat materiaalit tuottavat enemmän päästöjä, mutta pääasiassa tämä johtuu siitä, että käyttövaiheen kasvihuonepäästöt laskevat. Lisäksi päästöprofiilin valinta vaikuttaa, kun tarkastellaan materiaalien tärkeyttä. Tutkimuksessa huomattiin, että mikäli laskelmat eivät huomioi tulevaisuudessa tapahtuvaa kehitystä energiantuotannossa ja vain nykyisiä energia-arvoja käytetään, materiaalipohjaiset kasvihuonepäästöt laskevat 37 %:sta 28 %:iin. (Ruuska & Häkkinen 2015, s. 348)

Säynäjoki et al. (2012) toteaa tutkimuksensa perusteella, että ilman merkittävää rakennusvaiheen kasvihuonepäästöjen vähentämistä uudisrakentamisella ei voida saavuttaa ilmastotavoitteita. Lisäksi todetaan, että mikäli on pakko rakentaa uutta, passiivienergiataloja täytyisi suosia ilmastonäkökulmasta tarkastellen. Näiden syiden takia on syytä pyrkiä vähentämään rakentamisvaiheen kasvihuonepäästöjä.

Kumari et al. (2020) on huomannut yhdeksän globaalisti käytössä olevaa strategiaa kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi. Siinä eri strategiat on jaettu neljään elinkaaren vaiheeseen: suunnittelu-, rakentamis- ja käyttövaiheisiin sekä elinkaaren loppuun. Strategiat ovat elinkaaren vaiheiden mukaisesti: 1) vähähiilisten ja energiapihien materiaalien käyttö, 2) materiaalien määrän minimointi, 3) rakennussuunnitelman optimointi, 4) hiilietiketöintihankkeet (engl. Carbon Labelling Scheme), 5) säännöt, säädökset ja niiden mukaan toimiminen, 6) paikallisten materiaalien käyttö ja kuljetuksen minimointi, 7) tehokas rakentamisen prosessi ja tekniikat, 8) rakennusmateriaalien kierrätys ja uudelleenkäyttö, 9) rakennusten joustava uudelleenkäyttö. Kuva 9 havainnollistaa rakennusten sitoutuneen hiilen vähentämisen strategioita.

Rakennusmateriaalien määrä pitäisi minimoida suunnittelun keinoin ja materiaaleissa pitäisi suosia paikallisia tuotteita sekä esimerkiksi korvata alumiini ja teräs mahdollisuuksien mukaan puulla. Betonituotteiden valmistusprosessissa pitäisi huomioida betonin seosainesuhde, käyttää vaihtoehtoisia polttoaineita ja hyödyntää betonin valmistuksessa syntyvät

päästöt. Lisäksi suositellaan käyttämään kantavissa rakenteissa onteloratkaisuja umpinaisten ja teräksellä vahvistettujen ratkaisujen sijaan. (Kumari et al. 2020)



Kuva 9. Rakennusten sitoutuneen hiilen vähentämisen strategioita. (Kumari et al. 2020)

Yhtenäinen teema lähteissä näyttäisi olevan kasvihuonepäästöihin reagointi jo suunnittelun aikana, mikä mahdollistaa ympäristöystävällisten ratkaisujen tekemisen hyvin aikaisessa vaiheessa rakennushanketta. Toinen esiin nouseva asia on uudisrakentamisen vähentäminen, ja panostaminen korjausrakentamiseen. Mikäli uudisrakentaminen on ainoa vaihtoehto, kannattaa panostaa ympäristöystävällisten materiaalien käyttöön, rakenteiden keventämiseen sekä resurssien tehokkaaseen käyttöön. (Malmqvist et al. 2020, Kumari et al. 2020, Säynäjoki et al. 2012)

Pasanen et al. (2011) tuli tutkimuksessaan siihen tulokseen, että elinkaaren pituudesta ja rakennuksen energiatehokkuudesta riippuen päästöero puurakenteiselle ja betonirakenteiselle kerrostalolle oli 5...11 % puurakenteisen kerrostalon eduksi. Lisäksi hän väittää, että elinkaaren päästöjen kannalta merkityksellisiä tekijöitä ovat myös rakenteiden hiilivarastot, jotka puurakenteisessa talossa vastaavat 16 % sadan vuoden päästöistä, kun taas betonirakenteisessa talossa vastaava luku oli vain 2 %.

Ruuska & Häkkinen (2015, s. 323) huomasivat tutkimuksessaan, että myös rakennuksen sijainti vaikuttaa päästöihin. Ensimmäiseksi todetaan, että mikäli rakennushankkeessa joudutaan stabilisoimaan maata, kuten usein tehdään pääkaupunkiseudulla rakennettaessa, se saattaa nostaa hankkeen kokonaispäästöjä huomattavasti. Maan stabilisointi saattaa aiheuttaa jopa 108 000 CO₂e:n kasvihuonepäästöt. Tällöin stabilisoinnin päästöt käsittäisivät jopa 39 % rakennushankkeen materiaaliperäisistä päästöistä verrattuna tutkimuksessa käsitellyn perusrakennukseen.

Toiseksi tutkijat huomasivat, että ihmisten liikkuvuus vaihteli tutkimuksessa 19...47 %:n välillä kokonaisuudesta. Tutkijat ehdottavat, että elinkaarianalyysi tulisi tehdä ajoissa, silloin kun rakennuksen paikkaa vasta valitaan. Tällöin olisi mahdollisuus vertailla elinkaarianalyysijä ja eri skenaarioiden aiheuttamia välillisiä päästöjä. Lisäksi todetaan, että käyttövaiheen kunnossapidon ja korjausten 17 prosentin osuutta materiaaliperäisistä kasvihuonepäästöistä voidaan helposti vähentää valitsemalla kestäviä, pitkäikäisiä ja kierrätettäviä rakennuskomponentteja. (Ruuska & Häkkinen 2015, s. 327)

3. RAKENNUSMATERIAALEIHIN SITOUTUNUT HIILI JA KASVIHUONEPÄÄSTÖT

Yleisimmät rakentamisessa käytetyt materiaalit ovat betoni, teräs ja puu. Muita rakentamisessa yleisesti käytettyjä materiaaleja ovat esimerkiksi tiili, kipsi, lasi, alumiini, muovi ja maalit. Tässä luvussa käsitellään yleisimpiin rakennusmateriaaleihin eli betoniin, teräkseen ja puuhun sitoutunutta hiiltä, niiden aiheuttamia kasvihuonepäästöjä sekä muita näiden rakennusmateriaalien kasvihuonepäästöihin vaikuttavia ominaisuuksia.

Rakennusmateriaalien raaka-aineiden hankinnassa ja rakennusmateriaalien valmistuksessa muodostuu hiilidioksidia materiaaleihin sitoutuneista hiiliyhdisteistä. Lisäksi materiaalien valmistuksen prosesseista ja energian käytöstä aiheutuu kasvihuonepäästöjä. Osa raaka-aineista, kuten puuhun on sitoutunut hiilidioksidia, joka ei reagoi materiaalin valmistusvaiheessa, vaan säilyy rakenteessa koko elinkaaren ajan, kunnes puurakenne käytetään uudelleen tai hävitetään. Tällä tavoin tietyillä rakennusmateriaalivalinnoilla voi olla positiivinen ilmastovaikutus laskettaessa rakennushankkeen kokonaiskasvihuonepäästöjä ja yksittäisen tuotteen hiilikädenjälki voi olla positiivinen. (Kaufmann et al. 2018, Puutuoteteollisuus 2019)

Ruuskan & Häkkisen (2014) tutkimuksen mukaan paremmilla tavoilla rakentaa ja käyttää rakennuksia voitaisiin vaikuttaa 42 %:iin lopullisesta energiankulutuksesta, noin 35 %:iin kasvihuonepäästöistä sekä yli 50 %:iin käytetyistä materiaaleista. Kulutustottumuksia muuttamalla voitaisiin säästää yli 30 % vettä. Materiaalien tehokkaalla käyttämisellä on suora vaikutus ilmaston lämpenemiseen ja kasvihuonepäästöihin. Tutkijat ehdottavatkin, että rakennuksen aiheuttamia kasvihuonepäästöjä voitaisiin käyttää indikoimaan rakennuksen materiaalihokkuutta.

Rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen pienentämisen tulee lähitulevaisuudessa olla entistä merkittävämpää. Säynäjoki et al. (2012, s. 116) toteaa tutkimuksensa pohjalta, että rakentamisvaiheen hiilipiikkiin eli korkeisiin päästöihin lyhyessä ajassa tulee kiinnittää erityistä huomiota. Geneerisellä LCA-datamallilla voidaan karkeasti arvioida rakennushankkeen kasvihuonepäästöjä, mutta on suositeltavaa käyttää tarkempaa projektikohtaista dataa ja mallinnusta tarkempien tulosten saamiseksi. Tutkimuksessa karkean ja projektispesifin mallinnuksen eroksi havaittiin noin 20 prosentin tarkkuuseroavaisuus. (Säynäjoki et al. 2012)

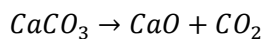
Eri tutkijat ovat huomanneet, että rakennusmateriaalit ovat hyvin tärkeässä roolissa ilmastomuutoksen ja rakennusalan kasvihuonepäästöjen hillinnässä. Ruuska & Häkkinen (2015) ovat huomanneet, että materiaalien osuus elinkaaren kasvihuonepäästöistä on merkittävä, ja he ovat lisäksi sitä mieltä, että materiaalivalmistajien välisiä päästöjä ei ole vielä tutkittu

tarpeeksi. Säynäjoki et al. (2012) toteaa, että materiaaliperäiset päästöt aiheuttavat suurimman osan koko elinkaaren aikaisista päästöistä, kun tavoitteet energiankulutuksen päästöjen vähentämiseksi otetaan mukaan. Röck et al. (2020) toteaa, että rakennusmateriaalien suhteelliset kasvihuonepäästöt nousevat rakennuksen energiatehokkuuden kasvaessa.

3.1 Sementtipohjaisten materiaalien kasvihuonepäästöt

Rakentamisen kannalta oleellisin ja päästöintensiivisin prosessi, jossa muodostuu hiilidioksidia, on sementin valmistusprosessi. Sementti on myös massaltaan suurin maailmassa valmistettava tuote ja sementtipohjaiset materiaalit ovat maailman toiseksi käytetyin substanssi heti veden jälkeen. Tällä hetkellä sementtiteollisuus aiheuttaa noin 10% kaikista maailman CO₂-päästöistä. Yhdistettäessä sementtiä veteen ja mineraaleihin muodostuu sementtipohjaisia materiaaleja, kuten betonia. (Scrivener et al. 2018, s. 2)

CO₂-päästöä tarkastellessa tärkein sementin mineraaleista on niiden kalsiumpitoisuus. Kalsiumia sementtiin tulee kalsiumkarbonaatista eli kalkkikivestä sekä klinkkerin ensimmäisestä valmistusvaiheesta, jossa kalkkikivi dekarbonisoituu. Reaktion nimi on kalsinoituminen, jossa kalsiumkarbonaatista muodostuu kalsiumoksidia ja hiilidioksidia:



On tutkittu, että perinteisessä portlandsementin valmistusprosessissa noin 60 % CO₂-päästöistä aiheutuu yllä olevasta kemiallisesta reaktiosta. Koska kalkkikivi on ainoa suuripitoinen kalsiumin lähde, kalsiumpohjaisten sementtien valmistus johtaa väistämättä kalsinoitumiseen ja siten sen aiheuttamiin suuriin kemiallisiin CO₂-päästöihin. Tämä on juurisyy sementtiteollisuuden merkittäviin CO₂-päästöihin. Scrivener et al. (2018, s. 8) näkee tässä myös mahdollisuuden parempaan, koska toisaalta on selvästi mahdollista vähentää näitä päästöjä suhteellisen halvalla eli yksinkertaisesti muuttamalla sementtien koostumuksia. Punkki et al. (2010) toteaa myös, että sementin CO₂-päästöjä voidaan tehokkaimmin alentaa seostamalla portlandsementtiä erilaisilla seosaineilla, kuten masuunikuonalla, joka on rautateollisuuden sivutuote tai lentotuhkalla, joka syntyy kombustioreaktiossa hiilivoimaloissa.

Sementti on hiilidioksidi-intensiivinen materiaali, joka tuottaa eri sementtilaadun mukaan noin 700 kg hiilidioksidia per tonni sementtiä. Suuri osa päästöistä johtuu klinkkeröinnistä, jossa jauhettua kalkkikiveä poltetaan korkeassa lämpötilassa, ja siitä muodostuu klinkkeriä. Tehostamalla polttamisprosessia tai uusiutuvilla polttoaineilla prosessin päästöjä voidaan pienentää. Punkki et al. (2010, s. 46) toteaa, että kalsinoitumisprosessissa sementtitonnia kohden vapautuvaa noin 500 kg:n CO₂-päästöä ei pystytä pienentämään prosessia tehostamalla, koska kyseessä on kemiallinen reaktio (kalsinoituminen), ja vapautuvan hiilidioksidin määrä

on vakio. Tämä kemiallinen CO₂-päästö palautuu osittain betoniin kalsinoitumisen käänteisreaktiossa, karbonisaatiossa, jolloin betonirakenteet sitovat hiilidioksidia itseensä. Tämä reaktio huomioidaan myös Ympäristöministeriön (2019) rakennusten vähähiilisyiden menetelmässä.

Vuonna 2004 sementtiä valmistettiin yhteensä 2,2 miljardia tonnia. Vuoteen 2016 mennessä sementtiä valmistettiin yhteensä 4,1 miljardia tonnia, joten sen valmistus oli lähes kaksinkertaistunut. Määrä oli silloiseen maapallon ihmismäärään suhteutettuna noin 565 kg henkilöä kohden vuodessa. (Cembureau 2017) Betonirakentamisen kasvavaa määrää kuvaa myös se, että vuonna 1950 sementtipohjaiset materiaalit käsittivät 7 % kaikista käytettävistä materiaaleista maailmanlaajuisesti, mukaan luettuna fossiiliset polttoaineet. Vuonna 2005 tämä määrä oli noin 30 %, joka vastaa noin nelinkertaista suhteellista kasvua 55 vuodessa. (Scrivener et al. 2018, s. 3)

Betonirunkoisessa rakennuksessa sementin valmistuksesta aiheutuu huomattavat määrät rakentamisen aikaisista hiilidioksidipäästöistä. Vuonna 2020 tehdyssä tutkimuksessa Prakasan et al. kirjoittavat, että Euroopassa keskiarvolta yhden klinkkerisementtitonnin valmistuksessa muodostuu 839 kilogrammaa hiilidioksidia. Jos lisää valmistukseen keskiarvollisen sähkönkulutuksen ja muut päästöjä aiheuttavat tapahtumat, saadaan luvuksi 923 kg CO₂/ton. Portland-sementillä vastaavat luvut ovat 833 kgCO₂/ton pelkälle klinkkerille, ja 853 kgCO₂/ton yhteensä. Pozzolana-sementille, joka sisältää lentotuhkaa 11–35 %, luvut ovat hieman matalammat 675 kgCO₂/ton klinkkerille ja 693 kgCO₂/ton yhteensä. (Prakasan S. et al., 2020)

Sementin seosaineita (SCM, engl. Supplementary cementitious materials) voidaan käyttää joko täyteaineena tai niiden pozzolaanisten eli veden ja kalsiumhydroksidin kanssa reagoivien ominaisuuksien vuoksi. Vaihtoehtoisten seosaineiden idea on korvata osa klinkkeristä vähemmän ympäristölle haitallisella aineella kuitenkin sementin tehokkuutta tai ominaisuuksia heikentämättä. Yleisimmät sementissä käytettävät seosaineet ovat lentotuhka ja masuunikuona. Masuunikuona ei voi jokseenkin heikon saatavuutensa vuoksi korvata klinkkeriä ainakaan tietyillä alueilla. Lentotuhkan ominaisuuksissa taasen on erittäin suurta flukтуаatiota, ja vain kolmannes kaikesta muodostuvasta lentotuhkasta on käyttökelpoista sementin seosaineeksi. (Nagi & Jang 2019, s. 5–6)

Nagi & Jang (2019, s. 6, s. 13) käsitelivät tutkimuksessaan sementin vaihtoehtoisia koostumuksia ja vertailivat niiden potentiaalia sekä ympäristövaikutuksia tavalliseen portlandsementtiin. Tutkimuksessa käsiteltiin seitsemää eri koostumusta, konventionaalisten raaka-ainneiden osittaisesta korvaamisesta kokonaan uudella klinkkerillä sementtiklinkkerin korvaaviin seoksiin. Huomattiin, että vaikka asiassa tarvitaan vielä lisätutkimusta sekä yhteisiä

säännöksiä ja standardeja, näiden vaihtoehtoisten sidosaineiden nähtiin olevan yksinkertainen, ympäristöystävällinen, kilpailukykyinen ja lupaava ratkaisu tavalliselle portlandsementille. Erityisesti kalsinoitu savi yhdessä kalkkikiven kanssa nähtiin lupaavana korvaajana, ja tutkimuksissa hyviä mekaanisia tuloksia saatiin aikaan 50-prosenttisella klinkkerisisällöllä edellä mainittujen korvaajien kanssa.

D’Alessandro et al. (2016) selvittivät vähäpäästöisen betonin tutkimuksen trendejä. Viimeisimmät vähäpäästöiseen betoniin kohdistetun tutkimuksen trendit ovat olleet betonien fyysiset ja mekaaniset ominaisuudet, raaka-aineiden vähentäminen ja energiatehokkuus. Uudenlaiset hyvin vahvat, mutta samalla kevytrakenteiset betonit mahdollistavat rakenteiden pienemmän omapainon ja sen myötä rakennusmateriaalien määrän pienentämisen. Näitä hyötyjä voidaan saada korvaamalla osa klinkkeristä uudenaikaisilla innovatiivisilla materiaaleilla ja kuiduilla. Käytettäviä raaka-aineita voidaan vähentää myös korvaamalla klinkkeriä kierrätetyillä materiaaleilla. Tutkijoiden mukaan betonilla on materiaalina jokseenkin valoisa tulevaisuus, osittain johtuen siihen kohdistetusta laajasta ja aktiivisesta tutkimuksesta. Betonin haasteena tutkijat näkevät kuitenkin betonin fyysisten, mekaanisten, termisten ja energiatehokkaiden ominaisuuksien soveltamisen kestävässä rakentamisessa.

3.2 Teräsmateriaalien kasvihuonepäästöt

Teräs on tärkein käyttömetalli ja hyvän vetolujuuden omaava rakennusmateriaali. Teräs on ominaisuuksiltaan kevyt, luja, palamaton sekä homogeeninen. Pienet rakennemitat mahdollistavat keveät rakenteet. Teräs kestää hyvin kulutusta, korroosion etenemistä ja kosteutta. Sen mekaanisia ominaisuuksia voidaan muuttaa halutuksi valmistusprosessin ja koostumuksen avulla. Teräs eroaa valuraudasta sillä, että hiilipitoisuus teräksessä on alle 1,7 %. Se tosin on materiaalina kallis ja sen pinta on altis korroosiolle. Lisäksi se on altis lämpötilavaihteluille, ja sitä on hankala muokata enää työmaalla. Terästä voidaan kierrättää sellaisenaan johtuen helpoista liitoksista, ja Suomessa lähes kaikki käytöstä poistettu teräs saadaan uudelleen kiertoon, eli teräksen kierrätysprosentti on lähellä sataa. Kierrätysprosessissa terästä voidaan erottaa magneettisesti sekä sulattaa ja käyttää uudelleen käytännössä loputtomasti. (Väisänen 2007, s. 28–29, s. 33)

Suurin osa teräksen ympäristövaikutuksista syntyy terästehtaassa, jossa masuuniprosessin hiilidioksidipäästöt syntyvät raaka-aineista (Väisänen 2007, s. 33). Teräksen tuotanto aiheuttaa maailmanlaajuisista kasvihuonepäästöistä 7...9 prosenttia, joista noin puolet on rakennusalan aiheuttamia. Maailmanlaajuisen teräksen tuotannon odotetaan kasvavan 30 prosentilla vuoteen 2050 mennessä. (Adams et al. 2019, s. 24)

Teräksen valmistuksen kasvihuonepäästömäärät vaihtelevat suuresti riippuen siitä, minkälaisessa tehtaassa se on valmistettu ja mikä on ollut prosessissa käytetty energiamuoto. Siitosen et al. (2010) mukaan teräksen globaalien kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi myös tehtaiden energiatehokkuuden pitäisi olla yksi tarkastelujen ydinkohdista.

Ruuskan et al. (2013) raportin mukaan sinkityn teräksen (tiheys 7850 kg/m³) hiilijalanjälki on 1,10 kgCO₂e/kg vaiheilla A1–A4. Toisin sanoen teräs tuottaa hieman yli kilogramman kasvihuonepäästöt teräskilogrammaa kohden ilmakehään matkalla rautamalmin louhinnasta valmiiseen teräspalkkiin työmaalla.

Teknolוגiateollisuuden (2020) artikkelin mukaan teknologiayritys SSAB lupaa tuottaa hiilivapaa terästä vuonna 2026. Terästä tuotettaisiin vetyä vähentämällä, jolloin prosessissa syntyi vettä hiilidioksidin sijaan. Yrityksen mukaan hiilivapaa teräs vähentäisi CO₂-päästöjä seitsemällä prosentilla Suomessa ja kymmenellä prosentilla Ruotsissa.

3.3 Puumateriaaleihin sitoutunut hiili

Puuta pidetään yleisesti vahvana, kestäväenä ja uusiutuvana materiaalina, ja sitä on käytetty esihistoriallisista ajoista lähtien kaikilla mantereilla. Puurakenteiset asuintalot kestävät eri ilmastoissa ympäri maailman, Aasiasta Skandinaviaan. (Hamadyk et al. 2020, s. 1–2) Viime aikoina jopa unohdettua materiaalia on tutkittu ja kehitetty valtavasti sekä huomattu sen potentiaali loistavana hiilinieluna (Kaufmann et al. 2018, s. 5). Pääministeri Sanna Marinin hallitusohjelman mukaan Suomi pyrkii edistämään puurakentamista, sillä puurakennus toimii myös hiilivarastona (Valtioneuvosto 2019).

Rakennuksen hiilivarastona toimiminen perustuu siihen, että puu ja siten myös rakenteissa olevat puukomponentit sitovat hiiltä itseensä ja viivyttävät hiilidioksidin vapautumista ilmakehään siihen asti, kunnes komponentti on elinkaarensa päässä. Tosin hiilidioksidia vapautuu vain, jos puukomponentti poltetaan esimerkiksi energiaksi. Mitä kauemmin puutuotetta käytetään materiaalina, sitä kauemmin hiiltä on sitoutuneena tuotteeseen, joten puurakentaminen auttaa hiilen talteenotossa (engl. carbon sequestration). Hiilen talteenotto on tärkeä tekijä hiilidioksidin vähentämisessä metsien avulla. (Kaufmann et al. 2018, s. 24)

Puiden hakkuu vähentää puuston biomassan määrää alueella, joten puusto päätyy epätasapainotilaan. Tilanteen saamiseksi tasapainoon uutta puustoa alkaa kasvaa kestävästi hoidettuun metsään. Rakennustuotteeksi hakatun puutavaran tilalle kasvanut uusi puusto voi jälleen sitoa lisää hiilidioksidia itseensä, joten voidaan ajatella, että jatkokäyttöön päätyvä puutavara lisää talteen otetun hiilen kokonaismäärää. (Kaufmann et al. 2018, Hamadyk et al. 2020)

Puun käyttämisellä rakennusteollisuudessa on myönteinen vaikutus hiilidioksidibalanssiin, ja erityisesti kotimaisen puun käyttämisen voidaan perustellusti todeta vaikuttavan tähän. Hiilen määrä puutuotteissa lasketaan keskiarvona perustuen sahatavaran, puutuotteiden ja paperin määrään. Rakennusmateriaaleissa käytettävän puun ympäristövaikutusta tarkastellessa kiinnostavat asiat ovat rakennuksen hiilen talteenoton määrä sekä rajallisten raaka-aineiden korvaaminen. Rakennusmateriaaliin sitoutuneen hiilen määrä lasketaan tuotantovaiheessa ja merkitään elinkaarianalyysissä (LCA) negatiiviseksi miinussymbolilla. Rakennuksen purkamisesta ja materiaalien hävittämisestä johtuva vapautuva hiili ja syntyvät kasvihuonepäästöt lasketaan LCA:ssa positiivisiksi, jolloin tuotannon negatiiviset päästöt kompensoivat näitä purkuvaiheen päästöjä. Tällä lähestymistavalla voidaan laskea, tarkastella ja vertailla erilaisia materiaaleja sisältävien rakenteiden hiilen talteenottoa. Tällöin voidaan pitää puuta ”hiili-neutraalina” tai ”ilmastoneutraalina” (engl. ”climate neutral”) raaka-aineena. (Kaufmann et al. 2018, s. 24–25)

On laskettu (Vares et al. 2017), että keskiarvallisesti jokaiseen kuivaan kuutioon puuta (sahatavaraa), jonka tilavuuspaino on 450 kg, sisältyy 225 kg hiiltä (C). Standardi DIN EN 16449 käsittelee puuhun ja puupohjaisiin tuotteisiin sitoutunutta hiiltä (biogeeninen hiili) ja sen muuttamista hiilidioksidiksi. Moolimassojen avulla puutuotteiden sisältämä hiilidioksidi voidaan laskea seuraavalla kaavalla, jossa puutuotteen sisältämä hiili reagoi ilmakehän hapen kanssa: $C + O_2 = CO_2$. Tällöin saadaan hiilisisällöksi 1,55 kgCO₂/kg, ja hiilijalanjäljeksi 0,09 kgCO₂/kg. (IPCC 2018)

Johtuen tilavuuspainon vaihteluista erilaisissa puutuotteissa sekä valmistuksessa käytettävästä energiasta, hiilijalanjälki on eri tuotteilla erisuuruinen. Hiilijalanjälki on laskettu elinkaaren vaiheille A1–A4. Esimerkiksi liimapuulle, jonka tilavuuspaino on 470 kg/m³, hiilisisältö on 1,62 kgCO₂/kg ja hiilijalanjälki 0,36 kgCO₂/kg. Stora Enson CLT:lle eli ristiinliimatulle massiivipuulle (engl. Cross-laminated timber) vastaavat luvut ovat 470 kg/m³, 1,55 kgCO₂/kg ja 0,21 kgCO₂/kg (Stora Enso 2017). (Vares et al. 2017) CLT-rakenteita käytetään esimerkiksi korkean esivalmistusasteen ja rakennusteknisten ominaisuuksien vuoksi. Tässä diplomityössä myöhemmin mallinnettu puurakenteinen skenaario on pääosin CLT-rakenteinen.

Puutuoteteollisuus ry:n (2019) ympäristöselosteessa on käytetty Suomesta, Venäjältä ja Ruotsista peräisin olevia kuusi- ja mäntytukkeja. Kuusesta valmistetun kuivatun sahatavaran keskimääräinen tiheys on 472 kg/m³ ja männylle 475 kg/m³, jolle kosteusprosentti vaihteli välillä 15...18 %. Kuivatulle sahatavaralle laskettiin keskimääräinen tilavuuspaino 474 kg/m³ sekä kosteuspitoisuus 18 %. Ympäristöseloste kuvaa ympäristövaikutuksia muodossa kgCO₂e/m³ kuivattua sahatavaraa. Ympäristöselosteen mukaan sahatavaran hiilivaikutus ilmakehään on negatiivinen, -131,85 kgCO₂e/m³.

Biogeenisen hiilen varastoinnin lisäksi uusiutuvista materiaaleista, kuten puusta valmistetut rakennusmateriaalit voisivat korvata rajallisista raaka-aineista valmistettuja rakennusmateriaaleja, kuten muovi-, metalli- tai mineraalipohjaisia tuotteita, parantaen ympäristövaikutusta edelleen. Sathren & O'Connorin (2010) tutkimuksen mukaan keskiarvollinen substitutiokijä oli $-3,9 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$, eli $3,9 \text{ kg}$ vähemmän CO_2e :tä per 1 kg puuta. Tosin, toisessa tutkimuksessa todettiin, että keskiarvollinen luku keskivertotalolle olisi $-1,6 \dots 2,6 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$. (Kaufmann et al. 2018, s. 25) Ympäristöministeriön ILMARI-tietokannan mukaan puun ympäristöprofiili taas on $0,09 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$. Ympäristöprofiili sisältää raaka-aineiden hankinnan, materiaalien valmistuksen, kuljetuksen työmaalle ja työmaan hukan, joten siinä ei ole mukana hiilidioksidin talteenottoa. (Häkkinen & Ruuska 2015, s. 69)

Puurunkorakenteisessa rakennuksessa perustuksilla ja kellarilla on suurin vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen riippuen perustusten koosta ja tyypistä. Mitä korkeampi rakennus on, sitä pienempi on niiden suhteellinen vaikutus. Suurin osa hiilestä varastoituu runkorakenteisiin, koska ne vaativat suurimman osan puutavaraa. Rakennustyömaalla tapahtuvan asentamisen hiilijalanjälki on pieni verrattuna rakennusmateriaalien valmistuksen vastaavaan. Rakennuksen listoituiset, ikkunat, ovet sekä julkisivumateriaalit saattavat vaikuttaa hiilen talteenottoon pitkällä aikavälillä, sillä näitä osia joudutaan vaihtamaan usein rakennuksen elinkaaren aikana. Puurakenteiden huolto on tärkeää, jotta ne säilyvät kestävinä koko rakennuksen elinkaaren ajan, jolloin hiilijalanjälki pysyy optimaalisena. (Kaufmann et al. 2018, s. 28)

Pohjoismaissa puukerrostalorakentamisesta on viime vuosina tullut kiinnostava liiketoimintamahdollisuus. Suomessa vuonna 2010 puisilla kerrostaloilla oli vain yhden prosentin markkinaosuus, kun vuonna 2015 se oli 10 prosenttia. (Toppinen et al. 2018) Hamadykin et al. (2020, s. 5) mukaan puun ei-tekniset, luonnolliset ominaisuudet kuten ulkonäkö, luonnollinen olemus, tuoksu sekä miellyttävä tekstuuri vaikuttavat positiivisesti materiaalin valintaan.

Kestävästä lähteistä peräisin oleva puumateriaali vaikuttaa positiivisesti yrityksen ympäristöstrategiaan. Puurakennukset pystyvät olemaan pitkiä ajanjaksoja rappeutumatta biologisesti, mikäli huolto ja hoito hoidetaan asianmukaisin tavoin. Puu on materiaalina ympäristöystävällinen, myrkytön ja biohajoava, mutta lisäksi rakenteellisesti tehokas ja hyvin toimiva. (Hamadyk et al. 2020, s. 6) Puu on myös keveytensä ansiosta helppo materiaali käsitellä. Puurakenteet täyttävät modernin kaupunkirakentamisen vaatimukset, ja mahdollistavat yksinkertaisen, nopean ja kuivan tavan rakentaa. Lisäksi puurakenteet kuluttavat vähemmän raaka-aineita ja vaativat pienemmät perustukset. Hamadyk et al. (2020) myös väittää, että nämä seikat tarkoittavat rakennushankkeen kokonaishinnan laskua. (Kaufmann et al. 2018, Hamadyk et al. 2020, s. 5–6)

Viimeisimpiä innovaatioita puurakentamisessa ovat puurakenteiset moduulikerrostalot, jotka ovat nopeita asennettavia. Moduulikerrostaloissa hyödynnetään valmiiksi tehtaalla tehtyjä

elementtejä, joten rakennustyömaalla tarvitsee vain liittää osat yhteen. Elementtejä voidaan kuljettaa tehokkaasti, mikä vähentää kasvihuonepäästöjä ja energiankulutusta. Valmistuksen tehokkuus ja esivalmistus vaikuttavat suorasti rakentamisen nopeuteen ja taloudellisuuteen. (Kaufmann et al. 2018, Hamadyk et al. 2020, s. 5)

Hamadyk et al. (2020) toteaa, että puuta tulisi materiaalina käyttää rakennusalalla paljon enemmän. Puumateriaalin käyttäminen voisi auttaa kaupunkien nopeassa laajentumisessa, muokata metsien hoitoa kestävämmäksi sekä vähentää rakentamisen hiilijalanjälkeä. Lisäksi puulla voitaisiin osittain vähentää muiden materiaalien valmistukseen vaadittavien raaka-ainneiden katoa. Puurakentaminen osaltaan myös edustaa kolmea kestävän kehityksen teemaa, eli ympäristöä, taloutta sekä sosiaalista kestävyyttä.

Kaufmann et al. (2018) toteaa, että näyttäisi suositeltavalta käyttää puuta rakennusmateriaalina aina, kun se on mahdollista kuitenkin niin, että puu on tuotettu kestävän kehityksen periaatteiden mukaisesti ja sen käyttö ja valmistus on kestävää. Muihin materiaaleihin verrattuna se tuottaa hyvin alhaiset kasvihuonepäästöt ja sitoo hiiltä itseensä. Parhaiten puun ympäristöystävällisyydestä hyötyy käyttämällä korkealaatuisia ja kestäviä puutuotteita sekä korvaamalla päästö- ja energiaintensiivisiä materiaaleja puulla. Lisäksi puun käyttöä tulisi miettiä yksilöllisesti jokaisessa eri rakennustoiminnossa. Esimerkiksi rakennuksen runkorakenteet vaativat paljon rakennusmateriaaleja, joten rakentamalla ne puusta voidaan ottaa paljon hiiltä talteen. Rakennuksen elinkaaren päättyessä puutavaran voi käyttää uudelleen, kierrättää tai polttaa energiaksi kaskadikäytössä, mikä on tehokas tapa käyttää resursseja ja mahdollistaa moninkertaisen hiilidioksidin substituutioefektin. (Kaufmann et al. 2018, s. 26, s. 28)

3.4 Materiaalien vertailu ja kasvihuonepäästöjen vähentäminen materiaalivalinnoin

Rakennuksessa käytetyillä rakennusmateriaaleilla on huomattava merkitys kasvihuonepäästöihin. Materiaalivalintoihin voidaan vaikuttaa parhaiten heti suunnitteluvaiheen alussa. Karkeasti kolmasosa rakennushankkeen materiaaliperäisistä päästöistä johtuu runkorakenteista, kuudesosa perustuksista sekä alusrakenteista ja kuudesosa täydentävistä rakenteista. (Ruuska & Häkkinen 2015) Materiaalivalinnoin kasvihuonepäästöjä voidaan vähentää valitsemalla rakennusmateriaaleiksi vaihtoehtoja, jotka ovat ekologisia, kierrätettyjä, uudelleenkäytettyjä tai luonnollisia. Rakennusmateriaalien käytön minimointi on myös päästöjä vähentävä ratkaisu, joka voidaan tehdä esimerkiksi keveämmillä rakenneratkaisuilla kuten ohentamalla rakenteita. (Malmqvist et al. 2020; Kumari et al. 2020)

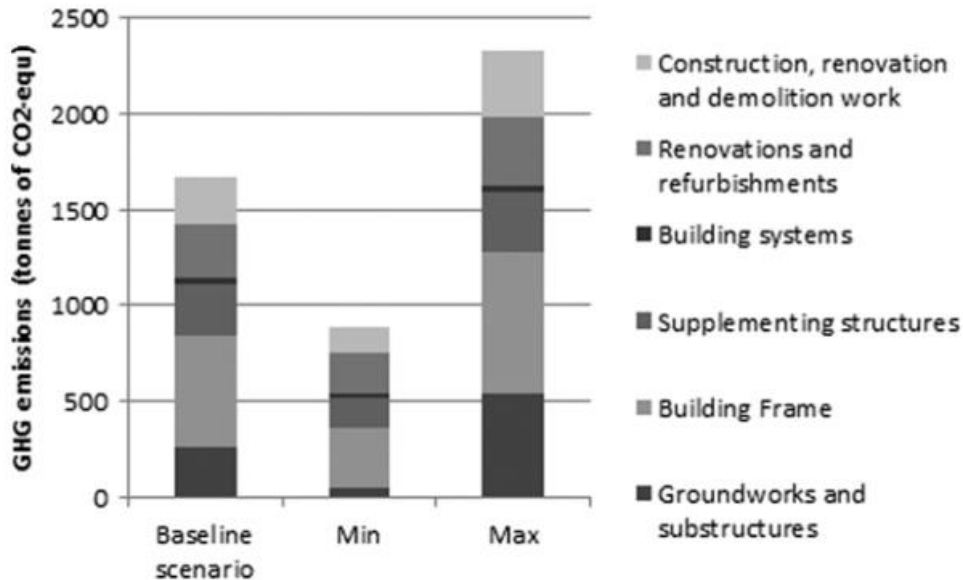
Malmqvist et al. (2018) käsittelee artikkelissaan materiaalivalintojen vaikutusta kasvihuonepäästöjen vähenemiseen muutamassa eri rakennusprojektissa. Esimerkiksi välipohjan teräs-betonilaatan korvaaminen puu-betoni-komposiittilaatalla vähensi materiaaleihin sitoutuneita kasvihuonepäästöjä 30–45 % tietyssä tapauksessa. Lisäksi muutamassa ruotsalaisessa rakennuksessa havaittiin, että sekä kantavien rakenteiden että ei-kantavien rakenteiden vaihtaminen betonista puuhun vähensi päästöjä 15%. Eräässä tapauksessa tavanomainen betoni korvattiin lentotuhkaa ja masuunikuonaa sisältävällä betonilla, ja havaittiin 12 % lasku sitoutuneissa kasvihuonepäästöissä.

Ruuskan & Häkkisen (2015) tutkimuksessa selvitettiin kerrostalon kasvihuonepäästöjen eri tekijöiden merkitystä. Laskelmien pohjana käytettiin olemassa olevaa suomalaista 6-kerroksista kellarillista asuinkerrostaloa. Kerrostalossa oli 28 asuntoa, kerrosala 2 454,5 m², nettoala 2 082 m² sekä bruttoala 3 056 m². Rakennus koostui pääasiassa betonielementtirakenteista ja välipohjat, kattorakenteet, hissikuilut sekä sisä- ja ulkoseinät olivat betonielementtejä. Perustukset, alapohja sekä osa väestönsuojarakenteista oli tehty paikallavaluina. Tätä perustason rakennusta muokattiin vaihtamalla materiaaleja kahdeksi eri vertailutapaukseksi: Minimiskenaariona oli Puuinfon (2012) julkisesti jaossa olevan rakennekirjaston mukaisesti rakennettu puurakenteinen kerrostalo ja maksimiskenaariona alkuperäistä rakennusta muokattiin vielä raskaammaksi. Molemmat skenaarit ovat toteutuskelpoisia sekä standardinmukaisia ja Ruuska & Häkkinen (2015, s. 319–320) toteavat, että skenaarioiden kaltaisia rakennuksia rakennetaan Suomessa asuintarkoitukseen, joskin minimi- ja maksimiskenaarioista haluttiin tarkoituksella tehdä ääripään vaihtoehdot. Huomattavaa, että kaikissa kolmessa skenaariossa ikkunat, ovet, kalusteet, kellari, hissikuilut sekä väestönsuojarakenteet olivat samat. Rakennusten eliniäksi oletettiin 50 vuotta.

Ruuskan & Häkkisen (2015) tutkimuksen tulokset osoittavat runkorakenteiden suuripäästöisimmiksi artikkeleiksi lattialaatat, jotka aiheuttavat 35–40 % rungon päästöistä, ulkoseinät (25–35 % rungon päästöistä) sekä kantavat sisäseinät (15–20 % rungon päästöistä). Tutkimuksessa huomattiin, että rungosta aiheutui noin 35 % hankkeen elinkaaren kasvihuonepäästöistä, mikäli veden ja energian käyttö jätettiin huomioimatta.

Kuvasta 10 voidaan nähdä, että eri skenaarioiden materiaalityyppien kasvihuonepäästöjen erot olivat suuret. Maksimitapauksen eli massiivibetonisen rakennuksen päästöt olivat 2,6 kertaa suuremmat kuin minimitapauksen eli kevyen puurunkorakenteisen rakennuksen. Minimitapauksen päästöt olivat vain 53,4 % perustapauksen vastaavista, mutta maksimitapauksen päästöt olivat 40,2 % suuremmat kuin perustapauksella. Tutkijat huomauttavatkin, että runkorakennetyypin valinta on hyvin tärkeää päästöjä minimoimassa. Runkorakenne ja sen materiaalit päätetään hyvin alkuvaiheessa suunnitteluja, eikä niitä voida enää päätöksen

jälkeen muokata kovin helposti, joissain tapauksissa ei lainkaan. Tästä syystä suunnittelu-
vaiheen alkupuolella kannattaisi vertailla vaihtoehtoisia runkorakenteita ja -materiaaleja kes-
kenään. (Ruuska & Häkkinen 2015, s. 321, s. 327) Tutkimuksen tulokset näyttävät korreloi-
van Kumari et al. (2020) väitteen kanssa, jossa tutkijat suosittelivat käyttämään ontelorat-
kaisuja kantavissa betonirakenteissa umpinaisten teräsvahvistettujen sijaan.



Kuva 10. Eri skenaarioiden materiaalipohjaiset kasvihuonepäästöt, huomioimatta maa-
perän stabilisointia ja aurinkoenergia- sekä ilmanvaihtojärjestelmiä. (Ruuska & Häkki-
nen 2015, s. 323)

Taulukossa 2 nähdään Puutuoteteollisuuden vuonna 2019 tehty ympäristöseloste kuivatusta
sahatavarasta. Huomataan, että puun kokonaishiili-intensiteetti on negatiivinen ($-131,85$
 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$), kun esimerkiksi betoni- ja terästuotteilla se on positiivinen. Hiili-intensiteetin ne-
gatiivisuus tarkoittaa, että puu sitoo itseensä enemmän kasvihuonekaasuja kuin aiheuttaa
niitä. Sahatavaraa käyttämällä rakentamiseen voidaan sitoa kasvihuonekaasuista pääasi-
assa hiilidioksidia ilmakehästä, mikäli metsänhoito on kestävä. (Puutuoteteollisuus 2019;
Hamadyk et al. 2020, s. 6; Kaufmann et al. 2018, s. 28)

Taulukossa 3 nähdään teräsbetonipilarin vaikutus ilmaston lämpenemiseen. Kyseessä on
Parman valmistama tuote, josta on tehty ympäristöseloste vuonna 2019. Kokonaishiili-inten-
siteetti on $442,51 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$. Teräsbetonipilari on hyvin raskas rakenne, joten osittain siitä
syystä ilmastomuutosvaikutus on suuri.

Taulukkoon 4 on koottu muutaman erilaisen Pohjoismaissa valmistetun valmisbetonin ympäristöselosteet. Taulukkoon pyrittiin hakemaan valmisbetonituotteita mahdollisimman laajalta skaalalta, ja eroavaisuudet ovatkin melko suuria. Vähiten ilmastoa lämmittävien valmisbetonien kasvihuonepäästöt ovat noin 109 kgCO₂e/m³, ja suurimmat päästöt ovat 374,44 kgCO₂e/m³. Valmisbetonien vertailuissa täytyy myös huomioida, mihin käyttötarkoituksiin betonia valmistetaan. Esimerkiksi pakkasenkestävyys, lujuus, raekoko ja notkeus saattavat vaikuttaa kasvihuonepäästöihin seosainesuhteiden lisäksi. Taulukoitujen ruotsalaisten ja norjalaisten valmisbetonien ympäristöselosteet löytyvät EPD-Norge -tietokannasta. Suomalaisten Ruduksen valmisbetonien ympäristöselosteet ovat Self Declaration -ympäristöselosteita, joten niitä ei löydy mistään julkisesta tietokannasta. Vertailun vuoksi esimerkiksi OneClick LCA -ohjelma tarjoaa tyypillisen suomalaisen C30/37-valmisbetonin hiili-intensiteetiksi 270,88 kgCO₂e/m³.

Taulukoissa 2, 3 ja 4 nähdään muutaman eri rakennusmateriaalin päästöintensiteetit tilavuutta kohden. Taulukkojen rakennusmateriaaleja ei voi tietenkään suoraviivaisesti vertailla keskenään, sillä eri materiaaleilla tehtyihin rakennusratkaisuihin kuluu eri määrät materiaaleja. Toisin sanoen esimerkiksi kantavaan pystyrakenteeseen kuluu eri määrä materiaalia kuutiometreissä, riippuen siitä, onko se teräsbetonia, betonia vai puuta. Lisäksi esimerkiksi betonin ollessa kyseessä pelkkä betoni ei riitä, vaan tarvitaan myös terästä.

kgCO ₂ e/m ³	A1	A2	A3	A1-A3	A4	C1	C2	C3	C4	D	Yht.
Yhteensä	-1289	18,51	615	-656	8,83	0,54	4,27	728	0	-218	-131,85
pl. Biogeeniset vaikutukset	54,34	18,51	-0,4	72,45	8,83	0,54	4,27	0	0	-218	-131,91
Biogeeniset vaikutukset	-1343	0	615	-728	0	0	0	728	0	0	0

Taulukko 2. *Kuivatun sahatavaran vaikutus ilmaston lämpenemiseen eli ilmastomuutosvaikutus taulukoituna kuutiometriä materiaalia kohden. (Puutuoteteollisuus 2019)*

kgCO ₂ e/m ³	A1	A2	A3	A1-A3	A4	C1	C2	C3	C4	D	Yht.
Yhteensä	395	10,3	1,68	407	0,001	9,72	12,3	3,89	10,8	-1,18	442,51

Taulukko 3. *Teräsbetonipilarin vaikutus ilmaston lämpenemiseen eli ilmastomuutosvaikutus taulukoituna kuutiometriä materiaalia kohden. (Parma 2019b)*

kgCO ₂ e/m ³	A1	A2	A3	A1-A3	A4	C1-C4	D	Yht.
B35M45. Skedsmo Betong	99,70	5,83	3,36	108,89	-	-	-	108,89
60 % vähäpäästöisempi betoni. Rudus.	-	-	-	109,00	-	-	-	109,00
40 % vähäpäästöisempi betoni. Rudus	-	-	-	158,00	-	-	-	158,00
Grön bjälklagsbetong C32/40. Skanska	-	-	-	175,00	9,85	-	-	184,85
Sweexp55 C30/37. Swerock Ab	234,00	7,27	5,05	246,32	5,85	-	-	252,17
C32/30, VCT 0,50, XC4, CEM I 42,5 N. Thomas Betong	347,38	13,72	0,89	361,99	12,45	-	-	374,44

Taulukko 4. *Eri valmisbetonien vaikutuksia ilmaston lämpenemiseen. Ilmastonmuutosvaikutus taulukoituna kuutiometriä materiaalia kohden. (Skedsmo Betong 2020; Skanska 2019; Swerock Ab 2020; Thomas Betong 2019)*

On tutkittu, että puurakenteiset välipohjat ovat noin puolet kevyempiä verrattuna tyypilliseen betoniseen laattavälipohjaan. Lisäksi tutkimuksessa huomattiin, että puurakenteiset asuinrakennukset ovat 35–50 % kevyempiä kuin tavanomaiset rakennukset. (Kaufmann et al. 2018) Hamadykin et al. (2020) mukaan puuvälipohjan kevytrakenteisuus avaa uusia mahdollisuuksia esimerkiksi olemassa olevien rakennusten päälle rakentamiseen tai rakennusten lisäsiipien tai muokkausten tekemiseen.

Kaufmann et al. (2018, s. 26) esittää, että puuta käytettäessä käyttövaiheen jälkeisten purkuskenaarioiden tulisi tukea puukomponenttien uudelleenkäyttöä. Lisäksi energiankulutus tulisi olla mahdollisimman vähäistä rakennuksen käyttövaiheessa ja rakennuksen huoltosyklin hyvin suunniteltu. Kaufmann et al. (2018) väittää myös, että puu on kestävämpi ja parempi ratkaisu ilmastonmuutokseen kuin muut materiaalit. Pasasen et al. (2011) tekemässä selvityksessä huomattiin, että mikäli tarkastellaan vain rakennuksen elinkaaren rakennusvaihetta, puurakenteisen kerrostalon päästöt olivat 29 % pienemmät kuin vastaavalla betonirakenteisella kerrostalolla. Crawfordin ja Cadorelin (2017) mukaan on elintärkeää etsiä ja löytää uusia vaihtoehtoja betonille ja teräkselle.

4. KASVIHUONEPÄÄSTÖJEN SIMULOINTI

Rakentamisen aiheuttamia kasvihuonepäästöjä simuloitiin tässä työssä OneClick LCA -ohjelman avulla. Ohjelmaan syötettiin kohdeyrityksen Etelä-Suomen yksikön keskiarvollisen asuinrakennuksen tiedot ja käytetyt rakennusmateriaalit. Tässä diplomityössä käsitellään rakennusmateriaalien vaikutusta kasvihuonepäästöihin, joten simulaatiossa keskityttiin erityisesti rakennushankkeen vaiheisiin A1–A5. Nämä vaiheet käsittävät rakennushankkeen tuotevaiheen ja rakentamisen aiheuttamat päästöt. Simulaation avulla arvioidaan niiden vaikutuksia rakennushankkeen kokonaispäästöihin.

4.1 Simulointi OneClick LCA -ohjelman avulla

OneClick LCA on Bionova Oy:n kehittämä ohjelmisto rakennushankkeiden elinkaariarviointiin, kasvihuonepäästölaskentaan sekä näiden optimointiin. OneClick LCA:ta käytetään melko laajasti ja se on mm. Norjan valtion virallinen kumppani. Yhdistyneen kuningaskunnan BRE (Building Research Establishment) eli organisaatio BREEAM:n takana käyttää kyseistä ohjelmaa. Suurista Suomessa toimivista rakennusliikkeistä mm. Skanska käyttää ohjelmaa globaalisti. Kohdeyrityksessä ohjelma on otettu käyttöön ja kaikkien uusien rakennushankkeiden hiilijalanjälki lasketaan ohjelmalla. Ohjelmassa voidaan käyttää päästölaskelmien tekemiseksi erilaisia menetelmiä, kuten LEED:n, BREEAM:n tai Suomen Ympäristöministeriön menetelmiä. Tässä diplomityössä käytettävä menetelmä pohjautuu Ympäristöministeriön (2019) vähähiilisuuden arviointimenetelmään. Diplomityössä mallinnuksiin käytettäväksi ohjelmaksi valittiin OneClick LCA sen monipuolisuuden, suuren markkina-aseman sekä kohdeyrityksen tarpeiden vuoksi.

Oleellista laskelmien kannalta on ohjelmaan sisältyvä kattava ja ajankohtainen päästötietokanta, johon sisältyvät mm. rakennusmateriaalit, energiankulutus ja taulukkoarvot, sekä niiden aiheuttamat päästöt tietyllä arviointijaksolla. OneClick LCA sisältää tällä hetkellä 64 000 materiaalin tai tuotteen ympäristöselostetta. (Bionova Oy 2020) OneClick LCA -ohjelmasta löytyy esimerkiksi yli sata terästuotetta eri valmistajilta ympäri maailmaa. Tuotteiden ympäristöarvoja pystyy tarkastelemaan ohjelmassa helposti ja vertailemaan verrannollisten tai korvaavien materiaalien ympäristöarvoja hankkeen vastaaviin. Ohjelmassa voidaan myös muokata, poistaa ja kopioida jo mallinnettuja materiaaleja hyvin helposti. Lisäksi ohjelmalla on mahdollista vertailla eri materiaalien tai rakenneratkaisujen vaikutuksia kohteen hiilidioksidipäästöihin. Ohjelma on myös yhteensopiva BIM-tietomallien kanssa.

Ohjelmaa käyttäessä kannattaa päättää yksityiskohtaisuuden taso. Ohjelma on suunniteltu käytettäväksi niin, että projektin suunnitteluvaiheessa tehdään yleensä karkea laskenta vähäpäästöisyyden ohjaamiseksi ja päästöjen selvittämiseksi. Projektin lopussa voidaan laskea tarkat eli toteutuneet päästöt. Ohjelmassa voidaan myös suoraan mallintaa ennalta tiedetyt tuotteet yksityiskohtaisesti, kuten tässä diplomityössä tehtiin. OneClick LCA:ssa arvioitavat rakennuksen osat ovat: 1. tontin täytöt ja rakenteet, 2. rakennuksen kantavat ja täydentävät rakenteet sekä 3. talotekniikan keskeiset osat.

Kun halutaan mallintaa rakennushanke, ohjelmaan luodaan ensin projekti, johon syötetään perustiedot, kuten bruttoala, käyttöikä sekä arviointijakso ja Ympäristöministeriön menetelmän vaatimat tiedot. Luodulle rakennukselle täytyy myös määrittää vuosittainen sähkönkulutus, polttoaineiden kulutus, lämmön kulutus, mahdollinen kaukokylmäkulutus ja ulkopuolelle toimitettu energia. Ohjelmisto indikoi mallinnuksen aiheuttamaa ilmaston lämpenemistä suurella $\text{kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$ eli kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia rakennettua neliometriä kohden vuodessa. Näiden perustietojen merkitseminen oikein vaikuttaa hyvin paljon lopputulosten oikeellisuuteen ja kasvihuonepäästömääriin (Rakennusteollisuus RT 2020).

Kun perustiedot on syötetty, voidaan mallintaa tuotteita tarkoituksenomaisesti alakohtiin. Materiaalinäkymässä materiaalit on eroteltu seuraavasti: 1. perustukset ja maanalaiset rakenteet, 2. pystyrakenteet ja julkisivu, 3. vaakarakenteet: pohjat, katot, palkit, 4. muut rakenteet ja materiaalit, 5. alue- ja piharakentaminen sekä 6. rakennuksen talotekniikka. Näihin alakohtiin mallinnetaan materiaaleja kirjoittamalla hakupalkkiin materiaalia kuvaava hakusana, ja etsimällä hakua vastaavista vaihtoehdoista oikea tai mahdollisimman lähelle osuva. Sen jälkeen syötetään määrä halutussa yksikkömuodossa (m^2 , m^3 , kg , ...). Tällöin ohjelma kertoo mallinnetun tuotteen kokonaisvaikutukset kaikista elinkaarivaiheista per materiaali muodossa CO_2e . Jokaiselle mallinnettavalle voi myös antaa omat muistiinpanot, sekä määrittää erikseen käyttöiän, hukkaprosentin ja määrittää rakennusosan tason (esimerkiksi runko: palkit, väliseinät, alapohjat, kiintokalusteet jne.). Rakennusosamäärittäminen helpottaa tulosten analysointia.

Mallintaminen voidaan tehdä myös niin, että suodatetaan materiaalin mukaan ja katsotaan alakohtaisesti ohjelman jäsenneiltyä tarjoamaa. Esimerkki: Valitaan suodattimeksi ”teräs ja muut materiaalit”, minkä jälkeen valitaan alavalikosta ”betonirauδοitus”, joita löytyy ohjelmasta 145 erilaista. Valitaan sopiva rakennusosa. Dataa voidaan tuoda myös esimerkiksi Excel-taulukosta, jolloin käytetään OneClickin tarjoamaa Excel-pohjaa. Datan tuominen tarkastetaan ja ohjelma kertoo, mikäli jossain rivissä on ongelmia.

Ohjelmaan ei erikseen syötetä työmaan aikaisia toimintoja kuten siivousta, mittauksia, torninosturin pystytystä, työkoneita ja niiden kuluttamaa energiaa, vaan niille on keskiarvallisesti laskettu Ympäristöministeriön (2019) taulukkoarvo. Rakennusjätteen ympäristövaikutuksia ei

ole huomioitu laskelmissa. Muotit, elementtiasennukset, ikkuna-asennukset ja muu Indeksitalon panosluetteloon kirjattu työ jätettiin huomioimatta. Laskentamenetelmänä käytetty Ympäristöministeriön arviointimenetelmä ei huomioi väliaikaisia rakenteita, muotteja, telineitä, suojuuksia eikä teknisiä laitteita (Ympäristöministeriö 2019, s. 18).

Jotta voidaan arvioida tulosten paikkansapitävyyttä, on syytä kiinnittää huomiota muutamaan seikkaan. Paikoitellen tietojen syöttö on hyvin hankalaa ja osaa rakennusmateriaaleista ei pysty kovin järkevästi syöttämään ohjelmaan. Mikäli jostakin tuotteesta ei ole olemassa ympäristöselostetta, mallintaja joutuu valitsemaan jonkun mahdollisimman lähelle osuvan tuotteen tai jättämään tuotteen kokonaan pois mallinnuksesta. Lähelle osuvan tuotteen ympäristöarvot eivät välttämättä ole samat kuin hankkeessa käytetyn tuotteen. Tämä korostuu sitä enemmän, mitä suurempi määrä tuotetta pitäisi olla suhteessa kokonaisuuteen. Jos tuote on kohtalaisen merkityksetön kokonaisuuden kannalta, voi olla viisainta jättää tuote mallintamatta.

4.2 Indeksitalo sekä sen perustiedot ja käytetyt arvot

Kohdeyritys on koonnut käytetyt rakennusmateriaalit ja resurssit yhteen sekä koostanut niistä teoreettisen keskiarvoisen asuinkerrostalohankkeen, jonka rakenteita ja ratkaisuja päivitetään säännöllisesti. Näiden tietojen avulla koostetaan eräänlainen indikaattorirakennus. Tämän indikaattorirakennuksen voidaan nähdä kuvastavan YIT Suomi Oyj:n rakentamaa keskivertorakennusta Etelä-Suomessa. Kuten sisäisesti kohdeyrityksessäkin, jatkossa myös tässä diplomityössä referoidaan tätä rakennusta ”Indeksitalona”.

Indeksitalo on teoreettinen rakennuksen malli, joka sisältää tiedon rakentamiseen kuluneista keskiarvoisista materiaaleista ja resursseista sekä määrät yhtä asuinrakennusta kohden. Tällainen keskiarvoinen rakennus on tyypillisesti 6-kerroksinen kerrostalo, jossa esimerkiksi julkisivut sisältävät prosentuaaliset määrät betonia, tiiltä ja muita julkisivumateriaaleja. Väli-pohjista suurin osa (80 %) on ontelolaattoja, ja loput (20 %) paikallavalua. Indeksitalossa on mukana pysäköintihalliin kuuluvat rakenteet. Indeksitalo valittiin mallinnettavaksi tässä diplomityössä, sillä kohdeyritys halusi mahdollisimman yleistettäviä tuloksia tutkimuksesta, ja toisaalta myös kiinnostavaa dataa laajalla skaalalla.

Tässä diplomityössä OneClick LCA -ohjelmaan mallinnettiin 500 Indeksitalon kustannuksiltaan suurinta määräriviä, jotka käsittivät 95,9 % hankkeen kokonaiskustannuksista. Nämä määrärivit ovat alun perin peräisin Quintet-laskentaohjelmasta ja ne sisältävät materiaaleja ja työtä. Määrärivit pyrittiin mallintamaan mahdollisimman hyvin vastaten alkuperäistä mate-

riaalia ja käyttötarkoitusta. Rajaus täytyi tehdä jollakin perusteella, sillä Indeksitalossa määräreijä on reilusti yli tuhat kappaletta. Määräriivit rajattiinkin viiteensataan, koska ilmaston lämpenemistä indikoiva tunnusluku ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$) ei käytännössä viimeisten 50 määrärivin mallintamisen aikana juurikaan enää kasvanut. Nämä kustannuksiltaan pienemmät määräriivit olivat myös volyymiltaan huomattavasti pienempiä, eivätkä enää juurikaan vaikuttaneet lopputulokseen, joten voitiin katsoa niiden olevan lähes merkityksettömiä, kun kontekstina on koko rakennus.

Näiden volyymiltaan suurimpien määrärivien lisäksi OneClick LCA -ohjelmaan syötettiin Indeksitalon perusarvot, kuten sähkönkulutus, alat, tilavuudet ja muut oleelliset tiedot, joita vaadittiin laskentaan. Indeksitalossa bruttoalaa on $4\,263\text{ m}^2$, ja asuntoalaa $2\,967\text{ m}^2$. Taulukossa 5 nähdään listattuna Indeksitalon perusarvot.

Bruttoala	4263 br m^2
Rakennettu tilavuus	13375 r m^3
Asuntojen ala	2967 as m^2
Asunnot	46 as
Rakennuksen pohja-ala	779 r m^2
Autopaikat (parkkihalli)	47 ap
Lämmitetty nettoala	3212 m 2
Kaukolämmön kulutus per annum	549,93 MWh
Verkkosähkön kulutus per annum	214,42 MWh

Taulukko 5. *Indeksitalon perusarvot.*

Yllä olevan taulukon 5 arvoissa on huomioitava, että kaukolämmön ja verkkosähkön kulutuksen ilmastoa lämmittävä vaikutus riippuu oleellisesti siitä, mitä energiamuotoa käytetään. Tässä projektissa on käytetty kaukolämmön kulutuksessa ohjelmistosta löytyvää kaukolämmön suomalaista keskiarvoa, jonka ilmastoa lämmittävä vaikutus on $0,071\text{ kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$. Vertailun vuoksi esimerkiksi Fortum Waste Solutions Oy:n Riihimäen laitoksen biokaukoläm-

mön ilmastoa lämmittävä vaikutus on 0,015 kgCO₂e/kWh ja Turku Energia Oy Ab:n kaukolämmön vastaava arvo on 0,357 kgCO₂e/kWh. Verkkosähkön kulutukselle on käytetty ohjelmiston vakioarvoa 0,048 kgCO₂e/kWh.

Indeksitaloon syötetyn valmisbetoniin käytetyn sementin sidosaineiden kierrätysprosentin arvoksi oletettiin 10 % ja teräksen kierrätysprosentin arvoksi 97 %. Arvot ovat kohdeyrityksen selvityksen mukaan keskiarvoja. Myös OneClick LCA -ohjelma ehdottaa samoja arvoja tyypilliselle Suomessa käytetylle valmisbetonille ja teräkselle.

Kohdeyrityksellä on kumppanina suuri betonialan toimija. Tämän yrityksen johtajan mukaan valmisbetonin valmistuksessa raaka-aineista betoniin tulee kierrätysmateriaaleja sideaineiden kautta. Betonin valmistuksessa käytetään lisäksi valukohteiden ja reseptiikan niin vaatiessa sideaineina masuunikuonaa sekä lentotuhkaa. Suomalaisista sementeistä esimerkiksi Finnsementin Oiva-sementissä on masuunikuonaa laatuinformaation perusteella 18 prosenttia. Finnsementti käyttää sementin valmistuksessa myös kierrätysmateriaaleja polttoaineena klinkkerin poltossa.

Betonielementtien juotokset ja muut valut -nimikkeeseen niputettiin yhteen Indeksitalon tuloksista joitakin pienempiä valuja noin 25 m³:n edestä ja arvioitiin muiden neliömetreissä annettujen valujen määriä mahdollisimman tarkasti. Lisäksi samassa nimikkeessä on mallinnettu yli tuhat juoksumetriä pysty- sekä vaakaelementtien juotoksia. Näiden kokonaismääräksi arvioitiin yhteensä 30 m³ ja ne mallinnettiin alkuperäiseen vaihtoehtoon tyypillisenä C30/37-betonina.

Mikäli jollekin listatulle rakennusmateriaalille tai -tuotteelle ei löytynyt tuotetta vastaavaa nimikettä ohjelmasta, suoritettiin mallintamisessa jokin seuraavista toimenpiteistä: 1) Etsittiin tietokannasta mahdollisimman lähelle vastaava tuote, ensisijaisesti suomalainen, mutta mielellään vähintään pohjoismainen ja mallinnettiin määrärivi sellaisena. 2) Käytettiin OneClick LCA:n tarjoamaa yleisarvoa kyseisille materiaaleille. 3) Käytettiin kyseessä olevaa rakennusmateriaalia vastaavaa tuotetta mallinnuksessa. 4) Käytettiin eri kokoista, mutta samaa materiaalia olevaa tuotetta ja muutettiin esimerkiksi paksuutta niin, että se vastasi alkuperäistä arvoa 5) Hajotettiin tuote osiin, ja mallinnettiin osat erikseen. 6) Jos määrärivi oli merkityksättömän pieni sitä ei mallinnettu ollenkaan, mikäli tuotetta ei löytynyt ohjelmasta ja sille ei löytynyt mitään järkevää vaihtoehtoa. Ohjelmassa on myös mahdollista lokalisoida tuotteet alkuperäisestä maasta kohdemaahan, jolloin ohjelma laskee tietyillä algoritmeilla tuotteen vastaamaan paremmin kohdemaan vakioita, kuten sähkönkulutusta tai ilmastovaikutuksia. Jos suomalaista tuotetta ei löytynyt, mallintamisessa lokalisoitiin kaikki määrärivit Suomeen.

Indeksitalon mallinnuksesta jätettiin pois muun muassa kodinkoneet, kuten jääkaapit, pakastimet, astianpesukoneet, induktiotasot ja uunit, koska niille ei löytynyt ohjelmasta mitään mallinnusmahdollisuutta. Lisäksi esimerkiksi saunan kiukaita tai kylpyhuone-elementtejä ei löytynyt ohjelmasta, eikä niitä siten voinut mallintaa. Tilanteessa, jossa mallinnettaville ei löytynyt mitään mielekästä mallinnustapaa, mallinnukset jätettiin pois. Lähes kaikki mallinnettavissa olevat vesikalusteet mallinnettiin ei-pohjoismaisilla, pääosin ranskalaisilla vaihtoehdoilla, sillä se oli ainoa mahdollinen tapa.

Mallinnuksen jälkeen suoritettiin virhetarkastelu, jossa arvioitiin, miten hyvin mallinnus onnistui kokonaisuudessaan. Eräänä mahdollisena jokseenkin virheellisenä mallinnuksena voidaan pitää rakennusmateriaalien virheellistä mallinnusta niiden vaatimaan tarkoitukseen eli ovatko kaikki mallinnetut tuotteet sopivia mallinnettuun käyttötarkoitukseensa käytännössä. Voidaan kyseenalaistaa, ovatko esimerkiksi pintabetonoinnit, tiilet tai kaatovalut mallinnettu oikein niin, että niiden mallinnukseen käytetyt rakennusmateriaalit ovat tarkoituksenomaisia. Suureksi osaksi mallinnukset kuitenkin pitävät paikkansa, ja voidaan todeta, että reilusti suurin osa rakennusmateriaaleista on tarkoituksenomaisesti ja mallinnettu hyvin lähelle todellista.

Peikon Deltabeam -liittopalkkien dimensiot ja massa suhteessa tilavuuteen eli rakennusmateriaalin tiheys saattavat olla virheellisesti laskettuja. Tämä vaikuttaa tietysti kasvihuonepäästöihin, joskin mallinnetut liittopalkit todettiin mielekkäästi mallinnetuiksi. Tutkimusta varten pyydettiin Peikko Groupilta kyseessä olevien eksaktien liittopalkkien yksityiskohtia, mutta niitä ei saatu.

Mallinnuksen päätteeksi arvioitiin, että tehdyissä OneClick LCA -ohjelman laskelmissa on jonkin verran virhemarginaalia niin ohjelman laskentatavan, kasvihuonepäästöjen kuin syötettyjen arvojenkin osalta. Osaa käytetyistä tuotteista ei löytynyt ohjelmasta, eikä niille löytynyt mitään vaihtoehtoisia tapoja tehdä mallinnusta. Joissakin tapauksissa täytyi tyytyä parhaaseen mahdolliseen vaihtoehtoon. Näiden vaihtoehtojen käyttäminen vaikutti jossakin määrin lopputulokseen.

4.3 Indeksitalon mallinnuksen tulokset

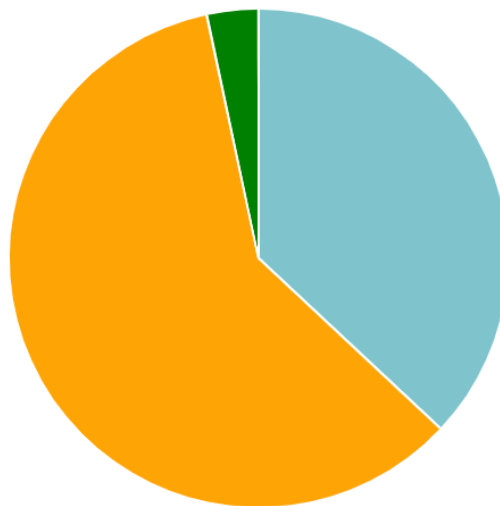
Tässä luvussa esitellään tuloksia, joita saatiin Indeksitalon mallinnuksessa. Työssä haluttiin selvittää, mitkä materiaalit vaikuttavat päästöihin eniten, joten vaikuttavuutta arvioitiin ensisijaisesti hiilidioksidiekvivalenteina. Työssä käytettiin Ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmää (versio 30.8.2019). Menetelmä sisältää hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen, ja niiden suuruudet nähdään taulukossa 6, elinkaaren vaiheisiin jaoteltuina.

Kuten taulukosta nähdään, hiilijalanjäljen summa on päästöjen summa ja hiilikädenjälki kiertäytksen ja uudelleenkäytön hyötyjen sekä biogeenisen hiilivaraston summa. Ympäristöministeriön menetelmässä elinkaaren moduulia D ei lasketa mukaan, jolloin moduulissa D muodostuvan hiilikädenjäljen vaikutusta ei lasketa rakennushankkeen päästöjä vähentäväksi.

Indeksitalon kokonaisvaikutus ilmaston lämpenemiseen on $20,15 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{/a}$. Kokonaisuudessaan tämä tarkoittaa siis $4\,294\,000 \text{ kgCO}_2\text{e}$ kasvihuonepäästöjä rakennuksen elinkaaren aikana. Tulokset on esitetty yksinkertaistetusti elinkaaren vaiheittain jaettuna kuvassa 11 ja esitetty taulukossa 6. Näistä voidaan tulkita, että ylivoimaisesti eniten elinkaaren aikana ilmastoa lämmittää rakennuksen käyttövaihe $59,7$ prosentilla, $12,02 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{/a}$. Rakennusvaihe taas aiheuttaa $37,0$ % kasvihuonepäästöistä, $7,45 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{/a}$. Päästövaikutukset käytön jälkeen ovat $3,3$ % kokonaismäärästä, $0,67 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{/a}$. Myöhemmin tässä luvussa perehdytään avaamaan ja analysoimaan näitä arvoja.

Ilmaston lämpeneminen, $\text{kg CO}_2\text{e/m}^2\text{/a}$ - Elinkaaren vaiheet

- A1-A5 Ennen käyttöä (A1-5) - 37.0%
- B3-B4,B6 Käyttö (B3-4, B6) - 59.7%
- C Käytön jälkeen (C) - 3.3%



Kuva 11. Indeksitalon kasvihuonepäästöjen jakautuminen elinkaaren vaiheiden mukaan.

	Tulosluokka	Ilmaston lämpeneminen, kg CO ₂ e/m ² /a		Suhteessa ko- konaissum- maan, %
A1-A3	Valmistus	6,49		32,2 %
A4	Kuljetus työmaalle (taulukkoarvo)	0,2		1,0 %
A5	Rakennustuotteiden työmaahävikki	0,21		1,0 %
A5	Uudisrakennustyömaan toiminnot (taulukkoarvo)	0,55		2,7 %
A1-A5	Päästövaikutukset ennen käyttöä (A1-5)	7,45		37,0 %
B3-4	Korjausten energiankulutus (taulukkoarvo)	0,04		0,2 %
B4	Rakennusosien vaihto	0,38		1,9 %
B6	Energian käyttö	11,6		57,6 %
B3-B4,B6	Päästövaikutukset käytön aikana (B3-4, B6)	12,02		59,7 %
C1	Purkutyömaan toiminnot (taulukkoarvo)	0,16		0,8 %
C2	Kuljetus jatkokäsittelyyn (taulukkoarvo)	0,2		1,0 %
C3-4	Jätteenkäsittely ja loppusijoitus (taulukkoarvo)	0,31		1,5 %
C	Päästövaikutukset käytön jälkeen (moduuli C)	0,67		3,3 %
D	Uudelleenkäytöstä ja kierrätyksestä saatavat hyödyt (D)		-3,67	-18,2 %
bio-CO ₂	Hiilivarasto, biogeeninen		-0,56	-2,8 %
A-C	Hiilijalanjälki (elinkaaren moduulien A-C summa)	20,15		
A-D	Hiilikädenjälki (elinkaaren moduulien A-D summa)		-4,24	-21,0 %
	Yhteensä	20,15		

Taulukko 6. *Indeksitalon aiheuttama ilmaston lämpeneminen elinkaaren vaiheiden mukaan, moduuleittain. Moduulien A-C summat lihavoitu selkeyden vuoksi.*

Taulukosta 6 voidaan huomata, että suurin yksittäinen kasvihuonepäästöjen aiheuttaja on rakennuksen energian käyttö 57,6 prosentilla kokonaissummasta eli 12,02 kgCO₂e/m²/a. Seuraavaksi suurin päästöjen aiheuttaja on materiaalien valmistus 32,2 prosentilla kokonaissummasta, joka aiheuttaa 6,49 kgCO₂e/m²/a. Kolmanneksi suurimmat päästöt, 3,3 prosenttia

eli 0,67 kgCO₂e/m²/a, aiheutuvat käytön jälkeen. Kiinnostava huomio on, että uudisrakennustyömaan toiminnoista sekä rakennustuotteiden hävikistä aiheutuu päästöjä yhteensä 3,7 prosenttia kokonaissummasta eli 0,76 kgCO₂e/m²/a. Kokonaisuutena hiilikädenjälki on -21,0 % kokonaissummasta, -4,24 kgCO₂e/m²/a.

Röckin et al. (2020) tutkimuksessa keskiarvoiset materiaaliperäiset kasvihuonepäästöt olivat 6,7 kgCO₂e/m²/a uusille standardinmukaisille rakennuksille ja 11,2 kgCO₂e/m²/a uusille kehittyneille rakennuksille. Indeksitalon mallinnuksen materiaaliperäisten päästöjen ollessa 7,45 kgCO₂e/m²/a mallinnusta voidaan pitää kohtalaisen onnistuneena. Lisäksi Ruuskan & Häkkisen (2015) tutkimuksen mukaan 30 % rakennuksen kasvihuonepäästöistä johtuu rakennusmateriaalien valmistamisesta sekä rakentamisesta ja 63 % johtuu energian kulutuksesta. Mallinnus osuu kohtuullisen lähelle myös näitä arvoja.

4.4 Kasvihuonepäästöihin eniten vaikuttavat tuotteet ja materiaalit

Tässä työssä keskitytään rakennusmateriaaleihin, joten erityisen kiinnostavia kohteita ovat volyymiltaan suurimmat tuoteryhmät ja niiden aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt. Kohdeyrityksen suurin yksittäinen tuoteryhmä on betonielementtituotteet. Vuonna 2019 kohdeyrityksen koko Suomen asuintalorakentamisen yksikön seitsemästä ostoiltaan suurimmasta toimittajasta neljä työskenteli betonialalla.

Indeksitalon ilmastoa lämmittävää vaikutusta voidaan tarkastella OneClick LCA -ohjelmasta tuotujen kuvien, diagrammien ja taulukoiden avulla. Seuraavissa kuvissa ja taulukoissa on ensin esitetty kaikki resurssityypit ja niiden ilmastoa lämmittävä vaikutus. Lisäksi on esitetty muutamia erilaisia vaihtoehtoja, joissa tiettyjä resursseja on suodatettu pois mahdollisimman kokonaisvaltaisen tulosanalyysin saamiseksi.

Taulukossa 7 on OneClick LCA -ohjelmasta tuotu data Indeksitalon 20 eniten ilmaston lämpenemiseen vaikuttavista rakennusosista. Taulukossa vaikutukset on ilmoitettu kehdosta portille eli vaiheille A1–A3, rakennusmateriaalien raaka-aineiden hankinnasta valmistukseen. Toisin sanoen kuljetusta tai työmaan toimintoja ei ole mukana ja ilmoitetut arvot käsittävät pelkät materiaaleista aiheutuvat kustannukset. Vaiheet A1–A3 aiheuttavat kasvihuonepäästöjä yhteensä 1 383 tonnia CO₂e. Se on yhteensä 32,2 % koko rakennushankkeen kokonaispäästöistä.

	Resurssi	Kommentti	Vaikutukset vaiheet A1-A3	
1.	Valmisbetoni, normaali lujuus, yleinen	C30/37, 10% kierrätetty	339 tonnia CO ₂ e	24,50 %
2.	Ontelolaatta	Parma P37, P27, P50, EP27	277 tonnia CO ₂ e	20,00 %
3.	Betonielementtiseinä (eristämätön), yleinen	C40/50, 0% kierrätetty, 400 kg/m ³ , sis. raudituksen	173 tonnia CO ₂ e	12,50 %
4.	Sähköjärjestelmä, kaapelointi ja keskus, asuinrakennukselle, per bruttoala	Perustuu OneClickin tavanomaiseen ympäristöprofiiliin	65 tonnia CO ₂ e	4,70 %
5.	Betonirauditus, yleinen	97 % kierrätetty	47 tonnia CO ₂ e	3,30 %
6.	Teräsbetonipaalu 300x300 mm	2500 kg / m ³	36 tonnia CO ₂ e	2,60 %
7.	Tiili	226x104x60, 226x85x60 mm, NF rei'illä & kiinteä, RF	30 tonnia CO ₂ e	2,10 %
8.	Teräs, Deltapalkki	Peikko Deltabeam	22 tonnia CO ₂ e	1,60 %
9.	Alumiinirunkoiset ikkunat ja ikkunaseinä	Ikkunat, kolminkertaisella lasilla, saksalainen tuote	22 tonnia CO ₂ e	1,60 %
10.	Lämmönjakelujärjestelmä (vesikiertoinen patterilämmitys) asuinrakennukselle, per bruttoala	Perustuu OneClickin tavanomaiseen ympäristöprofiiliin	23 tonnia CO ₂ e	1,60 %
11.	Pintabetonoinnit (plaanot)	weber Floor 130 Core, 10...100 mm,	21 tonnia CO ₂ e	1,50 %
12.	Lattiatasoite	weber vetonit 120 & vetonit 140, 34 kg/m ²	20 tonnia CO ₂ e	1,40 %
13.	Ilmanvaihtojärjestelmä asuinrakennukselle, per bruttoala	Perustuu OneClickin tavanomaiseen ympäristöprofiiliin	20 tonnia CO ₂ e	1,40 %
14.	Massiivipuulattia/parketti	22-450 x 44-7000 x 8-35 mm, 11.71 kg/m ²	19 tonnia CO ₂ e	1,40 %
15.	Muurauslaasti	weber Murmortel M5	18 tonnia CO ₂ e	1,30 %
16.	Hissi, kapasiteetti 1600 kg, 5 kerrosta	MonoSpace® 500 DX (KONE)	17 tonnia CO ₂ e	1,20 %
17.	Puuovi, per m ²	809x2053 mm, 42x92 mm ranka, 52 mm lehti	14 tonnia CO ₂ e	1,00 %
18.	Eriste, EPS 100	EUMEPS, 0.035 W/mK, 18-22 kg/m ³ (100 kPa)	11 tonnia CO ₂ e	0,80 %
19.	Kipsilevy	13 mm, 9.26 kg/m ² , 740 kg/m ³ , KS BA13 KNAUF	11 tonnia CO ₂ e	0,80 %
20.	Kevytsoraharkko (LECA), yleinen	650 kg/m ³ , 18 kg/block, 0.5x0.3x0.185 mm	8,3 tonnia CO ₂ e	0,60 %
	Loput materiaalit		195 tonnia CO ₂ e	14,10 %
	Yhteensä		1383 tonnia CO ₂ e	100,0 %

Taulukko 7. Indeksitalon 20 eniten ilmaston lämpenemiseen vaikuttavaa rakennusosaa (absoluuttiset kasvihuonepäästöt CO₂e). Vaikutukset kehdestä portille (A1–A3).

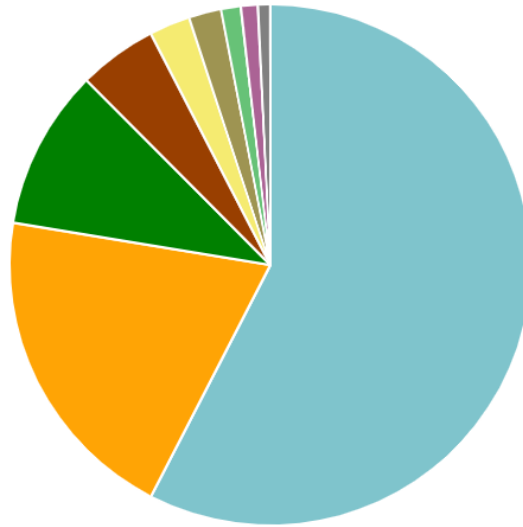
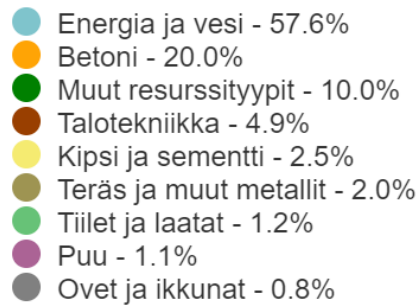
Taulukosta 7 huomataan nopeasti, että Indeksitalossa ilmaston lämpenemiseen eniten vaikuttava materiaali on yksiselitteisesti betoni. Pelkästään kolme vaikuttavinta rakennusosaa eli valmisbetoni, ontelolaatat ja betonielementtiseinät käsittävät 57,0 % kasvihuonepäästöistä vaiheiden A1–A3 aikana. Täytyy kuitenkin huomioida, että ontelolaatat ja betonielementtiseinät sisältävät myös terästä. Näiden kolmen vaikuttavimman tuotteen lisäksi 20 vaikuttavimman tuotteen joukossa on muitakin betonituotteita, kuten teräsbetonipaalut ja pinta-betonointien materiaalit. Lisäksi betonirauδοitus vaikuttaa rakennusosista viidenneksi eniten ilmaston lämpenemiseen.

Betonituotteilla on hyvin korkea hiili-intensiteetti muihin artikkeleihin verrattuna. Osittain tämä johtuu siitä, että ohjelmassa haluttiin käyttää keskiarvollista 10 % kierrätettyä klinkkeriä sisältävää tyypillistä suomalaista valmisbetonia. Lisäksi ei ollut eksaktia tietoa siitä, minkälaista betonia työmaalla todellisuudessa käytetään. Joka tapauksessa voidaan tehdä johtopäätös, että materiaalina betoni aiheuttaa suuren osan rakennuksen materiaalipohjaisista päästöistä. Vaikka valmisbetoni olisi mallinnettu esimerkiksi 20 % kierrätettyä klinkkeriä sisältävänä, olisi se silti aiheuttanut hyvin suuret kasvihuonepäästöt.

Tarkastellessa Indeksitalon resurssityyppejä kuvasta 12 huomataan, että energiasta ja vedestä aiheutuvat kaikkein suurimmat hiilidioksidipäästöt: 57,6 % eli 11,60 kgCO₂e/m²/a. Nämä päästöt aiheutuvat käyttövaiheen aikana, sillä esimerkiksi työmaavaiheen aikana kulutettu energia sisältyy muihin resurssityyppeihin. Muut resurssityypit sisältävät Ympäristöministeriön taulukkoarvoja elinkaaren vaiheille A4–C4. Näitä ovat kuljetus työmaalle (A4), uudisrakennustyömaan toiminnot (A5), korjausten energiankulutus (B3–4), purkutyömaan toiminnot (C1), kuljetus jatkokäsittelyyn (C2), sekä jätteenkäsittely ja loppusijoitus (C3–4). Näistä taulukkoarvoista aiheutuu kasvihuonepäästöjä 1,62 kgCO₂e/m²/a. Lisäksi muut resurssityypit sisältävät erikseen mainitsemattomat materiaalit, kuten lasivillan, muovimateriaalit, bitumin, maalit ja pihan asfaltin, jotka yhteensä aiheuttavat 0,39 kgCO₂e/m²/a. Muista resurssityypeistä materiaalit ja taulukkoarvot yhteenlaskettuna aiheutuu päästöjä 2,01 kgCO₂e/m²/a.

Ilmaston lämpeneminen, kg CO₂e/m²/a - Resurssityypit

Napsauta kaavion osiota nähdäksesi sen yksityiskohdat



Kuva 12. Indeksitalon kasvihuonepäästöjen jakautuminen resurssityyppien mukaan.

Taulukossa 8 nähdään kuvan 12 tapaan ilmaston lämpeneminen resurssityypeittäin, mutta taulukoituna. Kyseessä olevan rakennuksen hiilidioksidiekvivalenttiarvoja tarkastellessa huomataan, että Indeksitalon elinkaaren aikana suurin osa (57,6 %) ilmaston lämpenemisestä aiheutuu energiasta ja vedestä, eli päästöt muodostuvat rakennuksen käytön aikana. Seuraavaksi suurin ilmaston lämmittäjä on betoni 20,0 prosentilla, ja se on samalla materiaaleista suurin päästöjen aiheuttaja. Muut resurssityypit ovat kolmanneksi suurin ilmaston lämmittäjä, ja talotekniikka neljäs, 4,9 % kokonaismäärästä.

Kategoria	Ilmaston lämpeneminen, kg CO ₂ e/m ² /a
Energia ja vesi	11,60
Betoni	4,03
Muut resurssityypit	2,01
Talotekniikka	0,98
Kipsi ja sementti	0,51
Teräs ja muut metallit	0,41
Tiilet ja laatat	0,24
Puu	0,22
Ovet ja ikkunat	0,15

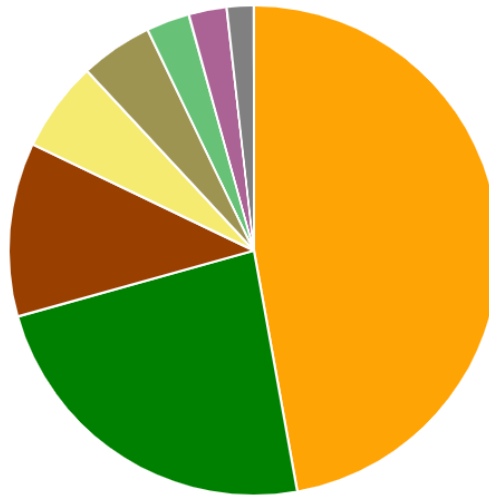
Taulukko 8. *Ilmaston lämpeneminen resurssityypeittäin, koko elinkaaren ajalta.*

Kuvassa 13 esitetään tulokset koko elinkaaren ajalta, kun siitä on jätetty pois energia ja vesi sekä kaukolämmön, veden ja sähkön aiheuttamat kasvihuonepäästöt. Tässä määrässä ovat siis mukana rakennusmateriaalit ja Ympäristöministeriön (2019) vähähiilisen rakentamisen menetelmien asettamat taulukkoarvot. Absoluuttiset arvot ovat samat kuin taulukossa 8 pois lukien energia ja vesi, joita ei oteta huomioon. Tällä tavalla tuloksia tarkastellessa huomataan, että betonilla on ylivoimaisesti suurin hiilidioksidiekvivalentti, 47,2 % tästä määrästä. Seuraavaksi suurin tekijä ovat muut resurssityypit (23,5 %) ja kolmanneksi suurin tekijä on talotekniikka (11,5 %). Huomataan siis, että betonista johtuvat kasvihuonepäästöt ovat 8-kertaiset verrattuna seuraavaksi suurimpaan yksittäiseen materiaaliin eli kipsiin ja sementtiin (5,9 %). Teräkseen ja muihin metalleihin (4,8 %) verrattuna betonin aiheuttamat kasvihuonepäästöt ovat lähes 10-kertaiset.

Ilmaston lämpeneminen, kg CO₂e/m²/a - Resurssityypit

Napsauta kaavion osiota nähdäksesi sen yksityiskohdat

- Energia ja vesi - 0.0%
- Betoni - 47.2%
- Muut resurssityypit - 23.5%
- Talotekniikka - 11.5%
- Kipsi ja sementti - 5.9%
- Teräs ja muut metallit - 4.8%
- Tiilet ja laatat - 2.9%
- Puu - 2.5%
- Ovet ja ikkunat - 1.8%



Kuva 13. Indeksitalon kasvihuonepäästöjen jakautuminen resurssityyppien mukaan. Resurssityyppien suhteet nähtävillä niin, että energia ja vesi on jätetty huomioimatta.

5. KASVIHUONEPÄÄSTÖJEN VERTAILU

Tässä luvussa vertaillaan teoreettisella tasolla rakennushankkeen materiaaliperäisiä kasvihuonepäästöjä Indeksitalon sekä vaihtoehtoisten skenaarioiden välillä. Lisäksi erilaisia skenaarioita verrataan keskenään ja selvitetään, voivatko kasvihuonepäästöt olennaisesti vähentyä vaihtamalla yhden komponentin tai volyymiltaan suuren rakennusmateriaalin ympäristöystävällisemmäksi.

5.1 Vaihtoehtojen mallinnus

Tässä luvussa selvitetään teoreettisesti, kuinka paljon erilaisten välipohjaratkaisujen tekeminen ja ympäristöystävällisempien betonimateriaalien käyttö vaikuttaa rakennushankkeen kokonaiskasvihuonepäästöihin. Luvussa tutkitaan, miten ontelolaatoista rakennetun välipohjan vaihtaminen erilaisiin paikallavalulaaattoihin vaikuttaa kasvihuonepäästöihin. Luvussa selvitetään vähäpäästöisemmän ontelolaatan kasvihuonepäästöjen vertautumista tavanomaiseen ontelolaattaan. Teoreettisella tasolla lasketaan myös, miten kasvihuonepäästöihin voidaan vaikuttaa, jos teräsbetoniset runkorakenteet vaihdetaan puurakenteisiin.

Alkuperäisen Indeksitalon OneClick LCA -mallinnuksen lisäksi ohjelmaan mallinnettiin vaihtoehtoisia suunnitelmia. Kuten luvussa 4 todettiin, Indeksitalossa paikallavalettujen laattojen osuus välipohjista on 20 %, jolloin ontelolaattavälipohjia on 80 % rakennuksesta. Jotta voitiin tarkastella eri skenaarioiden vaikutusta päästöihin ja vertailla niitä, muutamia keskeisiä rakennusmateriaaleja vaihdettiin seuraavasti: vaihtoehdossa ”Paikallavaluvälipohja” välipohjien ontelolaatat vaihdettiin paikallavalulaaattoihin, jolla simuloidaan sitä, että koko välipohja olisi tehty paikallavaluna. Lisäksi vaihtoehdossa ”Ontelolaattavälipohja” tehtiin päinvastoin, jolloin kaikki paikallavaluvälipohjat vaihdettiin ontelolaattaisiin.

Työssä mallinnettiin erilaisia ympäristöystävällisiä materiaalivalintoja välipohjille, vaakarakenteille, perustuksille sekä pystyrakenteille. Näitä mallinnettiin joko 40 % tai 60 % vähäpäästöisemmällä betonilla riippuen kyseessä olevasta skenaariosta. Pystyrakenteista väliseinäelementtejä ei voitu mallintaa yhtä tarkasti kuin muita rakenteita, sillä väliseinäelementeille ei löytynyt tuotekohtaisia ympäristöselosteita. Väliseinäelementit mallinnettiin 40 % kierätettyä klinkkeriä sisältävillä elementeillä, kun taas ulkoseinäelementit ja muut pystyrakenteet voitiin mallintaa samalla tavoin kuin muutkin rakenteet. Tässä diplomityössä vähäpäästöisemmällä betonilla tarkoitetaan betonia, jossa sementissä on käytetty vaihtoehtoisia ympäristöystävällisiä sidosaineita, jolloin valmistus on vähäpäästöisempää.

Ympäristöystävällistä valmisbetonia Suomessa valmistaa ainakin Rudus, jonka tuotteita käytettiin vaihtoehtoisten paikallavaluvälipohjaisten skenaarioiden mallintamisessa. Ympäristöystävällisemmän valmisbetonin klinkkerissä pikasementtiä on korvattu vaihtoehtoisilla sidosaineilla. Tuotteet todettiin sopiviksi, mielekkäiksi ja ennen kaikkea käyttökelpoisiksi vaihtoehtoisiksi tavanomaiselle betonille. Mallinnetuissa vaihtoehtoisissa käytettiin seuraavia tuotteita: Ensimmäisenä vaihtoehtona käytettiin valmistajan mukaan 40 % vähäpäästöisempää betonia, jonka hiilidioksidiekvivalentti on 158 kgCO₂e/m³. Toisena vaihtoehtona käytettiin 60 % vähäpäästöisempää betonia. Hiilidioksidiekvivalentti tälle betonille on 109 kgCO₂e/m³.

Mallinnus suoritettiin mallintamalla OneClick LCA -ohjelmassa vaihtoehdot, jotka osuvat mahdollisimman lähelle näitä betonilaatuja. Mallinnuksessa käytettiin norjalaisia valmisbetoneja, joiden hiiliekvivalentit olivat 160,0 kg kgCO₂e/m³ sekä 108,9 kgCO₂e/m³ ja jotka lokalisoiitiin Suomeen. Näin ollen näiden vaihtoehtojen voidaan arvioida osuneen hyvin lähelle haettua ja poikkeamien olevan verrattain pieniä. Tyypillisen suomalaisen valmisbetonin (jota tässä diplomityössä käytettiin mallinnuksessa) hiili-intensiteetti on 270,88 kgCO₂e/m³. OneClickin EPD-haku tuntee Euroopasta myös alankomaalaisen Van Nieuwpoortin valmisbetonin, jonka hiili-intensiteetti on vain 84,72 kgCO₂e/m³.

Mallinnetuissa vaihtoehtoisissa termeillä tarkoitetaan seuraavia asioita: Vaihtoehdossa "välipohja" vaihdettiin kaikki välipohjissa käytetty betoni ympäristöystävällisempään betoniin. Vaihtoehdossa "vaakarakenteet" kaikki vaakarakenteiden betoni (pl. P50-ontelolaatat, sis. välipohjat) sekä pintabetonoinnit on vaihdettu ympäristöystävällisempään betoniin. Vaihtoehdossa "vaakarakenteet ja perustukset" edellisen vaihtoehdon muutosten lisäksi perustusten betonoinnit on vaihdettu ympäristöystävällisempään betoniin. Käytännössä tässä vaihtoehdossa on mukana vaakarakenteiden lisäksi perustusten anturatäytöt, parkkihallin maanvarainen laatta sekä sen tasauskerros ja kaksi porraskallistusvalua. Vaihtoehdossa "pystyrakenteet" kaikki pystyrakenteet on vaihdettu ympäristöystävällisempään betoniin. Lisäksi mallinnettiin pelkästään betonirakenteista koostuva ympäristöystävällisin mahdollinen kombinaatio ("vaaka-, pystyrakenteet ja perustukset"), jossa on käytetty 60 % vähäpäästöisempää betonia kaikissa vaaka- ja pystyrakenteissa sekä perustuksissa, pois lukien osa betonielementtiseinistä, joita ei voitu mallintaa kuin 40 % kierrätettyjä seosaineita sisältävällä betonilla.

Yksi vaihtoehtoista on mallinnettu muuten samalla tavalla kuin alkuperäinen Indeksitalon mallinnus, mutta Peikko Groupin Deltabeam-liittopalkki on korvattu saman yrityksen ympäristöystävällisellä Deltabeam Green -vaihtoehdolla. Tällä mallinnuksella haluttiin vertailla, miten yhden tuotteen korvaaminen voisi vaikuttaa ympäristöarvoihin. Huomattavaa tässä mallinnuksessa on se, että liittopalkkeista suurin osa on parkkihallissa, noin 110 jm, kun talon puolella liittopalkkeja on vain 12 jm. Viimeiseksi mallinnettiin kaikkein ympäristöystävällisin mahdollinen vaihtoehto, jossa edellä mainitut vaaka- ja pystyrakenteet sekä perustukset on

korvattu 60 % vähäpäästöisemmällä betonilla (pl. elementtiseinät, jotka mallinnettiin 40 % kierrätettyä klinkkeriä sisältävällä betonilla), minkä lisäksi liittopalkit ovat Deltabeam Green -palkkeja.

Toiseksi viimeisenä vaihtoehtona luotiin myös CLT-rakenteinen vaihtoehto OneClickin kärkeän laskennan Carbon Designer -työkalulla. Vaihtoehdossa korvattiin kaikki betoniset rungon vaakarakenteet, pintabetonoinnit, kantavat pystyrakenteet ja parvekkeet puurakenteisilla ratkaisuilla. Betonisista rakenteista jäljelle jäivät parkkihallin P50-ontelolaatat, maanvarainen laatta ja EP27-ontelolaatat, perustukset, parvekkeet ja porraskuilun rakenteet CLT-runkorakenteilla. Talotekniikka, hissi, perustukset, VSS-rakenteet, pintarakenteet, kalusteet ja julkisivurappaukset säilytettiin samanlaisena kuin alkuperäisessä Indeksitalon mallinnuksessa.

Viimeisimpinä vaihtoehtoina pyrittiin mallintamaan ympäristöystävällisempiä ontelolaattavälipohjia. Tavanomaista ontelolaattaista välipohjaa verrattiin ilmastonmuutosvaikutukseltaan pienempiin vaihtoehtoihin vaihtamalla P37-, P27- ja P50-ontelolaatat vähäpäästöisemmiksi. Ensimmäisessä näistä skenaarioista mallinnettiin volyymiltaan suurimmat P37-laatat ja toisessa P37-laattojen lisäksi P27-laatat. Kolmanneksi mallinnettiin vielä P50-laatat, jotta nähtiin, miten paljon parkkihallillisissa kohteissa voidaan vaikuttaa kasvihuonepäästöihin. Näissä ontelolaatoissa päästöjen vähenemän oletettiin olevan noin 40 % verrattuna tavanomaiseen ontelolaattaan.

5.2 Ontelolaattavälipohjan ja paikallavaluvälipohjan mallinnus

Mallinnuksen perusteella suurin yksittäinen Indeksitaloon vaikuttava materiaali on ontelolaatta. Parman valmistama ontelolaatta P37 on neliömassaltaan 485 kg/m² ja 370 mm paksu. Näitä ontelolaattoja on olemassa ainakin yhdeksää varianttia 180 mm:n paksuisesta 500 millimetriin asti sekä valmiiksi eristettyjä ontelolaattoja. Indeksitalossa on käytetty ontelolaattoja P27, P37 ja P50 sekä perustuksissa valmiiksi eristettyjä EP37-laattoja. Parman tekemästä EPD-ympäristöselosteesta selviää ontelolaattojen omapainot ja esimerkiksi muuntokertoimet, joilla tulokset on kerrottava, mikäli käytetään muita ontelolaattoja kuin P37:ää. (Parma 2019a)

Indeksitalossa hallitsevaa ontelolaattavälipohjaa vertailtiin paikallavaluvälipohjaan OneClick LCA -ohjelmiston avulla. Kohdeyrityksen hankintajohtajan selvityksen mukaan Parman P37-ontelolaattaan kestävyys verrattavissa olevan paikallavaluholvin paksuus on joko 260 tai 280 mm, ja kyseiset paksuudet jakautuvat tasaisesti. Tällöin paikallavaluholvin terästen massan suhde laatan alaan liikkui välillä 15...20 kg/m².

Ohjelmistoon mallinnetussa Indeksitalossa korvattiin tässä tutkimuksessa kaikki P37-ontelolaatat paikallavalulaatoilla niin, että paikallavalulaatan paksuus on 270 mm ja paikallavalulaatan terästen massa neliometriä laattaa kohden on 17,5 kg/m². Lisäksi ohuempiin P27-ontelolaattoihin verratessa käytettiin Parman muuntokertoimia paikallavalulaattojen paksuuksien ja teräsmassojen kanssa, jotta saatiin todenmukaiset verrannaisarviot. EP27- ja P50-ontelolaattoja ei vertailtu, sillä P50-ontelolaattoja käytetään vain parkkihallin rakentamiseen ja EP27-ontelolaattoja alapohjaan. EP27-ontelolaatoissa tulisi huomioida lisäksi eristeet. Taulukossa 9 on esitetty P37- ja P27-ontelolaatat, niiden verrannaispaikallavalulaatat sekä ominaisuudet.

	Paksuus	Laatan omapaino	Muuntokerroin	Vastaavan PV-laatan paksuus	Neliömassa
	mm	kg/m ²		mm	kg/m ²
P27	270	360	0,74	200	13
P37	370	485	1	270	17,5

Taulukko 9. *P27- ja P37-ontelolaattoja vastaavat paikallavalulaatat ja niiden mallintamiseen käytetyt oletusarvot.*

Indeksitalossa paikallavalulaatta- ja ontelolaattavälipohjien suhde on 20:80. Kun halutaan mallintaa kokonaan välipohjaltaan ontelolaattainen tai paikallavalupohjainen rakennus, näiden arvot täytyy laskea erikseen tietyllä muuntokertoimella, jotta päästään realistiseen tulokseen. Alla olevassa taulukossa 10 on esitetty pinta-ala-arvot, joilla mallinnus tehtiin. Huomiota on, että rauditusmateriaalit, saumaus ja työ sekä muut näihin artikkeleihin liittyvät kustannukset mallinnettiin myös vastaavalla kertoimella, osittain myös luvun 6 kustannusvertailun vuoksi.

Tuote	Vaihtoehto		
P37-ontelolaatat	Alkuperäinen	2164,3	m ²
P27-ontelolaatat	Alkuperäinen	539,4	m ²
Paikallavalulaatat	Alkuperäinen	541,075	m ²
Pelkät pv-laatat P37 osalta	Paikallavaluvälipohja	2705,375	m ²
Rauditusmateriaalit, 17,5 kg/m ²	Paikallavaluvälipohja	47344,06	kg
Pelkät pv-laatat P27 osalta	Paikallavaluvälipohja	674,25	m ²
Rauditusmateriaalit, 13 kg/m ²	Paikallavaluvälipohja	8765,25	kg
P37-ontelolaatat	Ontelolaattavälipohja	2705,375	m ²
P27-ontelolaatat	Ontelolaattavälipohja	674,25	m ²

Taulukko 10. *Alkuperäisen Indeksitalon mallinnetut ontelo- ja paikallavalulaatat, sekä vaihtoehtojen mallinnusarvot.*

Kun kaikki ontelolaatat korvataan paikallavalulaatoilla, täytyy paikallavalulaattojen rauditukseen laskujen mukaan käyttää 71 744,4 kg terästä. Paikallavalulaattoihin käytetty teräs mallinnettiin 97 % kierrätettynä samalla tavalla kuin Indeksitalon mallinnuksessa. Seuraavassa alaluvussa käsitellään erilaisia skenaarioita.

5.3 Mallinnetut skenaariot ja analyysi

Tässä luvussa vertaillaan erilaisilla materiaaliratkaisuilla mallinnettujen skenaarioiden vaikutusta kasvihuonepäästöihin ja analysoidaan, mitkä tekijät päästöihin vaikuttavat. Luvussa selvitetään, voiko kasvihuonepäästöjä merkittävästi vähentää vaihtamalla tiettyjä runkorakennemateriaaleja ympäristöystävällisempään. Lisäksi luvussa pohditaan mallinnusten oikeellisuutta ja vastaavuutta alan kirjallisuuden tutkimuksiin.

On tarkoituksenmukaista verrata ennen käyttöä tapahtuvia päästöjä toisiinsa, sillä tämä diplomityö keskittyy nimenomaan siihen, miten materiaalivalinnat vaikuttavat kasvihuonepäästöihin. Tämä on myös ainoa moduuli, jossa ilmenee varianssia päästöarvoissa. Toisin sa-

noen vaiheissa B3–B4 ja B6 eli käyttövaiheessa sekä moduulissa C eli käytön jälkeen hiilidioksidiekvivalentit eli ilmastomuutosvaikutus pysyvät samana. Skenaarioiden materiaalivaihto eivät siis vaikuta näissä tapauksissa muuhun kuin vaiheissa A1–A5 eli ennen käyttöä muodostuviin kasvihuonepäästöihin. Tässä luvussa skenaarioiden päästöjä vertaillaessa tarkoitetaan nimenomaan moduulia A eli vaiheita ennen käyttöä.

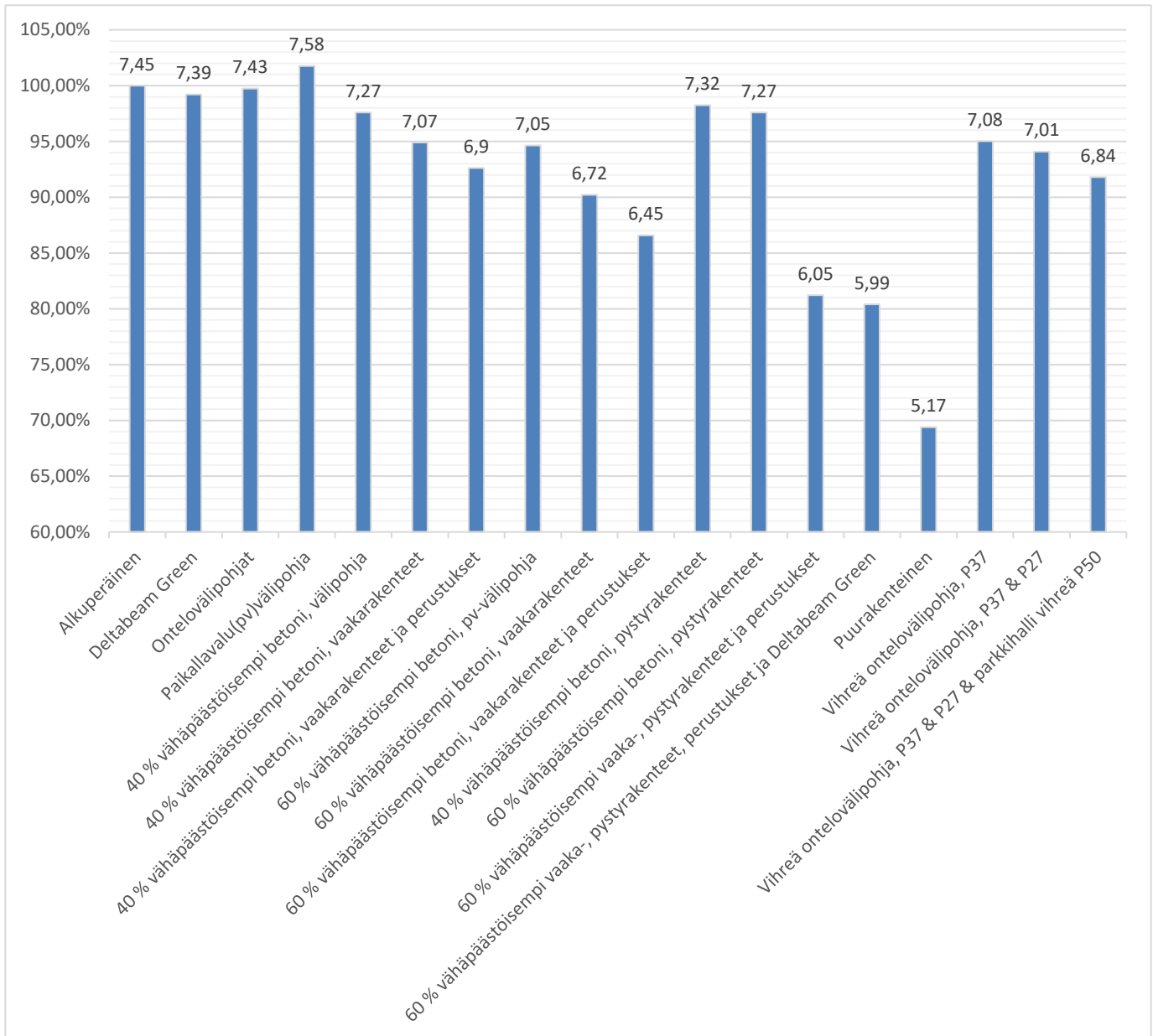
Eri skenaarioiden hiilidioksidiekvivalenteja vertaillaessa täytyy ottaa huomioon, että mikäli vertaillaan paikallavaluvalipohjia keskenään, paikallavaluvalipohjaisia rakenteita kannattaa verrata paikallavaluvalipohjaan ennemmin kuin alkuperäiseen. Silloin huomataan, että suhteellinen ero Indeksitalon 80:20-suhteiseen välipohjaan tyypillisellä 10-prosenttisesti kierrätetyllä valmisbetonilla valetulla välipohjalla on 1,74 prosenttiyksikköä. Toisin sanoen paikallavaluvalipohja aiheuttaa 1,74 % korkeammat päästöt kuin alkuperäisen Indeksitalon mallinnus. Jos paikallavaluvalipohjan tekisikin sen sijaan 40 % vähäpäästöisemmällä betonilla, se aiheuttaisi 2,42 % vähemmän päästöjä kuin alkuperäinen tai 4,16 % vähemmän päästöjä kuin vastaava paikallavaluna tavanomaisella betonilla valettu välipohja. Jotta tuloksia voidaan tulkita oikein, tämä asia on olennaista sisäistää.

Taulukossa 11 on esitetty ensin kokonaishiili-intensiteetti rakennettua neliötä kohden vuodessa ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$). Sen jälkeen nähdään sekä suhteelliset luvut moduulissa A eli ennen käyttöä tapahtuville vaiheille että koko elinkaaren ajalle moduuleille A–D. Lukuarvot ovat jokaiselle skenaariolle absoluuttiset, ja prosenttiluvut on suhteutettu alkuperäiseen Indeksitalon mallinnukseen vertailun selkeyden vuoksi.

Ilmastonmuutosvaikutus	A1-A5 Ennen käyttöä		A-D koko elinkaari	
	kgCO ₂ e/m ² /a	%	kgCO ₂ e/m ² /a	%
Alkuperäinen	7,45	100,00 %	20,15	100,00 %
Deltabeam Green	7,39	99,19 %	20,09	99,70 %
Ontelovälipohjat	7,43	99,73 %	20,13	99,90 %
Paikallavalu(pv)välipohja	7,58	101,74 %	20,27	100,60 %
40 % vähäpäästöisempi betoni, pv-välipohja	7,27	97,58 %	19,96	99,06 %
40 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakenteet	7,07	94,90 %	19,77	98,11 %
40 % vähäpäästöisempi betoni, pystyrakenteet	7,32	98,26 %	20,02	99,35 %
40 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakenteet ja perustukset	6,9	92,62 %	19,59	97,22 %
60 % vähäpäästöisempi betoni, pv-välipohja	7,05	94,63 %	19,75	98,01 %
60 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakenteet	6,72	90,20 %	19,41	96,33 %
60 % vähäpäästöisempi betoni, pystyrakenteet	7,27	97,58 %	19,97	99,11 %
60 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakenteet ja perustukset	6,45	86,58 %	19,15	95,04 %
60 % vähäpäästöisempi vaaka-, pystyrakenteet ja perustukset	6,05	81,21 %	18,75	93,05 %
60 % vähäpäästöisempi vaaka-, pystyrakenteet, perustukset ja Deltabeam Green	5,99	80,40 %	18,69	92,75 %
Puurakenteinen	5,17	69,40 %	17,98	89,23 %
Vihreä ontelovälipohja, P37	7,08	95,03 %	19,77	98,11 %
Vihreä ontelovälipohja, P37 & P27	7,01	94,09 %	19,71	97,82 %
Vihreä ontelovälipohja, P37 & P27 & parkkihalli P50	6,84	91,81 %	19,54	96,97 %

Taulukko 11. Eri skenaarioiden hiilidioksidiekvivalenttien vertailua ennen käyttöä ja koko elinkaaren osalta. Suhdeluvut nähtävillä verrattuna alkuperäiseen mallinnukseen.

Kuvassa 14 on havainnollistettu taulukossa 9 ilmoitetut eri skenaarioiden ilmastonmuutosvaikutukset vaiheille A1–A5. Selkeyden vuoksi palkkien päälle on lisätty absoluuttiset hiilidioksidiekvivalentit. Alkuperäisen skenaarion suhdeluku on tässä kuvassa 100,0 %. Huomattavaa on, että kuvaajan pystyakseli alkaa 60 %:sta.



Kuva 14. Eri skenaarioiden ilmastonmuutosvaikutus suhteessa alkuperäiseen mallinukseen vaiheiden A1–A5 aikana eli ennen käyttöä. Nähtävillä myös skenaarioiden absoluuttinen ilmastonmuutosvaikutus (kgCO₂e/m²/a) palkkien yläpuolella.

Vaihtoehdossa, jossa välipohja oli mallinnettu paikallavalulaattana, valmisbetonin osuus materiaalien päästöistä (vaiheet A1–A3) oli 35,9 % tyyppillisellä betonilla. Mikäli paikallavalulaatan betonilaatua vaihdettiin ympäristöystävällisemmäksi, sen osuus päästöistä oli 32,7 prosenttia 40 % vähäpäästöisemmällä betonilla ja 30,5 prosenttia 60 % vähäpäästöisemmällä betonilla.

Tuloksista voidaan tulkita, että mikäli vaihdetaan kaikki vaaka- ja pystyrakenteissa sekä perustuksissa käytetty betoni 60 % vähäpäästöisemmäksi betoniksi, saadaan vähennettyä päästöjä tavanomaiseen paikallavaluvälipohjaan verraten $1,53 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$ eli ennen käyttöä olevassa vaiheessa jopa 20,53 prosenttiyksikköä. Betonilaadun muutoksella saadaan näin ollen vähennettyä yli viidesosa koko hankkeen materiaaleista johtuvista päästöistä vaiheiden A1–A5 aikana.

Kun tavanomaisen ontelolaattavälipohjan P37-ontelolaatat korvataan vähäpäästöisemmällä ontelolaatalla, päästöjä saadaan vähennettyä 4,7 prosenttiyksikköä. Jos korvataan myös P27-ontelolaatat, vähennys on 5,64 prosenttiyksikköä. Jos halutaan ottaa laskelmiin mukaan myös pysäköintihallin P50-ontelolaatat ja korvata ne, saadaan päästöjä vähennettyä 2,25 prosenttiyksikköä lisää, jolloin materiaaliperäiset päästöt vähenevät 91,81 prosenttiin alkuperäisestä. Täytyy huomioida, että pysäköintihallin P50-ontelolaattojen korvaamista vihreämmällä vaihtoehdolla ei kuitenkaan kovin hyvin voida verrata muihin vaihtoehtoihin, sillä niissä P50-ontelolaattoja ei ole korvattu millään, minkä lisäksi pysäköintihalleja ei ole jokaisessa asuinrakennuksessa.

Koska alun perin mallinnettiin ontelolaatat ja paikallavalulaatat saman rakennushankkeen pohjalta, verrataan seuraavaksi vähäpäästöisempiä ontelolaattavälipohjia ja vähäpäästöisempiä paikallavalulaattavälipohjia keskenään. Vaihdettaessa kokonaan paikallavaluna rakennetun välipohjan tavanomainen betoni 40 % vähäpäästöisempään betoniin, saadaan kasvihuonepäästöjä vähennettyä 4,16 prosenttiyksikköä. Käytettäessä 60 % vähäpäästöisempää betonia, päästöt laskisivat 7,11 prosenttiyksikköä verrattaessa paikallavaluvälipohjaan. Jos vaihdetaan täysontelolaattavälipohjan P37-ontelolaatat vähäpäästöisemmäksi, kasvihuonepäästöt vähenevät 4,7 prosenttiyksikköä. Mikäli vaihdetaan myös P27-ontelolaatat vähäpäästöisemmiksi, laskevat päästöt 5,64 prosenttiyksikköä verrattaessa tavanomaiseen ontelolaattavälipohjaan. Pelkästään paikallavaluvälipohjan kasvihuonepäästöt ovat 101,74 %, kun 40 % vähäpäästöisempää betonia käytettäessä päästäisiin 97,58 %:iin. Vastaavasti 60 % vähäpäästöisemmällä betonilla luku olisi 94,63 %, kun vähäpäästöisimmän skenaarion eli molempien ontelolaattojen vaihto vähäpäästöisemmäksi luku olisi 94,09 %. Huomataan siis, että molempien skenaarioiden vaikutus kasvihuonepäästöihin on melko lähellä toisiaan riippumatta siitä, onko välipohja paikallavalettu vai ontelorakenteinen.

Tutkimuksen perusteella välipohjien rakentaminen paikallavaluna on suositeltavaa tehdä vähäpäästöisemmällä betonilla. Vähäpäästöisellä betonilla saadaan aikaan kohtalaisia kasvihuonepäästövähennyksiä riippuen vähäpäästöisen betonin kierrätettyjen sidosaineiden suhteista. Ontelolaattainen välipohja kannattaa myös mahdollisuuksien mukaan rakentaa vähäpäästöisellä tuotteella. Jos ei käytetä ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja kummassakaan tapauksessa, välipohja kannattaa tehdä ontelolaatoilla, koska tästä skenaariosta aiheutuu pienemmät kasvihuonepäästöt.

Tässä diplomityössä aikataulullisia Aspekteja ja niiden välillisiä vaikutuksia kasvihuonepäästöihin ei otettu huomioon. Todellisuudessa kun eri betonilaatuisia välipohjia tarkastellaan ja vertaillaan toisiinsa, olisi otettava huomioon myös aikataululliset vaikutukset ja sitä kautta niiden vaikutus ympäristöarvoihin. Käytettäessä esimerkiksi Ruduksen 60 % vähäpäästöisempää betonia lujuudenkehitys on huomattavasti hitaampaa klinkkerin sisältämien kierrätettyjen ainesosien vuoksi. Se kestää valmistajan mukaan 91 päivää, mikä on huomattavasti hitaampi kuin tavanomaisella betonilla. Vähäpäästöisillä ontelolaatoilla rakennettaessa työmaan aikatauluun ei pitäisi tulla muutoksia, koska lujuudenkehitys tapahtuu ontelolaattoja valmistavalla tehtaalla.

Deltabeam Green -palkeilla varustetun 80/20-ontelolaattavälipohjan päästöt ovat 7,39 kgCO₂e/m²/a, kun tavanomaisilla Deltabeam -palkeilla varustetun alkuperäisen mallinnuksen hiili-intensiteetti oli 7,45 kgCO₂e/m²/a ennen käyttöä. Tällä yksinkertaisella muutoksella saadaan siis lähes prosentti pois materiaaliperäisistä kasvihuonepäästöistä.

Vertaillen puurakenteista rakennusta alkuperäiseen huomataan, että kasvihuonepäästöt ennen käyttöä ovat 30,60 prosenttiyksikköä pienemmät, ja koko elinkaaren osalta vaikutus on yli 10 prosenttiyksikköä. Pasanen et al. (2011) huomasivat tutkimuksessaan, että rakennusvaiheessa puurakenteisen kerrostalon päästöt olivat 29 % pienemmät kuin vastaavalla betonirakenteisella kerrostalolla. Vaikka puurakenteisen rakennuksen mallinnus oli melko karkea ja teoreettinen, mallinnuksen tulosta voidaan pitää kohtalaisen luotettavana.

Haastatellun suuren betonialan toimijan johtajan mukaan pystyrakenteissa käytettyjä betonielementtejä ei vielä valmisteta samaan tapaan ympäristöystävällisesti kuten valmisbetonia vaakavaluihin (Haastattelu 2020). Mallinnukset tehtiin olettaen, että pystyrakenteissa voitaisiin käyttää yhtä vähäpäästöisiä betonilaatuja, jotta mahdollisia lähitulevaisuuden materiaali- ja vaihtoehtojen eroavaisuuksia kasvihuonepäästöissä voidaan verrata. Nämä pystyrakenteiden teoreettiset mallinnukset ovat hyödyllisiä myös tarkastellessa vaaka- ja pystyrakenteiden suhteellisia mahdollisuuksia rakennushankkeen kasvihuonepäästöjen pienentämisessä.

OneClick LCA jakaa mallinnetut nimikkeet eri elementteihin niiden tarkoituksen mukaan, jolloin voidaan tarkemmin tarkastella, miten kasvihuonepäästöarvot muuttuvat eri skenaarioiden mukaan. Työn lopussa liitteenä A oleva OneClick LCA:sta tuotu taulukko havainnollistaa skenaarioiden ilmastonmuutosvaikutuksen jakautumista elementteittäin. Joissain elementeissä, kuten sähkön käytössä, kiintokalusteissa, talotekniikassa ja taulukkoarvoissa ei tapahtunut muutoksia, koska materiaalivaihdokset eivät vaikuttaneet niihin. Elementit, joissa on nähtävissä varianssia ovat alapohjat, perustukset, julkisivut, väliseinät, ulkotasot, lattiapintarakenteet sekä rungon osalta kaikki elementit.

Ulkomailta tai kotimaasta hankittujen betonielementtien välillä ei huomattu juurikaan eroa kuljetusmatkan ympäristövaikutuksissa. Esimerkiksi Parman ontelolaatan ympäristöselosteessa ilmoitettu keskiarvoinen kuljetusmatka on 73 km, ja kuljetuksesta aiheutuvat päästöt ovat noin sadastuhannesosa koko tuotteen aiheuttamista päästöistä (Parma 2019a). Todennäköisesti ulkomailta tuodessa ympäristövaikutukset johtuvat enimmäkseen muista syistä, kuten tehtaalla valmistuksessa käytetystä energiamuodosta tai tehtaan prosesseista. Betonielementin valmistamisessa tapahtuvat kemialliset reaktiot ovat joka tapauksessa universaaleja.

5.4 Materiaalitoimittajien ratkaisuja hiilijalanjäljen pienentämiseksi

Osalla materiaalitoimittajista vähäpäästöisyys on osa strategiaa, ja monet yrityksistä lupaa- vatkin julkisesti vähentää kasvihuonepäästöjä tietyllä prosentilla tiettyyn vuoteen mennessä. Tämä tarkoittaa luonnollisesti sitä, että tuotekehitystä täytyy tehdä, olemassa olevista tuotteista täytyy muokata ympäristöystävällisempiä ja uudenlaisia vähäpäästöisiä tuotteita täytyy kehittää. Päästöjen vähentämisen keinoiksi on mainittu esimerkiksi energiatehokkuuden parantaminen ja energiakulujen vähentäminen, tehokas tuotanto ja hukan minimointi, materiaalitehokkuus, kustannustehokkaat tuotteet sekä syntyvien jätteiden minimointi, hyötykäyttö ja kierrätys (Saint-Gobain 2020, Rudus 2020, Peikko Group 2020). Osa materiaalitoimittajista ei luvannut mitään konkreettisia toimenpiteitä päästöjen vähentämiseksi. Seuraavaksi esitellään muutamia rakennusalan toimijoita ja niiden ratkaisuja kasvihuonepäästöjen pienentämiseksi.

Suurista betonialan toimijoista suomalaisella Ruduksella on olemassa Vihreä betoni -tuoteperhe, joka sisältää asteittain eri seossuhteisia valmisbetoneja. Niiden luvataan pienentävän betonin aiheuttamia kasvihuonepäästöjä helposti 20 prosentista 50 prosenttiin ja joissakin tapauksissa jopa huomattavasti enemmän. Yrityksen mukaan rakennuskohteessa käytettävän vihreän betonin laatu valitaan yhteistyössä suunnittelijan, urakoitsijan ja rakennuttajan

kanssa, jolloin betonin luvataan täyttävän rakenteille asetettavat vaatimukset betonin valetavuudesta, lujuuden kehityksestä, loppulujuudesta ja säilyvyydestä. Vihreän betonin tavanomaisiksi käyttökohteiksi mainitaan perustukset ja sisällä olevat rakenteet. Vaativissa ja voimakkaasti suola- ja pakkasrasitetuissa kohteissa kuten silloissa vihreää betonia ei voida täysimääräisesti hyödyntää. Rudus myös valmistaa kierrätetystä betoni- ja tiilimurskeesta Bero-roc-kierrätysmursketta, joka soveltuu hyvin esimerkiksi maanrakentamiseen. (Rudus 2020)

Suomalainen teräsalan yritys Peikko Group on tuonut markkinoille Deltabeam Green -tuotteen, jonka luvataan vähentävän päästöjä jopa 50 % verrattuna perinteiseen Deltabeam-liit-topalkkiin. Ominaisuuksiltaan saman tuotteen päästöjen vähennykset saavutetaan Peikko Groupin (2020) mukaan käyttämällä yli 90-prosenttisesti kierrätettyä terästä valmistuksessa, sekä käyttämällä pelkästään uusiutuvaa energiaa valmistuksessa. Lisäksi tuotteen toimituksessa käytetään ympäristöä vähemmän kuormittavia vaihtoehtoja, kuten biodieseliä. (Peikko Group 2020)

Saint-Gobain on suuri, globaali rakennusalan yritys, jonka tuotteita ovat muiden muassa Weber-lattiatasoitteet, Gyproc-kipsilevyt, Isover-lasivillaeristeet ja Ecophon-akustiikkalevyt. Saint-Gobain lupaa Weberin uusien pumpattavien lattiatasoitteiden hiilijalanjäljen olevan jopa 36 % pienempi kuin aiemmin. Isoverin lasivillaeristeistä kerrotaan, että 80 % lasivillasta on kierrätettyä. Saint-Gobain lupaa vähentää hiilidioksidipäästöjään 20 %:lla vuoteen 2025 mennessä verrattuna vuoteen 2010. (Saint-Gobain 2020) Saint-Gobainilta löytyy myös kilpailijoihin verrattuna suuri määrä ympäristöselosteita Rakennustietosäätiön EPD-tietokannassa.

Pohjoismainen teräsyhtiö SSAB lupaa tuottaa fossiilivapaata terästä vuonna 2026. Yritys väittää, että hiilivapaan teräksen käyttö vähentäisi hiilidioksidipäästöjä Suomessa 7 % ja Ruotsissa 10 %. Hiilivapaata terästä valmistettaessa tuotantoprosessia muutettaisiin niin, että vedyn määrä teräksessä vähenisi, jolloin prosessissa syntyisikin vettä hiilidioksidin sijaan. (Teknologiateollisuus 2020)

Finnsementin (2020) ympäristöraportin mukaan tunnetuilla ja jo osittain käytössä olevilla tekniikoilla ja menetelmillä sementtiteollisuuden päästöjä voidaan Euroopassa vähentää noin 32 prosenttia. Sementin valmistuksessa tutkitaan erityisesti hiilen talteenotto-, hyötykäyttö- ja varastointimenetelmiä. Toteutuessaan nämä menetelmät mahdollistaisivat jopa 80 prosentin päästövähennykset vuoteen 2050 mennessä.

6. KUSTANNUKSET JA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Tässä luvussa vertaillaan edellisen luvun skenaarioiden kustannuksia ja niiden suhdetta ympäristövaikutuksiin. Kustannuslaskennan kautta pyritään löytämään skenaariot, jotka ovat kustannus-ympäristösuhteeltaan mahdollisimman hyvät. Lisäksi suoritetaan virhetarkastelu.

6.1 Kustannuslaskennan lähtökohdat

Kustannuslaskentaa varten hyödynnettiin Indeksitalolle ja sen artikkeleille olemassa olevia hyvin kattavia kustannustietoja. Näiden lisäksi kustannusvertailua varten kerättiin raudoitusmateriaalin ja raudoitustyön hintatietoa kohdeyrityksen tapahtuneista rakennushankkeista. Paikallavalun muoteille, betonivaluille ja niiden saumauksille käytettiin Indeksitalon kustannustietoja.

C30/37-betonoinnin materiaali kattaa 37,5 % betonoinnin kokonaiskuluista. C25/30-betonoinnin materiaalikulut olivat vastaavasti 36,1 % kokonaiskuluista. Loput kustannukset sisältävät mm. valmistamisen, työn, lämmityslisän, sekoitussäiliön, mahdollisen kuljetuslisän ja odotusjaksot, sekä riippuen sopimuksista autopumpun tai vuokran. Verrattaessa vähäpäästöisestä betonista valmistettuja paikallavalulaaattoja tavanomaisiin paikallavalulaaattoihin tiedetään, että yllä esitettyjen muiden betonoinnin kulujen lisäksi raudoitukset, muotit, työ, saumaukset ja muut välittömästi paikallavalulaaattoon liittyvät tekijät pysyvät samoina. Materiaalikulut ovat toisin sanoen ainoa betonoinnin muuttuva tekijä, kun betonilaatua vaihdetaan tavanomaisesta vähäpäästöiseen betoniin. Tässä työssä ei huomioitu vähäpäästöisen betonin hitaammasta lujuuskehityksestä johtuvia välillisiä kustannuksia, jotka liittyvät esimerkiksi tehtaan ja työmaan aikataulumuutoksiin ja työmaan käyttöasteeseen.

Haastateltujen suurten betonialatoimijoiden mukaan sementin valmistusprosessi on käytännössä samanlainen riippumatta sementin sidosaineiden kierrätysprosentista asteikolla 30...70 %. Tällöin betonin materiaalikustannuksissa ei tapahdu juurikaan merkittävää muutosta sidosainesuhteiden muuttuessa. Todellisuudessa vähäpäästöisen betonin valmistaminen ei käytännön tasolla ole niin yksiselitteistä kuin mitä teorian pohjalta on mahdollista olettaa. Toisin sanoen eri betonilaatujen kustannusvertailua ei voida absoluuttisella tasolla tehdä ilman tarkempaa tietoa tehtaan prosesseista, tehtaan kapasiteetista, tarkoista seossuhteista

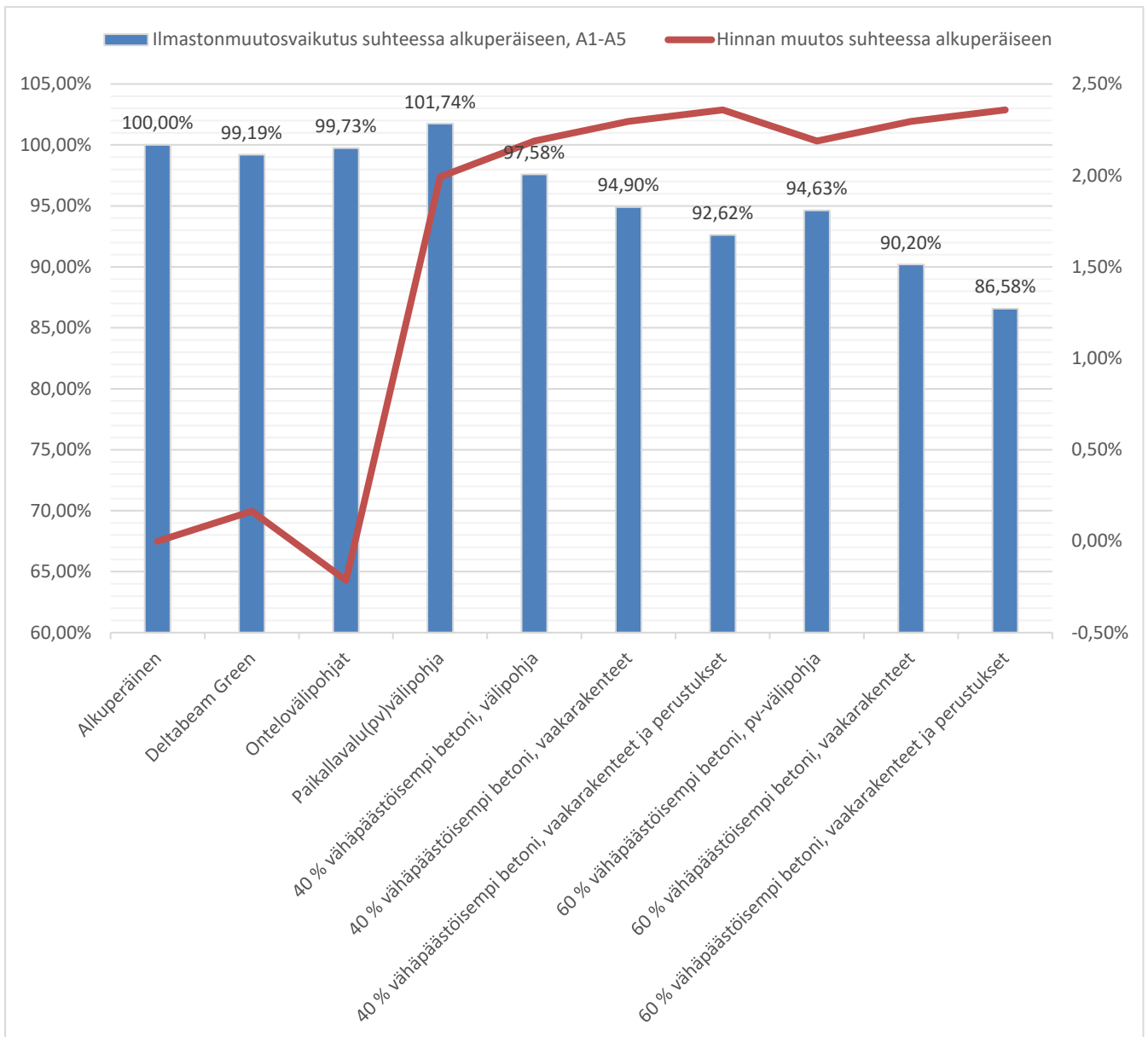
ja betonin lujuuskehityksen aiheuttamista aikataulumuutoksista työmaalla ja tehtaalla. Vähäpäästöisten betonien materiaalikustannukset arvioitiin tässä työssä tietyllä kohdeyrityksen ja materiaalitoimittajien kesken sovitulla hinnalla.

Puurakenteisen rakennuksen, vähäpäästöisempien ontelolaattojen tai ympäristöystävällisempien pystyrakenteiden kustannuksia ei tässä diplomityössä pystytty laskemaan. Puurakenteisen rakennuksen kustannustietoja ei ollut olemassa eikä niitä näin ollen voitu arvioida. Vähäpäästöisten ontelolaattojen kustannuslaskennat ovat vielä kesken kohdeyrityksen materiaalitoimittajilla, joten niiden kustannusarviot jätettiin pois tästä diplomityöstä. Lisäksi haastateltujen betonialan toimijoiden johtajien mukaan julkisivu- ja väliseinäelementtien hinnoittelu on vielä kesken. He eivät myöskään antaneet hinta-arvioita, sillä ympäristöystävällisempien betonielementtien tutkimus on heidän osaltaan vielä kesken. Esivalmistettujen betonisten rakenteiden hinnoittelussa ei myöskään voida käyttää samoja oletusarvoja kuin valmisbetonissa, sillä kustannuksissa täytyy ottaa huomioon raaka-ainekustannusten lisäksi esimerkiksi elementtien kuivuminen, varastointi ja tehtaan prosessien muutos verrattuna alkuperäiseen tasoon (Haastattelu 2020). Mainittujen skenaarioiden ilmastomuutosvaikutukset ovat nähtävillä luvussa 5.3 olevassa taulukossa 11 ja kuvassa 14.

6.2 Mallinnettujen skenaarioiden kustannus-ympäristösuhteet

Tässä alaluvussa vertaillaan erilaisten skenaarioiden ilmastomuutosvaikutuksen suhdetta rakennushankkeen kokonaiskustannuksiin. Vertailtaviksi vaihtoehtoisiksi valittiin samat skenaariot kuin edellisessä luvussa niiltä osin kuin kustannustietoja oli olemassa. Osalle skenaarioista ei ollut olemassa faktapohjaisia kustannustietoja, joten niitä ei voitu vertailla. Niille skenaarioille, joiden kustannuksia voitiin vertailla, kustannustiedot olivat kuitenkin varsin kattavat. Luvun 2.5 kirjallisuustutkimuksessa tosin havaittiin, että kustannukset saattavat korreloida heikosti kasvihuonepäästöjen kanssa. Asia on hyvä huomioida ja sisäistää, kun tulkitaan tässä diplomityössä esitettyjä tuloksia ja kustannus-ympäristöyhteyksiä.

Seuraavassa kuvassa 15 on esitetty vaiheiden A1–A5 ilmastomuutosvaikutuksen ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$) suhde alkuperäiseen hintaan prosentuaalisesti. Hinnanmuutos on suhteessa koko hankkeen hintaan. Alkuperäisessä Indeksitalon mallinnuksessa on siis 100,00 %:n ilmastomuutosvaikutus sekä 0,00 % hinnanmuutosta. Ontelovälipohjaratkaisu on kokonaisuudessaan 0,21 % halvempi kuin Indeksitalon 80:20-suhteella jaettu välipohja, ja kokonaan paikallavaluna tehty välipohja on 2,03 % kalliimpi ratkaisu. Tällöin kannattaa verrata ympäristöystävällisiä paikallavaluvälipohjia tavanomaiseen paikallavaluvälipohjaan.



Kuva 15. Erialaisten skenaarioiden ilmastonmuutosvaikutus vaiheilla A1-A5 eli ennen käyttöä, sekä hankkeen kokonaiskustannusten muutos verrattaessa Indeksitalon alkuperäiseen mallinnukseen.

Kuvasta 15 voidaan tulkita, että mikäli paikallavaluvälipohja rakennettaisiin esimerkiksi jommallakummalla mallinnetulla vähäpäästöisellä betonilla, hankkeen kokonaiskustannukset nousisivat 2,19 % verrattuna alkuperäiseen Indeksitaloon, tai 0,20 % verrattuna kokonaan paikallavaluvälipohjaiseen rakennukseen. Jos paikallavalu tehtäisiin 40 % vähäpäästöisemmällä betonilla, se vähentäisi vaiheiden A1–A5 ilmastonmuutosvaikutusta 2,42 % verrattuna Indeksitaloon tai 4,16 % verrattuna kokonaan tavanomaisella betonilla valettuun paikallavaluvälipohjaiseen rakennukseen. Jos sama tehtäisiin 60 % vähäpäästöisemmällä betonilla, hintamuutos olisi sama kuin 40 % vähäpäästöisemmällä betonilla, mutta kasvihuonepäästöt

laskisivat 5,37 % verrattuna Indeksitaloon ja 7,11 % verrattuna tavanomaiseen paikallaväliin.

Yksittäisiä tuotteita tarkastellessa Peikon Deltabeam -liittopalkkien korvaaminen Deltabeam Green -liittopalkkeilla on melko tehokas tapa vähentää ympäristökuormaa. Korvaamalla Indeksitalon määrän liittopalkkeja ympäristöystävällisellä vaihtoehdolla saadaan laskettua vaiheiden A1–A5 ilmastonmuutosvaikutusta 0,79 prosenttiyksiköllä. Lisäksi tiedetyillä kustannusvaikutuksilla tämän skenaarion kustannukset ovat vain 0,16 prosenttiyksikköä suuremmat kuin Indeksitalon kokonaiskustannukset.

Taulukossa 12 on edellisen kuvan 15 havainnollistettu ilmastonmuutosvaikutus taulukoituna. Ilmastonmuutosvaikutus ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$) nähdään kolmessa eri sarakkeessa, ensin koko elinkaaren ajalta, sen jälkeen vaiheiden A1–A5 ajalta absoluuttisena lukuna ja prosentteina. Lisäksi on esitetty prosenttiluvuin hinnan muutos suhteessa koko rakennushankkeen hintaan. Taulukossa on erikseen selkeyden vuoksi listattu viimeisessä sarakkeessa hinnanmuutos verrattaessa paikallaväliin hintaan.

Skenaario	Ilmastonmuutosvaikutus			Kustannusten muutokset	
	A-D koko elinkaari	A1-A5 Ennen käyttöä		Alkuperäiseen verrattuna	Pv-välipohjaan verrattuna
	kgCO ₂ e/m ² /a	kgCO ₂ e/m ² /a	%	%	%
Alkuperäinen	20,15	7,45	100,00 %	0,00 %	-
Deltabeam Green	20,09	7,39	99,19 %	0,16 %	-
Ontelovälipohjat	20,13	7,43	99,73 %	-0,21 %	-
Paikallavaluvälipohja	20,27	7,58	101,74 %	1,99 %	-
40 % vähäpäästöisempi betoni, pv-välipohja	19,96	7,27	97,58 %	2,19 %	0,19 %
40 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakeet	19,77	7,07	94,90 %	2,30 %	0,30 %
40 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakeet ja perustukset	19,59	6,90	92,62 %	2,36 %	0,36 %
60 % vähäpäästöisempi betoni, pv-välipohja	19,75	7,05	94,63 %	2,19 %	0,19 %
60 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakeet	19,41	6,72	90,20 %	2,30 %	0,30 %
60 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakeet ja perustukset	19,15	6,45	86,58 %	2,36 %	0,36 %

Taulukko 12. *Mallinnettujen vaihtoehtoisten skenaarioiden ilmastonmuutosvaikutuksen vertailua hankkeen kokonaiskustannuksiin.*

Kun verrataan vähäpäästöisillä ontelolaatoilla rakentamista tavanomaisilla ontelolaatoilla rakentamiseen, ympäristöhyödyt ovat merkittävät. Käytettäessä vähäpäästöisempiä ontelolaattoja, työmaan aikatauluissa ei pitäisi näkyä juurikaan vaikutuksia, sillä vähäpäästöisten ontelolaattojen lujuuskehitys tapahtuu ontelolaattoja valmistavalla tehtaalla. Tällöin kustannuksetkin ovat todennäköisesti pienemmät kuin paikallavalulaatoilla rakennettaessa. Tästä näkökulmasta tarkastellen on suositeltavaa käyttää esivalmistettuja tuotteita rakentamisessa.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että mikäli rakennushankkeessa ei ole aikomusta käyttää kierrätettyä betonia, on suositeltavaa käyttää ontelolaattoja niin kustannusten kuin ympäristön kannalta.

Liittopalkkien vaihtaminen ympäristöystävällisempiin liittopalkkeihin on kohtalaisen tehokas tapa vähentää ympäristökuormaa. Tällä ratkaisulla saadaan lähes prosentin kasvihuonepäästövähennykset ennen käyttöä hyvin pienillä kustannuksilla.

Optimaalisimmaksi teoreettiseksi skenaarioksi kustannus-ympäristösuhteita tarkastellessa saadaan 60 % vähäpäästöisemmällä betonilla mallinnetut vaakarakenteet ja perustukset. Ilmastomuutosvaikutus pienenee tässä skenaariossa tyypilliseen paikallavaluvälipohjaskenaarioon verraten 15,16 prosenttiyksikköä ja kustannukset kasvavat 0,36 %. Jos verrataan skenaariota Indeksitaloon, se on 2,36 % kalliimpi kasvihuonepäästöjen vähentyessä 13,42 %.

Jos yllä olevaan skenaarioon vaihdetaan lisäksi Deltabeam Green tavanomaisten liittopalkkien tilalle, kasvihuonepäästöt vähenevät 15,97 prosenttiyksikköä ja kustannukset kasvavat 0,52 % verrattaessa tyypilliseen paikallavaluvälipohjaan. Kasvihuonepäästöt vähenevät 14,23 % hinnan kasvaessa 2,52 % alkuperäiseen Indeksitaloon verrattaessa.

Tehdyn tutkimuksen perusteella näyttäisi siltä, että koska vähäpäästöisen betonin hinta suhteessa tavanomaiseen betoniin ei ole kovin kallis, kannattaisi kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi käyttää sitä. Varsinkin paikallavalukohteiden hiilijalanjälkeä saadaan helposti ja kohtalaisen kustannustehokkaasti pienennettyä käyttämällä vähäpäästöistä betonia tavanomaisen betonin sijasta. Ongelmana vähäpäästöisen betonin käyttämisessä saattaa olla sen hitaampi lujuuskehitys ja siitä johtuva kuivumisaika, joka on pidempi kuin tavanomaisella betonilla. Todellista ympäristöhyötyjen ja kustannusten suhdetta on hankala arvioida, sillä vähäpäästöisempien paikallavalulaattojen hitaampi lujuuskehitys voi aiheuttaa viiveitä työmaalla.

Laskelmia ja kustannus-ympäristösuhteita tarkastellessa on tärkeää ottaa huomioon, että vähäpäästöisen betonin vaikutuksia lopullisiin hankkeen kustannuksiin ei voida täysin suoraan laskea ottamalla huomioon vain klinkkerin koostumuksen muutoksia. Toisin sanoen materiaaleista johtuvien kustannusten lisäksi täytyy ottaa huomioon myös materiaalille ominaisesta normaalista hitaammasta lujuudenkehityksestä aiheutuvat välilliset kustannukset.

Suunniteltaessa ja toteuttaessa mahdollisimman ympäristö- ja kustannustehokasta ratkaisua tulee erityisesti huomioida vähäpäästöisen betonin lujuuskehityksestä johtuvat välilliset kustannukset, mikäli holvi tehdään paikallavaluna. Varsinkin kylmällä säällä lujuudenkehitys on hitaampaa kuin tavanomaisella betonilla. Työmaavaiheessa hitaampi lujuudenkehitys aiheuttaa tarpeen harkita aikataulullisia asioita uudella tavalla, sillä esimerkiksi holvin hitaampi kuivuminen vaikuttaa liikkumis- ja työskentelymahdollisuuksiin työmaalla, minkä lisäksi se aset-

taa erinäisiä muita haasteita. Vähäpäästöisestä betonista valmistettujen elementtien kohdalla tulee ottaa huomioon niin ikään hitaammasta lujuudenkehityksestä aiheutuvat lisäkustannukset betoniteollisuuden prosesseissa.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että rakennusmateriaalien osalta kasvihuonepäästöjä voidaan tehokkaimmin vähentää suunnitteluvaiheen ratkaisujen avulla. Näitä ovat esimerkiksi runkorakenteiden materiaalien valinta, kevyempien rakenteiden suunnittelu ja ympäristöystävällisten rakennusmateriaalien valitseminen. Kasvihuonepäästöihin vaikuttavat olennaisesti myös energiatehokkaampien materiaalien valinta ja sitä kautta rakennuksen käyttövaiheen päästöjen vähentäminen. Suunnittelijan, rakennuttajan, urakoitsijan, hankkijan ja materiaalitoimittajien välinen yhteistyö on oleellisessa osassa vähäpäästöisyyden tavoitteiden saavuttamisessa.

Tällä hetkellä tyypillisessä kerrostalorakentamisessa koko elinkaarta tarkastellen suurimmat vähennykset kasvihuonepäästöihin saadaan vaikuttamalla käytön aikaisiin energiaratkaisuihin. Energiamuotojen kehittyessä vuosi vuodelta vähäpäästöisemmäksi, rakentamisvaiheen materiaaliratkaisuilla on kuitenkin kasvava merkitys hankkeen elinkaareen suhteellisesti sekä joissakin tapauksissa absoluuttisesti. Mitä tehokkaammiksi energiaratkaisut kehittyvät, sitä enemmän elinkaaren kokonaispäästöt yleensä laskevat ja toisaalta sitä enemmän myös rakennusmateriaalien ympäristöystävällisyydellä on merkitystä. Lähitulevaisuudessa suurin osa rakennushankkeen päästöistä aiheutuukin vaiheesta ennen käyttöä toisin kuin tällä hetkellä.

Tilanne on siinä mielessä paradoksaalinen, että vaikka materiaaliperäiset päästöt kasvavat absoluuttisesti ja suhteellisesti, niitä pitäisi silti vähentää. Materiaaliperäisille kasvihuonepäästöille ei pitäisikään asettaa liian suuria päästövähennysvaatimuksia elinkaaren kasvihuonepäästöjen kustannuksella. Tällä tarkoitetaan siis sitä, että rakennushankkeessa tulisi ennemmin valita materiaaliperäisiä päästöjä hieman nostava, mutta elinkaaren kokonaispäästöjä laskeva kuin vähäpäästöinen, mutta esimerkiksi lämmityksen aiheuttamien päästöjen takia elinkaaren kokonaispäästöjä huomattavasti nostava materiaali. Rakennusliikkeiden ja myös materiaalitoimittajien tulee tässä asiassa ottaa vastuuta tekemisistään ja valinnoistaan. Tulevat ilmastolait ja aiheeseen liittyvät säännökset ottavat tähän asiaan myös kantaa.

Tehtäessä elinkaarianalyysiä ja arvioidessa rakennushankkeen kasvihuonepäästöjä, on oleellista huomioida, että mallinnukselle valittu energiaratkaisu sekä arviointiaikajakso vaikuttavat kokonaisuudessaan merkittävästi tuloksiin. Tällöin virheellisen päätöksen tekeminen saattaa muuttaa lopputuloksia huomattavasti.

Yleisesti käytössä olevista rakennusmateriaaleista puurunkorakenteinen rakennus näyttäisi olevan ympäristöystävällisin vaihtoehto. Puurakenteet ovat kevyempiä kuin muut rakenteet,

ne ovat kestäviä ja niillä on suuri hiilikädenjälki. Diplomityössä tehty mallinnus sekä kirjallisuustutkimus puoltavat hypoteesia. Puurakentaminen edistää osaltaan myös kestävästä kehitystä ja sen teemoja. Puuta ei kuitenkaan voida aina käyttää tietyissä rakennusosissa, kuten perustuksissa.

Kun kerrostalo rakennetaan betonirunkorakenteisena, ympäristöystävälliset vaihtoehdot saattavat olla rakennushankkeen kokonaiskustannuksien kannalta kalliita. Tämä johtuu vähäpäästöisemmän betonin verrattain hitaasta lujuuskehityksestä, joka aiheutuu pääasiassa kierrätetyistä sidosaineista. Eksaktien kustannusvaikutusten selvittämiseksi tulee ottaa huomioon materiaalikustannusten lisäksi esimerkiksi tehtaan varastoinnista, valmistuksen kestosta, aikatauluista ja ylimääräisistä työmaan toiminnoista sekä hukka-ajasta aiheutuvat kulut. Tilanne saattaa olla se, että eri materiaaliratkaisujen ja -toimittajien tärkeäksi kilpailukohteeksi muodostuu rakentamisen esivalmistelujen tärkeys ja mahdollisimman pienet häiriöt työmaan muille toiminnoille. Tällöin tehtaalla esivalmistetut tuotteet saattavat olla kannattavampi vaihtoehto kuin paikalla tehdyt ratkaisut.

Materiaalitutkimuksen ja -teknologian kehittyessä vaihtoehtoisia materiaaleja tulee lisää markkinoille ja ne kehittyvät. Tällä hetkellä valmistajilta löytyy esimerkiksi komposiitti- tai hybridimateriaaleja, joita voidaan käyttää betonin tapaan, mutta ne ovat vielä verrattain kalliita.

Niissä kohteissa, joissa joudutaan suorittamaan maaperän stabilointia, se saattaa aiheuttaa jopa 40 % materiaaliperäisistä kasvihuonepäästöistä. Voisiko maaperän stabiloinnin tehdä mahdollisimman ympäristöystävällisellä sementillä ja tarpeeksi aikaisin ennen seuraavia rakentamisen toimintoja, jotta sementti ehtisi lujittua?

Ympäristöystävällinen rakentaminen ja kasvihuonepäästöjen vähentäminen vaikuttaa olevan osalle yrityksistä vielä jossain määrin uusi asia, mutta on nähtävissä, että yritysten täytyy alkaa panostaa aiheeseen, mikäli he haluavat pysyä markkinoilla. Tähän vaikuttavat kasvihuonepäästöjä lähitulevaisuudessa reguloivat lait ja säännökset sekä tuotanto- ja toimitusketjut.

Tiettyjen tuotteiden kasvihuonepäästöjen vertailu on lähestulkoon mahdotonta, mikäli niistä ei löydy ympäristöselostetta. Esimerkiksi betonielementtituotteiden kasvihuonepäästöissä saattaa olla huomattavia eroja, jolloin niiden mallintamisessa ja vertailemisessa olisi lopputuloksen kannalta olennaista käyttää juuri kyseessä olevan tuotteen ympäristöselostetta. Yritysten olisi kannattavaa laatia ympäristöselosteet ainakin volyymitaan suurimmille tuotteille, ja toisaalta rakennuttaja voisi vaatia näitä tarpeen mukaan. Tällöin voitaisiin paremmin vertailla eri tuotteiden ympäristövaikutuksia ja suunnitella mahdollisimman ympäristö- ja kustannustehokkaita ratkaisuja sekä toimittajan että ostajan näkökulmasta.

Hankinnan näkökulmasta kasvihuonepäästöjen vähentämisen tavoitteisiin pääsy vaatii materiaalitoimijoihin vaikuttamista ja mahdollisesti esimerkiksi runkorakenteiden hankintojen tekemistä jo suunnitteluvaiheessa. Yhdessä rakennuttajan, materiaalitoimittajan, suunnittelijan ja hankkijan kanssa voitaisiin päästä mahdollisimman hyvään ratkaisuun niin ympäristöystävällisyyden kuin kustannustenkin osalta.

Pelkillä rungon toimenpiteillä ei näytä olevan mahdollista saada aikaan tarpeeksi suurta vaikutusta, jotta päästäisiin kohdeyrityksen tai rakennusalan vähäpäästöisyystavoitteisiin. Potentiaalisia jatkotutkimuskohteita voisivat olla esimerkiksi sisävaiheen materiaalit tai julkisivut, kunhan niistä saadaan tarpeeksi ympäristöselosteita mahdollista kasvihuonepäästöjen vertailua varten.

Kohdeyrityksen on järkevää jatkaa tutkimusta aiheesta. Esimerkiksi tässä diplomityössä mallinnettu keskiarvorakennus on hyvä pohja jatkotutkimukselle. Kustannustarkastelua voisi tehdä tästä työstä ulos rajatut tekijät, kuten aikatauluvaikutukset ja materiaalien tekniset ominaisuudet huomioon ottaen. Kun nämä vähäpäästöisempien rakenteiden aiheuttamat kustannukset ovat tiedossa, myös niiden suhdetta ympäristöhyötyihin kannattaa tarkastella. Lisäksi samalla voisi selvittää, ovatko tässä työssä mallinnetut teoreettiset skenaariot mahdollisia toteuttaa.

Kiinnostavia mallinnettavia skenaarioita olisivat olleet esimerkiksi eri rakennusmateriaaleista tehdyt julkisivut ja niiden kasvihuonepäästöjen vertailu. Lisäksi olisi ollut mielekästä vertailla erilaisia lattiamateriaaliskenaarioita, joissa olisi voinut tarkastella erilaisia parketti- ja laminaattiratkaisuita. Parketit ja erityisesti tiili todettiin edellisessä luvussa eräiksi Indeksitalon eniten ilmaston lämpenemiseen vaikuttavista rakennusmateriaaleista. Relevanttien ympäristöselosteiden puutteiden takia nämä skenaariot todettiin kuitenkin mahdottomiksi mallintaa tässä työssä.

Jos vähäpäästöisemmät rakennusmateriaalit osoittautuvat huomattavasti kalliimmiksi vaihtoehdoiksi, täytyy selvittää, minne kustannukset siirtyvät rakennusyrityksen kustannusketjussa. Päätyvätkö kustannukset lopulta kuluttajalle rakennusten kustannusten nousun takia? Ihmisten kiinnostus vihreitä arvoja ja ympäristöystävällisempää elämäntapaa kohtaan on noussut viime vuosina. Kyselytutkimus liittyen kuluttajien ympäristöarvoihin ja asumisen maksuvalmiuteen olisi kannattavaa.

Jotta ilmaston lämpeneminen saataisiin pysäytettyä lähitulevaisuudessa, on kaikkien teollisuuden alojen otettava vastuuta tekemisistään ja kehitettävä toimintaansa ilmastoystävällisempään suuntaan. Rakennusala on yksi näistä aloista. Rakentamisesta ja rakennusmateriaaleista aiheutuvien päästöjen vähentäminen on osa ratkaisua yhteen aikamme suurimmista globaaleista ongelmista.

LÄHTEET

- Adams M, Burrows V, Richardson S, Drinkwater J, Gamboa C. 2019. Bringing embodied carbon upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon. World Green Building Council. 58 s. Saatavissa: <https://www.worldgbc.org/bringing-embodied-carbon-upfront-report-webform>.
- Bionova Oy. 2015. Rakennusmateriaalien kasvihuonekaasupäästöjen ohjaukseen käytettävät järjestelmät ja sääntely. Saatavissa: https://www.oneclicklca.com/wp-content/uploads/2017/11/Bionova_YM_materiaalien_ymparistoohjaus_20loka2015_FINAL.pdf.
- Bionova Oy. 2017. Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa. 72 s. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B4B3172BC-4F20-43AB-AA62-A09DA890AE6D%7D/129197>.
- Brander M. 2012. Greenhouse Gases, CO₂, CO_{2e}, and Carbon: What Do All These Terms Mean? Ecometrica. Saatavissa: <https://ecometrica.com/assets/GHGs-CO2-CO2e-and-Carbon-What-Do-These-Mean-v2.1.pdf>.
- Crawford R, Cadorel X. 2017. A Framework for Assessing the Environmental Benefits of Mass Timber Construction. Procedia Engineering, vol. 196. s. 838–846. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.015>.
- D’Alessandro A, Fabiani C, Pisello A, Ubertini F, Materazzi A, Cotana F. 2016. Innovative concretes for low carbon constructions: a review. International Journal of Low-Carbon Technologies. Vol. 12, Issue 3. s. 289–309. Saatavissa: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctw013>
- Euroopan komissio. 2016. Komission tiedonanto: Puhdasta energiaa kaikille eurooppalaisille. COM 860 final. Saatavissa: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016DC0860\(01\)&rid=1](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016DC0860(01)&rid=1).
- Finnsementti Oy. 2020. Ympäristöraportti 2020. Saatavissa: https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti_ymparistoraportti_2020.pdf.
- Haastattelu. 2020. Suomalaisen betonialan toimijan johtajan haastattelu.
- Hallituksen esitys 200. 2016. Hallituksen esitys eduskunnalle Pariisin sopimuksen hyväksymisestä ja sopimuksen lainsäädännön alaan kuuluvien määräysten voimaansaattamisesta. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2016/20160200#idp446049760>.
- Hamadyk E, Amado M, de Brito J. 2020. Use of timber for the sustainable city growth and its role in the climate change. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 410. Sustainability in the built environment for climate change mitigation: SBE19. Saatavissa: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/410/1/012034>.
- Heljo J, Nippala E, Nuutila H. 2005. Rakennusten energiankulutus ja CO₂-ekv.-päästöt Suomessa. Rakennuskannan ekotehokkaampi energiankäyttö (EKOREM) -projektin loppuraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakentamistalouden laitos. Raportti 2005:4.
- Häkkinen T, Kuittinen M, Ruuska A, Jung N. 2015. Reducing embodied carbon during the design process of buildings. Journal of Building Engineering. vol. 4. s. 1–13. Saatavissa: <https://www.researchgate.net/publication/281968258>.
- Ilmastolaki 609. 2015. Annettu Helsingissä 22.5.2015. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150609>.

International Energy Agency. (Abergel T, Dean B, Dulac J, Hamilton I, Wheeler T). 2018. Global Status Report - Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. ISBN 978-92-807-3729-5. Saatavissa: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/27140>.

IPCC. (Myhre G, Shindell D, Bréon F-M, Collins W, Fuglestvedt J, Huang J, Koch D, Lamarque J-F, Lee D, Mendoza B, Nakajima T, Robock A, Stephens G, Takemura T, Zhang H). 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Saatavissa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf.

IPCC. (Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O, Roberts D, Skea J, Shukla P, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, Lonnoy E, Maycock T, Tignor M, Waterfield T). 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Saatavissa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf.

Kaufmann H, Krötsch S, Winter S. 2018. Manual of Multi-storey Timber Construction. München: DETAIL. 40 s. Saatavissa: <https://doi.org/10.11129/9783955533953>.

Kumari L, Kulatunga U, Madusanka N, Jayasena N. 2020. Embodied Carbon Reduction Strategies for Buildings. ICSBE 2018: Proceedings of the 9th International Conference on Sustainable Built Environment. Springer Nature Singapore Pte Ltd. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-9749-3>.

Malmqvist et al. 2018. Design and construction strategies for reducing embodied impacts from buildings - case study analysis. Energy and Buildings. Vol. 166. s. 35–47. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.033>.

Naqi A, Jang J. 2019. Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review. Sustainability 2019, 11. Vol. 537. 18 s. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su11020537>.

Pasanen P, Korteniemi J, Sipari A. 2011. Passiivitasen asuinkerrostalon elinkaaren hiilijalanjälki. Sitran selvityksiä 63. 36 s. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/julkaisut/passiivitasen-asuinkerrostalon-elinkaaren-hiilijalanjalki/>.

Prakasan S. et al. 2020. Study of energy use and CO₂ emissions in the manufacturing of clinker and cement. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2020;101(1). s. 221-232. <https://doi.org/10.1007/s40030-019-00409-4>.

Punkki J, Lounamaa A, Junnila S. 2010. Betonirakenteiden merkitys rakennuksen elinkaaren aikaisista hiilidioksidipäästöistä. Betoni 1/2010. s. 46–49. Saatavissa: https://issuu.com/kivirakentaminen/docs/bet1001_koko_lehti/47.

Punkki J. 2019. Hiilipihi valmistus- ja betoniteknologia. Esitelmä annettu Betoniteollisuuden Kesäseminaarissa 2019. Saatavissa: <https://betoni.com/wp-content/uploads/2019/08/10.-Jouini-Punkki.pdf>

Ruuska A, Häkkinen T. 2013. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset – Taustaraportti. VTT. 97 s. Saatavissa: https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2013/YM_Taustaraportti.pdf

- Ruuska A, Häkkinen T, Vares S, Korhonen M, Myllymaa T. 2013. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset. Ympäristöministeriön raportteja 8:2013. Helsinki. 40 s. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/41423>.
- Ruuska, A, Häkkinen T. 2014. Material Efficiency of Building Construction. Buildings 2014. Vol. 4. Issue 3. s. 266–294. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/buildings4030266>.
- Ruuska A, Häkkinen T. 2015. The significance of various factors for GHG emissions of buildings. International Journal of Sustainable Engineering. Vol. 8. Issue 4–5. s. 317–330. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/19397038.2014.934931>.
- Röck M, Saade M, Balouktsi M, Rasmussen F, Birgisdottir H, Frischknecht R, Habert G, Lützkendorf T, Passer A. 2020. Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. Applied Energy. Vol. 258. 12 s. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>.
- Sathre R, O'Connor J. 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. Environmental Science & Policy. Vol. 13. Issue 2. s. 104–114. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005>.
- Scrivener K., Vanderley J., Ellis G., UN Environment. 2018. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. Cement and Concrete Research. Vol. 114. s. 2–26. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- Siitonen S, Tuomaala M, Ahtila P. 2010. Variables affecting energy efficiency and CO₂ emissions in the steel industry. Energy Policy. Vol. 38. Issue 5. s. 2477–2485. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.042>.
- Säynäjoki A, Heinonen J, Junnila S. 2011. Carbon footprint assessment of a residential development project. International Journal of Environmental Science and Development. Vol. 2. Issue 2. s. 116–123. Saatavissa: <https://doi.org/10.7763/IJESD.2011.V2.107>.
- 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. Vol. 7. Issue 3. s. 1–10. Saatavissa: <http://iopscience.iop.org/1748-9326/7/3/034037>.
- Toppinen A, Röhr A, Pätäri S, Lähtinen K, Toivonen R. 2018. The future of wooden multistory construction in the forest bioeconomy – A delphi study from Finland and Sweden. Journal of Forest Economics. Vol. 31. s. 3–10. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2017.05.001>.
- Valtioneuvosto. 2019. Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi. Pääministeri Marinin hallituksen hallitusohjelma. 3. Strategiset kokonaisuudet: 3.1. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma>.
- Vares S, Häkkinen T, Vainio T. 2017. Rakentamisen hiilivarasto. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Asiakasraportti, No. VTT-CR-04958-17. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B2859F537-ECD2-479D-A62B-F13AD75403F2%7D/136827>.
- Väisänen P. 2007. Teräs – Perustietoa arkkitehtipiskelijälle. TKK Arkkitehtiosasto, Rakennusoppi. ISBN 978-951-22-8651-5. 88 s. Saatavissa: http://arkkitehtuuri.tkk.fi/oppituolit/ro/julkaisut/Teras_web.pdf.
- Ympäristöministeriö. 2020. Ilmastolain uudistus. Saatavissa: https://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Ymparistonsuojelun_valmisteilla_oleva_lainsaadanto/Ilmastolain_uudistus.
- Ympäristöministeriö. 2019. Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriön julkaisuja 22. 58 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-029-3>.

Verkkolähteet

- Bionova Oy. 2020. Simple EPD guide: what, why, how, whom for? Yrityksen internet-sivut. Saatavissa (viitattu 3.2.2020): <https://www.oneclicklca.com/simple-epd-guide/>.
- Energiateollisuus. 2020. Ilmastoneutraalimpaa energiantuotantoa. Uutinen. Saatavissa (viitattu 10.9.2020): https://energia.fi/energiasta/vastuullisuus/ilmastoneutraali_energia.
- EPD-Norge. 2020. Norjan EPD-yhdistyksen internetsivut. Saatavissa (viitattu 12.8.2020): <https://www.epd-norge.no/building-materials/category417.html>.
- Parma. 2019a. Ontelolaattojen ympäristöseloste. Saatavissa (viitattu 25.9.2020): https://cer.rts.fi/wp-content/uploads/rtsepd_28-19_parmaoy_ontelolaatta-1.pdf.
- Parma. 2019b. Teräsbetonisuorakaidepilarien ympäristöseloste. Saatavissa (viitattu 26.9.2020): https://cer.rts.fi/wp-content/uploads/rtsepd_30-19_parma_tb-suorakaidepilari-1.pdf.
- Peikko Group. 2020. Peikon uusi DELTABEAM® Green -liittopalkki vähentää CO₂-päästöjä jopa 50 %. Yrityksen internet-sivut. Saatavissa (viitattu 12.8.2020): <https://www.peikko.fi/news/peikon-uusi-deltabeam-r-green-liittopalkki-vahentaa-co2-paastoja-jopa-50/>.
- Puutuoteteollisuus ry. 2019. Suomalainen kuivattu sahatavara kuusi- tai mäntypuusta. Ympäristöseloste. Saatavissa (viitattu 22.7.2020): https://cer.rts.fi/wp-content/uploads/rts-epd-27-19_puutuoteteollisuus_suomalainen-kuivattu-sahatavara_allekirjoitettu.pdf.
- Rakennusteollisuus RT. 2020. Rakennuksen laskennallinen hiilijalanjälki voi vaihdella huomattavasti käytettyjen laskentaoletusten mukaan. Tiedote. Saatavissa (viitattu 21.9.2020): <https://www.epressi.com/tiedotteet/rakentaminen/rakennuksen-laskennallinen-hiilijalanjalki-voi-vaihdella-huomattavasti-kaytettyjen-laskentaoletusten-mukaan.html>.
- Rakennustietosäätiö. 2020. Ympäristöseloste EPD. Säätiön internet-sivut. Saatavissa (viitattu 5.3.2020): <https://cer.rts.fi/epd-ymparistoseloste/>.
- Rudus. 2020. Vihreä betoni. Yrityksen internet-sivut. Saatavissa (viitattu 5.10.2020): <https://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/vihrea-betoni/5798/vihrea-betoni>.
- Saint-Gobain. 2020. Vähähiilisen rakentamisen ratkaisut. Yrityksen internet-sivut. Saatavissa (viitattu 6.10.2020): https://www.saint-gobain.fi/vastuullisuus/kestava_rakentaminen.
- Skanska. 2019. Grön betong -betonin ympäristöseloste. Saatavissa (viitattu 8.10.2020): <https://www.epd-norge.no/ferdig-betong/gron-betong-article2053-317.html>.
- Skedsmo Betong. 2020. B35 M45 CEM III/B, Lavkarbon Ekstrem -betonin ympäristöseloste. Saatavissa (viitattu 8.10.2020): [https://www.epd-norge.no/ferdig-betong/b35-m45-cem-iii-b-lavkarbon-ekstrem-article 2640-317.html](https://www.epd-norge.no/ferdig-betong/b35-m45-cem-iii-b-lavkarbon-ekstrem-article%202640-317.html).
- Swerock. 2020. Sweexp55 C30/37 -betonin ympäristöseloste. Saatavissa (viitattu 8.10.2020): https://www.epd-norge.no/getfile.php/1313394-1588669197/EPDer/Byggevarer/Ferdig%20betong/NEPD-2041-914_Betong%281%29.pdf.
- Teknologioteollisuus ry. 2020. Giant investment reduces 7 % of Finland's Carbon Dioxide emissions – The fast-track investment by SSAB is a real benchmark from the technology industry. Artikkel. Saatavissa (viitattu 20.4.2020): <https://teknologioteollisuus.fi/en/ajankohtaista/article/giant-investment-reduces-7-finlands-carbon-dioxide-emissions-fast-track>.
- Thomas Betong. 2019. C32/30, XC4. CEM I 42,5 N -betonin ympäristöseloste. Saatavissa (viitattu 9.10.2020): https://www.epd-norge.no/getfile.php/139975-1550836240/EPDer/Byggevarer/Ferdig%20betong/NEPD-1708-694_AnI--ggningsprodukt-med-f--reskrivet-vct-0-50.pdf.

VTT. 2018. Hiilikädenjälki: Uusi ympäristömittari tuotteiden positiivisten ilmastovaikutusten arviointiin. Lehdistötiedote. Saatavissa (viitattu 8.9.2020): [https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-jat
tarinat/hiilikadenjalki-uusi-ymparistomittari-tuotteiden-positiivisten](https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-jat tarinat/hiilikadenjalki-uusi-ymparistomittari-tuotteiden-positiivisten).

YIT Suomi Oyj. 2020. Kestävä kehitys. Yrityksen internet-sivut. Saatavissa (viitattu 28.1.2020): <https://www.yitgroup.com/fi/kestavakehitys>.

LIITE A: ILMASTONMUUTOSVAIKUTUS (CO₂E) ELEMENTEITTÄIN

Ilmastonmuutosvaikutus, kgCO ₂ e/m ² /a																		
	Alkuperäinen	Onteloväli	Paikallavali	Deltabeam Green	40 % vähäpäästöisempi betoni, välipohja	40 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakenne	40 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakenne ja perustukset	60 % vähäpäästöisempi betoni, pv-välipohja	60 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakenne	60 % vähäpäästöisempi betoni, vaakarakenne ja perustukset	40 % vähäpäästöisempi betoni, pystyrakenne	60 % vähäpäästöisempi betoni, pystyrakenne	60 % vähäpäästöisempi betoni, pystyrakenne	60 % vähäpäästöisempi betoni, pystyrakenne, per. ja Deltabeam Green	Puurakenne	Vihreä ontelovälipohja, P37	Vihreä ontelovälipohja, P37 & P27	Vihreä ontelovälipohja, P37 & P27 & parkkihelli vihreä P50
Sähkön käyttö	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Kaukolämmön käyttö	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18	9,18
1212 Perustukset: Muurit/pilarit/palkit	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
2120. Vesi- ja viemärijärjestelmät	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
1122 Tuennat ja vahv.: Pysyvät	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
1220 Alapohjat	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,36	0,44	0,44	0,31	0,44	0,31	0,44	0,31	0,44	0,44	0,44	0,44
1110 Maatyöt	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
1121 Tuennat ja vahv.: Paalut	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
1211 Perustukset: Anturat	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,07	0,10	0,10	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10
1231 Runko: Väestönsuojat	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,11	0,14	0,14	0,10	0,14	0,10	0,14	0,10	0,14	0,14	0,14	0,14
1123 Tuennat ja vahv.: Vahvistukset	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1241 Julkisivut: Ulkoseinät	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,37	0,36	0,36	0,36	0,20	0,42	0,42	0,42
1242 Julkisivut: Ikkunat	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
1232 Runko: Kantavat seinät	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,60	0,56	0,56	0,56	0,04	0,90	0,90	0,90
1233 Runko: Pilarit	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02
1311 Väliseinät: Väliseinät	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,44	0,09	0,09
1236 Runko: Runkoportaat	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
1355. Tilaelementit: Hormi	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
1317 Väliseinät: Tilaportaat	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1234 Runko: Palkit	0,32	0,32	0,32	0,26	0,32	0,24	0,24	0,32	0,20	0,20	0,32	0,20	0,32	0,14	0,05	0,32	0,32	0,32
1235 Runko: Välipohjat	1,65	1,63	1,77	1,65	1,47	1,41	1,41	1,25	1,14	1,14	1,87	1,14	1,87	1,14	0,87	1,27	1,21	1,04
1260 Vesikatot	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10	0,10
1250 Ulkotasot	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,07	0,18	0,18	0,18
1351. Tilaelementit: Kylpyhuone	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
1331 Kiintokalusteet	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
1353. Tilaelementit: Sauna	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
1243 Julkisivut: Ulko-ovet	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1315 Väliseinät: Väliovet	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
1316 Väliseinät: Erityisovet	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1321 Pintarakenteet: Lattiapintarak.	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,65	0,63	0,72	0,61	0,59	0,72	0,59	0,72	0,59	0,34	0,72	0,72	0,72
1323 Pintarakenteet: Sisäkattorak.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1325 Pintarakenteet: Seinäpintarak.	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
1130 Tontin päällysteet	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
2150. Palontorjuntajärjestelmät	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
1354. Tilaelementit: Talotekniikan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2130. Ilmastointijärjestelmät	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
S1. Asennus- ja apujärj.	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
2511. Hissit	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
S220. Sähkön pääjakelu	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
S250. Valaistusjärjestelmät	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
S212. Sähkön tuotantöj. ja -laitteistot	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2110. Lämmitysjärjestelmät	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
A4 Kuljetus työmaalle (taulukkoarvo)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
A5 Uudisrakennustyömaan toiminnot (taul.)	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
B3-4 Korjausten energiankulutus (taul.)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
C1 Purkutyömaan toiminnot (taul.)	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
C2 Kuljetus jatkokäsittelyyn (taul.)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
C3-4 Jätteenkäsittely ja loppusijoitus (taul.)	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Yhteensä	20,15	20,13	20,27	20,09	19,96	19,77	19,59	19,75	19,41	19,15	20,02	18,75	19,97	18,69	17,98	19,77	19,71	19,54