

Tuomas Laitinen

**VÄHÄHIILISEN BETONIN KÄYTTÖ ELE-
MENTTIKERROSTALORAKENTAMI-
SESSA HIILIJALANJÄLJEN NÄKÖKUL-
MASTA**

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Professori Arto Saari
Väitöskirjatutkija Tuomo Joensuu
Tammikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Tuomas Laitinen: Vähähiilisen betonin käyttö elementtikerrostalorakentamisessa
hiilijalanjäljen näkökulmasta
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Tammikuu 2024

Ilmastonmuutos on jatkunut jyrkkää kehitystään esiteollisesta ajasta lähtien ja tilanne on käymässä kestäättömäksi. Maailman päättävät elimet ovat reagoineet ilmastonmuutoksen pysäyttämiseksi. Rakennusala on yksi suurimmista päästöjen aiheuttajista maailmanlaajuisesti ja siksi sen hiilijalanjäljen rajoittamiseksi on ryhdytty toimiin. 2025 tammikuussa astuu Suomessa voimaan uusi rakentamislaki, joka asettaa vaatimuksen ilmastonselvityksestä, materiaaliselosteesta sekä mahdollisuuden asettaa hiilikaton rakentamisluvan myöntämiseksi. Lisäksi kaavoitus vaatii enenevässä määrin puun käyttöä kerrostalorakentamisessa, mikä nostaa rakentamisen kustannuksia betonirakentamiseen verrattuna.

Tilanne asettaa rakennuttajille paineita varautua tulevaisuuden haasteisiin selvittämällä keinoja rakentamisen elinkaaren hiilipäästöjen vähentämiseksi. Tämä tutkimus keskittyy erityisesti kerrostalorakentamisen materiaalien tuotevaiheen hiilipäästöjen arviointiin sekä keinoihin laskea betonirakentamisen hiilipäästöjä vähähiilisen betonin avulla. Päättävänä tavoitteena on selvittää, voidaanko betonirakentamisessa tällä hetkellä vähähiilistä betonia hyödyntämällä päästä puutaloa vastaavaan hiilijalanjälkeen. Sivutavoitteena on kartoittaa vähähiilisen betonin käytön kustannuksia tämän hetken markkinoilla.

Tutkimuksen teoriaosuudessa käsitellään syitä rakennuslain muutokselle, tutustutaan rakennushankkeen hiilipäästöjen jakautumiseen, vähähiiliseen betoniin ja selvitetään, kuinka rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki arvioidaan.

Tutkimuksen käsittelyosuudessa tutkitaan kolmea lähes identtistä T2H Pirkanmaa Oy:n kerrostaloa. Näistä yksi on puutalo, toinen hybriditalo ja kolmas betonitalo. Betonitalo on hybriditalon teoreettinen variantti. Näille lasketaan kullekin Ympäristöministeriön menetelmän mukaiset elinkaaren hiilijalanjälkiarviot Suomen kansallista päästötietokantaa hyödyntäen. Näitä tutkitaan ja vertaillaan rakennetasolla toisiinsa.

Tutkimuksessa ilmenee, että vähähiilisellä betonilla ei voi tällä hetkellä päästä puurakentamista vastaaviin päästölukemiin ja vähähiilistä betonia pystyy ylipäänsä käyttämään vain runkorakenteissa. Betonitalon kokonaishiilipäästöjä onnistuttiin tiputtamaan noin 5 %. Materiaalien hiilipäästöt tippuivat 16,5 % vähähiilistä betonia hyödyntämällä. Kohderakennuksissa puutalon materiaalien hiilijalanjälki oli 33 % perinteisestä betonista valmistetun materiaalien hiilijalanjälkeä pienempi. Vähähiilisen betonin käytön todettiin nostavan betonituotteen hintaa noin 5–10 %.

Lisähuomiona tutkimuksessa havaittiin, että hybridirakentamisessa voisi tällä hetkellä olla vähähiilistä betonia suurempi potentiaali päästöjen vähentämisessä.

Avainsanat: Vähähiilinen betoni, betonielementti, hiilijalanjälki, elinkaariarviointi, LCA, kerrostalo, materiaalin hiilijalanjälki.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Tuomas Laitinen: the use of low-carbon concrete in element apartment building construction from the perspective of carbon footprint
Master's thesis
Tampere University
Degree program in civil engineering
January 2024

Climate change has continued its steep trajectory since the pre-industrial era, and the situation is becoming unsustainable. Global governing bodies have responded to mitigate climate change. The construction industry is one of the largest contributors to emissions worldwide, prompting measures to limit its carbon footprint. In January 2025, a new construction law will come into effect in Finland, mandating climate assessments, material declarations, and the option to set a carbon cap for construction permits. Additionally, urban planning increasingly requires the use of wood in apartment building construction, leading to higher costs compared to concrete construction.

This situation places pressure on developers to prepare for future challenges by exploring methods to reduce carbon emissions throughout the construction lifecycle. This research focuses specifically on assessing the carbon emissions in the product phase of materials used in apartment building construction and exploring ways to reduce carbon emissions in concrete construction using low-carbon concrete. The main objective is to determine whether, by currently utilizing low-carbon concrete in concrete construction, it is possible to achieve a carbon footprint like that of a wooden house. A secondary objective is to investigate the costs associated with the use of low-carbon concrete in the current market.

The theoretical part of the research discusses the reasons for changes in building regulations, explores the distribution of carbon emissions in construction projects, introduces low-carbon concrete, and explains how the carbon footprint of a building's lifecycle is assessed.

In the practical part of the research, three nearly identical apartment buildings from T2H Pirkanmaa Oy. are examined. One is a wooden house, another is a hybrid house, and the third is a concrete house—a theoretical variant of the hybrid house. The carbon footprint estimates for each building are calculated using the methodology of the Finnish national emission database. These estimates are then analyzed and compared at the building level.

The research reveals that, at present, low-carbon concrete cannot achieve emissions comparable to wooden construction, and low-carbon concrete can only be feasibly used in structural elements. The total carbon emissions of the concrete building were reduced by approximately 5%, and material emissions were reduced by 16.5% with low-carbon concrete. In terms of material carbon footprint, the wooden house had a 33% lower footprint than traditional concrete. The use of low-carbon concrete was found to increase the price of concrete products by approximately 5–10%.

As an additional observation, the research suggests that hybrid construction may currently have greater potential for emissions reduction compared to the use of low-carbon concrete.

Keywords: Low-carbon concrete, concrete element, carbon footprint, life cycle assessment, LCA, apartment building, material carbon footprint.

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

ALKUSANAT

Tämän diplomityön valmistuminen merkitsee loppua vuonna 2018 aloittamalleni pitkälle taipaleelle, jolle ei loppua näkynyt ennen kuin se yllättäen päättyi. Kiitollisin mielin katson nyt takana olevaa opiskeluaikaa, joka kasvatti minua niin ihmisenä kuin akateemisesti.

Haluan kiittää T2H Pirkanmaa Oy:tä sekä ohjaajaani Niko Syriä niin hyvästä tutkimusaiheesta, että vain työhön ryhtyminen oli tutkimuksen ääreltä nousemista haastavampaa. Kiitos myös yliopiston ohjaajalleni Arto Saarelle, joka antoi minulle vapaat kädet toteuttaa itseäni aiheeni parissa. Kiitos taisteluparilleni, jonka vaikutuksesta opiskelu oli varsin siedettävää sekä työt tehtiin ajallaan ja kurssit suoritettiin napakasti tahdissa. Erityiskiitos ystäville, joiden ansiosta opiskeluvuoteni ovat olleet elämäni parhaita.

Tampereella, 11.1.2024

Tuomas Laitinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	1
1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne	2
2. RAKENTAMINEN OSANA ILMASTON LÄMPENEMISTÄ	4
2.1 Ilmaston lämpeneminen	4
2.2 Rakennusalan vaikutus ilmaston lämpenemiseen	5
2.3 Lainsäädäntö	6
2.3.1 Euroopan Unioni ilmastotavoitteet	6
2.3.2 Suomen ympäristöministeriön ilmastotoimet	7
3. ASUINKERROSTALON HIILIJALANJÄLKI	10
3.1 Rakennushankkeen hiilidioksidipäästöjen jakautuminen	10
3.2 Materiaaleihin sitoutuneiden hiilidioksidipäästöjen jakautuminen	14
4. VÄHÄHIILINEN BETONI	18
4.1 Mitä on vähähiilinen betoni	18
4.2 BY-vähähiilisyysluokitus	21
5. RAKENNUKSEN ELINKAARIARVIOINTI	26
5.1 Mitä on elinkaariarviointi?	26
5.2 Rakennuksen elinkaarilaskennan vaiheet	27
5.2.1 Moduulit	27
5.2.2 Hiilijalanjäljen arviointimenetelmä	28
5.2.3 Hiilikädenjäljen arviointimenetelmä	32
5.2.4 Raportointi	32
6. LASKENNAN KOHTEET JA TOTEUTUS	35
6.1 Kohderakennukset	35
6.2 Kansallinen päästötietokanta	37
6.3 Laskennan toteutus	41
7. LASKENNAN TULOKSET	43
7.1 Pähkinä – Puutalo	43
7.2 Kirsikka – Hybriditalo	46
7.3 Kirsikka – Betonitalo	48
8. TULOSTEN ANALYSOINTI	51
8.1 Tulosten vertailu	51
8.2 Hiilipäästöjen vähentäminen	54
8.3 Tutkimuksen arviointi ja luotettavuus	57
9. JOHTOPÄÄTÖKSET	60
9.1 Tulosten pohdintaa	60

9.2	Jatkotutkimustarpeen esittäminen	61
9.3	Vihreä siirtymä ja uusi rakentamislaki	62
LÄHTEET	64

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Ilmastonmuutos on aikamme uhka. Kasvihuonekaasujen määrä ilmakehässä on esiteolisen ajan alusta noussut hälyttävää tahtia ja on jo nyt nostanut maapallon ilmaston keskilämpötilaa yhdellä celsiusasteella. Moni poliittinen elin on nostanut päänsä asian tiimoilta. IPCC:n raportin mukaan ilmaston lämpeneminen on rajattava 1,5 celsiusasteeseen vakavimpien seurausten välttämiseksi. Euroopan Unioni on reagoinut maapallon hätähuutoon. Euroopan komissio asettaa ilmastotavoitteita, joihin Unionin jäsenvaltiot vastaavat. (Euroopan Unioni 2023a)

Rakentaminen aiheuttaa suuren osan ihmiskunnan kasvihuonepäästöistä. Suomen Ympäristöministeriö pyrkii vähentämään rakentamisen aiheuttamia hiilipäästöjä uudella rakentamislakilla, joka ohjaa rakentamaan vähähiilisesti. Laki astuu voimaan 1.1.2025. Vähähiilisyttä ohjataan lain nojalla myöhemmin annettavilla asetuksilla. Asetukset materiaaliselosteesta, ilmastoselvityksestä sekä hiilijalanjäljen raja-arvoista tulevat osaksi suomalaista rakennusmääräyskokoelmaa. (Ympäristöministeriö 2022b)

Uusi rakentamislaki tuottaa haasteita, mutta toisaalta myös potentiaalisia kilpailuvaltteja rakennusalan yrityksille. Toimeksiantajayritykselläni T2H Rakennus Oy:llä on syntynyt tarve varautua tuleviin lakimuutoksiin. Elinkaariarviointi ja hiilijalanjäljen raja-arvo ovat pian rakentamisluvan saamisen ehtona (Ympäristöministeriö 2022b). Puurakentamisella raja-arvon saavuttaminen olisi luultavasti helppoa, mutta ongelmaksi muodostuu sen hinta. Halutaan selvittää, voiko betonirakentamisella päästä vastaaviin tuloksiin. Ennen lakiuudistuksen voimaantuloa on opittava, kuinka elinkaariarviointia tehdään ja selvitetävää, kuinka rakentamisen hiilijalanjälkeä voidaan vähentää järkevin kustannuksin, jotta toiminta voi jatkua myös tulevaisuudessa.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tutkimuksen aiheena on vähähiilisen betonin hyödyntäminen betonikerrostalorakentamisessa. Ensimmäinen tavoite on selvittää, kuinka paljon hiilipäästöjä voidaan vähentää käyttämällä perinteisen betonin sijasta vähähiilisempiä betoneja, ja kuinka betonirakentamisen hiilipäästöt vertautuvat puurakentamiseen. Tällä pyritään selvittämään, voi-

daanko puurakentamisen sijaan rakentaa vähähiilisestä betonista ja silti päästä vastaviin tuloksiin hiilijalanjalan suhteen. Toinen tavoite on selvittää, mihin rakenteisiin vähähiilistä betonia on saatavilla ja mitä se kustantaa. Tarkkoja lukuja kustannusten suhteen ei ole mielekäästä selvittää, koska vähähiilisten betonituotteiden kehitys on tällä hetkellä nopeaa ja markkinat ovat muutoksessa. Henkilökohtaisena lisätavoitteena on myös tehdä tästä tutkimuksesta oppimisprosessi, jonka tavoitteena on saavuttaa taidot Ympäristöministeriön elinkaariarvioinnin suorittamiseen.

Tutkimuksessa huomioidaan koko rakennuksen hiilijalanjälki, mutta pääasiallisen tarkastelun kohteena on tuotevaiheen moduulit A1-A3, jotka sisältävät raaka-aineen hankinnan, kuljetusten ja jalostuksen tuottamat hiilipäästöt. Tällöin tutkimus keskittyy materiaalien päästöihin. Tutkimuksessa tarkasteltavia rakennusosia ovat ne, joissa on mahdollista pienentää hiilijalanjälkeä merkittävästi vähähiilistä betonia hyödyntämällä. Näitä rakennusosia ovat perustukset, ala-, väli- ja yläpohjat, kantavat väliseinät, kantavat ja eikantavat ulkoseinät sekä ulkotasojen laatat ja piletit. Päästöihin viitataan usein hiilidioksidiekvivalentteina (CO₂e).

Tarkastelun ulkopuolelle jätetään muun muassa vähäisemmät sementtipohjaiset tuotteet, kuten laastit, tasoitteet ja pienivolyymiset betonirakenteet sekä pintamateriaalit, maaosat, vesikatteet, ikkunat, ovet ja kiintokalusteet, vaikka nämä kyllä huomioidaan elinkaariarvioinnissa.

Elinkaariarvioinnin lasketa huomioi tarkasti tuotevaiheen moduulit A1-A3, käyttövaiheen moduulin B6 (ostoenergiankulutus), sekä purkuvaiheen moduulit C3-C4 (Purkujätteen kierrätys ja loppusijoitus). Muut elinkaariarvioinnin vaiheet eivät olleet tutkimuksen kannalta oleellisia ja on huomioitu vain ympäristöministeriön taulukkoarvojen mukaisesti.

Teoriaosuudessa käydään läpi syitä uusille lakimuutoksille ja selvitetään elinkaarilaskijalle oleellista informaatiota vähähiilisestä betonista ja elinkaarilaskennasta. Betonia käsitellään kovin pintapuolisesti raaka-aine- ja valmistustasolla.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Tutkimus jakautuu johdantoon, teoreettisen osuuteen kirjallisuuskatsauksen muodossa, käsittelyosuuteen, jossa esitetään empiirisen laskennan toteutus, tulokset sekä vertailu, ja johtopäätöksiin, joissa tulosten merkitystä pohditaan.

Työ aloitetaan toisessa luvussa selvittämällä syyt rakennuslain uudistukseen eli kartoitetaan ilmastonmuutoksen viitekehys ja raportoidaan Euroopan unionin sekä Suomen

valtion reaktiot siihen rakennusalan näkökulmasta. Tämä suoritetaan kirjallisuuskatsauksella, jossa lähteinä käytetään Euroopan Unionin, suomalaisten rakennusalan yhdistysten sekä Suomen Ympäristöministeriön sivuja.

Kolmannessa luvussa perehdytään kerrostalorakentamisen hiilipäästöjen jakautumiseen perehtymällä Ruuskan & Häkkisen (2014) tutkimukseen eri tekijöiden vaikutuksesta kerrostalorakentamisen päästöihin. Tämä tehdään pääasiassa osana omaa oppimisprosessia, mutta myös vertailukohdaksi tässä työssä tehtävän laskennan luotettavuuden määrittämiseksi. Huomion arvoista on, että heidän tutkimuksensa tiedot ostoennergian hiilijalanjäljestä ovat vanhentuneet, koska Ympäristöministeriön menetelmän mukainen arvio ostoennergian hiilijalanjäljestä huomio tulevaisuuden päästövähennemät toisin kuin Ruuskan & Häkkisen (2014) tutkimuksessa.

Neljännessä luvussa tutustutaan vähähiiliseen betoniin liittyvään informaatioon sekä Betoniyhdistyksen vähähiilisyysluokitukseen, sillä sen tunteminen on rakennuttajan näkökulmasta oleellista, mikäli haluaa käyttää vähähiilisiä betonia rakennushankkeissaan. Tämä suoritetaan kirjallisuuskatsauksena käyttämällä lähteenä alan kirjallisuutta ja Betoniyhdistyksen internetsivustoa.

Viidennessä luvussa selvitetään, mitä on elinkaariarviointi ja tutustutaan Ympäristöministeriön rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen arviointimenetelmään, minkä pohjalta kohderakennusten elinkaarilaskenta lopulta toteutetaan.

Luvut kuudesta kahdeksaan ovat tutkimuksen käsittelyosuus. Käsittelyosuudessa esitellään kohderakennukset, tietolähteet materiaalien hiilijalanjälkien arvioimiseksi sekä laskennan toteutuksen kulku, laskennasta syntyneet tulokset sekä niiden vertailu. Tutkimusmenetelmänä on käytetty empiiristä laskentaa, joka tapahtui kohderakennuksista tehtyjen tietomallien sekä detaljipiirustusten avulla. Yhdeksäs ja viimeinen luku sisältää johtopäätökset, eli pohdintaa tulosten merkityksestä ja Ympäristöministeriön arviointimenetelmästä sekä jatkotutkimusehdotuksen.

2. RAKENTAMINEN OSANA ILMASTON LÄMPE- NEMISTÄ

2.1 Ilmaston lämpeneminen

Ihmisen toiminnalla on asteittainen vaikutus maapallon ilmastoon. Luonnollisesti ilmakehässä esiintyvät kasvihuonekaasut, mutta ihmisen toiminta lisää niitä merkittävästi. Ylimääräiset kasvihuonekaasut johtuvat pääasiassa fossiilisten polttoaineiden polttamisesta energiantuotannossa sekä muista ihmisen toimista, kuten rakentamisesta, sademetsien hakkuusta, maataloudesta, karjankasvatuksesta ja kemikaalien valmistuksesta. Yleisin ihmisen toiminnasta peräisin oleva kasvihuonekaasu on hiilidioksidi (CO₂). Nämä ylimääräiset kaasut tehostavat kasvihuoneilmiötä ilmakehässämme, mikä puolestaan johtaa maapallon lämpötilan nopeaan nousuun ja suuriin ilmastonmuutoksiin. (Euroopan Unioni 2023a)

Maapallon keskilämpötila on jo noussut yli yhden celsiusasteen verrattuna esiteolliseen aikaan. Kansainvälisen ilmastonmuutospaneelin (IPCC) tutkijat ovat varoittaneet, että jos maapallon lämpötila nousee 1,5 celsiusastetta, se voi aiheuttaa vakavia ja jopa peruuttamattomia vaikutuksia ympäristölle ja ihmisille. Mitä enemmän ilmastoa muutetaan, sitä suuremmiksi tulevat riskit yhteiskunnille ja ympäristölle. Kansainvälinen yhteisö on ottanut tehtäväkseen rajoittaa keskilämpötila nousua alle kahteen celsiusasteeseen. (Euroopan Unioni 2023a)

Ilmastonmuutoksen seuraukset korostuvat erityisesti infrastruktuurin ja rakennusten kannalta. Tämä johtuu niiden pitkästä elinkaaresta, korkeista alkuinvestoinneista ja keskeisestä roolista yhteiskunnan ja talouden toiminnassa. Rakennukset ja infrastruktuuri voivat olla alttiita ilmastonmuutoksen vaikutuksille, olipa kyse sitten suunnittelun (kuten puutteellinen myrskysietokyky) tai sijainnin (kuten tulvien, maanvyörymien tai lumivyöryjen riskialtiilla alueilla) haavoittuvuudesta. Ne voivat kärsiä vaurioita tai tulla käytökelvottomiksi seuraavien muuttuneiden ilmasto-olosuhteiden tai ääri-ilmiöiden seurauksena: merenpinnan nousu, runsaat sateet ja tulvat, poikkeuksellisen matalat tai korkeat lämpötilat, voimakkaat lumisateet ja myrskytuulet. (Euroopan komissio 2023a)

Ilmastonmuutos muodostaa uhan kaikille maailman yrityksille, mutta jotkut niistä ovat alttiimpia riskeille kuin toiset. Vaikutusten odotetaan osuvan erityisen voimakkaasti pienempiin ja keskisuuriin yrityksiin, mikä voi ilmetä liiketoiminnan häiriönä, omaisuuden vaurioitumisena sekä toimitusketjujen ja infrastruktuurin toiminnan häiriönä. Tämä puolestaan johtaa kasvaneisiin huolto- ja materiaalikustannuksiin sekä hintojen nousuun. On

kuitenkin huomionarvoista, että ilmastotoimenpiteet tarjoavat myös yrityksille monenlaisia uusia mahdollisuuksia kehittää tuotteita ja palveluita, jotka auttavat vähentämään päästöjä ja sopeutumaan ilmaston lämpenemiseen. (Euroopan komissio 2023)

2.2 Rakennusalan vaikutus ilmaston lämpenemiseen

Rakennettu ympäristö on ratkaisevassa roolissa ilmastonmuutoksen torjumisessa. Kansainvälisen Ilmastonmuutospaneelin (IPCC) tuottaman raportin mukaan rakentamisessa olisi suurin taloudellinen potentiaali kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi (Ruuska & Häkkinen 2014). Talonrakennuksissa käytetään lähes 40 prosenttia koko Suomen energiankulutuksesta, ja ne tuottavat yli 30 prosenttia kaikista päästöistä. Kun otetaan huomioon liikenne mukaan lukien, rakennetun ympäristön osuus energiankäytöstä nousee 60 prosenttiin ja päästöistä 55 prosenttiin. Rakennusten energiankulutuksen vähentäminen ja niistä johtuvien päästöjen pienentäminen ovat nyt keskeisiä tavoitteita ja vaatimuksia. Suurin mahdollisuus näiden tavoitteiden saavuttamiseksi piilee jo olemassa olevien rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa. Rakennetun ympäristön energiatehokkuuden parantaminen on taloudellisesti kannattavin tapa hillitä ilmastonmuutosta. (Rakennusteollisuus 2023)

Energian ja ympäristön kannalta on ensisijaisen tärkeää ottaa huomioon koko rakennuksen elinkaari, koska suurin osa rakennetun ympäristön aiheuttamista päästöistä syntyy rakennusten käytön aikaisesta energiankulutuksesta. Rakennuksia täytyy lämmitellä, jäähdyttää ja niissä kuluu sähköä, ja nämä toiminnot vaikuttavat merkittävästi niiden ympäristövaikutuksiin. Rakennusten energiatehokkuus ei siis rajoitu pelkästään rakennusvaiheeseen, vaan se ulottuu koko rakennuksen elinkaareen aina suunnittelusta rakentamiseen, käyttöön ja lopulta purkuun. (Rakennusteollisuus 2023)

Tässä tutkimuksessa keskitytään kuitenkin nimenomaan rakennusvaiheen aikaisiin päästöihin ja lähinnä runkomateriaalien valinnan kautta. Rakentamisen ja rakennusmateriaalien kasvihuonepäästöjen suuruusluokka kaikista elinkaaren aikaisista päästöistä on noin 20 prosenttia. Rakennusten energiatehokkuuden kehittyessä ja kasvihuonepäästöjen vähentyessä rakentamisvaiheen päästöjen suhteellinen osuus voi tulevaisuudessa kasvaa, jolloin on hyvä kehittää ratkaisuja, joilla rakennusaikaisia päästöjä voidaan pienentää. Toki rakennusmateriaalien päästöjä mietittäessä on otettava huomioon niiden teknisten ja toiminnallisten ominaisuuksien säilyminen pitkän elinkaaren alusta loppuun. (Rakennusteollisuus 2023)

2.3 Lainsäädäntö

2.3.1 Euroopan Unioni ilmastotavoitteet

Euroopan Unioni on toiminut pitkään edelläkävijänä ilmastonmuutoksen torjunnassa. EU pyrkii tehokkaasti vähentämään ilmastonmuutosta ottamalla käyttöön kunnianhimoisia toimia sekä Euroopassa että maailmanlaajuisesti yhteistyössä kansainvälisten kumppaneidensa kanssa. (Euroopan Unioni 2023a)

Vuonna 2007 Euroopan johtajat asettivat vuodelle 2020 tavoitteet ja säätivät lain 2009. Syntyi 2020 ilmasto- ja energiapaketti, joka varmisti, että EU saavuttaa ilmastotavoitteensa vuodelle 2020. Paketti asetti kolme avaintavoitetta:

- 20 % leikkaus kasvihuonepäästöihin vuoden 1990 tasosta
- 20 % Euroopan Unionin energiasta uusiutuvaa
- 20 % kehitys energiatehokkuudessa (Euroopan Komissio 2023b)

Vuonna 2019 kasvihuonepäästöt olivat tippuneet jo 24 % ja vuoden 2020 loppuun mennessä jopa 31 %. Tavoitteisiin siis päästiin, mutta paljolti koronaviruspandemian vuoksi. (Euroopan Parlamentti 2023)

Jatkona 2020 paketille kehitettiin 2030 ilmasto- ja energiaohjelma. Se sisältää Euroopan Unionin laajuiset tavoitteet ja menettelytavat vuosille 2021–2030. Osana European Green dealia EU komissio esitti vuonna 2020 40 % leikkausta kasvihuonepäästöihin vuoteen 2030 mennessä, mutta tavoitteita nostettiin entisestään ja lopulta ohjelma asetti seuraavat kolme avaintavoitetta:

- 55 % leikkaus kasvihuonepäästöihin vuoden 1990 tasosta
- 32 % Euroopan Unionin energiasta uusiutuvaa
- 32,5 % kehitys energiatehokkuudessa (Euroopan komissio 2023c)

EU tavoittelee ilmastoneutraaliutta vuoteen 2050 mennessä. Tavoitteena on saavuttaa talous, jossa kasvihuonekaasujen nettomääräiset päästöt ovat nolla. Tämä tavoite on Euroopan vihreän kehityksen keskiössä ja linjassa EU:n sitoumuksen kanssa maailmanlaajuisessa ilmastotoiminnassa Pariisin sopimuksen mukaisesti. Siirtyminen ilmastoystävälliseen yhteiskuntaan on sekä kiireellinen haaste että mahdollisuus rakentaa parempi tulevaisuus kaikille. Kaikki yhteiskunnan osa-alueet ja talouden sektorit osallistuvat tähän – sähköntuotannosta teollisuuteen, liikkuvuudesta rakentamiseen, maataloudesta metsätalouteen. EU voi johtaa tietä investoimalla realistisiin teknologisiin ratkaisui-

hin, tukemalla kansalaisia ja yhteensovittamalla toimintaa keskeisillä aloilla, kuten teollisuuspolitiikassa, rahoituksessa ja tutkimuksessa, samalla varmistaen sosiaalisen oikeudenmukaisuuden oikeudenmukaisen siirtymän aikaansaamiseksi. (Euroopan komissio 2023d)

EU:n jäsenvaltioiden on laadittava kansallisia pitkän aikavälin strategioita siitä, miten ne aikovat saavuttaa kasvihuonekaasupäästöjen vähennykset, jotka ovat tarpeen täyttääkseen sitoumuksensa Pariisin sopimuksen ja EU:n tavoitteiden mukaisesti. (Euroopan komissio 2023d)

2.3.2 Suomen ympäristöministeriön ilmastotoimet

Rakennusala, rakennustuotteissa ja rakentamisessa on merkittävä rooli ilmastonmuutoksen torjunnassa ja pyrittäessä kohti vähähiilisempää yhteiskuntaa. Rakentaminen ja rakennukset aiheuttavat noin kolmanneksen Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Jotta Suomi voisi saavuttaa sekä kansalliset että kansainväliset ilmastotavoitteensa, on välttämätöntä vähentää päästöjä myös rakennusala. (Ympäristöministeriö 2022a)

Ympäristöministeriön tavoitteena on ollut ohjata rakennusten elinkaaren aikaisia päästöjä lainsäädännöllä 2025 vuoden loppuun mennessä. Vuonna 2017 Ympäristöministeriö tilasi selvityksen, jossa luodaan suunnitelma tai "tiekartta" menetelmille, joilla voidaan vähentää rakentamisen ja erityisesti rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeä sekä pyritään edistämään Suomen kiinteistö- ja rakennusalan ilmastotavoitteita. (Ympäristöministeriö 2022b)

Tällä hetkellä rakennusmateriaalien ja -tuotteiden aiheuttamia päästöjä ohjataan pääosin vapaaehtoisilla päästöjen arviontimenetelmillä, kuten rakennustiedon ympäristöluokitus, kansainvälinen LEED ja brittiläinen BREEAM sekä EU:n komission testissä olevan level(s)-ympäristöraportointijärjestelmän avulla. Ympäristöministeriö on myös julkaissut oman Excel-pohjaisen työkalunsa rakennusten materiaalipäästöjen kartoitusta varten. (Ympäristöministeriö 2022b)

Ympäristöministeriön tilaaman selvityksen pohjalta julkistettiin kolmivaiheinen tiekartta rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljen rajoittamiseksi. Sanna Marinin hallituksen ohjelmassa sen toteutusta pyrittiin nopeuttamaan:

Vaihe 1: Testaus ja menetelmät 2017–2018

- Arviot ohjausmenetelmien vaikutuksista
- Hiilijalanjäljen laskentamallin ja päästötietokannan kehittäminen

- Osaamisen ja työkalujen kehittäminen
- Pilottihankkeita julkisissa rakennushankkeissa ja yksityisellä sektorilla

Vaihe 2: Ohjausjärjestelmän laatiminen

- Säädöksen valmistelu ja mahdollisten kannustimien suunnittelu
- Liittäminen kaavoitukseen ja energian ohjaukseen
- Pilottihankkeiden laajentaminen
- Rakennusten päästötietojen seurannan ja tilastoinnin valmistelu

Vaihe 3:

- Hiilijalanjäljen ilmoitusvelvollisuus ennen sitovien raja-arvojen voimaantuloa
- Rakennuskannan liittäminen ohjaukseen vaiheittain
- Rakennuskannan päästötietojen seuranta (Ympäristöministeriö 2022b)

VTT laati tiekartan vuonna 2018 päättyneen vaikutusarvion perusteella, ja siinä keskeisimmäksi ohjauskeinoksi todettiin raja-arvoihin perustuva säädosohjaus. Tämän avulla kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen voisi nousta noin puoleen miljoonaan tonniin vuodessa. (Ympäristöministeriö 2022b)

Tiekartan mukaan säädosohjaus suuntautuisi pääasiassa uudisrakentamiseen ja rakennuksen käytön aikaisen energiankulutuksen hallintaan. Koko rakennuksen elinkaaren päästöt arvioidaisiin eurooppalaisen standardoidun laskentamenetelmän perusteella. Ehdotuksen mukaisesti sitova sääntely ja rakennuskohtaiset raja-arvot otettaisiin käyttöön vaiheittain, aloittaen vapaaehtoisesta pilotoinnista, julkisista hankinnoista, ilmoitusvelvollisuudesta ja keskittymällä tärkeimpiin rakennustyyppeihin. Tiekartan toteuttamiseksi tarvitaan muun muassa kiinteistö- ja rakennusalan ammattitaidon parantamista ja ympäristötietouden lisäämistä koskien rakennustuotteita. Vaikka tiekartan toimeenpanoon liittyviä standardeja ja muita työkaluja on jo pääosin olemassa, tietomallinnuksen kaltaisten avustavien välineiden odotetaan helpottavan rakennusten hiilijalanjäljen laskentaa merkittävästi. On jo olemassa elinkaariarvojen laskentaohjelmia, jotka kykenevät laskemaan rakennuksen materiaalien hiilijalanjäljen syöttämällä sisään tarkoin valmistellun tietomallin. (Ympäristöministeriö 2022b)

Rakennusten elinkaarilaskentaa tehdään ja elinkaaren aikaisia ja rakennusmateriaalien päästöjä säännellään jo muutamissa Euroopan maissa. Muun muassa Hollannissa ja Ranskassa päästöjen ohjaus on astunut voimaan vuosina 2018 ja 2020. Ruotsissa uudisrakennuksilta on vaadittu ilmastotodistus vuoden 2021 jälkeen ja Norjan julkisissa rakennushankkeissa elinkaarilaskenta on pakollista. (Ympäristöministeriö 2020b)

Suomen lainsäädäntö ei tällä hetkellä sisällä rakennuksen vähähiilisuuden arviointia tai ilmastaselvitystä, mutta vuoden 2025 alusta voimaantulevan rakentamislain (751/2023) 38§:n myötä uudisrakennuksen tai laajamittaisen korjausrakennushankkeen rakennuslupa edellyttää ilmastaselvityksen tekemistä. Laskennassa on käytettävä kansallisen päästötietokannan (CO2data-palvelu) tietoja sekä rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmän (LEED, BREEAM, Level(s)) mukaisia ympäristöominaisuustietoja. Lainsäädäntö ei vielä sisältäisi sitovia raja-arvoja rakennuksen hiilijalanjäljelle, mutta se totuttaa rakennusyrietykset elinkaarilaskentaan. (Ympäristöministeriö 2021a)

Ympäristöministeriö on kehittänyt arviointimenetelmän rakennusten hiilijalanjäljen laskemiseksi. Tämä menetelmä on suunniteltu helpottamaan ilmastovaikutusten arviointia rakentamisessa ja se kattaa koko rakennuksen elinkaaren aina rakennustuotteiden valmistuksesta ja kuljetuksista työmaatoimintoihin, käyttöön, korjauksiin, purkamiseen ja kierrätykseen asti. Ensimmäinen versio arviointimenetelmästä julkaistiin testattavaksi rakennushankkeissa syksyllä 2019. Menetelmään tehtiin päivityksiä ja tarkennuksia vuoden 2020 testausjakson ja sitä seuranneen lausuntokierroksen perusteella. Päivitetty luonnos ohjeista rakennuksen vähähiilisuuden arvioinnista oli lausuntokierroksella vuonna 2021, yhdessä rakennuksen ilmastaselvityksen asetusluonnoksen ja sen perusteluistion kanssa. Rakennuksen ilmastaselvityksen asetusluonnos oli toisella lausuntokierroksella loppuvuodesta 2022. (Ympäristöministeriö 2022b)

Lopulliset ohjeet arviointimenetelmälle julkaistaan, kun ympäristöministeriön asetus rakennuksen vähähiilisuuden arvioinnista tulee voimaan. Tämän menetelmän perustana ovat Euroopan komission Level(s)-menetelmä ja EN-standardit 15804, 15978 ja 15643. (Ympäristöministeriö 2022b)

Ympäristöministeriön toimeksiannosta Suomen ympäristökeskus ylläpitää rakentamisen päästötietokantaa (CO2data-palvelu), joka tarjoaa puolueetonta dataa Suomessa käytettävien rakennustuotteiden ilmastovaikutuksista, materiaalihokkuudesta ja kierrätettävyydestä. Tietokannan tavoitteena on yhdenmukaistaa elinkaarilaskennan suorittamista ja vähähiilistä rakennuksen suunnittelua. Päästötietokanta helpottaa erityisesti ammattimaista suunnittelua ja tuotevalmistusta, mutta siitä on hyötyä myös kaikille ilmasto-vaikutuksista kiinnostuneille. (Ympäristöministeriö 2022b), (CO2data 2023)

3. ASUINKERROSTALON HIILIJALANJÄLKI

3.1 Rakennushankkeen hiilidioksidipäästöjen jakautuminen

Viimeaikoihin asti tutkimus rakentamisen energiatehokkuudesta on suuntautunut pääosin rakennusten käytönaikaiseen energiatehokkuuteen, pääosin sähköön, lämmitykseen ja viilennykseen. Hernandez & Kenny (2011) arvioivat rakennusmateriaalien vastanneen tyypillisesti noin 15 % koko rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä, jättäen käytönaikaisille päästöille 85 % prosentoinen osan kokonaishiilijalanjäljestä. Rakentamisprosessin, kuljetuksen ja purkamisen osuuden oli todettu olevan mitätön, noin 1 % luokkaa. (Adalberth 1997), (Hernandez & Kenny 2011)

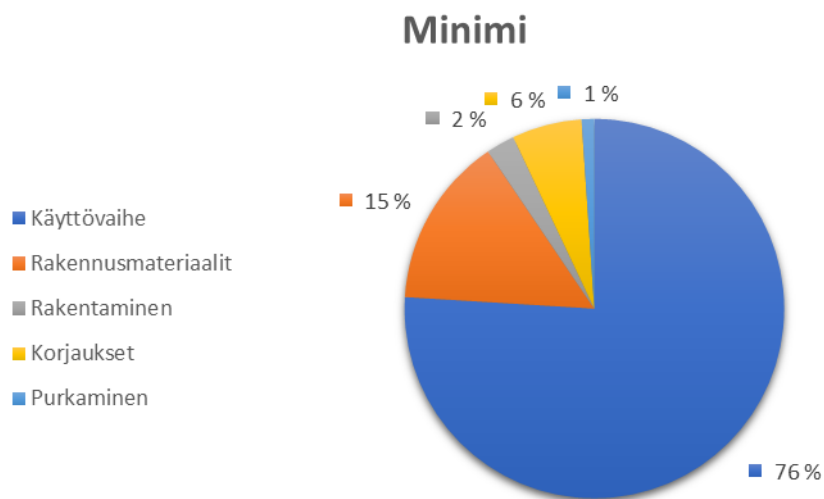
Rakennusten energiatehokkuus on parantunut merkittävästi johtuen lainsäädännöllisistä ja muista syistä. Kehittynyt energiatehokkuus on usein seurausta paremmasta eristyksestä ja kehittyneemmästä talotekniikasta, mikä yleensä lisää sitoutuneen hiilen määrää rakennuksessa. Näin sekä materiaalien absoluuttinen että suhteellinen osuus koko rakennuksen elinkaarenaikaisista päästöistä kasvaa. Kirjallisuudesta voidaan vetää yleisyys, että mitä matalaenergisempi talo, sitä suurempi on materiaaleihin sitoutuneen hiilidioksidipäästön osuus, ja toisinpäin. Riippumatta materiaaleihin sitoutuneen hiilen osuuden kasvusta, matalaenergiataloilla on useimmiten pienempi hiilijalanjälki tavallisiin rakennuksiin verrattuna. Tämä pätee vain tiettyyn pisteeseen asti; äärimmäiset eristyspaksuudet ja monimutkaiset talotekniset järjestelmät eivät välttämättä tarjoa optimaalista ratkaisua elinkaaren näkökulmasta. Mitä energiatehokkaampi talo, sitä tärkeämmäksi materiaaleihin sitoutuneen päästön osuus tulee. (Sartori & Hestnes 2007), (Hernandez & Kenny 2011)

Lisäksi tutkimukset osoittavat, että rakentamisen nopeasta ja suuresta hiilipiikistä johtuen rakennusvaiheen päästöt ovat ilmastonmuutoksen kannalta paljon merkittävämpiä kuin rakennusten elinkaaren päästöosuus antaisi ymmärtää, kun otetaan mukaan hiilipäästöjen ajallinen vaikutus (Säynäjoki et al. 2012).

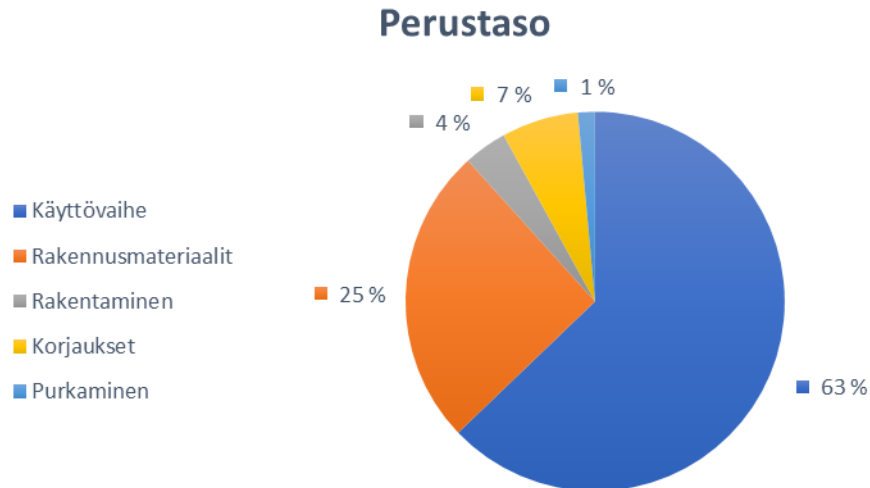
Ruuska & Häkkinen (2014) toteuttivat case-tutkimuksen suomalaisesta asuinkerrostalosta. Tutkimuksessa selvitettiin tyypillisen Suomalaisen kerrostalon hiilijalanjäljen jakautumista ja siinä keskityttiin erityisesti materiaaleista johtuviin päästöihin. Kyseistä kerrostaloa materiaaleineen ja rakenteineen käytettiin tutkimuksessa perustasona. Lisäksi tutkimuksessa arvioitiin "minimi-" ja "maksimiarvot" vastaavan kerrostalon rakentamishankkeen elinkaaren hiilijalanjäljelle, jotta voidaan arvioida päästöjen vaihteluväli. Laskelmat minimi- ja maksimi -skenaarioissa oletettiin samanlaiset käyttötarkoitukset, asumis- ja

rakennustilat, mutta tuotantomenetelmät ja materiaalit olivat erilaiset. Esimerkiksi minimitasolla runkomateriaalina on käytetty puuta, perustasolla betonisia ulkoseiniä ja kipsiväliseiniä, ja maksimitasolla massiivisia betonielementtejä. (Ruuska & Häkkinen 2014)

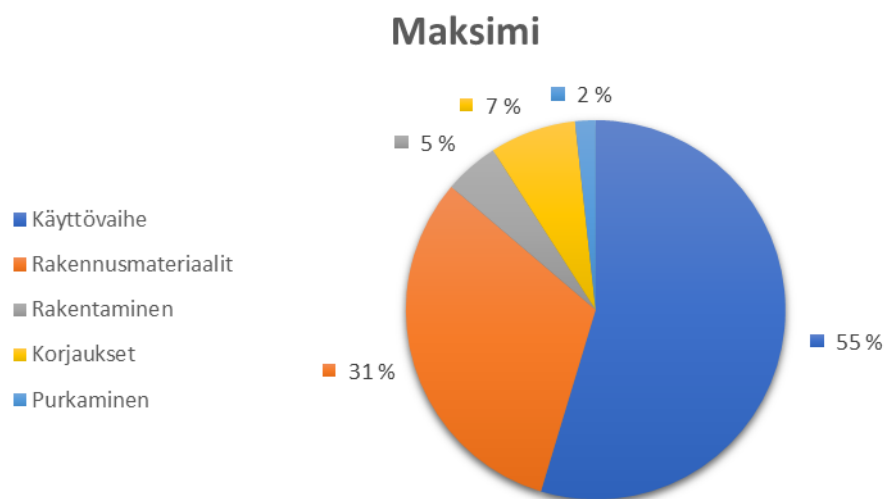
Tutkimuksessa havaittiin, että tuotantomenetelmien ja materiaalien valinnoilla on suuri merkitys rakennushankkeen materiaalien suhteellisen hiilijalanjäljen sekä rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjäljen absoluuttisen hiilijalanjäljen pienentämisessä. Tutkimuksen kaikkien skenaarioiden rakennuksille oletetaan energialuokka A. Suunnitteluvaiheen valinnoista riippuen materiaalien osuus elinkaaren aikaisista hiilipäästöistä oli 15–31 %. Kun mukaan lasketaan vielä materiaaleihin sitoutuneiden päästöjen lisäksi rakennustyön osuus, nousee lukema 23–43 %:iin. Käytönaikaisten päästöjen osuus 76–55 %. Kuvat 1, 2 ja 3 havainnollistavat rakennushankkeen hiilijalanjäljen jakautumista. Tässä tutkimuksessa keskitytään pääasiassa rakennusmateriaaleihin sitoutuneisiin päästöihin ja ohitetaan muiden osuuksien tarkempi tarkastelu.



Kuva 1. Asuinkerrostalorakennuksen päästöjen jakautuminen, minimitaso (Ruuska & Häkkinen 2014)



Kuva 2. Asuinkerrostalorakennuksen päästöjen jakautuminen, perustaso (Ruuska & Häkkinen 2014)



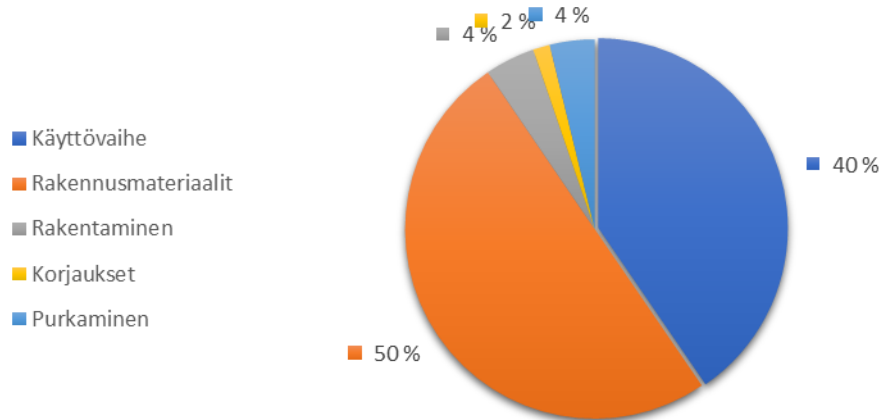
Kuva 3. Asuinkerrostalorakennuksen päästöjen jakautuminen, maksimitaso (Ruuska & Häkkinen 2014)

Ruuskan & Häkkinen (2014) tutkimuksen tuloksia tarkastellessa on hyvä huomioida, että Ympäristöministeriön rakennuksen hiilijalanjäljen arviointimenetelmässä, toisin kuin tässä, huomioidaan rakennuksen käytönaikaisen ostoenergian hiilijalanjäljen osalta tulevaisuuden päästövähennemät pienentävänä vaikutuksen. (Ympäristöministeriö 2021b)

Ympäristöministeriön TALO-hankkeessa on laskettu elinkaariarvioita eri materiaaleista ja erityyppisillä lämmitysmuodoilla varustettuja asuinkerrostaloja varten. Näissä laskelmissa on otettu huomioon Ympäristöministeriön arviointimenetelmän mukaiset tekijät,

kuten energian tulevaisuuden päästövähennemät. Kuvassa 4 on havainnollistettu Ympäristöministeriön toimesta lasketun tyypillisen betonirakenteisen kaukolämpöisen, E-luvultaan määräystason täyttävän kaukolämmöllä lämmitetyn asuinkerrostalon päästöjen jakautuminen elinkaaren eri vaiheisiin. (Ympäristöministeriö 2019b)

Hiilijalanjäljen jakautuminen



Kuva 4: Asuinkerrostalon päästöjen jakautuminen, Ympäristöministeriön TALO-hanke. (Ympäristöministeriö 2019b)

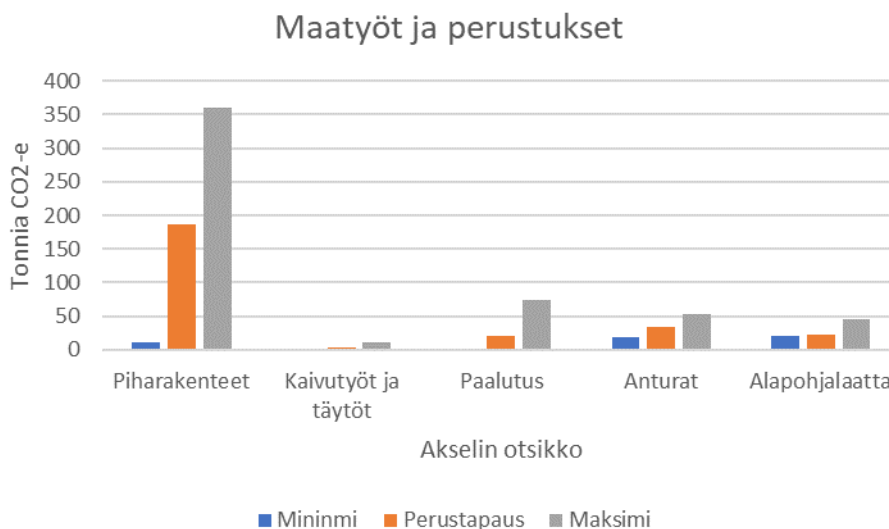
Tyypitalon elinkaaren kokonaishiilijälki on 879,29 kgCO₂e/brm². Materiaalien hiilijalanjäljen osuus tästä on 440 kgCO₂e/brm². Kuten havaitaan kuvien 2 ja 4 välillä, käytännölläisen energiankulutuksen merkitys asuinkerrostalon hiilijalanjäljen arvioinnissa on pienentynyt huomattavasti vuoden 2019 ympäristöministeriön laskentamenetelmän uudistuksen myötä, ja rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen merkitys on noussut. (Ympäristöministeriö 2019b)

Viime aikoina on tehty paljon lopputöitä elinkaariarviointiin liittyen. Aleksanteri Aakkula on opinnäytetyössään saanut vastaavantyyppiselle rakennukselle elinkaaren hiilijalanjäljeksi 875,5 kgCO₂e/brm² hyvin samantyyppisellä jakaumalla kuin Ympäristöministeriön TALO-hankkeen tyypirakennus. Hänen tutkimuksessaan materiaalien hiilijalanjälki oli 453,5 kgCO₂e/brm². Vastaavasti Aliina Härkönen on diplomityössään saanut elinkaaren hiilijalanjäljelle tuloksen 879,5 kgCO₂e/brm² ja materiaaleille 364,5 kgCO₂e/brm². (Aakkula 2022, Härkönen 2021)

3.2 Materiaaleihin sitoutuneiden hiilidioksidipäästöjen jakautuminen

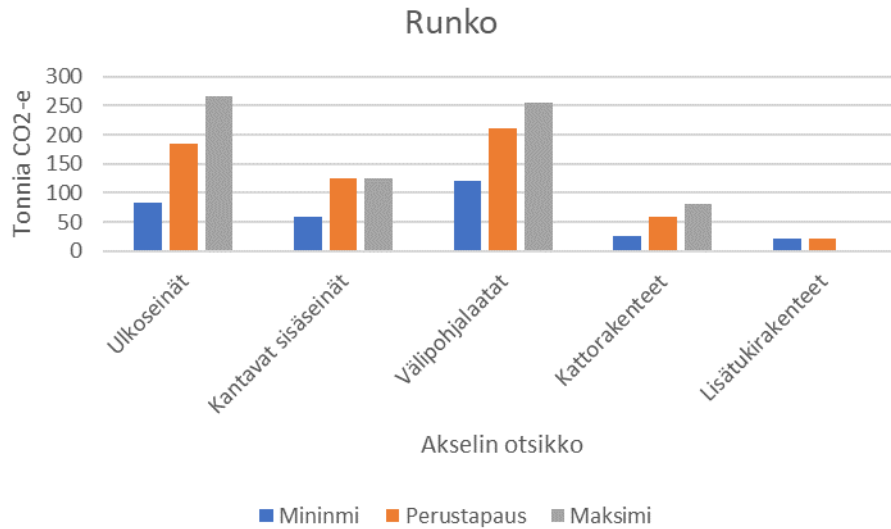
Ruuskan & Häkkisen (2014) tutkimuksessa havaittiin materiaaleihin sitoutuneiden päästöjen olevan vastuussa 15–31 % koko asuinkerrostalon elinkaaren aikaisesta hiilijalanjäljestä. Tutkimuksessaan he jakoivat materiaalipäästöt työvaiheiden mukaan neljään kategoriaan, jotka ovat maatyöt & perustukset, runko, täydentävät rakenteet ja talotekniikka.

Maatyöt sisältävät piharakenteet, kaivutyöt ja täytöt sekä paalutuksen (Kuva 5). Perustuksiin kuuluu anturat ja alapohjalaatta. Näistä syntyi yhteensä keskimäärin 265 t CO₂e päästöjä. Merkittävin osa maatyöistä oli piharakenteet, joiden päästöjen vaihteluväli oli 12–360 t CO₂e. (Ruuska & Häkkinen 2014)

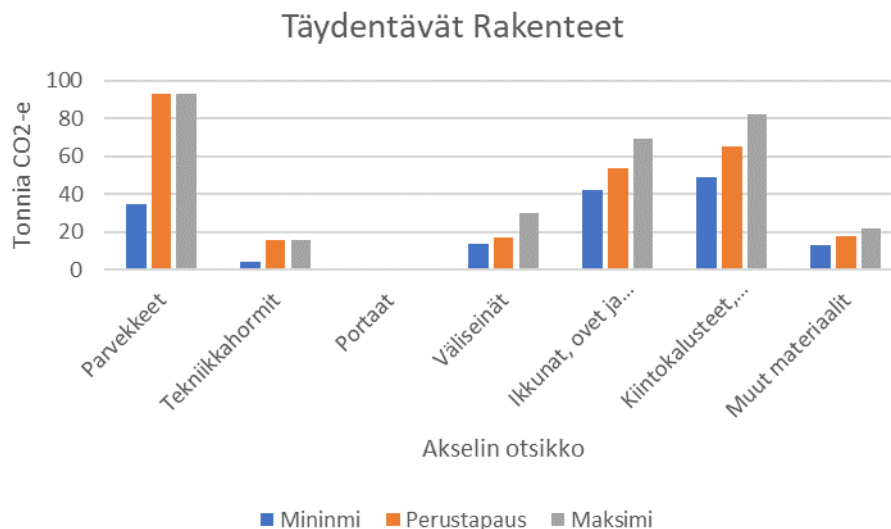


Kuva 5. Tyypillisen asuinkerrostalorakennuksen maatyövaiheen materiaalien päästöjen vaihteluväli (Ruuska & Häkkinen 2014)

Rakennuksen runko sisältävää ulkoseinät, kantavat väliseinät, välipohjalaatat, kattorakenteet sekä mahdolliset muut kantavat rakenteet, kuten pilarit ja palkit (Kuva 6). Merkittäviä päästölähteitä näistä olivat välipohjalaatat (35–40 %), ulkoseinät (25–35 %) ja kantavat sisäseinät (15–20 %). Vähemmän merkittäväksi tekijäksi havaittiin kattorakenteet ja lisätukirakenteet. Tulokset osoittavat, että ulkoseinien vaihteluväli voi olla jopa 2,5-kertainen, mikä kertoo erityisesti ulkoseinien materiaalivalinnoilla olevan suuri merkitys. (Ruuska & Häkkinen 2014)



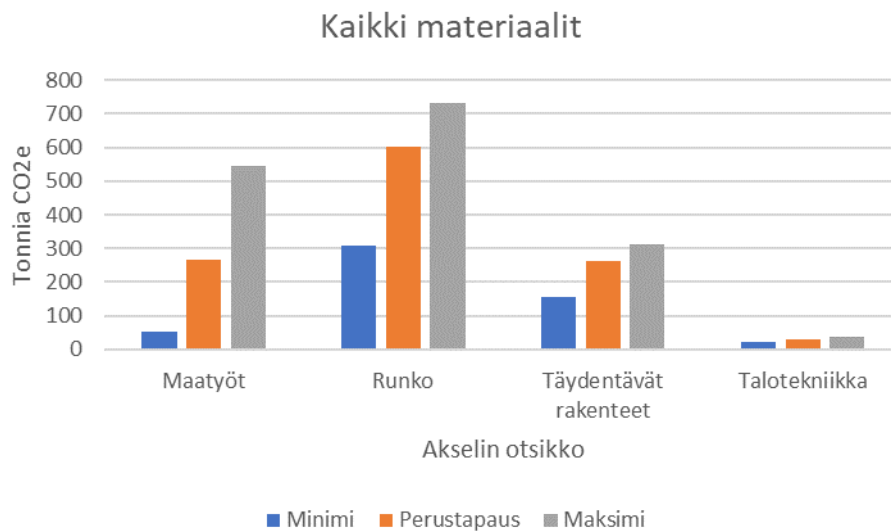
Kuva 6. Tyypillisen asuinkerrostalon runkovaiheen materiaalien päästöjen vaihteluväli (Ruuska & Häkkinen 2014)



Kuva 7. Tyypillisen asuinkerrostalon täydentävien rakenteiden materiaalien päästöjen vaihteluväli (Ruuska & Häkkinen 2014)

Täydentävät rakenteet sisältävät parvekkeet, tekniikkahormit, portaajat, ei-kantavat väliseinät, ikkunat, ovet, lasitukset, kiintokalusteet, varusteet ja muut materiaalit (Kuva 7). Merkittäviä päästölähteitä olivat parvekkeet (20–35 %), ikkunat, ovet ja lasitukset (20–25 %) sekä kiintokalusteet (25–30 %). Ikkunoiden, ovien, lasitusten sekä kiintokalusteiden ja varusteiden osuus on merkittävä, koska 50 vuoden suunnitellun käyttöiän puitteissa näitä vaihdetaan useamman kerran rakennuksen elinkaaren aikana. (Ruuska & Häkkinen 2014)

Talotekniikka sisältää sähkö-, lämmitys, ilmastointi, saniteetti- ja sprinklerijärjestelmät sekä hissit. Näiden yhteisvaikutus kokonaispäästöihin oli huomattavasti pieni, vain 23–38 %. Huomattavaa on, että tutkimuksen kerrostaloissa ei ole aurinkosähkö- tai -lämmitys-järjestelmää tai ilmastointia, jotka olisivat suurentaneet talotekniikan osuutta kokonais-päästöistä huomattavasti. (Ruuska & Häkkinen 2014)



Kuva 8. Tyypillisen asuinkerrostalon materiaalien päästöjen vaihteluväli (Ruuska & Häkkinen 2014)

Kuvasta 8 havaitaan, että tontin valinnalla voi olla ratkaiseva merkitys koko asuinkerrostalon hiilijalanjäljelle eikä rungon ja täydentävien rakenteidenkaan materiaali- ja työmenetelmien valinnan merkitystä suunnitteluvaiheessa sovi väheksyä. Tutkimus osoittaa, kuinka suuri merkitys on rakennuksen suunnitteluvaiheen valinnoilla rakennushankkeen lopulliselle hiilijalanjäljelle. (Ruuska & Häkkinen 2014)

Maatöiden osalta suurimmat erot päästöissä syntyivät tontin valinnasta sekä perustusten ylle suunnitellusta massasta. Ne riippuvat maanmuokkauksen, täyttöjen ja paalutuksen tarpeesta, pihapiirin muokkauksen määrästä sekä rakennuksen ylempien kerrosten suunnittelun painon vaikutuksesta perustusten massiivisuuteen. Rungon osalta eroja loi kantavien rakenteiden tyyppi. Minimitason rungon matalia hiilipäästöjä selittää puun käyttö kantavana rakenteena kantavissa ulkoseinissä, kantavissa sisäseinissä ja välipohjissa sekä osittainen pilari-palkkirakentaminen muiden kantavien rakenteiden massiivisuuden vähentämiseksi. Maksimitason rungon korkeita hiilipäästöjä sen sijaan selittää massiivisten teräsbetonelementtien käyttö kaikissa kantavissa rakenteissa. Eroa täydentävien rakenteiden päästöissä selittävät pääosin parvekkeiden, tekniikkahormien

ja ei-kantavien väliseinien rakennetyyppivalinnat. Minimitapauksessa on näissä käytetty puurunkoa, julkisivua ja puurunkoisia kipsirakenteita. Maksimitapauksessa taas parvekkeiden kantavat pielet ja välipohjalaatat sekä tekniikkahormit ja ei-kantavat väliseinät ovat kaikki teräsbetonelementeistä rakennettuja. (Ruuska & Häkkinen 2014)

Tutkimus osoittaa, että teräsbetonin käyttö rakentamisessa aiheuttaa suuren osan rakennushankkeen materiaaleihin sitoutuneista päästöistä. Päästöjä voisi siis rakennusmateriaalien osalta vähentää optimoimalla betonin käyttöä, valitsemalla vaihtoehtoisia materiaaleja tai käyttämällä vähähiilisempää betonia.

4. VÄHÄHIILINEN BETONI

4.1 Mitä on vähähiilinen betoni

Tavallisen C30/37 luokan rakennebetonin hiilijalanjälki moduuleissa A1-A3 muodostuu siten, että 82 % päästöistä koostuu sideaineen, portlandsementin valmistuksesta. Raaka-aineiden kuljetus muodostaa 14 %, kiviaines 2 %, energia 2 % ja muut, kuten vesi, jätevesi ja jätteidenkäsittely alle 0 % betonin valmistuksen hiilipäästöistä. Sementin korkea hiilijalanjälki johtuu klinkkerin valmistusvaiheesta, kalsinoinnista. Siinä kalkkikiveä poltetaan korkeassa lämpötilassa, jolloin kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Kalsinointireaktion osuus sementin valmistamisesta aiheutuvien hiilipäästöjen määrästä on noin 70 %. Kalsinointireaktion lopputuote ei kuitenkaan ole termodynaamisesti stabiili, vaan hydratoitunut sementti pyrkii sitomaan itseensä ilmakehän hiilidioksidia. Tätä reaktiota kutsutaan karbonatisoitumiseksi. Karbonatisoituminen pysyy sitomaan takaisin noin 85 % kalsinointireaktiossa vapautuneesta hiilidioksidista. Kuitenkin vain pieni osa tästä tapahtuu rakenteen ollessa ehjä ja loput vasta rakenteen purkamisen ja murskaamisen jälkeen, kun reaktiopinta-ala suurenee yli 1000-kertaiseksi. Betonin kierrätysvaihe onkin kriittinen betonin elinkaaren hiilinielun maksimoinnissa. Toisin kuin puurakenteet, betonirakenteet eivät ole hyvä hiilinielu, koska hiilipäästöjen ja hiilinielun syntymisen ajoitus on huono. Hiilijalanjäljen ajallisella vaikutuksella on suuri merkitys niiden vaikutuksen kannalta ilmastonmuutoksen suhteen. Rakentamisaikaisen hiilipiikin suhteellisen vaikutuksen ilmastonmuutokseen voidaan ajatella olevan suurempi, kuin käytön aikaisten hiilipäästöjen tai betonin hitaan karbonatisoitumisen aiheuttaman hiilinielun vaikutus. (Betoniteollisuus Ry 2023), (Säynäjoki et al. 2012)

Merkittävin keino Betonin hiilijalanjäljen rajoittamiseksi on keskittyä sementtiin. Yläkäsite matalamman hiilijalanjäljen betonille on vähähiilinen betoni. Vähähiilistä betonia voidaan valmistaa esimerkiksi korvaamalla osa sementistä vähähiilisemmällä materiaaleilla tai altistamalla betonituotteita hiilidioksidille kovettumisen aikana. Tulevaisuudessa voi olla mahdollista korvata sementti kokonaan betonin kaltaisilla aineilla, eli geopolymeereillä. Tämän hetken ratkaisu on kuitenkin pääasiassa sementin osittainen korvaaminen pienempipäästöisillä raaka-aineilla. (Betoniteollisuus Ry 2023b)

Pääasialliset sementin korvaajat ovat lentotuhka, masuunikuona, silika sekä täytteenä toimiva kalkkikivijauhe. Sementtiä voidaan korvata näillä teollisuuden sivuvirroista syntyvillä tuotteilla jopa 80 % ennen kuin betonin lujuusominaisuudet alkavat kärsiä (Lah-

densivu & Lahdensivu 2021). Vähähiilisille betoneille tyypillistä on korkeampi loppulujuus, mutta hitaampi lujoudenkehitys. Jälkimmäinen on erityisen merkittävää kylmissä olosuhteissa. (Betoniteollisuus Ry 2023a)

Lentotuhkaa syntyy jauhetun hiilen polttamisen sivutuotteena (Suomen standardointiliitto 2012). Tyypillisesti lentotuhkaa lisätään betoniin työstämisen helpottamiseksi ja vesi-sementtisuhteen pienentämiseksi (Neville 1995) ja paremman loppulujuuden saavuttamiseksi (Antunes et al. 2022). Mitä enemmän betoniseoksessa on lentotuhkaa, sitä vähemmän vettä tarvitaan standardikoostumuksen saavuttamiseksi (Chea et al. 2019). Chea et al. tutkimuksen mukaan lentotuhkan konsentraatiolla on yhteys suurempaan loppulujuuteen, mutta pienemmän alkulujuuden kustannuksella. Kun lentotuhkan ja sementin suhde ylittää 80 %, loppulujuus alkaa pienentyä merkittävästi. Toisen lähteen mukaan sementtiä tulisi korvata lentotuhkalla enintään 70 % (Antunes et al. 2022).

Masuunikuonaa syntyy rautamalmin sulattamisen sivutuotteena. Sulanut ja nopeasti jäädyttämällä kovetettu masuunikuona murskataan jauheeksi, jota käytetään betonin sideaineena (Suomen standardointiliitto 2012). Masuunikuonajauheen käytöllä saavutetaan betonivalun pidempi asettumisaika ja parempi työstettävyys (Neville 1995) sekä suurempi lopullinen puristuskestävyys, jälleen kerran alkulujuuden kustannuksella. Portlandsementtiä voidaan korvata masuunikuonalla jopa 40 % ilman tarvetta notkistimen käytölle. Masuunikuona vaatii enemmän vettä, kuin portlandsementti. Masuunikuonan suurella konsentraatiolla betoniseoksessa on huomattu olevan yhteys nopeampaan karbonatisoitumisnopeuteen. (Lang 2002)

Kun yli 60 % sideaineesta on korvattu lentotuhkan ja masuunikuonan seoksella, betonin karbonatisoitumistahti alkaa nopeutua, kun portlandsementtiä lisätään. Tämä johtuu vaihtoehtoisten sideaineiden vaikutuksesta betonin huokosten yhtenäisyyteen, jolloin betonin permeabiliteetti pienenee ja lisää pitkäaikaista kestävyyttä ja vastustuskykyä sulfaattihyökkäystä, alkali-kiviainesreaktiota vastaan ja suojaa raudoituksia ruostumiselta karbonatisoitumisen hidastumisen vuoksi. (Thomas 2008)

Silikaa syntyy puhtaan kvartsin redusoinnissa sähköuunissa piin ja ferropiin valmistuksen yhteydessä (Suomen standardointiliitto 2012). Silikan käyttö betonissa lisää alkulujuutta. Hyötyä silikan käytöstä on noin 10 % asti, minkä jälkeen sillä ei enää ole merkittävää vaikutusta betonin ominaisuuksiin (Neville 1995). Tuoreemman lähteen mukaan viiden prosentin osuus silikaa tuottaisi parhaan lopputuloksen betonin työstettävyuden, lujouden ja kestävyuden suhteen (Antunes et al. 2022)

Vähähiilistä betonia valmistetaan nykyään pääosin masuunikuonan avulla. Tavalliseen portlandsementistä valmistettuun betoniin verrattuna masuunikuonabetoni lujittuu hitaammin ja karbonatisoituu nopeammin, mikä vaikeuttaa sen käyttöä paikallavalurakenteissa, erityisesti kylmiin talviaikoihin, sekä vaativissa rasisolosuhteissa olevissa rakenteissa. Elementtivalmistajan näkökulmasta masuunikuonabetoni haastaa muottikiertoa ja on siten kalliimpi valmistaa. Vähähiilisen betonin komponentit eivät ole uusi tuoteinnovaatio, vaan sementtiä korvaavia raaka-aineita on käytetty jo pitkään parantamaan betonin ominaisuuksia (Suomen betoniyhdistys Ry 2023b). Vähähiilisyyttä tavoitellessa kuitenkin sementtiä korvaavien raaka-aineiden osuudet ovat nousseet niin korkealle, että ne alkavat vaikuttaa negatiivisesti betonin teknisiin ominaisuuksiin käyttötarkoituksen mukaan. Näitä haasteita vastaan kamppaillaan erilaisten lisäaineiden ja prosessitekniikan avulla, ja lopputuloksena betonin tekniset ominaisuudet saattavat käyttötarkoituksesta riippuen olla paremmat, kuin perinteisellä CEM1-betonilla. (Järvinen 2022)

Vähähiilinen masuunikuonabetonin käyttö paikallavaluissa on edullista, kun rakenne on massiivinen ja vaatii sulfaattikestävyyttä tai kun rakenteelta vaaditaan suurta loppulujuutta ilman, että varhaiselle lujuudenkestävyydelle annetaan painoarvoa. Massiivisissa rakenteissa masuunikuonabetonin pitkä työstettävyyssäika ja alentunut lämmönkehitys voivat olla eduksi. Talviaikaan sen sijaan pienempi lämmöntuotto aiheuttaa haasteita, kun pienempi lämmöntuotto vaikeuttaa jo ennestään haastavaa varhaista lujittumista kylmissä lämpötiloissa. Tämä aiheuttaa suuremman tarpeen valun lämpöeristyksille ja lisää runkovaiheen lämmityksen kustannuksia esimerkiksi polttoöljyn muodossa. Samalla voidaan hävitä osa saavutetusta hiilijalanjalan pienennyksestä. (Järvinen 2022)

Tyypillisiä käyttökohteita ovat paikallavalettavat rakenteet, joissa ei ole vaatimuksia säänkestävyydelle, ja jotka ovat massiivisia. Näitä ovat paksut seinät, holvit, pilarit sekä perustukset. On todettu, että masuunikuonabetonia ei ole hyvä käyttää lattiavaluissa, joissa pinnan hiertäminen on tehtävä nopeasti valun jälkeen, kun betonin kovettumista on odotettava pidempään. Toisaalta masuunikuonabetonin parempi työstettävyyys johtaa tasaisempaan pintaan, jolloin työstäminen on nopeampaa. (Järvinen 2022)

Vähähiilisestä masuunikuonabetonista valmistetut betonielementit eivät tilaajan näkökulmasta eroa perinteisistä betonielementeistä raudoitusten tai lujuuden puolesta. Vähähiilisen betonin haasteet näkyvät tuotannon puolella hidastuneena muottikiertona. Nopeassa muottikierrrossa betonin pitäisi kovettua noin 12 tunnissa ennen muotista poistoa. Jotta muottikierto pysyisi järkevässä vaaditussa tahdissa, joudutaan perinteistenkin betonien kanssa käyttämään pientä vesi-sementtisuhdetta ja seosaineita riittävän varhaisen lujuuden saavuttamiseksi, jolloin betonielementtien hiilijalanjälki on usein valmisbetonia suurempi. Kun vielä käytetään hitaammin lujittuvaa masuunikuonabetonia, nopean

varhaislujuuttumisen tavoittelu suurempien sideainemäärien kanssa johtaa suureen ylilujittumiseen lujuudenkehityksen jatkuessa pidempään. Tätä ylilujittumista ei vielä juuri hyödynnetä suunnitelmissa tai työmaalla. (Järvinen 2022)

Vähähiilisen betonin kustannukset jakautuvat pääasiassa tuotanto- ja materiaalikustannuksiin. Valmisbetonin materiaalikustannukset ovat suhteessa suuremmat kuin elementtivalmistuksessa, missä hidas lujuudenkehitys haastaa tuotantoa. Hitaampi muottikierto ja kallistuvat lisäaineiden hinnat vaikuttavat betonielementin hintaan. Myös tämänhetkinen pieni kysyntä vaikuttaa elementtien hintaan. Mikäli kysyntä suurenee, ja tuotantonopeutta saadaan nostettua uudenlaisten kiihdyttimien avulla, voidaan vähähiilisten betonielementtien hintoja alas. Valmisbetonin materiaalikustannukset ovat tuotannollisia kustannuksia merkittävämmät, kun hitaamman lujuudenkehityksen haaste jää työmaan vastuulle. Kesäaikaan tämä saattaa jopa laskea kustannuksia, mutta talvella joudutaan käyttämään enemmän resursseja lujuuden kehityksen varmistamiseksi ja hitaampi lujuudenkehitys aiheuttaa aikataulullisia haasteita. (Järvinen 2022)

4.2 BY-vähähiilisyysluokitus

Betonin tuotanto kuuluu päästökaupan piiriin ja on tiedossa, että päästökaupan hinnat ovat nousussa ja niiden hinta tulee vielä nousemaan. Näin ollen sementtien hinta tulee nousemaan ja sitä myötä myös betonin hinta tulee nousemaan. Jos hiilipäästöjä voidaan pienentää, voidaan myös betonin hintaa saada laskemaan. Rakentamislain uudistuksen myötä rakennusten päästöille on tulossa päästökatto, joka on rakennusluvan saamiseksi pystyttävä alittamaan. EU-taksonomian myötä pankit ovat olleet entistä kiinnostuneempia rakennusten hiilijalanjäljistä. Lainan saannin ehtona voi olla tieto, että rakennushanke on kestävä kehityksen mukainen. Vaikka uusi rakentamislaki ei ole vielä voimassa, markkinoilla on jo jonkin aikaa ollut vähähiilisiä betonituotteita, joita ei ole vielä yhdenmukaistettu sertifiointivaatimuksilla. Osalla näistä betonituotteista on tuotekohtaiset ympäristöselvitykset (EPD), mutta yhdellä betonivalmistajalla saattaa olla satoja betonireseptejä ja ympäristöselosteiden tekeminen jokaiselle tuotteelle erikseen kävisi työlääksi ja kalliiksi. Näiden syiden vuoksi Suomen betoniyhdistys on päättänyt luoda BY-vähähiilisyysluokituksen, joka helpottaa betonisuunnittelijoiden työtä vähähiilisten rakennushankkeiden suunnittelussa, ja vastaavasti yksinkertaistaa betonivalmistajien tuotteiden luokittelua. (Suomen betoniyhdistys Ry 2023a)

BY-vähähiilisyysluokitus on kansallinen ja vapaaehtoinen luokittelumenetelmä, jolla ilmoitetaan betonin hiilidioksidipäästöt. Se on ympäristöselosteita yksinkertaisempi ja edullisempi keino esittää betonituotteen hiilijalanjälki ottamatta kantaa tuotenimiin tai ta-

paan valmistaa kyseinen tuote ja on lisäksi ympäristöselostetta tarkempi luotettavuudessa ja vertailukelpoisuudessa. Vähähiilisyysluokituksessa päästöluokitus on analoginen lujuusluokkien kanssa, mikä helpottaa työtä suunnitteluvaiheessa, kun valmistajaa ei vielä tarvitse tietää. (Suomen betoniyhdistys Ry 2023c)

BY-vähähiilisyysluokitus jakaa betonit viiteen päästöluokkaan ja luokitus sisältää tällä hetkellä valmisbetonien osalta 18 eri valmisbetonilaatua ja elementtien osalta 17 eri betonilaatua. Päästöluokat merkitään tunnuksella GWP.XX. Tunnuksen XX viittaa päästötasoon suhteessa referenssitason siten, että esimerkiksi GWP.85 betonin hiilijalanjälki on korkeintaan 85 % referenssiluokan hiilijalanjäljestä. Luokkia ovat GWP.85, GWP.70, GWP.60, GWP.55 ja GWP.40 sekä referenssiluokka GWP.REF on myös päästöluokka. Se on määritetty laskemalla keskitaso suurimpien betonivalmistajien tyypillisestä ei-vähähiilisestä betonista vuonna 2021. GWP.REF on siis vähähiilisempää, kuin puolet suomalaisista ei-vähähiilisistä betoneista. GWP-luokka koskee vain betonia ja ei ota kantaa raudoitteisiin, eristeisiin, työmaakuljetuksiin ja työmaatoimintoihin. BY-vähähiilisyysluokitus huomio betoninkin osalta vain moduulit. Vähähiilisyysluokituksen betonilaatujen ja GWP-luokkien raja-arvot on esitetty betoniyhdistyksen taulukossa (kuva 9) siten, että arvojen yksikkönä on kgCO₂/m³. (Suomen betoniyhdistys Ry 2023c)

Betoni	GWP.REF	GWP.85	GWP.70	GWP.55	GWP.40
C20/25 - Ei huokostettu	210	180	145	115	85
C25/30 - Ei huokostettu	230	195	160	125	90
C30/37 - Ei huokostettu	255	215	180	140	100
C35/45 - Ei huokostettu	285	240	200	155	115
C40/50 - Ei huokostettu	305	260	215	170	120
C45/55 - Ei huokostettu	320	270	225	175	130
C50/60 - Ei huokostettu	340	290	240	185	135
<hr/>					
C30/37 - Huokostettu	290	245	205	160	115
C35/45 - Huokostettu	330	280	230	180	130
C40/50 - Huokostettu	355	300	250	195	140
C45/55 - Huokostettu	375	320	265	205	150
C50/60 - Huokostettu	395	335	275	215	160

Kuva 9: BY-vähähiilisyysluokituksen betonilaadut sekä vähähiilisyysluokkien raja-arvot. Arvojen yksikkönä kgCO₂/m³ (Suomen betoniyhdistys 2023c)

GWP-luokkien tunnuksia voi käyttää vain betonilaatujen merkintöjen yhteydessä ja vain, jos tuote täyttää vähähiilisyysluokituksen määritelmän mukaiset kriteerit. Kriteerien mukaan päästöarvot tulee laskea Suomen Betoniyhdistys Ry:n hyväksymällä laskurilla ja laskelmien tulee olla hyväksytty yhdistyksen hyväksymän kolmannen osapuolen valvotuna. Vähähiiliseltä betonilta edellytetään samoja lujuus- ja säilyvyysominaisuuksia vä-

hähiilisyysluokasta riippumatta. Huomionarvoista on, että vähähiilisemmän betonin valinta vaikuttaa todennäköisesti muihin ominaisuuksiin, kuten lujuudenkehitykseen ja lämmöntuottoon. (Suomen betoniyhdistys Ry 2023c)

Betoni	Laadunarvosteluikä	GWP.REF	GWP.85	GWP.70	GWP.55	GWP.40
C20/25 - Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C25/30 - Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C30/37 - Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C35/45 - Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C40/50 - Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C45/55 - Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
C50/60 - Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
C30/37 - Huokostettu	28 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
	91 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
C35/45 - Huokostettu	28 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
	91 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
C40/50 - Huokostettu	28 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
	91 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
C45/55 - Huokostettu	28 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
	91 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
C50/60 - Huokostettu	28 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
	91 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red

Kuva 10: Eri päästölukien arvioitu saatavuus vuonna 2023 (Suomen betoniyhdistys Ry 2023c)

Vähähiilisyysjärjestelmässä tuotteelle asetetaan raja-arvo, mutta se ei ota kantaa siihen, kuinka kyseinen raja-arvo saavutetaan. Tietenkin oletetaan lujuus- ja säilyvyysominaisuuksien säilyvän. Valmistajalla on vapaat kädet, saavuttaa hän sitten raja-arvon sementtiä korvaamalla, energiatehokkaammalla prosessiteknikalla, lyhemmillä raaka-aineen kuljetusmatkoilla tai vaikka hiilidioksidipäästöjen talteenotolla (carbon capture). (Suomen betoniyhdistys Ry 2023b)

Vähähiilistä betonia valittaessa on kiinnitettävä huomiota saatavuuteen. Alhaisimmissa lujuus- ja GWP-luokissa saatavuus on parempaa kuin suuremmilla lujuuksilla ja vaativammassa GWP-luokissa. Saatavuuden arvio kesällä 2023 on esitetty Betoniyhdistyksen taulukossa (kuva 10). (Suomen betoniyhdistys Ry 2023c)

Kaikessa yksinkertaisuudessaan BY-vähähiilisyysluokituksen käyttö toimii siten, että Tilaaaja tai suunnittelija valitsee käytettävän betonin GWP-luokan, betonin valmistajat ilmoittavat, mihin luokkiin pääsevät eri betonilaaduilla ja urakoitsija tilaa luokan mukaista betonia. (Suomen betoniyhdistys Ry 2023b)

5. RAKENNUKSEN ELINKAARIARVIOINTI

5.1 Mitä on elinkaariarviointi?

Elinkaariarviointi, eli LCA (Life cycle assessment) on laskentamenetelmä, jolla tuotteen tai palvelun resursseja ja ympäristövaikutuksia voidaan mitata ja arvioida. Elinkaari kattaa tuotteen suorat ja epäsuorat vaikutukset kehdosta hautaan. Se sisältää raaka-aineiden hankkimisen, kuljetuksen sekä jalostuksen, jalostetun tuotteen jakelun, käytön, uudelleenkäytön, huoltamisen, kierrätyksen ja hävittämisen. Elinkaariarvioinnilla pyritään pienentämään rakennusten hiilijalanjälkeä tarkan ennakkosuunnittelun keinoin. (Suomen ympäristökeskus 2017)

Elinkaarilaskenta toimii päätöksenteon tukena suunnitteluvaiheessa ja mahdollistaa ympäristövaikutusten arvioinnin aikaisessa vaiheessa. Ympäristöministeriö on luonut oppaan, joka auttaa suunnittelijoita luomaan yhdenmukaisia elinkaarilaskelmia. Ensimmäinen versio luotiin vuonna 2019 ja sitä testattiin vuonna 2020. Testijakson pohjalta Ympäristöministeriö julkaisi vuonna 2021 uuden luonnoksen rakennuksen vähähiilisyysarviointimenetelmästä. Tapahtuneet muutokset koskivat lähinnä taulukkoarvojen päivittämistä ja vaadittujen tietojen tarkentamista. Lopullinen arviointimenetelmä julkaistaan vuonna 2025 vähähiilisuuden arviointiin liittyvän Ympäristöministeriön asetuksen myötä. (Ympäristöministeriö 2021b)

Elinkaariarviointi ei vielä ole lakisäätelistä, mutta Ympäristöministeriön vähähiilisyys-tiekartan mukaan se tulisi pakolliseksi osaksi rakennusmääräyksiä vuoteen 2025 mennessä. (Ympäristöministeriö 2021b)

Ympäristöministeriön vähähiilisyysarviointimenetelmä tulee pohjautumaan Euroopan komission laatimaan Level(s)-menetelmään sekä eurooppalaiseen kestävästä rakentamisen standardeihin EN 15643, EN 15978, EN 158004 ja EN ISO 14067. Level(s)-menetelmä tarjoaa suunnittelijoille yhteisen kielen, jolla arvioidaan ja raportoidaan rakennuksen vihreyttä. Level(s):in käyttäminen on vapaaehtoista, mutta suotavaa tulosten yhteisyyden kannalta. (Euroopan komissio 2023e)

Tätä Ympäristöministeriön vähähiilisyysarviointimenetelmää käytetään kaikkiin rakennuksiin uudis- tai korjausrakennushankkeissa. Se on tarkoitettu tehtävän samaan aikaan energiatehokkuuden arvioinnin kanssa. Menetelmä ei varsinaisesti sovellu infahankkeiden, viheralueiden ja yksittäisten rakennustuotteiden arviointiin. (Ympäristöministeriö 2021b)

Menetelmän käyttö elinkaariarvointiin soveltuu rakennussuunnittelun aikana tehtäväksi, kun tiedossa on tarpeeksi tarkkaa ja yksityiskohtaista tietoa rakennuksen materiaaleista ja energiatarpeesta. Arvointiin sisällytetään tontin rakenteet, talo rakennusosineen ja tilaosineen sekä osa taloteknisistä järjestelmistä. (Ympäristöministeriö 2021b)

Rakennuksen vähähiilisuuden arviointiin tarvitaan laskentatyökalu, määrälaskentaluettelo rakennukseen, tontille ja taloteknisiin järjestelmiin tulevista tuotteista sekä niiden päästötiedot. Laskentatyökaluna voi käyttää joko ympäristöministeriön kehittämää yksinkertaista arviointitaulukkoa tai valita oman soveltuvan työkalun. Määrälaskentaluettelo voidaan jakaa karkeasti kategorioihin seuraavasti: alueosat, rakennusosat, tilaosat, talotekniikka ja työmaa. Taulukkoon 1 on merkitty tarkemmin, mitä kuhunkin kategoriaan kuuluu. Vaihtoehtoinen tapa kategorisoida rakennusosat talo2000-nimikkeistöön perustuen. Päästötiedot löytyvät CO2data päästötietokannasta, johon on kirjattu tiedot tyyppillisistä Suomessa käytetyistä tuotteista. Jos tarkat materiaalivalinnat tunnetaan, voidaan käyttää rakennustuotteiden omia ympäristöselosteita (EPD). (Ympäristöministeriö 2021b)

5.2 Rakennuksen elinkaarilaskennan vaiheet

5.2.1 Moduulit

EN 15978 -standardi (2011) määrittelee tavan rakennuksen elinkaarilaskennalle. Standardi esittää rakennuksen elinkaaren vaiheet seuraavasti:

- Tuotevaihe
 - A1: Raaka-aineen hankinta
 - A2: Kuljetus valmistukseen
 - A3 Tuotteen valmistus
- Rakentamisvaihe
 - A4: Kuljetus työmaalle
 - A5: Työmaatoiminnot
- Käyttövaihe
 - B1: Tuotteen käyttö rakentamisessa (Ei arvioida)
 - B2: Kunnossapito (Ei arvioida)
 - B3: Korjaukset (Ei arvioida)

- B4: Osien vaihto
- B5: Laajamittaiset korjaukset (Oma erillinen arviointi)
- B6: Energian käyttö
- B7: Veden käyttö (Ei arvioida)
- B8: käyttäjien toimet (Ei arvioida)
- Elinkaaren loppu
 - C1: Purkutyöt
 - C2: kuljetus jatkokäsittelyyn
 - C3: Purkujätteen käsittely
 - C4: Purkujätteen loppusijoitus
- Elinkaaren ulkopuolella
 - D: Muut vaikutukset (Arvioidaan osana hiilikädenjälkeä) (Ympäristöministeriö 2021b)

Elinkaariarvioinnissa arvioidaan kaikki merkittävät ilmastovaikutukset, jotka aiheutuvat ennen rakennuksen käyttöä, käytön aikana ja käytön jälkeen. Vaiheet voidaan kategorisoida seuraavasti: Materiaalit (A1-3, B4, ja C3-4), kuljetukset (A4, B4 ja C2), työmaa (A5, B4, C1), käyttövaihe (B6) ja hiilikädenjälki (D. (Ympäristöministeriö 2021b)

5.2.2 Hiilijalanjäljen arviointimenetelmä

Arviointi tehdään rakennuksen ensimmäiselle 50 vuodelle, vaikka rakennus olisikin käytössä pidempään, koska pitkälle tulevaisuuteen tehtävien arvioiden tekemisen epätarkkuus kasvaa merkittäväksi. Mikäli arviointia suoritetaan väliaikaiselle rakennukselle, voi lyhyempääkin laskentajaksoa käyttää. (Ympäristöministeriö 2021b)

Moduleissa A1-3 arvioidaan rakennustuotteiden valmistuksesta syntyneet hiilipäästöt. Mikäli elinkaariarviointia ollaan tekemässä taloteknisten järjestelmien ollessa vielä suunnitteluvaiheessa, voidaan käyttää taulukkoarvoja niiden hiilijalanjäljen arviointiin. Rakennusmateriaalien päästötiedot tulee ensisijaisesti arvioida tuotteen oman ympäristöselosteen (EPD) tai vaihtoehtoisesti kansallisten päästötietojen (CO2Data) pohjalta. Jos tietoja ei ole saatavilla, voidaan käyttää muuta käytössä olevaa päästötietokantaa. Mikäli rakennushankkeessa käytetään uudelleen vanhoja tai muilta työmaalta ylijääneitä rakennustuotteita, jätetään näiden tuotteiden moduulit A1-3 laskennan ulkopuolelle. Näin ei

kuitenkaan voi toimia enää moduulissa B4 eli rakennusosienvaihdossa. (Ympäristöministeriö 2021b)

Rakennustuotteiden vaihtojen hiilipäästöjen laskenta tapahtuu moduulissa B4 ja siinä huomioidaan tuotteet, joiden tekninen käyttöikä on rakennuksen elinkaarta lyhyempi. Rakennusosien vaihtamisen hiilipäästöt voi laskea jakamalla rakennuksen tavoitekäyttöikä rakennusosan suunnitellulla käyttöiällä ja vähentämällä osamäärästä alkuperäisen osan, joka on jo huomioitu moduuleissa A1-3. Luku pyöristetään aina suurempaan kokonaislukuun. Vaihdeettavan rakennustuotteen oletetaan laskennassa aina olevan uusi. Moduulissa B4 jätetään mahdolliset laajamittaiset korjaukset pois laskuista. (Ympäristöministeriö 2021b)

Taulukko 1: Elinkaariarvointiin sisällytettävät rakennusosat (Ympäristöministeriö 2021b)

	Sisältyy arvointiin	Ei sisälly arvointiin
Tontti	Maaosat	Alueen varusteet
	Tuennat ja vahvistukset	Kasvillisuus
	Päällysteet	
	Alueen rakenteet	
Kantavat rakenteet	Perustukset	Tuotteisiin kuulumattomat
	Alapohja	Erilliset naulat, ruuvit, liimat, tiivisteet, saumaukset ja muut kiinnikkeet
	Runko	
	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
	Ulkotasot	
	Kattorakenteet	
Täydentävät rakenteet	Väliseinät ja ovet	Pintamateriaalit ja listat
	Portaat	Pintakäsittelyt ja maalaukset
	Pintarakenteet	Tuotteisiin kuulumattomat
	Tyypilliset kiintokalusteet	Erilliset naulat, ruuvit, liimat, tiivisteet, saumaukset ja muut kiinnikkeet
	Hornit ja tulisijat	
	Tilaelementit	
Talotekniikka	Lämmitysjärjestelmät	Tietotekniset järjestelmät
	Vesi- ja viemärijärjestelmät	Taloautomaatio
	Ilmastointijärjestelmät	Varavirtajärjestelmät
	Jäähdytysjärjestelmät	Liukuportaat
	Sprinklerijärjestelmät	Erilliset koneet ja laitteet
	Sähköjärjestelmät	
	hissit	
Työmaa	Työmaalla kulutettu energia	Telineet ja suojaukset
		Väliaikaiset rakenteet, muotit ja tekniset laitteet
		Työmaatilojen elinkaari
		Työmaan henkilöliikenne

Kuljetuksen hiilijalanjälki lasketaan moduuleissa A4 (rakennusvaiheen kuljetukset), B3-4 (korjausvaiheen kuljetukset) ja C2 (kuljetukset elinkaaren lopussa). Kuljetukset ovat toki vain osa moduuleja B3 ja B4. Kuljetusten hiilijalanjälki voidaan laskea ottamalla päästöarvot taulukosta 2 (kansallisen päästötietokannan taulukkoarvot) tai vaihtoehtoisesti laskemalla kaikkien rakennuksen elinkaarenaikaisten kuljetusten päästöt yhteen. Yhteenlaskettavat kuljetukset ovat rakennusaikaiset kuljetukset sekä korjaamiseen, purkamiseen ja jätteenkäsittelyyn liittyvät kuljetukset. (Ympäristöministeriö 2021b)

Rakentamisvaiheen kuljetusten (A4) päästöjen arviointiin sisällytetään rakennustuotteiden, materiaalien ja maamassojen kuljetukset rakennustyömaille sekä työmaalla syntyvien jätteiden kuljetus loppukäsittelyyn. Rakennuskoneiden kuljetus työmaalle sekä työntekijöiden matkat työmaalle suljetaan pois laskuista. Jokaisen kuljetuksen päästöt lasketaan erikseen erityyppisten polttoaineiden päästökertoimet huomioiden. Kuljetusten täyttöasteiksi oletetaan 80 % työmaalle mentäessä ja 0 % työmaalta palatessa. Maamassojen kuljetukset molempiin suuntiin oletetaan 100 % täysiksi. Korjausvaiheen kuljetukset (B3-4) lasketaan samoin menetelmin. (Ympäristöministeriö 2021b)

Energiamuotojen päästökertoimina käytetään kansallisen päästötietokannan mukaisia arvoja. Alueellisia kaukolämmön ja kaukokylmän tietoja voi käyttää lisätietona, mutta niillä ei saa korvata kansallisen päästötietokannan tietoja. (Ympäristöministeriö 2021b)

Elinkaaren lopun kuljetusten (C2) päästöjen arviointiin sisällytetään kaikki purkupaikalta loppukäsittelyyn, kierrätykseen tai uudelle käytettäväksi lähtevä. Kuljetusten täyttöasteet ja päästökertoimet lasketaan samoin kuin moduulissa A4. Huomionarvoista tässä moduulissa on, että purkujätteen kuljetusvaiheisiin voi sisältyä useita peräkkäisiä pysähdyksiä. (Ympäristöministeriö 2021b)

Taulukko 2: Taulukkoarvoja elinkaariarviointiin

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

Työmaan hiilijalanjälki lasketaan moduuleissa A5 (rakennusvaihe), B3-5 (korjausvaihe) ja C1 (Purkuvaihe). Se voidaan laskea käyttämällä taulukon 2 (kansallisen päästötieto-

kannan taulukkoarvo) arvoa tai vaihtoehtoisesti laskemalla yhteen rakentamisen, korjausten ja purkamisen työmaatoimien aiheuttamat päästöt yhteen. (Ympäristöministeriö 2021b)

Työmaan (A5) hiilijalanjäljen laskentaan sisältyy rakennustyömaalla kuluva ostoenergia sekä polttoaineen kulutus. Energia-arvioon sisällytetään rakennustöistä, valaistuksesta, kuivatuksesta, lämmityksestä, toimisto- ja taukutilojen käytöstä ja muista tämän kaltaisista toimista aiheutuva energian tarve. Laskennassa huomioidaan eri energiamuotojen päästökertoimet. Laskentaan sisällytetään myös väliaikaisten tilojen ja työmaatoimintojen hiilijalanjälki, vaikka ne eivät sijaitsisikaan tontilla. Jos työmaatilat tai aputoiminnot palvelevat useampaa työmaata, jyvitetään nämä päästöt eri rakennustyömaiden bruttopinta-alan mukaan. Korjausrakennus- (B3-5) ja purkutyömaiden (C1) hiilijalanjäljet lasketaan samoin tavoin. Näiden tulevaisuudessa tapahtuvien toimien hiilijalanjälkeä laskeessa on hyvä huomioida tulevaisuuden päästövähennykset. (Ympäristöministeriö 2021b)

Energian hiilijalanjälki lasketaan moduulissa B6. Se lasketaan kertomalla rakennuksen ostoenergian kulutus eri energiamuotojen päästökertoimilla. Rakennuksen ostoenergiankulutus lasketaan uuden rakennuksen energiatehokkuudesta annetun selvityksen mukaan. Mikäli rakennukselle ei olet laadittu asetusten mukaista energiaselvitystä, arvioidaan ostoenergiankulutus käyttämällä asetuksessa annettua laskentamenetelmää. Energian päästöjä laskeessa käytetään kullekin energiamuodolle omia päästökertoimia, jotka huomioivat tulevaisuuden päästövähennykset Suomen energia- ja ilmastostrategian mukaisesti. Nämä päästövähennyksien skenaariot ovat saatavilla kansallisesta päästötietokannasta (Ympäristöministeriö 2021b)

Moduuleja B1, B2, B3 ja B7 ei tällä hetkellä huomioida elinkaarilaskennassa. Laajamittaiset korjaukset, eli moduuli B5 arvioidaan omana erillisenä osanaan. Korjaushankkeen hiilijalanjäljen laskentaa ei tehdä takautuvasti rakennuksen aikaisemmille työmaavaiheille. (Ympäristöministeriö 2021b)

Rakennuksen elinkaaren aikainen hiilijalanjälki arvioidaan summaamalla yhteen materiaalien raaka-aineiden hankinnasta, niiden kuljetuksesta ja valmistuksesta (A1-3), rakennustuotteiden vaihdosta (B4), rakennustyömaan, rakennustuotteiden vaihdon ja purkutyömaan jätteen käsittelystä (A5, B4 ja C3), rakennus- ja purkujätteen loppusijoituksesta (C4), rakennustuotteiden ja purkujätteen kuljetuksista (A4 ja C2), rakennustyömaan, rakennusosien vaihtotyömaan ja purkutyömaan aikaisesta energian käytöstä (A5, B4 ja C1) ja rakennuksen käytön aikaisesta energian käytöstä (B6) aiheutuneet hiilipäästöt (Ympäristöministeriö 2021b)

5.2.3 Hiilikädenjäljen arviointimenetelmä

Hiilikädenjälki lasketaan moduulissa D. Hiilikädenjälki tarkoittaa elinkaarilaskennan arviointirajauksen ulkopuolelle jääviä ilmastohyötyjä, joita ei olisi syntynyt ilman rakennushanketta. Hiilikädenjälkeä ei vähennetä hiilijalanjäljestä, vaan se ilmoitetaan erillisenä lukuna jalanjäljen ohella. Hiilikädenjälkeen lasketaan viisi eri ilmastohyötylajia. (Ympäristöministeriö 2021b)

Moduulit D1 ja D2 sisältävät uudelleenkäytöllä, kierrätyksellä ja energian hyödyntämisellä vältetyt hiilipäästöt. Arviointi suoritetaan laskemalla rakennusosien ja kierrätettävien materiaalien määrä ja laskemalla elinkaaren ulkopuolelle poistuvien kierrätettävien ja energiana hyödynnettävien materiaalien sekä uudelleenkäytettävien materiaalien nettokasvihuonepäästöt. Hiilikädenjäljen arviointiin käytetään kansallista päästötietokantaa tai rakennustuotteen omaa ympäristöselostetta.

Moduuli D3 sisältää ylimääräisen uusiutuvan energian. Rakennuksen tuottaessa ylimääräistä uusiutuvaa sähköä, lämpöä tai kylmää verkkoon, voidaan ne laskea osaksi hiilikädenjälkeä. Ylimääräinen energia arvioidaan vuositasolla (kWh/a) ja energia kerrotaan kansallisen päästötietokannan tulevaisuuden päästövähennykset huomioivilla päästökerrotimeilla. Ylimääräistä energiaa tuottavan järjestelmän elinkaaren hiilipäästöt on laskettava mukaan hiilijalanjälkeen. (Ympäristöministeriö 2021b)

Moduuli D4 sisältää pitkäikäisten rakennustuotteiden eloperäisen ja teknisen hiilen. Eloperäinen hiili on rakennusosan sisältämää yhteyttämällä tuotettua varastoitunutta hiiltä. Tekninen hiili on teknisin menetelmin koneista, laitteista, tehtaista tai suoraan ilmakehästä poistettua hiiltä. Eloperäinen hiili ja tekninen hiili muodostavat hiilivaraston. Hiilivarasto voidaan laskea rakennusosille, joiden on suunniteltu varastoivan hiiltä vähintään 100 vuoden ajan. Hiilivarasto lasketaan käyttämällä kansallisen päästötietokannan tai rakennustuotteen oman ympäristöselosteen tietoja. (Ympäristöministeriö 2021b)

Moduuli D5 sisältää sementtipohjaisten tuotteiden karbonatisoitumisen. Karbonatisoitumisella tarkoitetaan ilmakehän hiilidioksidin sitoutumista takaisin betonin sisältämään kalsinoituun kalkkiin. Sementtipohjaisten tuotteiden karbonatisoitumisen ilmastohyödyt arvioidaan kansallisen tietokannan tai tuotteen oman ympäristöselosteen tietoja käyttäen.

5.2.4 Raportointi

Elinkaariarvioinnin tulokset raportoidaan ilmastaselvityksenä. Ilmastaselvitys sisältää rakennuksen perustiedot sekä hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen. Tulokset esitetään erikseen rakennukselle ja rakennuspaikalle. (Ympäristöministeriö 2021b)

Rakennuksen tuloksiin sisällytetään vaikutukset, jotka johtuvat maanpäällisten rakennusosien elinkaaresta ja rakennuksen elinkaaren energiankulutuksesta. Rakennuspaikan tuloksiin sisällytetään rakennuksen ulkopuolella ja alla olevista rakenteista ja tuotteista aiheutuvat vaikutukset. Rakennuksen ja rakennuspaikan hiilijalanjäljet raportoidaan erikseen jokaiselle elinkaaren vaiheelle (A, B ja C), jolloin osatekijöiden vaikutuksia on helpompi käsitellä. (Ympäristöministeriö 2021b)

Tulokset ilmoitetaan hiilijalanjäljen osalta positiivisena lukuna kahden desimaalin tarkkuudella ja hiilikädenjäljen osalta negatiivisena lukuna kahden desimaalin tarkkuudella. Tulokset pyöristetään pyöristyssääntöjen mukaan siten, että lukuja käsitellään itseisarvoina. Yksikkönä käytetään $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$, eli kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia lämmitettyä kerrostasoalaa tai rakennuspaikan pinta-alaa, ja arviointijakson pituutta kohden vuosina. Arviointijakson pituus on yleensä 50 vuotta. (Ympäristöministeriö 2021b)

Hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen lisäksi tulosten ohella esitetään perustiedot arvioinnin kohteena olevasta rakennushankkeesta. Perustiedot sisältävät ainakin seuraavat asiat:

- Rakennuksen tunnus
- Rakennuksen käyttötarkoitus- tai luokka
- Rakennuksen laskennallinen ostoenergian kulutus
- Käytettyjen arviointijaksojen pituudet
- Rakennuksen kantavien rakenteiden pääasiallinen rakennusmateriaali
- Rakennuksen tavoitteellinen käyttöikä
- Arvioinnissa käytetyt laskentaohjelmistot
- Ilmastaselvityksen päiväys
- Selvityksen laatijan nimi (Ympäristöministeriö 2021b)

Jotta arvioinnin tulokset katsotaan luotettaviksi, tulee niiden täyttää seuraavat edellytykset:

- Arvioinnin kohteen tulee olla rakennusmääräysten mukainen
- Vähähiilisuuden arviointi on tehty ympäristöministeriön asetusten mukaisesti

- Tietolähteinä on käytetty kansallista päästötietokantaa tai rakennustuotteiden omaa ympäristöselostetta, jotka perustuvat standardiin 15804+A2 (Ympäristöministeriö 2021b)

6. LASKENNAN KOHTEET JA TOTEUTUS

6.1 Kohderakennukset

Tutkimuksen laskennan kohteena käytetään kolmea kerrostaloa. Kaksi näistä on T2H Pirkanmaa Oy:n samalla tontilla sijaitsevaa ulkoisesti samankaltaista kerrostalohanketta ja kolmas on teoreettinen variaatio toisesta näistä. Kerrostalohankkeille lasketaan hiilijalanjäljet ja kahdelle näistä kehitellään vähähiilisempiä ratkaisuja ja niiden vaikutuksia arvioidaan.



Kuva 11: As. Oy Tampereen pähkinä, itäinen sivu (T2H Pirkanmaa Oy)

Ensimmäinen kohde on vuonna 2022 valmistunut viisikerroksinen kerrostalo, As. Oy Tampereen Pähkinä. Pähkinä on perustettu kallioon tukeutuvien betonianturoin. Pähkinä on ensimmäistä kerrostaan lukuun ottamatta puukerrostalo. Rakennus sijaitsee rinnettontilla siten, että idän puolella näkyy 5 kerrosta ja lännen puolella 4 kerrosta, ja sen seurauksena ensimmäinen kerros on jouduttu rakentamaan teräsbetonielementein. Pähkinän runko on toteutettu ripalaatta-välipohjilla ja rankarunkoisilla suurelementeillä. Käytävien välipohjat ja parvekelaatat ovat vanerirunkoisia. Yläpohja on toteutettu LVL-ristikkojärjestelmällä. Vaikka ensimmäinen kerros on toteutettu teräsbetonielementein, on sen julkisivu silti toteutettu paikallan rakennettavalla puuverhouksella. Rakennukseen on

asennettu sprinklerijärjestelmä runkomateriaalinsa vuoksi. Pähkinä on esitetty kuvassa 11, jossa on nähtävillä lännen puolen 4 maanpäällistä kerrosta.

Toinen kohde on vuonna 2020 valmistunut viisikerroksinen kerrostalo, As. Oy Tampereen Kirsikka. Kirsikkakin on perustettu kallioon tukeutuvien betonianturoin ja sijaitsee rinnetontilla samoin tavoin. Kirsikan kaikki viisi kerrosta on toteutettu hybridimallisena. Kantava runko on toteutettu poikittaissuuntaisin kantavien teräsbetonein ja ontelolaattavälipohjin, mutta julkisivu on puuta. Kantavat päätyseinät on rakennettu betonisista ulko-kuorielementeistä, joiden kylkeen on asennettu puuverhouselementti. Yläpohja on toteutettu myös ontelolaatalla ja käytävien välipohjat massiivilaatalla. Pitkät ei-kantavat sivut on toteutettu paikalla rakennettuna puurankarunkoseinäinä samoin kuin välikaton seinätkin. Kirsikka on esitetty kuvassa 12, jossa on nähtävillä idän puolen 5 kerrosta.



Kuva 12: As. Oy Tampereen Kirsikka, läntinen sivu (T2H Pirkanmaa Oy)

Kolmas kohde on Kirsikan teoreettinen variaatio, jota ei ole koskaan rakennettu. Se on tyypillinen betonikerrostalo, jossa sekä runko että julkisivu ovat betonisia. Sen pitkien sivujen seinät on valmistettu ei-kantavista betonisandwichelementeistä samoin kuin välikaton seinätkin. Mitään pintoja ei ole lautaverhottu.

Kaikkien näiden rakennusten tontin pinta-ala on 1954m² ja lämmitetty kerrostasoala on 1850m² ja asuntoja näissä on 43 kussakin. Yhden rakennuksen vuosittainen sähkönkulutus on 73600 kWh ja kaukolämmön kulutus on 132505 kWh rakennuksen energiatoistuksen mukaan. Rakennusten energialuokitus on B. Nämä rakennukset vastaavat toisiaan lähes täysin ominaisuuksiltaan, jolloin laskennassa on käytetty paljon yhteisiä arvoja.

Tutkimusta suunniteltaessa oletettiin puurunkoisen kerrostalon hiilijalanjäljen olevan huomattavasti pienempi kuin betonisen vastaavan. Puurunkoisen pähkinän rakentamiskustannusten todettiin olevan huomattavasti suuremmat hybridimallin kirsikkaan verrattuna. Työn tavoitteena on löytää keinoja hiilijalanjäljen pienentämiseksi ilman puun käyttöä runkomateriaalina.

6.2 Kansallinen päästötietokanta

Tämän tutkimuksen empiirisen osuuden elinkaariarvioinnin laskenta suoritetaan Suomen kansallisen päästötietokannan CO2DATAn avulla Ympäristöministeriön rakennusten vähähiilisyden arviointimenetelmän mukaisesti.

Päästötietokanta kehitettiin Suomen ympäristökeskuksen toimesta, Ympäristöministeriön pyynnöstä yhteistyössä elinkaariarvioinnin asiantuntijoiden kanssa. Projekti oli osa Ympäristöministeriön kolmivaiheista matalahiilisen rakentamisen tiekarttaa. (Häkkinen 2021)

Päästötietokannan tarkoitus on tukea matalahiilisen rakentamisen suunnittelua. Se tarjoaa tyypilliset GWP-arvot (global warming potential) rakennustuotteille ja -palveluille sekä talotekniikkajärjestelmille. Päästötietokanta kattaa suurimman osan erilaisista rakennustuotteista sekä energia- ja kuljetuspalveluista ja muista palveluista, joita tarvitaan rakennuksen tuotanto-, käyttö ja purkuvaiheissa. (Häkkinen 2021)

[🏠](#) - Luokka

TUOTTEET

Lämmön- ja vedeneristys
 Rakennuslevyt
 Betonituotteet
 Teräs- ja metallituotteet
 Puutuotteet
 Mineraali- ja lasituotteet
 Lattiapäällysteet ja pintamateriaalit
 Talotekniset tuotteet
 Täydentävät rakennustuotteet
 Pohja- ja piharakentamisen tuotteet

PALVELUT JA PROSESSIT

Energiapalvelut
 Kuljetuspalvelut
 Rakentaminen
 Purkaminen ja purkutuotteiden käsittely

JÄRJESTELMÄT

Talotekniikka
 Käyttöiät

Kuva 13: Päästötietokannan luokittelu (CO2DATA 2023)

Päästötietokanta sisältää noin 250 tuotetta tai palvelua. Nämä on jaettu 15 luokkaan kuvan 13 mukaisesti. Tarjolla on myös käyttökiätiedot eri rakennustuotteille ja talotekniikkajärjestelmille. Luokat jakautuvat tuotetyypeihin kuvan 14 mukaisesti. Sivusto esittää yksittäisen rakennustuotteen tärkeimmät ympäristöindikaattorit kuvan 15 mukaisesti. Sivusto tarjoaa myös jokaiselle tuotteelle taustaraportin, jossa esitellään muun muassa tuotteen käyttö ja tausta kansallisessa mittakaavassa, merkittävimmät valmistajat sekä tuotteen hiilijalanjälki, siihen vaikuttavat tekijät ja perustelut tuotteen ympäristöindikaattorien suuruuden valinnalle. (Häkkinen 2021)

[🏠](#) - Luokka > Puutuotteet

CLT, Cross laminated timber
 GLT, Glued laminated timber
 GLVL, multiple glued laminated veneer lumber
 Heat treated planed timber for indoor use
[Heat treated planed timber for outdoor use](#)
 Heat treated timber for indoor use
 Heat treated timber for outdoor use
 Impregnated timber
 Laminated log wall structure
 LVL, laminated veneer lumber for beams, posts, and panels
 LVL, laminated veneer lumber for wall studs
 Sawn timber
 Sawn timber, planed

Kuva 14: päästötietokannan puutuotteet (CO2DATA 2023)

Tuotteiden ympäristöselvityksissä ympäristöindikaattoreita on useita, mutta päästötietokannan pääasiallisena indikaattorina toimii GWP. Tuotteiden GWP-arvo annetaan aina yksikössä kgCO₂e/kg. Lisätietona annetaan usein massa neliometriä tai kuutiometriä kohden konversiota helpottamaan. Energian GWP-arvo annetaan yksikössä kgCO₂e/kWh. Kuljetuspalveluiden GWP-arvo annetaan yksikössä kgCO₂/ton km. Rakentamisen ja purkamisen GWP-arvo annetaan yksikössä kgCo₂/m². (Häkkinen 2021)

päästötietokannassa mukana olevat erilaiset rakennustuotteet valittiin ja määriteltiin kattamaan merkittävä osuus kaikista rakennusosissa käytetyistä materiaaleista ja tuotteista sekä olemaan tärkeitä hiilijalanjäljen laskennassa. Tuotteiden, palveluiden ja järjestelmien GWP-arvot perustuvat julkisesti saatavilla olevaan tietoon, useimmiten tuotteiden ympäristöselosteisiin. Tietojen oleellisuuden arviointi on ollut tuotekohtaista. Kotimaisten tuotteiden osalta on huomioitu kansallisten tietojen lisäksi muita pohjoismaisia tietokantoja, koska valmistusprosessit ja -menetelmät sekä markkinat ovat usein samankaltaisia. Ulkomaisten tuotteiden, kuten OSB- ja MDF levyjen osalta on huomioitu tuotteiden valmistusmaiden tietokantoja. (Häkkinen 2021)

Päästötietokanta tarjoaa kahdenlaisia arvoja rakennustuotteiden A1-A3 moduuleihin. Ensimmäinen on tyypillinen arvo, joka edustaa merkittävimpien suomalaisten rakennustuotevalmistajien kyseisen tuotetyypin keskiarvoa, ja toinen on konservatiivisella kertoimella kerrottu arvo. Konservatiivinen kerroin on valittu saman tuotetyypin eri valmistajien hiilipäästöerojen pohjalta. Eri tuotteilla vaihteluväli voi toki olla huomattavan erilainen,

mutta konservatiiviseksi kertoimeksi on valittu 1,2. (Häkkinen 2021)

Ympäristöindikaattorit

GWP (A1-A3), KONSERVATIIVINEN ARVO Ilmastaselvityksen laskennassa käytettävä arvo	0.2 kg CO ₂ e /kg	
GWP (A1-A3 FOSSIL), TYYPILLINEN ARVO Ei käytetä rakentamislupaa haettaessa	0.17 kg CO ₂ e /kg	
GWP A1-A3 BIOGENIC Ilmastaselvityksen laskennassa käytettävä arvo	-1.6 kg CO ₂ e /kg	
GWP C3 Ilmastaselvityksen laskennassa käytettävä arvo	0.02 kg CO ₂ e /kg	
GWP C3 BIOGENIC Ilmastaselvityksen laskennassa käytettävä arvo	1.6 kg CO ₂ e /kg	
HIILIKÄDENJÄLKI Ilmastaselvityksen laskennassa käytettävä arvo	D2 Energy recovery D4 Carbon storage effect	-0.06 kg CO ₂ e /kg -1.6 kg CO ₂ e /kg
KONSERVATIIVISEN ARVON KERROIN A1-A3 fossil	1.2	
HUKKAKERROIN Hukka rakennustyömaalla	1.05	
MATERIAALISISÄLTÖ	Wood, natural fibre Other	99 % 1 %
UUSIUTUVIEN MATERIAALIEN OSUUS (%)	99 %	
KIERRÄTYSMATERIAALIEN OSUUS (%)	-	
HAITALLISTEN AINEIDEN OSUUS (%), (SVHC)	<0,1 %	
ELINKAAREN JÄLKEINEN SKENAARIO (%)	Reuse Recycled as secondary rawmaterial Energy recovery Final disposal Hazardous waste to be removed from use	0 % 0 % 100 % 0 % 0 %
MUUNNOSKERROIN	Density, kg/m ³	470

Kuva 15: Päästöietokannan rakennustuotteen esittely (CO2DATA 2023)

Uuden rakentamislain astuessa voimaan, konservatiivista arvoa tulee käyttää rakentamislupahakemuksessa, mikäli ei ole tietoa tarkasta tuotteesta, jota käytetään tai tuotteella ei ole EPD:tä. Tyypillistä arvoa voi käyttää, mikäli laskelmaa ei käytetä rakentamisluvan hakemiseen, kuten nyt tässä tutkimuksessa. Konservatiivinen kerroin kannustaa LCA-laskijoita käyttämään tuotteiden omia EPD:itä. (Häkkinen 2021)

6.3 Laskennan toteutus

Tässä luvussa käsitellään empiirisen osuuden toteutusta sekä tehtyjä valintoja ja oletuksia. Kerrostalorakennushankkeiden elinkaariarvioinnin laskenta on suoritettu sekä One Click LCA -laskentasovelluksella sekä käsin Ympäristöministeriön vuoden 2021 rakennusten vähähiilisyysarviointimenetelmään pohjautuvalla itse tehdyllä Excel laskurilla. Päätökseen tehdä laskenta myös manuaalisesti vaikutti kaksi asiaa. Ensimmäinen laskenta suoritettiin One Click LCA:lla ennen kuin tämän tutkimuksen teoreettista osuutta oli aloitettu kirjoittamaan ja sen seurauksena laskennan sisältö ei ollut vielä täysin selvää ja epäilin, ovatko tulokset päteviä. Päätös tehdä laskelmat uudelleen syntyi kuitenkin halusta ymmärtää elinkaarilaskennan menetelmiä syvemmin sen sijaan, että antaisi vain laskentaohjelman tuottaa minulle raportin sisään syöttämieni materiaalien ja määrien lopputuloksena. Arvelut ensimmäisen laskennan pätevyydestä olivat turhia, sillä molempien laskelmien tulokset olivat hyvin samankaltaisia keskenään. Lähteinä materiaalien hiilijalanjälkitiedoille on käytetty pääasiassa Suomen kansallista päästötietokantaa, CO2DATAA, mutta myös hieman epätavallisempien materiaalien tietojen osalta on käytetty tuotteiden omia ympäristöselosteita.

Lähtötietoina oli Kirsikan ja Pähkinän IFC-mallit. Nämä tietomallit avattiin Solibri Officeella luettavaan muotoon. Solibrissa voidaan luoda Excel-pohjainen määrälaskentaluettelo, jossa ilmenee jokainen tietomallissa oleva artikkeli luokkineen, määrineen, tilavuuksineen ja materiaalitietoineen. Solibri Officeen on mahdollista ladata One Click LCA lisäosa, jolloin tämä määrälaskentaluettelo voidaan syöttää suoraan elinkaarilaskentaohjelmaan. Tämä on kuitenkin ideaalitalanne, joka ei toteutunut. Tietomalleja ei ollut mallinnettu tarkka määrälaskentaluettelo mielessä, vaan useista rakennusosista puuttui luokka- ja materiaalitiedot. Kun Solibri Officea pyydettiin tuottamaan määrälaskentaluettelo, useita rakennusosia jäi siis tunnistamatta. Ei-tunnistetut rakennusosat määritettiin oikeisiin luokkiin manuaalisesti ja määrälaskentaluettelo oli laskentaohjelmaan tuotavassa muodossa Excel-tiedostona, jossa rakennusosille oli ilmoitettu luokka, materiaali, määrä ja määrän yksikkö. Tässä vaiheessa osa materiaalitiedoista kuitenkin puuttui.

Määrälaskentaluettelo tuotiin One Click LCA- laskentaohjelmaan. Osaa rakennusosista ohjelma ei tunnistanut ja, osan materiaaleista ohjelma tunnisti väärin, jolloin se pyysi muuttamaan tiedot manuaalisesti oikeiksi. Niiden rakennusosien osalta, joilla ei ollut vielä lainkaan materiaalitunnistetta, etsittiin hankkeiden detaljikuvista oikeat tiedot ennen kuin ohjelma hyväksyi ne. Erityisesti haasteita aiheuttivat puiset rankarakenteet, jotka oli mallinnettu umpinaisina ja usein ilman materiaalitunnisteita. Näistä laskettiin erikseen kunkin rakennetyypin osalta runkotolppien ja koolausten tilavuusmäärä neliötä kohden. Ohjelma raportoi materiaalien A1-A3, B4-B5 ja C1-C4 moduulien arvot määrien pohjalta.

Tuloksesta oltiin kuitenkin epävarmoja ja oppimisen tarve oli suuri, joten nyt tarkentuneet rakennusosien materiaalit, määrät ja määrien yksiköt otettiin talteen ja syötettiin Exceliin uudeksi, tarkemmaksi määrälaskentaluetteloksi. Tietokannaksi valittiin CO2DATA ympäristöselosteiden sijaan, sillä se tarjoaa keskimääräistä tietoa Suomessa käytettävien rakennusmateriaalien hiilijalanjäljistä, ja tutkimuksen tavoitteena on saada mahdollisimman yleispäteviä tuloksia.

CO2DATA ilmoittaa tuotteiden hiilijalanjäljet yksikössä kgCO₂/kg, ja määrälaskentaluettelossa oli käytetty eri yksiköitä erityyppisille tuotteille. Tämä ratkaistiin kullekin yksikölle soveltuvalla konversiokertoimella ja CO2DATA:sta löytyvällä muunnoskertoimella. One Click LCA tarjosi automaattisesti jokaiselle materiaalille oikean hukkakertoimen. Myös tämä löytyy CO2DATA:sta ja lisättiin määrälaskentaluettelon määriin. Päästötietokanta antaa jokaiselle materiaalille tuotevaiheen ja purkuvaiheen hiilijalanjäljet sekä hiilikädenjäljen. Tuotevaiheelle on tyypillinen arvo ja konservatiivinen arvo. Konservatiivista arvoa käytetään tässä tutkimuksessa vain, kun ilmoitetaan rakennushankkeiden rakentamislupahakemuksen mukainen raportti, mutta varsinaisessa vertailuosuudessa käytetään tyypillistä arvoa, jotta arvot olisivat keskenään vertailtavissa. Päästötietokannasta löytyy myös käyttöiät. Mikäli rakennusosaa joudutaan vaihtamaan 50 vuoden aikana, laskettiin sille myös B4 moduuli. Talotekniikan hiilijalanjälki arvioitiin päästötietokannan mukaisesti kertomalla annettu arvo (yksikössä kgCO₂/m²) kerrosalaneliöillä.

Rakennuksen käytön aikainen ostoenergian hiilijalanjälki arviotiin kertomalla vuosittainen ostoenergia sähkön ja kaukolämmön päästötietokannasta löytyvillä päästövähennemät huomiovilla kertoimilla.

Rakennustyömaan, korjausten sekä purkutyömaan ja purkutavarankuljetusten hiilijalanjäljet arviotiin Ympäristöministeriön taulukkoarvojen mukaisesti. Maatöille on erillinen kerroin päästötietokannassa. Tämä menee rakennuspaikan hiilijalanjälkeen.

Lopputuloksena saatiin Excel tiedosto, jossa on eriteltyä kunkin rakennuksen hiilijalanjäljet rakennuksen eri elinkaaren vaiheille moduuleittain konservatiivisella kertoimella tai ilman sekä rakennukselle että rakennuspaikalle. Tiedostosta on yksinkertaista eritellä kunkin rakennusosan määrät ja päästöt lähempää tarkastelua varten.

7. LASKENNAN TULOKSET

Tässä luvussa esitetään laskelmien tulokset kolmen kohteemme hiilijalanjälkien ja hiilikädenjälkien jakautumisesta. Tavoitteena on selvittää, kuinka suuren osan kokonaishiilijalanjäljestä muodostavat moduulit A1-A3 ja kuinka paljon mikäkin rakenne aiheuttaa hiilipäästöjä. Tutkinnan kohteena ovat rakenteet, joista voidaan tehdä päästövähennyksiä vähähiilistä betonia käyttämällä. Siispä maaosat, ei-kantavat väliseinät, pintamateriaalit, vesikate, ikkunat, ovet sekä hissit, portaat, kiintokalalusteet ja talotekniikkajärjestelmät sekä muutama massaltaan merkityksetön rakennusosa jää tutkinnan ulkopuolelle. Nämä merkitään ”muiksi materiaaleiksi”. Tutkinnan kohteena ovat seuraavat rakenteet:

- Perustukset
- Alapohja
- Välipohjat
- Yläpohja
- Kantavat ulkoseinät
- Kantavat väliseinät
- Parveke- ja terassipielet
- Parveke- ja terassilaatat
- Ei-kantavat ulkoseinät
- Tekniikkahormit

Tutkittavan rakenteen kohdalla ei huomioida pelkästään kantavaa osaa, vaan koko läpileikkaus, kuten koolaukset, eristeet ja tasoitteet. Rakenteen koko läpileikkauksen huomioiminen helpottaa vertailua. Puurunkoiselle Pähkinälle ei olla esittämässä vaihtoehtoisia vähähiilisempiä ratkaisuja, vaan se toimii vertailukohtana betonirunkoisille kohteille.

7.1 Pähkinä – Puutalo

Taulukoissa 3 on esitetty Pähkinän elinkaarilaskennan tulokset ja taulukossa 4 on esitetty vaaditut perustiedot Ympäristöministeriön vähähiilisyiden arviointimenetelmän mukaisesti. A-moduulin laskentaan on käytetty Suomen kansallisen päästötietokannan mukaisia konservatiivisia päästöarvoja. Jatkossa käytetään vain tyypillisiä arvoja ilman konservatiivista kerrointa.

Taulukko 3: Pähkinän elinkaariarvioinnin tulokset yksikössä kgCO₂/m²/a

As. Oy Tampereen Pähkinä	Puutalo	
Hiilijalanjälki	Rakennus	Ra- kennuspaikka
A. Ennen käyttöä	7,40	0,78
B. Käytön aikana	10,33	0,00
C. Käytön jälkeen	1,09	0,14
A+B+C Yhteensä	18,82	0,92
D. Hiilikädenjälki	-5,04	-0,14

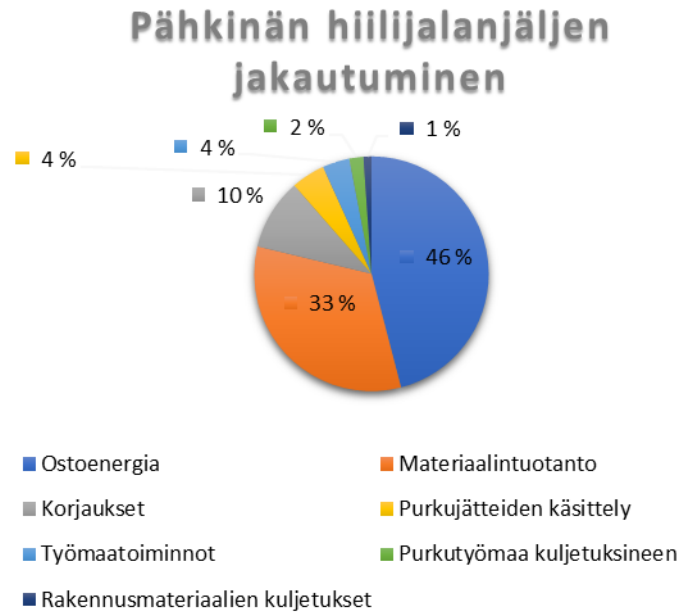
Pähkinän elinkaaren kokonaishiilijalanjälki on 1715 tonnia CO₂e, joista rakennuspaikka muodostaa 76 tonnia ja rakennus 1639 tonnia. Hiilikädenjälkeä muodostuu 467 tonnia hiilidioksidiekvivalenttia. (Taulukko 3)

Taulukko 4: Pähkinän perustiedot

Rakennuksen perustiedot	
Käyttötarkoitusluokka	012 Kerrostalo
Lämmitetty huoneala	1850m ²
Laskennallinen ostoenergiankulutus	
-Sähkö	7360 kWh
-Maalämpö	132505 kWh
Arviointijakson pituus	50 vuotta
pääsiallinen runkomateriaali	Puu
Tavoitteellinen käyttöikä	50 vuotta
Arvioinnissa käytetty laskentaohjelma	Excel
Ilmastaselvityksen päiväys	21.11.2023
Selvityksen laatijan nimi	Tuomas Laitinen

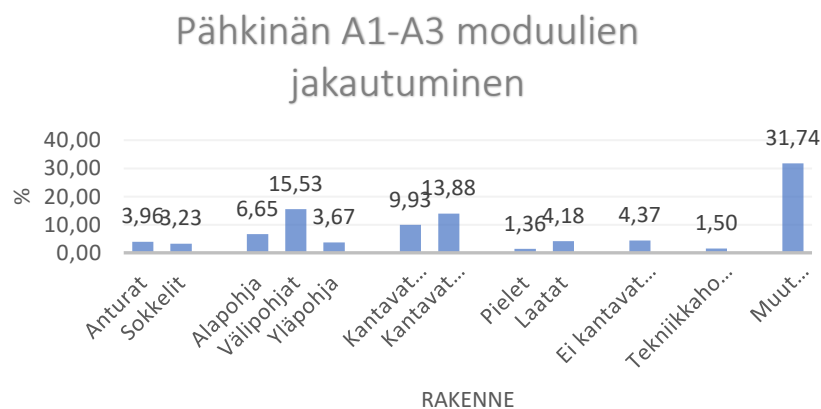
Suurimman osan Pähkinän päästöistä muodostaa moduuli B6, käytön aikainen ostoenergiankulutus sähkön ja kaukolämmön muodossa. Ne aiheuttavat 788 tonnia CO₂e eli noin 46 % koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Toiseksi suurimmat päästöt muodostaa A-moduuli eli materiaalintuotanto. Tämä aiheuttaa 563 tonnia CO₂e eli noin 33 % koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Kolmanneksi suurimmat päästöt muodostaa B4 moduuli, korjaukset. Tämä aiheuttaa 168 tonnia CO₂e, eli noin 10 % koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Korjaukset koostuvat pääasiassa ikkunoiden, ovien, vesikatteen, hissien ja talotekniikkajärjestelmien vaihdoista 50 vuoden aikana. Loput 11 % aiheutuvat suuruusjärjestyksessä moduuleista C3-C4, A5, C1-C2 ja A4, eli purkujätteen käsittely, työmaa-

toiminnot, purkutyömaa kuljetuksineen sekä rakennusmateriaalien kuljetukset uudisrakennusvaiheessa. Näiden luvut ovat vastaavassa järjestyksessä 80, 64, 33 ja 19 tonnia CO₂e sekä prosenttiosuuksina kokonaishiilijalanjäljestä 4 %, 4 %, 2 % ja 1 %. (Kuva 16)



Kuva 16: Pähkinän hiilijalanjäljen jakautuminen

Pähkinän tuotevaihemoduulin merkittävimmät päästöt aiheuttaa kantava runko, eli kantavat väliseinät, välipohjat, kantavat ulkoseinät, alapohja ja yläpohja, jotka yhdessä muodostavat 50 % A-moduulin päästöistä. Näistä 26 prosenttiyksikköä muodostuu vaakarakenteista ja 24 prosenttiyksikköä pystyrakenteista. Vastaavasti perustukset, parvekerakenteet, ei-kantavat ulkoseinät ja tekniikkahormit muodostavat yhdessä vain noin 19 %. Loput päästöistä muodostuvat pääasiassa maaosista, ikkunoista, ovista, vesikatteesta, talotekniikasta ja pintamateriaaleista. (Kuva 17)



Kuva 17: Pähkinän A1-A3 moduulien jakautuminen

7.2 Kirsikka – Hybriditalo

Taulukossa 5 on esitetty Kirsikan (hybridi) elinkaarilaskennan tulokset ja taulukossa 6 on esitetty vaaditut perustiedot Ympäristöministeriön vähähiilisyysarviointimenetelmän mukaisesti. A-moduulin laskentaan on käytetty Suomen kansallisen päästötietokannan mukaisia konservatiivisia päästöarvoja. Jatkossa käytetään vain tyypillisiä arvoja ilman konservatiivista kerrointa.

Taulukko 5: Hybriditalon elinkaariarvioinnin tulokset yksikössä kgCO₂/m²/a

As. Oy Tampereen Kirsikka	Hybriditalo	
Hiilijalanjälki	Rakennus	Rakennuspaikka
A. Ennen käyttöä	9,90	0,94
B. Käytön aikana	10,15	0,00
C. Käytön jälkeen	1,38	0,15
A+B+C Yhteensä	21,43	1,08
D. Hiilikädenjälki	-3,56	-0,20

Hybriditalon elinkaaren kokonaishiilijalanjälki on 1930 tonnia CO₂e, joista rakennuspaikka muodostaa 88 tonnia ja rakennus 1841 tonnia hiilidioksidiekvivalenttia. Hiilikädenjälkeä muodostuu 329 tonnia hiilidioksidiekvivalenttia. (Taulukko 5)

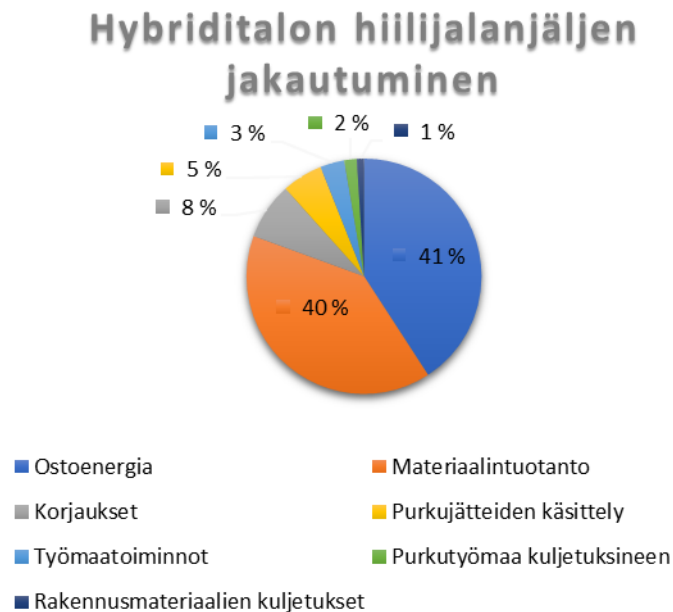
Taulukko 6: Pähkinän perustiedot

Rakennuksen perustiedot	
Käyttötarkoitusluokka	012 Kerrostalo
Lämmitetty huoneala	1850m ²
Laskennallinen ostoenergiankulutus	
-Sähkö	7360 kWh
-Maalämpö	132505 kWh
Arviointijakson pituus	50 vuotta
pääasiallinen runkomateriaali	Teräsbetoni
Tavoitteellinen käyttöikä	50 vuotta
Arvioinnissa käytetty laskentaohjelma	Excel
Ilmastaselvityksen päiväys	21.11.2023
Selvityksen laatijan nimi	Tuomas Laitinen

Suurimman osan hybriditalon päästöistä muodostaa moduuli B6, käytön aikainen ostoenergiankulutus sähkön ja kaukolämmön muodossa. Ne aiheuttavat 788 tonnia CO₂e eli noin 41 % koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Toiseksi suurimmat päästöt muodostaa A-moduuli eli materiaalintuotanto. Tämä aiheuttaa 767 tonnia CO₂e eli noin 40 % koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Kolmanneksi suurimmat päästöt muodostaa B4 moduuli, korjaukset. Tämä aiheuttaa 151 tonnia CO₂e, eli noin 8 % koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Korjaukset koostuvat koostuu pääasiassa ikkunoiden, ovien, vesikatteen, hissien ja talo-

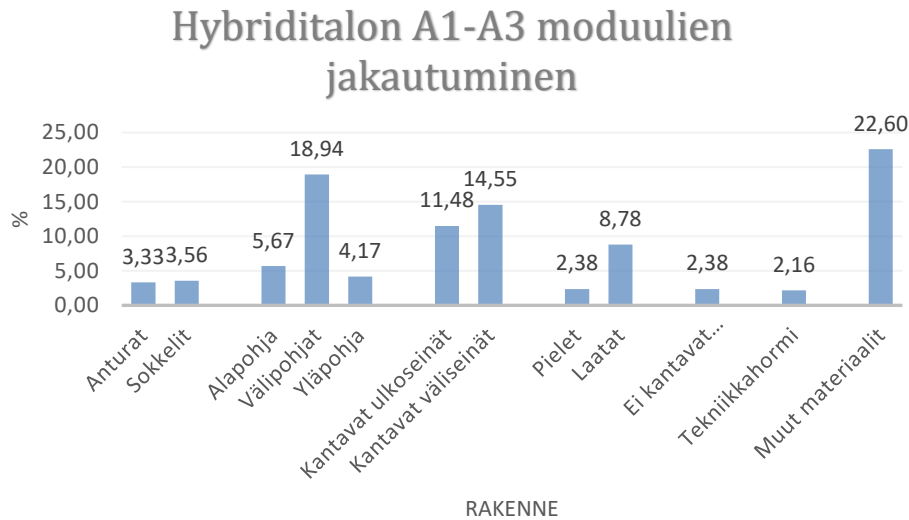
tekniikkajärjestelmien vaihdoista 50 vuoden aikana. Loput 11 prosenttia aiheutuvat suurusjärjestyksessä moduuleista C3-C4, A5, C1-C2 ja A4, eli purkujätteiden käsittely, työmaatoiminnot, purkutyömaa kuljetuksineen sekä rakennusmateriaalien kuljetukset uudisrakennusvaiheessa. Näiden luvut ovat vastaavassa järjestyksessä 108, 64, 33 ja 19 tonnia CO₂e sekä prosentiosuuksina kokonaishiilijalanjäljestä 5 %, 3 %, 2 % ja 1 %.

(Kuva 18)



Kuva 18: Hybriditalon hiilijalanjäljen jakautuminen

Hybriditalon tuotevaihemoduulin merkittävimmät päästöt aiheuttaa kantava runko, eli kantavat väliseinät, välipohjat, kantavat ulkoseinät, alapohja ja yläpohja, jotka yhdessä muodostavat 55 % A-moduulin päästöistä. Näistä 29 prosenttiyksikköä muodostuu vaakarakenteista ja 26 prosenttiyksikköä pystyrakenteista. Merkittävässä roolissa ovat myös ulkotasolaatat 9 % osuudella. Vastaavasti perustukset, parvekkeiden pystyrakenteet, ei-kantavat ulkoseinät ja tekniikkahormit muodostavat yhdessä vain noin 14 %. Loput päästöistä muodostuvat pääasiassa maaosista, ikkunoista, ovista, vesikatteesta, talotekniikasta ja pintamateriaaleista. (Kuva 19)



Kuva 19: Hybriditalon A1-A3 moduulien jakautuminen

7.3 Kirsikka – Betonitalo

Taulukoissa 7 on esitetty Kirsikan (betoni) elinkaarilaskennan tulokset ja taulukossa 8 on esitetty vaaditut perustiedot Ympäristöministeriön vähähiilisuuden arviointimenetelmän mukaisesti. A-moduulin laskentaan on käytetty Suomen kansallisen päästötietokannan mukaisia konservatiivisia päästöarvoja. Jatkossa käytetään vain tyypillisiä arvoja ilman konservatiivista kerrointa.

Taulukko 7: Betonitalon elinkaariarvioinnin tulokset yksikössä kgCO₂/m²/a

As. Oy Tampereen Pähkinä	betonitalo	
Hiilijalanjälki	Rakennus	Rakennuspaikka
A. Ennen käyttöä	10,80	0,94
B. Käytön aikana	10,15	0,00
C. Käytön jälkeen	1,35	0,15
A+B+C Yhteensä	22,29	1,08
D. Hiilikädenjälki	-3,00	-0,20

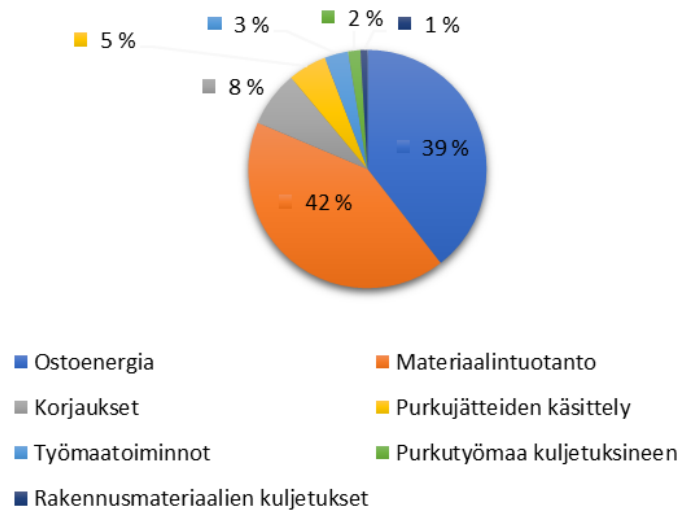
Betonitalon elinkaaren kokonaishiilijalanjälki on 1996 tonnia CO₂e, joista rakennuspaikka muodostaa 88 tonnia ja rakennus 1907 tonnia hiilidioksidiekvivalenttia. Hiilikädenjälkeä muodostuu 329 tonnia hiilidioksidiekvivalenttia. (Taulukko 7)

Taulukko 8: Pähkinän perustiedot

Rakennuksen perustiedot	
Käyttötarkoitukseluokka	012 Kerrostalo
Lämmitetty huoneala	1850m ²
Laskennallinen ostoenergiankulutus	
-Sähkö	7360 kWh
-Maalämpö	132505 kWh
Arviointijakson pituus	50 vuotta
pääasiallinen runkomateriaali	Teräsbetoni
Tavoitteellinen käyttöikä	50 vuotta
Arvioinnissa käytetty laskentaohjelma	Excel
Ilmastaselvityksen päiväys	21.11.2023
Selvityksen laatijan nimi	Tuomas Laitinen

Toisin kuin puu- ja hybriditaloissa, betonitalossa suurin hiilijalanjälki muodostuu tuotevaiheen moduuleista A1-A3, jotka aiheuttavat jo enemmän hiilipäästöjä kuin rakennuksen elinkaaren ostoenergia. Moduulit A1-A3 muodostavat 836 tonnia CO₂e eli noin 42 % koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Toiseksi suurimmat päästöt aiheuttaa B6 eli ostoenergian kulutus. Tämä aiheuttaa 787 tonnia CO₂e eli noin 39% koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Kolmanneksi suurimmat päästöt muodostaa B4 moduuli, korjaukset. Tämä aiheuttaa 151 tonnia CO₂e, eli noin 8 % koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Korjaukset koostuvat koostuu pääasiassa ikkunoiden, ovien, vesikatteen, hissien ja talotekniikkajärjestelmien vaihdoista 50 vuoden aikana. Loput 10 prosenttia aiheutuvat suuruusjärjestyksessä moduuleista C3-C4, A5, C1-C2 ja A4, eli purkujätteiden käsittely, työmaatoiminnot, purkutyömaa kuljetuksineen sekä rakennusmateriaalien kuljetukset uudisrakennusvaiheessa. Näiden luvut ovat vastaavassa järjestyksessä 108, 64, 33 ja 19 tonnia CO₂e sekä prosenttiosuuksina kokonaishiilijalanjäljestä 5 %, 3 %, 2 % ja 1 %. (Kuva 20)

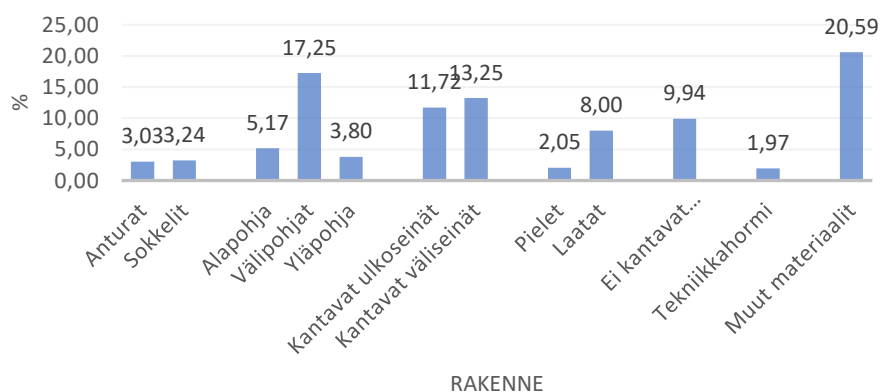
Betonitalon hiilijalanjäljen jakautuminen



Kuva 20: Betonitalon hiilijalanjäljen jakautuminen

Betonitalon tuotevaihemoduulin merkittävimmät päästöt aiheuttaa kantava runko, eli kantavat väliseinät, välipohjat, kantavat ulkoseinät, alapohja ja yläpohja, jotka yhdessä muodostavat 51 % A-moduulin päästöistä. Näistä 25 prosenttiyksikköä muodostuu vaakarakenteista ja 26 prosenttiyksikköä pystyrakenteista. Merkittävässä roolissa ovat myös ulkotasolaatat 8 % osuudella ja muista taloista poikkeavasti ei-kantavat ulkoseinät, jotka on puun sijasta rakennettu betonisandwich-elementein 10 % osuudella. Vastaavasti perustukset, parvekkeiden pystyrakenteet ja tekniikkahormit muodostavat yhdessä vain noin 10 %. Loput päästöistä muodostuvat pääasiassa maaosista, ikkunoista, ovista, vesikatteesta, talotekniikasta ja pintamateriaaleista. (Kuva 21)

Betonitalon A1-A3 moduulien jakautuminen



Kuva 21: Betonitalon A1-A3 moduulien jakautuminen

8. TULOSTEN ANALYSOINTI

8.1 Tulosten vertailu

Puutalon elinkaaren hiilijalanjälki oli 923 kgCO₂e/brm², hybriditalon 1043 kgCO₂e/brm² ja betonitalon 1079 kgCO₂e/brm². Puutalon hiilijalanjälki on siis vain 14,5 % pienempi kuin betonitalon ja hybridiratkaisu oli hiilijalanjäljeltään vain 3,3 % parempi. Tässä mitta-kaavassa säästöt tuntuivat hyvin pieniltä. Käytön aikainen energiankulutus on materiaaleja suuremmassa roolissa. Kehitystä tapahtuu, ja tulee tapahtua kaikilla sektoreilla, jotta ilmastotavoitteet voidaan saavuttaa.

Merkittävämpiä eroja huomataan näiden kolmen laskennan kohteen tuotevaiheiden kohdalla. Puutalon A-moduuli oli 305 kgCO₂e/brm², hybriditalon 415 kgCO₂e/brm² ja betonitalon, 452 kgCO₂e/brm². A-moduuleissa ero puutalon ja betonitalon välillä oli jopa 48 % ja hybriditalon ja betonitalon välillä 9 %. Tässä luvussa verrataan eri talojen rakenteiden A-moduuleja. Teräsbetonirakenteet muodostavat suurimman osan (285 kgCO₂e/brm²) betonitalon A-moduulin hiilijalanjäljestä. (Liite 1)

Taulukossa 9 on eritelty kunkin laskennan kohteen rakennetyypit ja niiden A-moduulien hiilijalanjäljet rakenneliometriä kohden. Huomionarvoista on, että taulukossa on esitetty kustakin rakennetyypistä vain pääasiallinen osa. Esimerkiksi puutalossa ensimmäinen kerros on teräsbetonista, mutta vertailun vuoksi esille on tuotu vain ylempien kerrosten puurakenteiset osat.

Hybriditalon ja betonitalon rakenteet olivat pääosin samanlaisia. Perustukset ja vaakarakenteet ovat samat, mutta eroavaisuudet käyvät ilmi pystyrakenteissa. Hybriditalon parvekepielet ovat betonitalon pieliä hiili-intensiivisempiä, koska hybriditalossa betonisen pielielementin pintaan on rakennettu lautaverhous, mutta ero on hyvin mitätön. Toinen eroavaisuus on kantavan päätyseinän rakenteessa. Betonitalossa on käytetty betonisandwichelementtiä, kun taas hybriditalossa on käytetty sisäkuorilaattaa eristyksellä ja lautaverhouksella. Hybriditalossa siis 80 mm betonisen ulkokuoren korvaa siis tuulensuojalevy, koolaus ja lautaverhous. Näiden rakenteiden hiilijalanjäljet ovat 143 kgCO₂e/m² ja 114 kgCO₂e/m². Eroa syntyy 20 % päätyseinän osalta. Suurin eroavaisuus hybriditalon ja betonitalon osalta aiheutuu ei-kantavista ulkoseinistä. Betonitalossa on käytetty ohutta betonisandwichelementtiä ja hybriditalossa LVL-rankarunkoisia paikallavalmistettuja puuseiniä. Sandwichelementin hiilijalanjälki on 114 kgCO₂e/m² ja puuseinän 32 kgCO₂e/m², ja tästäkin eristeet muodostavat kolme neljäsosaa. Puura-

kenteisen seinän päästöt ovat betonisandwich-seinää 72 % pienemmät. Hybridirakentaminen vaikuttaisi olevan ainakin hiilijalanjäljen näkökulmasta varsin hyvä vaihtoehto hiilijalanjäljen vähentämiseksi erityisesti ei-kantavien rakenteiden osalta, koska millään vähähiilisellä betonilla ei tällä hetkellä voida saavuttaa näin suurta säästöä hiilijalanjäljessä. (Taulukko 9)

Taulukko 9: Laskennan kohteiden rakenteiden hiilijalanjälkien vertailu (Tavallinen betoni)

	Puutalo	kgCO ₂ e/m ²	Hybriditalo	kgCO ₂ e/m ²	betonitalo	kgCO ₂ e/m ²
Alapohja						
-Asunnot	Ontelolaatta	124	Ontelolaatta	128	Ontelolaatta	128
-Käytävät	Ontelolaatta	110	Massiivilaatta	120	Massiivilaatta	120
Välipohja						
-Asunnot	Ripalaatta	60	Ontelolaatta	114	Ontelolaatta	114
-Käytävät	Vaneri	74	Massiivilaatta	109	Massiivilaatta	109
Yläpohja	Ristikkorakenne	54	Ontelolaatta	82	Ontelolaatta	82
Kantava ulkoseinä	Rankarunko	38	Sisäkuorielem	114	Sandwich	143
Kantava väliseinä	Rankarunko	33	Teräsbetoni	86	Teräsbetoni	86
Ulkotasot						
-Pielet	Vaneri	26	Teräsbetoni	91	Teräsbetoni	86
-Laatat	Vaneri	36	Massiivilaatta	108	Massiivilaatta	108
Ei-kantavat ulkoseinät	Rankarunko	32	Rankarunko	32	Sandwich	114

Perustusten eli anturoiden ja sokkelien osalta eroavaisuuksia syntyi suhteellisen vähän. Puutalo on betonirunkoisia jonkin verran keveämpi, jolloin sen perustusten hiilijalanjälki oli 24 % pienempi. (Liite 1)

Kaikissa taloissa oli sama alapohjaratkaisu, eli asuntojen alla ontelolaatat ja käytävän alla massiivilaatat. Näin ollen alapohjien osalta ei syntynyt merkittäviä eroavaisuuksia puutalon ja betonirunkoisten välillä. (Taulukko 9)

Kaikissa taloissa on myös sama ensimmäisen kerroksen välipohjaratkaisu, mutta eroavaisuudet syntyivät puutalon ja betonirunkoisten välillä ylempien kerrosten välipohjissa. Kokonaisuudessaan puutalon välipohjien hiilijalanjälki on 40 % pienempi. Puutalossa asuntojen ripalaattavälipohjan hiilijalanjälki on 60 kgCO₂e/m², käytävien vanerivälipohjan 74 kgCO₂e/m². Betonitalon asuntojen ontelolaattavälipohjan hiilijalanjälki on 114 kgCO₂e/m² ja käytävän massiivilaattavälipohjan 109 kgCO₂e/m². Puutalon välipohjatyypin hiilijalanjäljet ovat 47 % ja 32 % pienempiä. (Taulukko 9)

Puutalon ristikkoyläpohja on kokonaisuudessaan 36 % vähähiilisempi, kuin betonirunkoisten talojen ontelolaattayläpohjat. Puutalon yläpohjan kantavien rakenteiden hiilijalanjälki on 87 % pienempi kuin betonirunkoisten, mutta koko rakenteen eroavaisuus on kovin pieni, koska suurimman osan yläpohjan hiilijalanjäljestä muodostavat eristeet. (Taulukko 9)

Puutalon kantavat ulkoseinät kokonaisuudessaan 44 % vähähiilisempiä kuin betonitalolla. Ero on näinkin pieni, koska puutalon ensimmäisen kerroksen kantava päätyseinä on teräsbetoninen. Puutalon rankarunkoisen kantavan seinän hiilijalanjälki on 38 kgCO₂e/m² ja betonisen sandwichelementin hiilijalanjälki on 143 kgCO₂e/m². Rankarunkoinen seinä on tätä 74 % vähähiilisempi. (Taulukko 9)

Puutalon kantavat väliseinät ovat kokonaisuudessaan 31 % vähähiilisempiä kuin betonirunkoisilla taloilla. Ero jälleen kovin pieni, koska puutalon ensimmäinen kerros on teräsbetoninen. Ero puutalon rankarunkoisen kantavan väliseinän ja betonirunkoisen kantavan väliseinän välillä on 62 %. (Taulukko 9)

Puutalon ulkotasojen pielirakenteet ovat kokonaisuudessaan 56 % vähähiilisempiä kuin betonitalon pielet. Hybriditalon ulkotasojen pielet ovat vielä hieman hiili-intensiivisempiä, kuin betonitalossa, koska pelkän betoniseinän lisäksi sen kylkeen on asennettu lisäksi puuverhous. Vaneripielen hiilijalanjälki on 26 kgCO₂e/m² ja betonipielen 86 kgCO₂e/m². Näiden välinen ero on 70 %. (Taulukko 9)

Puutalon ulkotasojen laattarakenteet ovat kokonaisuudessaan 65 % vähähiilisemmät kuin betonirunkoisilla taloilla. Vanerisen laattarakenteen hiilijalanjälki on 36 kgCO₂e/m² ja betonisen vastaavasti 108 kgCO₂e/m². Näiden välinen eron on 67 %. (Taulukko 9)

Puutalon ja hybriditalon ei-kantavat ulkoseinät ovat kokonaisuudessaan 71 % vähähiilisemmät kuin betonitalolla. Kevyen rankarakenteisen puuseinän hiilijalanjälki on 32 kgCO₂e/m² ja ohuen sandwichelementin 114 kgCO₂e/m². Näiden ero on 72 %. (Taulukko 9)

Yllä mainitut kokonaishiilijalanjälkierot ovat hieman harhaanjohtavia, koska puutalon alin kerros on teräsbetoninen, mikä nostaa puutalon välipohjien, ulkoseinien, kantavien väliseinien sekä ulkotasarakenteiden kokonaishiilijalanjälkeä. Sen sijaan taulukon 9 mukainen rakenteiden vertailu neliömetritasolla kertoo hyvinkin tarkkaan, millaisista on puun ja betonin välinen ero hiilijalanjäljessä.

Havaittiin, että tämäntyyppinen puinen ripalaatta- ja vanerivälipohja tai ristikkoyläpohja antaa suhteellisen maltillisia päästövähennyksiä betoniseen verrattuna. Betonisessa ala-, väli- ja yläpohjassa on kuitenkin huomattava määrä betonista massaa, josta on helppo ottaa hiilijalanjälkisäästöä vähähiilisemmällä betonilla. (Liite 1)

Sen sijaan erityisesti kantavat ja ei-kantavat seinärakenteet ja ulkotasarakenteet ovat puurakenteisina huomattavasti betonisia rakenteita vähähiilisempiä. Toisaalta näidenkin massa on huomattava ja sieltä olisi myös mahdollista pienentää hiilijalanjälkeä vähähiilisellä betonilla. (Liite 1)

Sen lisäksi, että puutalo on materiaalipäästöiltään betonirunkoisia huomattavasti pienempi, on sillä myös suurempi hiilikädenjälki. Hiilikädenjälkeä ei sovi vähentää hiilijalanjäljestä, mutta suuremmasta hiilikädenjäljestä saattaa silti olla hyötyä tonttikilpailussa ja markkinoinnissa.

8.2 Hiilipäästöjen vähentäminen

Kuten edellisessä luvussa keskityttiin A-moduulin päästöihin, niin keskitytään myös tässä luvussa ratkaisemaan, kuinka A-moduulin päästöjä voidaan pienentää. Tavoitteena on kehittää ratkaisupaketteja hiilijalanjäljen vähentämiseksi.

Erilaisten vähähiilisten betonien ja betonielementtien vähähiilisten versioiden saatavuutta ja hintatietoja on selvitetty puhelinsoitoin ja sähköpostiviestein suomen suurimmilta betonitoimittajilta. Betonielementtien vähähiilisyysluokitusta ei ole vielä julkaistu, joten elementtien tiedustelu ei ollut yhtä helppoa kuin valmisbetonin. GWP-luokitusta ei siis voida tietää, mutta ainakin kunkin toimijan vähähiilisten elementtien EPD:t ovat saatavilla.

Kirjallisuudesta ja keskusteluista betonitoimittajien kanssa on selvinnyt, että betonielementtejä ei ole tällä hetkellä yleisesti saatavilla pakkas- ja karbonatisoitumisrasitettuihin olosuhteisiin. Näin ollen ulkotasojen betoniset laatta- ja pielitelementit ovat pois mahdollisuuksien piiristä. Sandwichelementtien ulkokuoria ei myöskään saa vähähiilisinä, mutta sisäkuoria saa ja samoten sisäkuorielementtejä. Hormielementtejä ei ollut yleisesti saatavilla, ja suuri osa hormielementin päästöistä muodostuu muutenkin sen sisällä olevasta talotekniikasta. Talon kantavissa rakenteissa, eli perustuksissa, ala-, väli ja yläpohjissa, väliseinissä, ja ulkoseinien sisäkuorissa on noin 65 % betonitalon kaikesta betonisesta massasta ja nämä ovat rasisuusluokissa, joihin vähähiilistä betonia on yleisesti saatavilla (Liite 1). Merkittävin suurissa rasisuusluokissa oleva massa on parvekelaatoissa ja sandwichelementtien ulkokuorissa.

Teräsbetoniset rakenteet muodostavat 527 tonnin osuuden koko betonitalon A-moduulin 836 tonnin hiilipäästöistä. Näistä 373 tonnia aiheutuu rakenteista, joiden hiilipäästöjä voidaan vähentää vähähiilisemmän betonin avulla.

Taulukossa 10 On laskettu, kuinka paljon kunkin betonitalon rakenteen betonin korvaaminen vähähiilisemmällä versiolla voisi vaikuttaa A-moduulin hiilipäästöihin. Taulukossa on esitelty kunkin rakenteen sisältämän teräsbetonin määrät ja hiilidioksidiekvivalenttipäästöt kuutio- tai neliometriä kohden sekä rakenteen teräsbetonin kokonaishiilijalanjäljen ensin tavallisella betonilla ja sitten vähähiilisellä betonilla. Tavallisen betonin hiilijalanjälki on arvioitu Suomen kansallisen päästötietokannan arvojen perusteella, koska ne

edustavat keskimääräisiä suomalaisia päästöjä. Tarkennuksena vielä, että ero tämän taulukon ja taulukon 10 hiilijalanjälkien välillä on siis se, että tässä taulukossa ei ole huomioitu koko rakenteen leikkausta vaan pelkästään teräsbetoni. Samoja arvoja voidaan käyttää myös hybriditalossa sopivilta osin.

Taulukko 10: Vähähiilisen betonitalon esimerkkilaskelma

Rakenne	Hiilijalanjälki (kgCO ₂ e/m ³)	Määrä (m ³)	Hiilijalanjälki kgCO ₂ e	Huomiot
Perustukset				
-Valmisbetoni	264→180	164	43296→29520	
-Raudoitus	4400	0,83	3652	
Rakenne	Hiilijalanjälki (kgCO ₂ e/m ²)	Määrä (m ²)	Hiilijalanjälki kgCO ₂ e	Huomiot
Ontelolaattaväliopohja	72→44	1162	83664→51128	O37
Ontelolaatta-alapohja	72→44	205	14760→9020	O37
Ontelolaattayläpohja	51→33	358	18258→11814	O26
Massiivilaattaväliopohja	85→49	260	22100→12740	220mm
Massiivilaatta-alapohja	85→49	182	15470→8918	220mm
Väliseinä	74→47	1427	105598→67069	200mm
Ulkoseinä				
-Sisäkuori	56→38	720	40320→27360	150mm
-Sisäkuori	30→20	809	24270→16180	80mm
-Sisäkuori	81→54	60	4860→3240	220mm
-Eriste	18	1588	28584	220mm
-Ulkokuori	30	1528	45840	80mm
Parvekepieli	74	221	16354	200mm
Parvekelaatta	87	567	49329	240mm
Terassin alapohjalaatta	85	125	10625	220mm
			526980→391373	-25,70 %

Perustusten valmisbetonin vähähiilisyysluokaksi valittiin GWP.70, koska se on yleisesti saatavilla suurimmalta osalta toimittajista ja helpottaa siten kilpailutusta ja lujittumisajat pysyvät inhimillisinä. Vähähiilisten elementtien tuotevaiheen A-moduulin hiilijalanjäljet arvioitiin Consolis Parman Green Spine Line® -tuoteperheen ympäristöselosteiden (EPD) perusteella, koska tuoteperhe sisältää kaikki Kirsikassa käytetyt elementtityypit. Myös useilla muilla betonielementtituottajilla on vastaavan päästöluokan elementtejä. (Taulukko 10)

Valituilla arvoilla saavutettiin perustusten valmisbetonille 32 % pienemmät päästöt Suomen keskiarvoon verrattuna. Elementtien osalta päästövähennyksiä syntyi ontelolaattoille 39 %, massiivilaatoille 42 %, väliseinille 36 % ja betonisandwich-elementtien sekä sisäkuorielementtien kantavalle osalle 33 % keskiarvopäästöihin verrattuna. Ulkoilman kanssa kosketuksissa oleville ulkotasoelementeille sekä sandwichien ulkokuorille ei tällä hetkellä ollut mahdollista saada vähähiilisempiä versioita. (Taulukko 10)

Jos kaikki betonitalon vähähiiliset paketit otetaan käyttöön, voidaan rakennushankkeen A-moduulin 836 CO₂e tonnista vähentää jopa 136 tonnia, mikä olisi noin 16 % päästövähenemä. Elinkaarenaikaisista päästöistä tämä olisi noin 6,8 %. Näin A-moduulin uusi arvo olisi 700 tonnia CO₂e. Suurin osa hiilidioksidipäästövähennyksestä muodostuu korvaamalla ontelolaatat (45 tonnia) ja väliseinät (39 tonnia) vähähiilisemmällä versiolla. (Taulukko 10)

Hybriditalon kohdalla A-moduulin 767 tonnista CO₂e vähennettäisiin 131 tonnia. Uusi A-moduulin arvo olisi tällöin 636 tonnia CO₂e. Tämä vähenemä olisi 17 % talon A-moduulista. Koko elinkaaren aikaisista päästöistä tämä olisi 6,8 %. (Taulukko 10)

Vähähiilisen betonin hyödyntämisestä huolimatta puutalon A-moduuli on edelleen betonitalon A-moduulia 20 % pienempi ja Hybriditalon A-moduulia 12 % pienempi. Toki nämä ovat alkuperäisiä lukuja (27 % ja 37 %) huomattavasti paremmat.

Taulukko 11: Laskennan kohteiden rakenteiden vertailu (Vähähiilinen betoni)

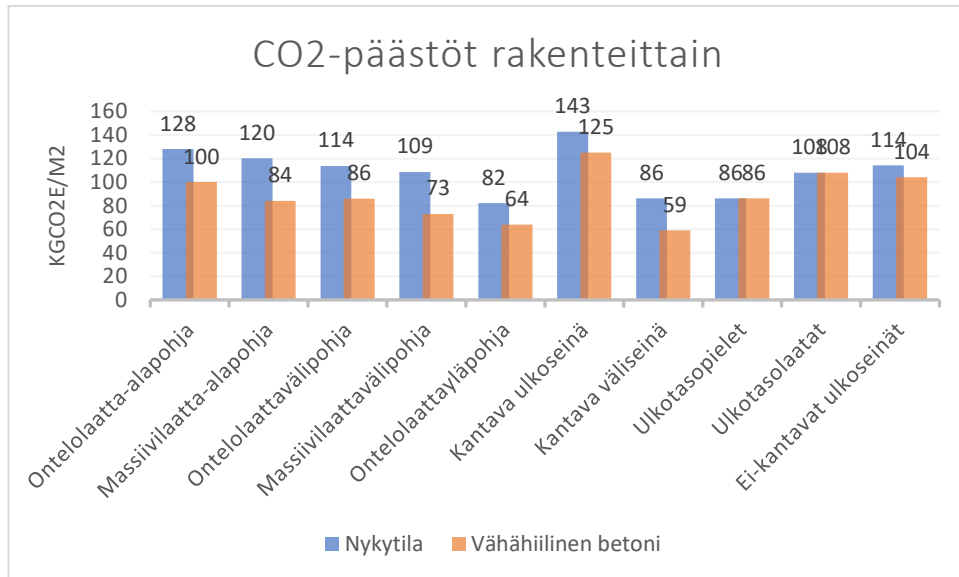
	Puutalo	kgCO ₂ e/m ²	Hybriditalo	kgCO ₂ e/m ²	betonitalo	kgCO ₂ e/m ²
Alapohja						
-Asunnot	Ontelolaatta	124	Ontelolaatta	100	Ontelolaatta	100
-Käytävät	Ontelolaatta	110	Massiivilaatta	84	Massiivilaatta	84
Välipohja						
-Asunnot	Ripalaatta	60	Ontelolaatta	86	Ontelolaatta	86
-Käytävät	Vaneri	74	Massiivilaatta	73	Massiivilaatta	73
Yläpohja	Ristikkorakenne	54	Ontelolaatta	64	Ontelolaatta	64
Kantava ulkoseinä	Rankarunko	38	Sisäkuorielem	87	Sandwich	125
Kantava väliseinä	Rankarunko	33	Teräsbetoni	59	Teräsbetoni	59
Ulkotasot						
-Pielet	Vaneri	26	Teräsbetoni	91	Teräsbetoni	86
-Laatat	Vaneri	36	Massiivilaatta	108	Massiivilaatta	108
Ei-kantavat ulkoseinät	Rankarunko	32	Rankarunko	32	Sandwich	104

Taulukossa 11 on vertailtu rakenteiden hiilijalanjälkiä kuten taulukossa 19, mutta siten, että tässä taulukossa on huomioitu Taulukon 10 mukaiset vähähiilisen betoni käytöstä aiheutuneet päästövähennykset hybriditalon ja betonitalon kohdalla. Puutalo on entisellään.

Perustusten osalta vähähiilisellä betonilla voidaan saavuttaa 14 % pienemmät päästöt, kuin puutalossa ilman vähähiilistä betonia, vaikka hybriditalo ja betonitalo ovat raskaampia. (Liite 1) (Taulukko 10)

Vaakarakenteiden osalta vaikuttaisi siltä, että ripalaattavälipohjalla, vanerivälipohjalla ja ristikkoyläpohjalla ei enää ole suurta etua verrattuna vähähiilisiin ontelolaattavälipohjiin, massiivilaattavälipohjiin ja ontelolaattayläpohjaan. Puinen ripalaattavälipohja on enää vain 30 % vähähiilisempi, ristikkoyläpohja 15 % ja vanerivälipohja on jopa niukasti hiili-intensiivisempi. (Taulukko 11)

Kantavissa ulko- ja väliseinissä sekä ei-kantavissa ulkoseinissä saavutettiin vähähiilisen betonin käytöllä merkittäviä etuja, mutta niiden puurankarunkoiset verrokkit ovat edelleen huomattavasti vähähiilisempiä. (Taulukko 11)



Kuva 20: Rakenteiden hiilijalanjälki tavallisella betonilla ja vähähiilisellä betonilla

Kuvassa 20 on vielä esitelty eri rakenteiden hiilijalanjäljet neliometriä kohden siten, että rakenteessa on käytetty tavallista betonia ja siten, että rakenteessa on käytetty taulukon 10 mukaista vähähiilistä betonia. Näissä arvoissa on huomioitu rakenteen koko poikkeileikkaus.

Betonitoimittajia haastatellessa kävi ilmi, että halvemmista raaka-aineista ja päästökau-pasta johtuen vähähiilisen betonin hinta ei ole merkittävästi tavallista betonia kalliimpaa. Toisilla toimittajilla vähähiiliset tuotteet olivat 10–20 % tavallisia kalliimpia, toisilla hinta-ero oli vain 5–10 %. Sandwichelementtien osalta hintaero oli vielä puolittunut entises-tään, koska vain sisäkuoressa on mahdollista käyttää vähähiilistä betonia rasituskestä-vyysvaatimusten takia.

8.3 Tutkimuksen arviointi ja luotettavuus

Jotta tutkimus olisi mahdollisimman läpinäkyvä ja arvioitavissa, laskennassa käytetyt ar-vot ovat näkyvissä liitteessä 1. Suurin osa liitteen arvoista on haettu Suomen kansalli-sesta päästötietokannasta, CO₂DATAsta. Poikkeuksena olivat ripalaattavälipohjan ta-soitteen tukiverkko, väliseinien metalliranka sekä saunojen eristeet, joiden tiedot etsittiin suomalaisista tuotekohtaisista ympäristöselosteista. Koska datan lähteenä on käytetty kansallisen päästötietokannan arvoja, jotka ovat keskimääräisiä suomalaisia arvoja sen

sijaan, että olisi käytetty projektispesifejä valmistajakohtaisia arvoja, pitäisi laskennan tulosten olla hyvinkin yleistettävissä suomalaisessa mittakaavassa.

Yleistettävyyttä vastaan toisaalta on kohdeyrityksen rakennuksille tyypillinen alimman ja ylimmän kerroksen täysi huonekorkeus ja väliin jäävien kerroksien hieman tyypillistä suurempi huonekorkeus sekä konseptin mukainen suuri ikkunapinta-ala. Nämä aiheuttavat hieman tyypillistä suuremman hiilijalanjäljen pystyrakenteiden osalta. Vaikutusten arvioidaan olevan 20 % luokkaa kyseisten rakenteiden kohdalla. Toisaalta suuri ikkunapinta-ala laskee pystyrakenteiden määrää.

Ennen kuin laskelmia suoritettiin käsin omalla excel-pohjaisella laskentatyökalulla, syötettiin sama määrälaskentaluettelo kunkin laskennan kohteen osalta One Click LCA -laskentaohjelmaan. Ohjelman oma laskennan luotettavuudenarviointi antoi kullekin laskennan kohteelle arvosanan A. Tämä perustuu siihen, että ohjelma tunnistaa materiaaleista, minkä tyyppinen rakennushanke on kyseessä ja asettaa ylä- ja alarajat kunkin materiaalin määrälle sekä vaatimukset materiaalien kattavuudesta. Määrälaskentaluettelon voidaan siis olettaa olevan suhteellisen tarkka.

Ruuska & Häkkinen (2014) ovat toimittaneet tutkimuksen eri tekijöiden vaikutuksista rakennushankkeen hiilidioksidipäästöihin. Heillä on tutkittavanaan tyypillinen suomalainen kerrostalo, joka on rakenteeltaan hyvin samantyyppinen Kirsikan betoniseen versioon nähden. Heidän kohteessaan on hieman enemmän neliöitä ja vähemmän huoneistoja. Kerrostaso-alaan suhteutettuna tämän tutkimuksen tulokset olivat heidän kanssaan hyvin samankaltaisia.

Kirsikan perustusten ja maatöiden hiilijalanjälki osui heidän tutkimuksensa mukaisen variaanssikäyrän alapäähän. Tämä oli oletettavissa, koska Kirsikka on perustettu kallioon ilman tarvetta maan stabiloinnille tai paalutustöille. (Ruuska & Häkkinen 2014)

Betonitalon pysty- ja vaakarakenteiden, eli ulkoseinien, kantavien väliseinien, ala- sekä välipohjien ja kattorakenteiden osalta omien laskelmiensa tulokset osuivat kaikki alle 10 % marginaaliin heidän laskelmiensa arvoista kerrostalaan suhteutettuna. Kirsikan rakenteista suhteellisesti korkein Ruuskan & Häkkisen (2014) oli luonnollisesti kantavat väliseinät, koska suuremman huonekorkeuden vaikutus osuu siihen täysmääräisesti, sillä siinä ei ole ikkunoita pinta-alaa vähentämässä.

Sama toteutui täydentävien rakenteiden osalta parvekkeiden ja tekniikkahormien kanssa. Ei-kantavat väliseinät olivat omissa laskennan kohteissani melkein puolet hiiliintensiivisempiä, vaikka väliseinän rakenne on sama. Tämän selittää luultavasti huoneistojen määrä ja koko sekä suurempi huonekorkeus. Kirsikassa on kompaktimmat tilat ja siten enemmän huoneistojen sisäisiä väliseiniä. Kirsikan ikkunoiden ja ovien hiilijalanjälki

meni reilusti Ruuskan & Häkkisen (2014) varianssikäyrän yläpään ohi. Tämän selittää todella suuren ikkunapinta-alan ja siitä seuraavan kovan vaatimuksen kyseisten ikkunoiden U-arvolle sekä suuresta asuntojen määrästä johtuva suuri hiili-intensiivisten parvekeovien määrä.

Suuren eron elinkaaren hiilijalanjälkeen oman tutkimukseni ja Ruuskan & Häkkisen (2014) tutkimukseen välillä aiheuttaa kuitenkin käytön aikainen energiankulutus. Nämä kaksi arvoa eivät kuitenkaan ole verrattavissa, sillä vuonna 2014 ostoenergian hiilijalanjäljessä ei huomioitu tulevaisuuden päästövähennyksiä.

Eroavaisuuksia löytyy myös uudis- ja korjausrakentamisen sekä purkamisen osalta, mutta tämä tutkimus ei juuri ota kantaa niihin. Niiden osalta tässä tutkimuksessa on käytetty kaikissa laskennan kohteissa Ympäristöministeriön taulukkoarvoja. Tutkimuksen kohteena on ollut erityisesti materiaalien vaikutus kerrostalon elinkaaren hiilijalanjälkeen ja muiden vaikutusten arviointi on jätetty tutkimusrajan ulkopuolelle. (Ruuska & Häkkinen 2014)

Elinkaaren hiilijalanjälki ja materiaalien hiilijalanjälki vertautuvat myös hyvin Ympäristöministeriön TALO-hankkeen tyyppitalon sekä Aakkulan ja Härkösen lopputöiden tuloksiin. Kokonaishiilijalanjälki on tässä tutkimuksessa hieman koholla verrattuna muihin tutkimuksiin, mutta materiaalien hiilijalanjäljen laskelmien tulosten suuruudet olivat keskimääräisiä muihin verrattuna.

Ympäristöministeriö on asettanut vaatimukset tutkimuksen luotettavuudelle. Arvioinnin kohde täyttää rakennusmääräykset, vähähiilisuuden arviointi on tehty Ympäristöministeriön asetusten mukaisesti ja tietolähteenä on käytetty kansallista päästötietokantaa ja rakennustuotteiden ympäristöselosteita, jotka perustuvat standardiin 15804+A2.

Näiden havaintojen pohjalla uskon tutkimukseni laskelmien olevan varsin luotettavia. Tutkimuksen toistaminen hyvin samankaltaisin tuloksin vaatii Pähkinän ja Kirsikan tietomallit tai määrälaskentaluettelot. Tarkkoja tuotetietoja ei tarvitse, sillä CO2DATA tarjoaa keskimääräiset arvot kullekin tuotetyypille.

Kritiikkinä omaa tutkimustani kohtaan voidaan esittää, että puurakentamisen ja betonirakentamisen erojen vaikutusta ei olla tutkittu yllä mainittujen osa-alueiden osalta. Esimerkiksi A4 moduuli, materiaalin kuljettaminen työmaalle voi olla hyvinkin eri suuruinen puisten ja betonisten elementtien osalta, kuten myös rakennustyömaan energiankäyttö, kun nostellaan eri painoisia elementtejä ja kuivumisajat ja kuivatustarpeet voivat olla hyvinkin erilaisia.

9. JOHTOPÄÄTÖKSET

9.1 Tulosten pohdintaa

Tutkimuksen alkuperäinen tarkoitus oli selvittää, miten betoni- ja hybridirakentamisen päästöt vertautuvat puurakentamiseen ja voidaanko vähähiilistä betonia hyödyntämällä päästä lähelle vastaavia päästöjä kuin puurakentamisella. Lisäkuriositeettina oli tarkoitus selvittää suunnilleen, mitä vähähiilisen betonin hyödyntäminen maksaa ja missä sitä voidaan käyttää.

Päästiinkö betonirakentamisella lähelle puurakentamisen hiilipäästöjä? Tutkimuksen perusteella vastaus on kyllä ja ei. Puurakentamisen hiilijalanjälkeä ei pystytty alittamaan, mutta betonirakentamisen näkökulmasta merkittäviä päästövähennyksiä on mahdollista saavuttaa.

Puutalon elinkaaren hiilijälki oli 927 kgCO₂e/brm² siinä missä hybriditalon ja betonitalon luvut olivat 1043 kgCO₂e/brm² ja 1079 kgCO₂e/brm². Kun kaikki taulukon 10 mukaiset betonirakenteet vaihdetaan vähähiiliseksi, saadaan luvut 972 kgCO₂e/brm² ja 1005 kgCO₂e/brm². Kun tarkastellaan koko elinkaaren hiilijalanjälkeä, erot puu- ja betonirakentamisen välillä vaikuttavat hyvin pieniltä (4,6 % ja 7,8 %). Kun tarkastellaan päästöjä pienemmässä mittakaavassa eli tuotevaiheen, A-moduulin näkökulmasta, luvut eivät enää ole yhtä imartelevia. Hybriditalon A-moduuli oli 414 kgCO₂e/brm² ja vähennysten jälkeen se oli 344 kgCO₂e/brm², eli tuotevaiheen hiilijalanjälki pieneni 13 %. Betonitalon A-moduuli oli vastaavasti 452 kgCO₂e/brm² ja vähennysten jälkeen 378 kgCO₂e/brm², eli tuotevaiheen hiilijalanjälki pieneni 16,5 %. Puutalon 304 kgCO₂e/brm² on vieläkin jopa 12,5 % ja 20,5 % pienempi. Koko elinkaaren hiilijalanjälkeä saatiin vähähiilisellä betonilla pienennettyä betonitalon osalta 6,9 % ja hybriditalon osalta 6,8 %. Jos kaikilta muilta rakennuksen elinkaaren osa-alueilta saadaan vastaavat säästöt, voidaan päästövähennekset melkein kolminkertaistaa.

Taulukon 11 lukujen perusteella havaittiin, että puurakentaminen on aina betonirakentamista ympäristöystävällisempää, vaikka käytettäisiin vähähiilistä betonia. Kunkin rakenteen puinen versio oli lähes poikkeuksetta vähähiilistä teräsbetoniversioita vähähiilisempi, ja usein kovin suurella marginaalilla.

Toisaalta vertailemalla taulukoita 9 ja 11 havaitaan, että vähähiilistä betonia käyttämällä voidaan kuitenkin rakentaa huomattavasti ilmastoystävällisempiä betonitaloja. Betonitalossa vähähiilisen betonin hyödyntäminen tiputti A-moduulin hiilipäästöjä 16 %. Samaan aikaan hiilipäästöjä pienennetään muillakin rakentamisen osa-alueilla. Emme vielä tiedä,

millaisen hiilikaton rakentamislain uudistus asettaa, mutta jokainen prosentti on merkittävä Euroopan Unionin ilmastotavoitteisiin pyrkiessä. Betonirakentaminen ei ole aivan pian katoamassa, jolloin on tärkeä, että meillä on työkalut hiilikaton alittamiseksi.

Vähähiilisiä elementtejä on yleisesti tarjolla vasta jonkin verran 40 % keskimääräistä perinteisestä betonista valmistettuihin verrattuna. Hintaeroa vähähiilisille ja tyyppillisille elementeille tuli noin 5–10 %. Sandwichelementeille vain 2–3 % lisähintaa, koska vain sisäkuori on vähähiilisempää. Hinta voi olla varsin siedettävä, jos esimerkiksi tonttikilpailutuksen voitto tai rakentamisluvan saaminen on siitä kiinni.

Vähähiilinen betoni on tällä hetkellä vielä lapsen kengissä. Vaikuttaisi siltä, että vähähiilisellä betonilla voidaan joskus saavuttaa puurakentamista vastaava hiilijalanjälki. Esimerkiksi Rudus väittää tuovansa markkinoille hyvinkin pian matalimman ja haastavimman vähähiilisyysluokan GWP.40 rakennebetonia, joka kuivuu yhtä nopeasti tai jopa nopeammin kuin perinteinen betoni. (Rudus 2023)

9.2 Jatkotutkimustarpeen esittäminen

Vaihtoehtoiset tavat hiilijalanjäljen pienentämiseksi vähähiilisen betonin hyödyntämisen ohella ei varsinaisesti kuulu tämän tutkimuksen aiheeseen, mutta taulukkoa 9 valmistellessa ei voinut olla huomaamatta, että hybridirakentamisessa on valtava potentiaali päästöjen vähentämiseksi. Tästä nousi ajatus jatkotutkimuksen aiheeksi. Avataan havaintoja tässä hieman.

Pähkinän puiset parvekepielet olivat 70 % matalahiilisempiä ja laatat 67 % vähähiilisempiä kuin betonisen Kirsikan perinteisestä betonista valmistetut rakenteet. Parvekkeet eivät ole osa Kirsikan kantavaa runkoa, jolloin betoniset elementit olisivat luultavasti suhteellisen helposti korvattavissa vanerisilla rakenteilla. Pelkästään parvekerakenteissa voitaisiin tehdä 52 CO₂e tonnia säästöjä A-moduulissa, mikä on hyvin merkittävää siihen nähden, että parvekerakenteet eivät alunalkaenkaan olleet kovin suuri päästölähde.

Myös kaksi muuta rakennetta, joissa ei ollut mahdollista hyödyntää vähähiilistä betonia eli ulkoseinien ulkokuoret ja ei-kantavat ulkoseinät. Puujulkisivu on sandwichelementin ulkokuorta 79 % vähähiilisempi ja sillä saavutettaisiin 40 CO₂e tonnia säästöjä A-moduulissa. Hybridi-Kirsikan ja Betoni-Kirsikan ei-kantavan puurankarunkoisen ulkoseinän ja vastaavan vähähiilisen betonisen sandwichelementin hiilijalanjälkien ero on 69 % ja 53 CO₂e tonnia.

Pelkästään betonisten ei-kantavien rakenteiden korvaaminen puulla voisi siis betonisen Kirsikan kohdalla tuottaa 145 CO₂e tonnia säästöjä hiilijalanjälkeen. Tämä on enemmän kuin vähähiilistä betonia hyödyntämällä saavutettiin. Näin olisi mahdollista suunnitella

talo, jonka hiilijalanjälki hipoi kokonaan puusta rakennetun talon hiilijalanjälkeä, mutta rungon saisi silti rakentaa tavalliseen tapaan betonielementeistä. Vähähiilisten betonielementtien käyttö ei edes eroa tavallisten elementtien käytöstä työmaan näkökulmasta. Olisiko helpoin tapa saavuttaa todella merkittäviä päästövähennyksiä kerrostalorakentamisen hiilijalanjäljestä vähähiilisen betonin hyödyntämisen ja hybridirakentamisen yhdistäminen?

Jatkotutkimuksena voisi olla selvittää, voiko tällaista hanketta toteuttaa järkevästi, ja kuinka paljon kustannuksia tällainen hybridiratkaisu nostaisi tyypilliseen betoniratkaisuun verrattuna. Vähähiilisen betonin kehityksen tahti on melko kova, ja vuoden päästä esimerkkilaskennan tulokset voisivat olla jo aivan toista luokkaa, jolloin tämän tutkimuksen luvut ei pitkään pysy relevanttina. Jatkotutkimuksessa olisi siis hyvä kartoittaa uudelleen vähähiilisen betonin saatavuutta.

9.3 Vihreä siirtymä ja uusi rakentamislaki

Ajatuksia herättävää oli havaita, että lainsäädäntö toimii vain perälautana kestävän kehityksen mukaisessa rakentamisessa, ja suuret yritykset menevät kaukana edellä. Euroopan unionin ilmastotavoitteita ja ympäristöministeriön reaktiot siihen vaikuttivat kirjallisuuskatsausta kirjoittaessa mahdolltomilta toteuttaa, mutta betonitoimittajien ja rakentajien toimiin tutustuttuani havaitsin, että mahdollisuudet ovat sittenkin hyvät. Vähähiilisiä hankkeita on jo toteutettu maailmalla, vaikka hiilikattoa ei vielä ole asetettu ja vähähiilisiä betonielementtejä on toimitettu jo pitkään, vaikka niiden vähähiilisyysluokitusta ei ole vielä julkaistu. LCA-laskentaan liittyviä diplomitoita on viime aikoina toteutettu runsaasti. Yritykset vaikuttavat olevan valmiita vastaamaan tulevaisuuden lainsäädännön aiheuttamiin haasteisiin.

R. Leino (2020) on tehnyt diplomityön aiheesta, joka vastaa hyvin paljon omaani. Hän laski muutamalle eri kohteelle ympäristöministeriön vuoden 2019 vähähiilisyysarviointimenetelmän mukaiset laskelmat kolmessa eri vaiheessa. Ensimmäinen, alustava laskenta suoritettiin karkeiden aikaisen suunnitteluvaiheen tietojen mukaan, toinen valmiista tietomallista ja kolmas tarkan urakkalaskelmiin pohjautuvan määrälaskentaluettelon pohjalta. Kun näitä vertailtiin, materiaalien hiilijalanjälki saattoi olla vaihdella jopa 40 %. Tässä tutkimuksessa saatiin betonitalosta parhaimmillaankin hybridirakentamisen ja vähähiilisen betonin keinoin vähennettyä materiaalien hiilijalanjälkeä vain 34 %. Vaihtelu vaikuttaa siis kohtuuttoman suurelta. Tällä Leinon pienemmällä suunnitteluvaiheen tuloksella voitaisiin hakea rakentamislupaa ja se voisi mennä läpi, mutta todellinen hiilija-

lanjälki olisi kuitenkin huomattavasti luultua korkeampi. Onko siis rakentamisluvan hakemisen yhteydessä arvioidulla hiilijalanjäljellä juurikaan painoarvoa? Näen tässä ongelman uuden rakentamislain astuessa voimaan.

Toinen kysymysmerkki uudessa rakentamislaisissa on velvoitus päivittää LCA-laskentoja rakennushankkeen edetessä. Tulisiko tehdä uudet laskelmat vai riittääkö, että ainoastaan päivitetään uudet luvut samaan tiedostoon. Tämä kaipaisi hieman täydennystä. Onko kyse siitä, ettei itsekään olla tiedetty, miten toimitaan näiden päivitysten kanssa?

Kolmas kysymysmerkki on hiilikädenjäljen arvottaminen. Ympäristöministeriön arviointimenetelmä vaatii hiilikädenjäljen laskemista, mutta kyseiselle luvulle ei kuitenkaan aseteta vaatimuksia. Puurakentajat haluavat pitää hiilikädenjäljen näkyvillä, koska se on yleensä heillä melko edustavan suuruinen. Voidaanko eri hiilikädenjälkityyppejä kuitenkin pitää saman arvoisina? Rakennepuuhun varastoitunut hiili aiheuttaa kyllä suhteellisen lyhytikäisen hiilivaraston suoman positiivisen temporaalisen vaikutuksen ilmastoon, mutta se on lopultakin vain siirretty metsästä puutaloon. Betonin karbonatisoitumisesta aiheutuva hiilikädenjälki sen sijaan on hiiltä, joka absorboituu lopullisesti takaisin sementtiin kun, talo on saavuttanut elinkaarensa pään ja betoni murskataan. Tämä kyseinen hiili näkyy kalkkikiven kalsinoinnissa betonin A-moduulissa. Puun biogeeninen hiili sen sijaan ei näy puun A-moduulissa, vaikka puu poistetaan metsästä. Toki betonirakentaminen näkyy hiilipiikkinä, jolloin sillä on negatiivinen temporaalinen vaikutus ilmaston lämpenemiseen. Tämä näkyy lievänä epäreiluutena betonirakentajia kohtaan.

LÄHTEET

- [1] Aakkula, A., 2022. Runkorakenteiden vaikutus rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Opinnäytetyö. Tampereen Ammattikorkeakoulu. Talonrakennustekniikka. s. 49.
- [2] Adalberth, K., 1997. Energy Use During the Life Cycle of Buildings: A Method. Building and Environment Vol. 32, No 4: s. 317– 320.
- [3] Antunes, M., Santos, R., Pereira, J., Rocha, P., Horta, R. & Colaço, R., 2022 Alternative Clinker technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review. 19 s.
- [4] Betoniteollisuus Ry, 2023a. Ratkaisuksi vähähiilinen betoni. Saatavissa:
- [5] Betoniteollisuus Ry, 2023b. Betonin hiilensidonta. Saatavissa: <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/vahahiilinen-betoni/hiilen-sidonta/>
- [6] CO2data, 2023. Rakentamisen päästötietokanta. Suomen Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://co2data.fi/rakentaminen/>
- [7] Cheah, C., Samsudin, m., Ramli, m., Part, W. & Tan, L., 2017. The use of high calcium wood ash in the preparation of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Pulverized Fly Ash geopolymers: A complete microstructural and mechanical characterization”. Journal of Cleaner Production, Vol. 156, No. 10, s. 114-123.
- [8] Euroopan komissio, 2023a. Ilmastonmuutoksen seuraukset. Saatavissa: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_fi
- [9] Euroopan komissio, 2023b. 2020 climate & energy package. Saatavissa: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2020-climate-energy-package_en
- [10] Euroopan komissio, 2023c. 2030 climate & energy framework. Saatavissa: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en
- [11] Euroopan komissio, 2023d. 2050 long term strategy. Saatavissa: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en
- [12] Euroopan komissio, 2023e. Level(s). Circular economy. Saatavissa: https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels_en
- [13] Euroopan parlamentti, 2023. Eu measures against climate change. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180703STO07129/eu-measures-against-climate-change>
- [14] Euroopan Unioni, 2023. Ilmastonmuutos. Saatavissa: https://climate-pact.europa.eu/about/climate-change_fi

- [15] Hernandez, P. & Kenny, P., 2011. Development of a Methodology for Life Cycle Building Energy Ratings. *Energy Policy*, 2011. Vol 39: s. 3779–3788.
- [16] Härkönen, A., 2021. Optimoidun hiilijalanjäljen vaikutus rakentamisen kustannuksiin. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. s. 35.
- [17] Järvinen, K., 2022. Vähähiilisen betonin tuotannolliset haasteet ja hiilijalanjälki. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164436/Diplomity%C3%B6_Kai_J%C3%A4rvinen.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [18] Lang, F., 2012. Blast furnace cements, Luku 12, Structure and performance of cements. Taylor & Francis Group, s. 310-325.
- [19] Lahdensivu, E. & Lahdensivu, J., 2021. Decreasing carbon footprint of block of flats – Concrete technology possibilities. *Nordic concrete research*, 2021. Vol 64: s. 129-144.
- [20] Leino, R., 2020. Kerrostalon hiilijalanjälki: päästöjen määrä ja laskenta. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Tampere. s. 33-37.
- [21] Neville, A.M., 1995. Properties of concrete, Longman Group Limited, Essee, Englanti, 1995, 844 s.
- [22] Rakennusteollisuus, 2023. Rakennettu ympäristö ja ilmastonmuutos. Saatavissa: <https://www.rt.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Materiaalitehokkuus/>
- [23] Rudus, 2023. CEVO-betoni. Betonirakenteita jopa 70 prosenttia pienemmillä päästöillä. Saatavissa: <https://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/cevo-betoni>
- [24] Ruuska, A. & Häkkinen, T., 2014. The significance of various factors for GHG emission of buildings. *International journal of sustainable engineering*, 2015. Vol 8, No 4–5.
- [25] Sartori, I. & Hestnes, A.G., 2007. Energy Use in the Life Cycle of Conventional and Low-Energy Buildings: A Review Article. *Energy and Buildings*, 2007, Vol 39: s. 249–257
- [26] Suomen betoniyhdistys Ry, 2023a. Mikä on BY-vähähiilisyysluokitus. BY-Vähähiilisyysluokituswebinaari 30.-31.10.2023. Videotallenne. Saatavissa: <https://www.betoniyhdistys.fi/tapahtumat/by-vahahiilisyysluokituswebinaari.html>
- [27] Suomen betoniyhdistys Ry, 2023b. Betonin BY-vähähiilisyysluokitus paneeli. BY-Vähähiilisyysluokituswebinaari 30.-31.10.2023. Videotallenne. Saatavissa: <https://www.betoniyhdistys.fi/tapahtumat/by-vahahiilisyysluokituswebinaari.html>
- [28] Suomen betoniyhdistys Ry, 2023c. BY-vähähiilisyysluokitus. Saatavissa: <https://vahahiilinenbetoni.fi>
- [29] Suomen standardointiliitto, 2012. Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. SFS EN-197-1, 35s.

- [30] Suomen ympäristökeskus, 2017. Tietoa elinkaariarvioinnista (LCA) ja elinkaari-klinikka toimimallista pk-yrityksille. Saatavissa: file:///C:/Users/tuoma/Downloads/Tietopaketti_LCA%20ja%20elinkaariklinikat.pdf
- [31] 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, 2012. 7, 9 s.
- [32] Häkkinen, T., 2021. Emission database for building products, services, and systems. Open LVA database for building construction. [Hiilineutraalisuomi.fi](https://hiilineutraalisuomi.fi). Suomen ympäristökeskus (SYKE).
- [33] Thomas, M., 2008. Optimizing the use of fly ash in concrete. Portland cement association. 8s.
- [34] Ympäristöministeriö, 2019a. Rakennuksen vähähiilisyiden arviointi. Ympäristöministeriön julkaisuja. Rakennettu ympäristö. 54 s. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyiden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [35] Ympäristöministeriö, 2019b. Taloudellisten kannusteiden käyttö vähähiilisen rakentamisen ohjauksessa TALO-hankkeen loppuraportti. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161923>
- [36] Ympäristöministeriö, 2021a. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ilmastot selvityksestä. Saatavissa: <https://ym.fi/hankesivu?tunnus=YM027:00/2021>
- [37] Ympäristöministeriö, 2021b. Rakennuksen vähähiilisyiden arviointi. Luonnos lausuntokierrosta varten. 39 s. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161761>
- [38] Ympäristöministeriö, 2022a. Vähähiilisen rakennetun ympäristön ohjelma. Saatavissa: <https://ym.fi/hankesivu?tunnus=YM004:00/2022>
- [39] Ympäristöministeriö, 2022b. Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. Saatavissa: <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>

LITE 1: KOHDERAKENNUSTEN MATERIAALIEN LCA-LASKENNAT

As. Oy Tampereen Kirsiä		Hybriditalo															
Niilijärven rakennusosain																	
Seinämateriaali	Määrä	Yksikkö	Konversiokerros	Muunnoskerros	kg	hukkakerros	A1-C32/kg	A1-C32/kg	C3 CO2e/kg	D CO2e/kg	A1-A3/kgCO2e	B4 kgCO2e	C3-C4 kgCO2e	D kgCO2e	CO2e/h	Kommentti	talo 2000
Perustukset ja pohjarakenteet																	
Valmisbetoni C30/37	79,272	m ³	1	1890	190252,8	1,05	0,13	0,005	0,022	29895,5073	1198,59596	4394,8398	27,2	Anturat	1,2	Perustukset	
Teräsuodite rakenteisiin	32,278	m ³	1	1000	3270	1,05	0,67	0,002	1,2	22910,95	6,601	4327,6	2,2	Anturan suodatus	1,2	Perustukset	
Valmisbetoni C30/37	84,909	m ³	1	2400	209256	1,05	0,13	0,005	0,022	37744,434	1293,5139	4695,2181	29,0	Sokkelit	1,2	Perustukset	
Teräsuodite rakenteisiin	3387,618	kg	1	1000	3387,6	1,05	0,67	0,002	1,2	2381,1768	7,11392	4624,074	2,4	Sokkelin suodatus	1,2	Perustukset	
Murskatun sora	20	m ³	1	1500	30000	1,05	0,007	0,007	0	220,5	0	220,5	0,2	Konkretin ja viemärien alustat	1,1	maasaat	
Murskatun sora	80	m ³	1	1500	120000	1,05	0,007	0,007	0	882	0	882	0,8	Alustajien alustaytöt	1,1	maasaat	
Murskatun sora	500	m ³	1	1500	750000	1,05	0,007	0,007	0	5512,5	0	5512,5	11,0	Perusmuurin vierustyydytys	1,1	maasaat	
Suodatinkangas	390	m ²	1	0,138	126	1,05	3,45	0,17	7,35	496,420	32,491	316,93	0,5	Suodatus	1,1	maasaat	
Muovipelti 110mm	280	m	1	18	3000	1,05	2,1	0,16	0,007	360	0	360	4,3	Alustajapelti	1,1	maasaat	
Sora ja hiekka	190	m ³	1	1500	285000	1,05	0,005	0,005	0	1161,25	0	1161,25	0,4	Alustajaytöt	1,1	3-pallotyöt	
Ulkoseinät ja julkisivu																	
Puinen seinäelementti	588,07	m ²	0,023	428	5880,7562	1,1	0,16	0,0129	1,57	398,610021	80,6299208	9810,6698	1,1	Lautelevous	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Ulkovehouslaatu maalattu 23mm	588,07	m ²	0,009	748	3943,09353	1,05	0,35	0,005	0	1449,05930	20,7007959	1000,6698	0,6	Tuulensuojat	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Igk-sivley 9mm	3,14	m ²	1	474	1488,36	1,1	0,083	0,02	1,66	135,897269	21,74392	2717,7453	0,2	Kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sahatavara	3,14	m ²	1	474	1488,36	1,1	0,083	0,02	1,66	135,897269	21,74392	2717,7453	0,2	Kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Mieneraivilla, jaykka 22 3mm	588,07	m ²	0,023	131	7999,51621	1,03	1,5	0,3	0	12319,3524	3471,809299	14,8	Eriste	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat		
LVI	6,08	m ³	1	404	2899,2	1,05	0,36	0,02	1,66	1111,0708	63,720	614,070	1,2	Reinonrunko	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Höyrynsulkumuovi 0,2mm	588,07	m ²	0,0001	625	108,79295	1,1	2,5	0,2	0,2	311,147671	309,007302	21,93440	0,7	Höyrynsulku	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Palokipsi 18mm	588,07	m ²	0,019	879	9262,1025	1,05	0,28	0,005	0	2723,083125	46,6203813	0	2,8	Palokipsi	1,3	tilatilat	
Puinen kuulelementti	220,38	m ²	0,023	428	2133,5076	1,1	0,16	0,0129	1,57	375,497376	30,27447283	3684,5678	0,4	Lautelevous	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Ulkovehouslaatu maalattu 23mm	220,38	m ²	0,009	280	1480,8663	1,05	0,35	0,005	0	544,218363	7,74548075	1000,6698	0,6	Tuulensuojat	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Igk-sivley 9mm	3,11	m ²	1	474	1488,36	1,1	0,083	0,02	1,66	131,15027	21,74392	2683,124	0,2	Kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sahatavara	3,11	m ²	1	474	1488,36	1,1	0,083	0,02	1,66	131,15027	21,74392	2683,124	0,2	Kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä ulkoisella puurakenteisella	415,77	m ²	0,003	428	4016,3382	1,1	0,16	0,0129	1,57	706,870253	56,8948984	6086,21007	0,8	Kantava pääyseinä	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Ulkovehouslaatu maalattu 23mm	415,77	m ²	0,009	520	2593,821	1,05	0,35	0,005	0	1034,48360	14,63562371	1000,6698	0,7	Tuulensuojat	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Igk-sivley 9mm	745	m ²	1	474	2763,42	1,1	0,083	0,02	1,66	252,393046	69,79934	506,0349	0,3	Runko ja kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sahatavara	745	m ²	1	474	2763,42	1,1	0,083	0,02	1,66	252,393046	69,79934	506,0349	0,3	Runko ja kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä ulkoisella puurakenteisella	415,77	m ²	0,003	428	4016,3382	1,1	0,16	0,0129	1,57	706,870253	56,8948984	6086,21007	0,8	Kantava pääyseinä	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Ulkovehouslaatu maalattu 23mm	415,77	m ²	0,009	520	2593,821	1,05	0,35	0,005	0	1034,48360	14,63562371	1000,6698	0,7	Tuulensuojat	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Igk-sivley 9mm	745	m ²	1	474	2763,42	1,1	0,083	0,02	1,66	252,393046	69,79934	506,0349	0,3	Runko ja kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sahatavara	745	m ²	1	474	2763,42	1,1	0,083	0,02	1,66	252,393046	69,79934	506,0349	0,3	Runko ja kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä 200mm	415,77	m ²	1	493	204974,61	1,03	0,17	0,005	0,049	53891,05421	1366,74309	10345,0681	37,2	Betoniseinäseinäelementti	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä 220+150mm	58,52	m ²	1	543	3238,5	1,03	0,19	0,009	0,046	6322,77349	22861,60992	1320,7707	29,3	Kantava kellarin seinä	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sandwichielementti 150+20+80mm	208,31	m ²	1	254	115414,87	1,03	0,15	0,009	0,046	29719,31615	850,51317	548,354177	37,1	Krs kantava ulkoseinä	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sandwichielementti 150+20+80mm	94,07	m ²	1	254	52633,36	1,03	0,25	0,009	0,046	13647,84028	379,812501	249,82768	17,8	Alustajapaneelit	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä puuvehouslailla	220,38	m ²	0,023	428	2133,5076	1,1	0,16	0,0129	1,57	375,497376	30,27447283	3684,5678	0,4	Lautelevous	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Ulkovehouslaatu maalattu 23mm	220,38	m ²	0,009	280	1480,8663	1,05	0,35	0,005	0	544,218363	7,74548075	1000,6698	0,6	Tuulensuojat	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Igk-sivley 9mm	3,11	m ²	1	474	1488,36	1,1	0,083	0,02	1,66	131,15027	21,74392	2683,124	0,2	Kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sahatavara	3,11	m ²	1	474	1488,36	1,1	0,083	0,02	1,66	131,15027	21,74392	2683,124	0,2	Kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä 200mm	415,77	m ²	1	493	204974,61	1,03	0,17	0,005	0,049	53891,05421	1366,74309	10345,0681	37,2	Betoniseinäseinäelementti	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä 220+150mm	58,52	m ²	1	543	3238,5	1,03	0,19	0,009	0,046	6322,77349	22861,60992	1320,7707	29,3	Kantava kellarin seinä	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sandwichielementti 150+20+80mm	208,31	m ²	1	254	115414,87	1,03	0,15	0,009	0,046	29719,31615	850,51317	548,354177	37,1	Krs kantava ulkoseinä	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sandwichielementti 150+20+80mm	94,07	m ²	1	254	52633,36	1,03	0,25	0,009	0,046	13647,84028	379,812501	249,82768	17,8	Alustajapaneelit	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä puuvehouslailla	220,38	m ²	0,023	428	2133,5076	1,1	0,16	0,0129	1,57	375,497376	30,27447283	3684,5678	0,4	Lautelevous	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Ulkovehouslaatu maalattu 23mm	220,38	m ²	0,009	280	1480,8663	1,05	0,35	0,005	0	544,218363	7,74548075	1000,6698	0,6	Tuulensuojat	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Igk-sivley 9mm	3,11	m ²	1	474	1488,36	1,1	0,083	0,02	1,66	131,15027	21,74392	2683,124	0,2	Kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sahatavara	3,11	m ²	1	474	1488,36	1,1	0,083	0,02	1,66	131,15027	21,74392	2683,124	0,2	Kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä 200mm	415,77	m ²	1	493	204974,61	1,03	0,17	0,005	0,049	53891,05421	1366,74309	10345,0681	37,2	Betoniseinäseinäelementti	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä 220+150mm	58,52	m ²	1	543	3238,5	1,03	0,19	0,009	0,046	6322,77349	22861,60992	1320,7707	29,3	Kantava kellarin seinä	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sandwichielementti 150+20+80mm	208,31	m ²	1	254	115414,87	1,03	0,15	0,009	0,046	29719,31615	850,51317	548,354177	37,1	Krs kantava ulkoseinä	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sandwichielementti 150+20+80mm	94,07	m ²	1	254	52633,36	1,03	0,25	0,009	0,046	13647,84028	379,812501	249,82768	17,8	Alustajapaneelit	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä puuvehouslailla	220,38	m ²	0,023	428	2133,5076	1,1	0,16	0,0129	1,57	375,497376	30,27447283	3684,5678	0,4	Lautelevous	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Ulkovehouslaatu maalattu 23mm	220,38	m ²	0,009	280	1480,8663	1,05	0,35	0,005	0	544,218363	7,74548075	1000,6698	0,6	Tuulensuojat	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Igk-sivley 9mm	3,11	m ²	1	474	1488,36	1,1	0,083	0,02	1,66	131,15027	21,74392	2683,124	0,2	Kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sahatavara	3,11	m ²	1	474	1488,36	1,1	0,083	0,02	1,66	131,15027	21,74392	2683,124	0,2	Kuolitus	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä 200mm	415,77	m ²	1	493	204974,61	1,03	0,17	0,005	0,049	53891,05421	1366,74309	10345,0681	37,2	Betoniseinäseinäelementti	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Betoniseinä 220+150mm	58,52	m ²	1	543	3238,5	1,03	0,19	0,009	0,046	6322,77349	22861,60992	1320,7707	29,3	Kantava kellarin seinä	1,2	Julkisivut, ovet ja ikkunat	
Sandwichielementti 150+20+80mm	208,31	m ²	1	254	115414,87	1,03	0,15	0,009	0,046	29719,31615	850,51317	548,354177	37,1				

