



Rakennesuunnittelun työkalujen hyödyntäminen rakennuksen hiilijalanjäljen laskennassa

Jenna Tuunainen

Opinnäytetyö, ylempi AMK

Maaliskuu 2023

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma (YAMK)

Tuunainen, Jenna

Rakennesuunnittelun työkalujen hyödyntäminen rakennuksen hiilijalanjäljen laskennassa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. **Maaliskuu 2023**, 150 sivua

Tekniikan ala. Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö YAMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Suomen kansallinen ilmastopoliittika on ilmastolain kautta asettanut tavoitteen, että Suomi on hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja hiilinegatiivinen pian hiilineutraaliuden jälkeen. Ympäristöministeriö on ilmastolain kautta määrittänyt Suomen rakennussektorille päämäärän, että rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä ohjattaisiin lainsäädännöllä 2020-luvun puoliväliin mennessä. Maankäyttö- ja rakennuslain uudistuksen myötä rakennuksen hiilijalanjäljen laskennasta tulee pakollista rakennuslupaa haettaessa.

Työn tarkoituksena oli tutkia, mistä rakennusten hiilidioksidipäästöt syntyvät, mitä hiilijalanjäljen laskenta vaatii sekä laskentamenetelmän soveltuvuutta esimerkkikohteiden hiilijalanjäljen laskennalle. Työn avulla luotiin käsitys, miten tulevaisuudessa vaadittava hiilijalanjäljen laskenta vaikuttaa rakennesuunnittelijan työhön käytännössä sekä miten pystytään vastaamaan rakennuksille annettaviin hiilijalanjäljen raja-arvoihin nykyisellä rakennustavalla ja mitä mahdollisia toimenpiteitä näiden raja-arvojen saavuttamiseksi tulee tehdä, eritellen ne keinoin, joilla saadaan kustannussäästöjä ja jotka lisäävät kustannuksia hankkeessa.

Työssä lähestymistavaksi valittiin tutkimuksellinen kehittäminen ja tutkimusmenetelmäksi valikoitui kvantitatiivinen menetelmä. Työssä laskettiin kahden esimerkkikohteen hiilijalanjälki, käyttäen One Click LCA -ohjelmiston Ympäristöministeriön vähähiilisyden arviointimenetelmän mukaista laskentatyökalua. Lähtötiedot tuotiin tietomallien integraation avulla laskentatyökaluun. Työkalun avulla pystyttiin analysoimaan rakennusten hiilijalanjälkeä ja sen muodostumista, sekä optimoimaan rakennusten hiilijalanjälkeä.

Kohteiden hiilijalanjäljen arvoiksi saatiin 14,00 kgCO₂e/m²/a ja 12,14 kgCO₂e/m²/a. Tulosten perusteella voitiin havaita, että rakennuksen elinkaaren aikaisista päästölähteistä merkittävimmät olivat valmistus, sekä käytönaikainen energia. Rakennusmateriaalien valmistuksesta aiheutuvat päästöt koko rakennusten päästöistä olivat lähes puolet, osuutta kasvatti rakennuksessa käytetyn betonin ja teräksen määrä. Energian käytössä erityisesti kaukolämmön käyttö kasvatti rakennuksen hiilijalanjälkeä. Tehokkaimmat tavat rakennusten hiilijalanjäljen optimoinnissa olivat energiamuodon muuttaminen kaukolämmöstä maalämmöksi, sekä vähähiilisen betonin käyttö välipohjassa.

Avainsanat (asiasanat)

Elinkaaren päästöt, hiilijalanjälki, hiilijalanjälkilaskenta, rakennuksen tietomalli, vähähiilisyys

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liitteet 1, 3, 4 ja 6 ovat salassa pidettäviä, ja ne on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 21, Teknologista taikka muuta kehittämistyötä ja niiden arviointia koskevat tiedot. Salassapitoaika on kymmenen (10) vuotta, salassapito päättyy 16.1.2033.

Tuunainen, Jenna

Applying structural design tools to the calculation of the carbon footprint of a building

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, March 2023, 150 pages

Engineering and Technology. Construction Engineering Degree Program. Master's Thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Finland's national climate policy, through the national Climate Act, has set the goal for Finland to be carbon-neutral by 2035 and carbon-negative shortly after carbon neutrality. The Ministry of the Environment has also set a target for the Finnish building sector that the carbon footprint of a building's life cycle should be controlled by legislation by the mid-2020s. With the Land Use and Building Act reform, carbon footprint calculations for buildings will become mandatory when applying for a building permit.

The aim of the study was to investigate the source of carbon dioxide emissions from buildings, the requirements for calculating the carbon footprint and the suitability of the calculation method for calculating the carbon footprint of example buildings. It provided an understanding of how the future carbon footprint calculation requirements will affect the work of the building designer in practice, how to meet the carbon footprint limits for buildings with current building practices, and what possible measures should be taken to achieve these limits, breaking them down into cost-saving and cost-increasing measures in the project.

The approach chosen for this work was research development and the research method was quantitative method. The carbon footprint of two example sites was calculated using the calculation tool of the One Click LCA software according to the Ministry of Environment's Low Carbon Assessment Methodology. The output data was imported into the calculation tool through data model integration. The tool was used to analyze the carbon footprint of buildings, and to optimize the carbon footprint of buildings.

The carbon footprints of the sites were 14.00 kgCO₂e/m²/a and 12.14 kgCO₂e/m²/a. The results showed that the most significant sources of emissions during the life cycle of a building were manufacturing and in-use energy. Emissions from the manufacture of building materials accounted for almost half of the total emissions from buildings, driven by the use of concrete and steel in the building. In terms of energy use, the use of district heating increased the carbon footprint of the building. The most effective ways to optimize the carbon footprint of buildings were to change the energy source from district heating to geothermal heat, and to use low-carbon concrete in the intermediate floor.

Keywords/tags (subjects)

Life cycle emissions, carbon footprint, carbon footprint calculation, building information model, low carbon

Miscellaneous (Confidential information)

Appendices 1, 3,4 and 6 are confidential and removed from the public thesis. The basis for secrecy is section 24(21) of the Act on the Openness of Government Activities (621/1999), information on technological or other developments and their evaluation. The period of secrecy is ten (10) years, the secrecy will end on 16 January 2033.

Sisältö

1	Johdanto	7
2	Tutkimusasetelma	8
2.1	Kohdeyritys.....	8
2.2	Tutkimuskysymykset	8
2.3	Tietoperustan määrittely ja rajaukset	9
2.4	Tutkimusmenetelmät	10
3	Vähähiilisen rakentamisen ohjaus Suomessa	12
3.1	Ohjaava lainsäädäntö ja muut tekijät	12
3.2	Ohjausmekanismit.....	14
3.3	Rakennushankkeen hiilijalanjälkeen vaikuttaminen	16
4	Rakennushankkeen hiilijalanjäljen laskennan vaiheet	19
4.1	Rakennuksen elinkaaren eri vaiheiden laskenta	19
4.2	Hiilijalanjäljen laskenta One Click LCA – arviointityökalulla	23
4.2.1	Tavoitteen ja laajuuden määrittäminen	24
4.2.2	Rakennusmateriaalien ja – toimintojen luettelointi	25
4.2.3	Laskennassa käytettävät ohjelmistot	27
4.2.4	Tulosten tulkinta ja raportointi	29
5	Tutkimuksen toteutus	31
5.1	Tutkimuksen tavoitteet	31
5.2	Tutkimuksen lähtötiedot	32
5.2.1	Rakennus 1	33
5.2.2	Rakennus 2	34
5.3	Hiilijalanjäljen laskennan toteutus.....	36
5.3.1	Integraatio ohjelmistoista	36
5.3.2	Tietojen kirjaus laskentatyökaluun.....	38
5.3.3	Laskennassa käytettyjen tietojen luotettavuus	40
6	Tulokset	40
6.1	Laskennan tulokset.....	40
6.1.1	Rakennus 1 tulokset	40
6.1.2	Rakennus 2 tulokset	45
6.2	Tulosten vertailu aiemmin tehtyihin tutkimuksiin	49
6.3	Tulosten vaikutus rakennesuunnitteluun	52

7	Johtopäätökset	54
7.1	Hiilijalanjälkilaskeman tuloksien johtopäätelmä	54
7.2	Hiilijalanjälkilaskelman tarkkuus ja todenmukaisuus.....	56
7.3	Hiilijalanjäljen optimointi	59
7.3.1	Yleiset periaatteet.....	59
7.3.2	Rakennuspaikka	61
7.3.3	Energiatehokkuus.....	62
7.3.4	Materiaalit ja toimivuus	63
7.3.5	Optimoinnin tulokset	67
8	Pohdinta	69
	Lähteet	74
	Liitteet	77
	Liite 2. Rakennus 1 energiatodistus.....	77
	Liite 5. Rakennus 2 energiatodistus.....	81
 Kuvat		
	Kuva 1 Tutkimuksellisen kehittämistyön prosessi (Ojasalo & Moilanen & Ritalahti 2015, 24). .	11
	Kuva 2 Vähähiilisen rakentamisen tiekartan aikajana (Vähähiilisen rakentamisen tiekartta n.d.)	14
	Kuva 3 Hiilijalanjäljen pienentämisen mahdollisuudet projektien eri vaiheissa	20
	Kuva 4 Materiaalien elinkaaripäästöjen benchmarkin luokitusvälit A-G (One Click LCA n.d.).	30
	Kuva 5 Rakennus 1 rakennemalli näkymä	33
	Kuva 6 Rakennus 2 rakennemalli näkymä	34
	Kuva 7 Rakennus 1 ilmaston lämpeneminen - elinkaaren vaiheet	42
	Kuva 8 Rakennus 1 ilmaston lämpeneminen – resurssityypit	43
	Kuva 9 Rakennus 1 ilmaston lämpeneminen - rakennuksen osat	44
	Kuva 10 Rakennus 1 sitoutunut hiili per rakenne moduulit A1-A3	44
	Kuva 11 Rakennus 2 ilmaston lämpeneminen - elinkaaren vaiheet	46
	Kuva 12 Rakennus 2 ilmaston lämpeneminen – resurssityypit	47
	Kuva 13 Rakennus 2 ilmaston lämpeneminen – rakennuksen osat.....	48
	Kuva 14 Rakennus 2 sitoutunut hiili per rakenne moduulit A1-A3	48
	Kuva 15 Rakentamisen vähähiilisyyden vaikutus suunnittelun eri tasoilla ja vaiheissa (Häkkinen & Kuittinen 2020, 153).....	60
	Kuva 16 Vähähiilisen rakentamisen osatekijät ja niiden suhde toisiinsa (Häkkinen & Kuittinen 2020, 99).....	61

Taulukot

Taulukko 1 Päästötiedon tarve vähähiilisen rakennussuunnitelun eri vaiheissa (Häkkinen & Kuittinen 2020, 86).....	21
Taulukko 3 Energiamuotojen päästökertoimet (g CO ₂ /kWh) vuosikymmenittäin (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 46).	27
Taulukko 4 Rakennus 1 hiilijalanjäljen yhteenveto	41
Taulukko 5 Rakennus 1 hiilijalanjälki ilmastaselvityksen mukaan	42
Taulukko 6 Rakennus 1 hiilikädenjälki	44
Taulukko 7 Rakennus 2 hiilijalanjäljen yhteenveto	45
Taulukko 8 Rakennus 2 hiilijalanjälki ilmastaselvityksen mukaan	46
Taulukko 9 Rakennus 2 hiilikädenjälki	48
Taulukko 10 Ehdotettu hiilijalanjäljen raja-arvo rakennustyypeittäin (Carbon footprint limits for common building types 2021, 35.)	50
Taulukko 11 Hiilidioksidipäästöjen muodustuminen rakennusten elinkaaren eri vaiheissa (Röck ym. 2022, 13).	51
Taulukko 12 Optimoinnin vaikutukset rakennusten hiilijalanjälkeen ja kokonaispäästöihin.....	68

1 Johdanto

Hiilijalanjälki kuvaa rakennuksesta johtuvaa ilmastovaikutusta rakennuksen elinkaaren aikana. Rakennusten hiilijalanjälki muodostuu rakennusmateriaalien valmistuksesta ja niiden kuljettamisesta, työmaan toimimisesta, rakennuksen kunnossapidosta ja korjaustoimenpiteistä, energian ja veden käytöstä ja viimeisenä rakennuksen purkamisesta ja rakennusmateriaalien loppukäsittelystä. Rakennusten elinkaaren aikaisista päästöistä suurin osa aiheutuu käytönaikaisesta energiankulutuksesta ja rakennusmateriaalien valmistuksesta. Tärkeimmät päätökset rakennusten elinkaaren aikaisista vaikutuksista ympäristöön tehdään jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa. Rakennuksen elinkaarella tarkoitetaan suunnittelusta ja rakennusmateriaalien hankinnasta rakentamiseen, sekä aina rakennuksen käyttöön päätyttyä purkuun ja purkutuoitteiden lajitteluun asti. Suunnittelussa ja rakentamisessa tuotettuja ratkaisujen muuttaminen rakennuksen käyttämisen aikana voi olla mahdotonta tai muutosten tekeminen ei ole kustannustehokasta.

Ympäristöministeriö on asettanut Suomen rakennussektorille tavoitteen, että rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä ohjattaisiin lainsäädännöllä 2020-luvun puoliväliin mennessä. Maankäyttö- ja rakennuslaki on kokemassa uudistuksen, jonka myötä rakennuksen hiilijalanjäljen laskennasta tulee pakollista rakennuslupaa haettaessa. Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy:lla ei ole työkalua käytössään, jolla hiilijalanjälkeä voitaisiin laskea tai osaamista työkalujen käyttämiseen. Suunnitelluista rakennuksista ei ole tuotettu tietoa, minkä suuruinen rakennuksen hiilijalanjälki olisi, jolloin suunniteltujen rakennusten päästöjen niin sanottua normaalia tasoa ei ole voitu määrittää.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy:n suunnitteleminen rakennusten elinkaaren aikaisia hiilidioksidipäästöjä, sekä pohtia mitkä toimet vähentäisivät päästöjä kustannustehokkaasti. Tarkoituksena oli myös ottaa käyttöön One Click LCA:n arviointityökalu, jotta rakentamisen päästöjä pystyttäisiin ohjaamaan jo suunnittelupöydällä. Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy:ssä rakennusten suunnittelu tehdään tietomallipohjaisesti ohjelmistolla, josta pystytään suoraan siirtämään tietoa arviointityökalun käyttöön. Lähtökohdat arviointityökalun käyttämiselle löytyivät jo siis suunnittelutoimistosta, sekä kiinnostusta sisällyttää suunnittelutoimiston tarjoamiin palveluihin rakennuksen elinkaaren laskeminen.

Alkuun työssä perehdyttiin vähähiilisen rakentamisen ohjaukseen Suomessa lainsäädännön, ohjausmekanismien ja vaikutusmahdollisuuksien kautta. Kirjallisuustutkimuksen kautta luotiin käsitys rakennusten hiilijalanjäljen laskennan vaiheisiin, sekä siihen vaikuttaviin ohjeisiin. Tietoperustan luomisen jälkeen suoritettiin referenssikohteiden hiilijalanjäljen laskenta. Laskennan tuloksia vertailtiin aiemmin tehtyihin tutkimuksiin ja pohdittiin niiden vaikutusta rakennesuunnitteluun. Tuloksien johtopäätelmien jälkeen käytiin läpi hiilijalanjäljen optimointivaihtoehdot ja niiden vaikutuksista referenssirakennusten hiilijalanjälkeen.

Tutkimuksen suorittamisessa ja opinnäytetyössä noudatettiin eettisiä käytäntöjä. Tutkimustyö koskee rakennusten hiilijalanjälkeä, jolloin haastavia eettisiä anonymiteettiin kohdistuvia esimerkiksi henkilötietojen keräämiseen liittyviä ongelmia ei tutkimuksen suorittamisen aikana kohdattu. Tietoperustan lähdeviittaukset on toteutettu ohjeistusten mukaisesti, rikkomatta tekijänoikeuksia. Tutkimuksen aineisto säilytettiin tutkimustyön suorittajan kotilevyllä, myös toimeksiantajalla on pääsy aineistoon. Laskennassa osana olleiden kohteiden rakennetyypit sekä hiilijalanjäljen laskennan tulosten raportit ovat salassa pidettävää aineistoa.

2 Tutkimusasetelma

2.1 Kohdeyritys

Kehittämissympäristönä toimii Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy, joka on vaativien talonrakennuskohteiden rakennesuunnittelija. Toimipisteet sijaitsevat Vantaalla, Tampereella, Kajaanissa ja Kempeleessä. Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy toimii konsernin omana rakenneteknisiä asiantuntijapalveluita tarjoavana suunnittelutoimistona, konsernin lisäksi Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy tarjoaa asiantuntijapalveluita kaikille rakennusalan ammattilaisille. Rakennushankkeiden suunnitteluun osallistumisen lisäksi Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy tarjoaa palveluitaan hankekehityksen, laskennan, hankinnan, tuotekehityksen sekä tuotteistuksen käyttöön.

2.2 Tutkimuskysymykset

Ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä opinnäytetyössä on, kuinka suuri suunnitteilla olevien rakennusten hiilijalanjälki on ja miten rakennusten hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa. Laskentaan sisäl-

lytetään eri suunnittelualojen tietomallit ja tavoitteena on tuottaa keinoja rakennusten hiilijalanjäljen pienentämiseksi, eritellen ne keinoihin, joilla saadaan kustannussäästöjä ja jotka lisäävät kustannuksia hankkeessa. Tutkimuskysymyksen avulla saadaan myös määritettyä suunniteltujen rakennusten hiilijalanjälki, jotta saadaan näkemys, miten tulevaisuudessa pystytään vastaamaan rakennuksille annettuihin raja-arvoihin.

Toisena tutkimuskysymyksenä on, mitä kestävä kehitys rakennusalalla tarkoittaa käytännössä rakennesuunnittelijalle ja tilaajalle. Kysymyksen avulla saadaan tarkennettua näkemystä nykyisten suunniteltujen rakennusten hiilijalanjäljestä ja niiden kehittämismahdollisuuksista.

Kolmantena kysymyksenä tarkastellaan eri suunnitteluohjelmistojen soveltuvuutta, erityisesti suunnittelutoimistossa käytettäviä ohjelmistoja, hiilijalanjäljen laskennassa. Laskentatyökalussa saadaan lähtötiedot helposti integroitua osasta suunnitteluohjelmistoista suoraan laskennan lähtötiedoiksi, jolloin hiilijalanjäljen laskenta on tehokasta ja tarkkaa. Tärkeää on tarkastella, onko tietomallien sisältö riittävä laskennan suorittamiseksi.

Yhteenvedona voidaan määrittää tutkimukseen sisältyvän kolme konkreettista kysymystä:

1. Mistä rakennuksen hiilijalanjälki koostuu?
2. Mitä hiilijalanjäljen laskenta vaatii?
3. Hiilijalanjäljen laskenta osaksi yrityksen palveluita.

2.3 Tietoperustan määrittely ja rajaukset

Tutkimuksen suorittamista lähestyttiin tietoperustan luomisen avulla. Tietoperustan lähestymiseen valittiin kaksi tapaa: vähähiilisen rakentamisen ohjaus Suomessa ja rakennushankkeen hiilijalanjäljen laskennan vaiheet. Rakennusalalla lainsäädännöt ohjaavat rakentamista vahvasti, jolloin vähähiilisen rakentamisen ohjaukseen Suomessa oli tärkeä perehtyä. Luvussa 3 perehdytäänkin vähähiilisen rakentamisen ohjauksen taustoihin, ohjausmekanismeihin ja miten rakennushankkeen hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa.

Ennen tutkimuksen suorittamista on tärkeää ymmärtää mistä osa-alueista ja tekijöistä hiilijalanjäljen laskenta muodostuu ja miten laskenta suoritetaan kehittämistyössä käytettävällä laskentatyö-

kalulla. Luvussa 4 selvitetään lähteiden avulla, miten rakennuksen elinkaaren eri vaiheiden laskenta suoritetaan Ympäristöministeriön luoman menetelmän avulla, sekä miten hiilijalanjäljen laskenta suoritetaan arviointityökalun avulla.

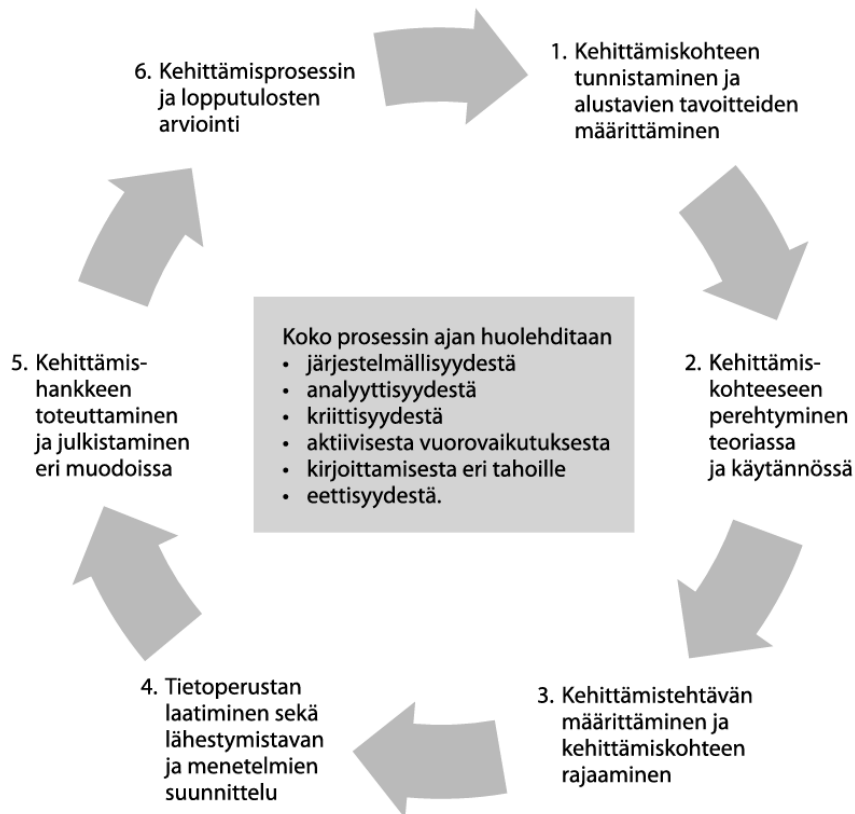
Kehittämistyössä käsitellään uudiskohteiden rakentamista ja uudiskohteiden hiilijalanjälkeä. Lähtötietoaineiston pohjalta suoritettiin EU-standardeihin ja Suomen kansallisiin menetelmiin pohjautuen tutkimukseen valikoituneiden rakennusten hiilijalanjäljen laskenta.

2.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksellisessa kehittämistoiminnassa käytännön ristiriidat ja vaikeudet luovat kehittämistarpeen. Tutkimuksellista kehittämistoimintaa lähestytään kehittämisprosessin, toimijoiden osallisuuden ja tiedontuotannon näkökulmista. Näkökulmat eroavat toisistaan, mutta yhdessä ne luovat käsityksen kehittämistoiminnasta. (Toikko & Rantanen 2009, 9.) Tutkimuksellisessa kehittämistoiminnassa tavoitteena on saada aikaan yrityksen sisällä vallitseviin käytäntöihin kehitystä tai uusia ratkaisuja, samalla kuitenkin uuden ammatillisen tiedon tuottamista käytännössä (Ojasalo & Moilanen & Ritalahti 2015, 19).

Tutkimuksellisessa kehittämistoiminnassa aiheen osaamisen lisäksi vaaditaan myös projektityön ja kehittämisen osaamista. Raportointi suoritetaan projektiraportin tapaisesti, jossa kuvataan kehittämisen lähtökohdat ja tavoitteet, työmuodot ja prosessin eteneminen sekä lopputulokset. Tutkimuksellinen kehittämistyö voidaan katsoa alkavan ideoinnista ja päättyvän useiden kehittelyvaiheiden kautta ratkaisuun, sen toteutukseen ja lopulta arviointiin. Uusien ratkaisujen luominen ja olemassa olevien soveltaminen sekä muokkaaminen kuuluvat keskeisesti kehittämistyöhön. (Ojasalo & Moilanen & Ritalahti 2015, 19.)

Tutkimuksellisessa kehittämistyössä tutkimuksellisuus esiintyy järjestelmällisyytenä, tiedon hankintana, analyttisyytenä, kriittisyytenä sekä uuden tiedon luomisena ja jakamisena. Eli kehittäminen on perusteltua, tukena käytetään tutkittua ja käytännön tietoa, luodaan erilaisia näkökulmia, joita tarkastellaan myös kriittisesti sekä tarkasti dokumentoitua. (Ojasalo & Moilanen & Ritalahti 2015, 22.)



Kuva 1 Tutkimuksellisen kehittämistyön prosessi (Ojasalo & Moilanen & Ritalahti 2015, 24).

Kehittämistyössä voidaan käyttää hyödyksi useita menetelmiä, ja kehittämistyössä onkin ominaista käytettävien menetelmien moninaisuus. Menetelmät voidaan jaotella määrällisiin (kvantitatiivisiin) ja laadullisiin (kvalitatiivisiin). Menetelmiä ovat esimerkiksi havainnointi (observation), dokumenttianalyysi (analysis of documentary evidence) ja ennakointimenetelmät. Kehittämistyön menetelmä valitaan kahden kysymyksen avulla: millaista tietoa tarvitaan ja mihin tarkoitukseen sitä aiotaan käyttää? (Ojasalo & Moilanen & Ritalahti 2015, 40.)

Kehittämistyön lähestymistavaksi valitaan tutkimuksellinen kehittäminen ja lähestymistapana taustatutkimus. Työn tavoitteena on saavuttaa toimeksiantajanyritykselle käytännön toimintaan muutos ja saada rakennesuunnittelijalle teoreettista tietoa, miten hiilijalanjäljen laskenta vaikuttaa suunnitteluun tänä päivänä ja erityisesti tulevaisuudessa. Työn tulosten tuottaminen edellyttää rakennushankkeen laajuuteen, rakentamisen tasoon ja toimintoihin sekä rakennuksen elinkaaren aikaiseen käyttöön perustuvan laskentatulosten tuottamista, jonka perusteella kehittämistutkimuksen tutkimusmenetelmiksi valikoitui määrällinen eli kvantitatiivinen menetelmä.

3 Vähähiilisen rakentamisen ohjaus Suomessa

Vähähiilisellä rakennuksella on pieni hiilijalanjälki ja suuri hiilikädenjälki. Energiantuotanto muuttuu tulevaisuudessa yhä vähäpäästöisemmäksi, jolloin rakennusmateriaalien ja -työmaan vaikutus rakennusten hiilijalanjäljessä kasvaa. Rakennuksen hiilijalanjälkeä laskettaessa tuleekin ottaa huomioon koko rakennuksen elinkaari aina rakennusmateriaalien valmistuksesta, kuljetuksesta ja työmaatoiminnosta aina rakennuksen käyttöönottoon ja purkamiseen asti.

3.1 Ohjaava lainsäädäntö ja muut tekijät

Kansainvälisellä tasolla, johon Suomen ilmastopolitiikan asettamat ilmastolait perustuvat, on tärkeimmät ilmastopoliittiset linjaukset tehty YK:n ilmastomuutosta koskevassa puitesopimuksessa 1994, Kioton pöytäkirjassa 2005 sekä Pariisin ilmastosopimuksessa 2016. Ilmastopuitesopimus toimii kansainvälisen ilmastopolitiikan perustana, tavoitteena on ihmisten aiheuttaman kasvihuonepäästöjen vakauttaminen vaarattomalle tasolle. Kioton sopimus sisältää päästövähennystavoitteet kehittyneille maille. Pariisin ilmastosopimuksen tavoitteena on, että maailmanlaajuiset kasvihuonekaasupäästöt saataisiin laskemaan, maapallon keskilämpötilan nousun hallinta selvästi alle kahdessa asteessa suhteessa esiteolliseen aikaan sekä pyrkiä toimiin, joilla lämpeneminen saataisiin rajattua alle 1,5 asteen. (Kansainvälinen ilmasto-politiikka n.d.)

Suomen kansallinen ilmastopolitiikka on ilmastolain kautta asettanut tavoitteen, että Suomi on hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja hiilinegatiivinen pian hiilineutraaliuden jälkeen. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi, jokaiselle toimialalle on luotu vähähiilisyyden tiekartta yhdessä alan toimijoiden kanssa, jotka arvioivat toimialojen odotettavaa kehitystä ja jotka sovitetaan yhteen ilmastotoimien kanssa. Tiekarttahankkeeseen osallistui suurimmista aloista energia-, kemian-, metsä- ja teknologiateollisuus. Suurten teollisuuden toimialojen lisäksi esimerkiksi ympäristöministeriö, liikenne- ja viestintäministeriö, elintarviketeollisuusliitto sekä kaupan liitto osallistuvat tiekarttojen luomiseen. Tiekarttojen valmistumisen tavoitteeksi asetettiin kevät 2020. (Vähähiiliset tiekartat 2035 n.d.)

Ympäristöministeriö ohjaa Suomessa rakentamista ja maankäyttöä. Ympäristöministeriö on ilmastolain tavoitteen kautta määrittänyt Suomen rakennussektorille tavoitteen, että rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä ohjattaisiin lainsäädännöllä 2020-luvun puoliväliin mennessä, ennen

kaikkea tarkastelussa huomioitaisiin elinkaaren alku- ja loppupää. (Kohti vähähiilistä julkista rakentamista 2017.) Myös rakennusteollisuus RT on osallistunut päästöjen vähentämiseen asettamalla rakentamiselle ja rakennetulle ympäristölle tavoitteen vähentää päästöjä vuoteen 2035 mennessä 66 prosentilla, sekä vuoteen 2050 mennessä 95 prosentilla nykytilaan verrattuna (Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyyden tiekartta 2020–2035–2050 2020). Kiinteistönomistajat ja rakennuttajat Rakli pyrkii hiilineutraaliuteen vuoteen 2035 mennessä ja luomaan merkittäviä päästövähennyksiä jo vuoteen 2025 mennessä (RAKLIn vähähiilisyyden tiekartta 2020). Edellä mainituilla toimijoilla on suuri vaikutusvalta rakennusalan kehitykseen. Näiden toimijoiden asettamalla tavoitteilla saavutetaan ilmastopoliittiset linjaukset ja siten hidastetaan ilmaston lämpenemistä.

Rakennusten hiilijalanjälkeä määräystasolla on huomioitu tähän asti ainoastaan energiatehokkuuden osalta. Uudisrakentamisen energiatehokkuuden kehittyessä ja päästöjen vähentyessä aletaan hankkeissa tehtäviä rakennustuotteiden valintojen päätöksiä ohjaamaan myös kohti vähähiilisempää suuntaa. Maankäyttö- ja rakennuslaki (MRL) on kokemassa uudistuksen, jonka tavoitteena on uudistaa ja selkeyttää vanhaa vuoden 2000 alussa voimaan tullut lakia (132/1999) ja asetusta (895/1999). Uudistuksessa tärkeimpinä tavoitteina on hiilineutraali yhteiskunta, luonnon monimuotoisuuden vahvistaminen, rakentamisen laadun parantaminen sekä digitalisaation edistäminen. (Maankäyttö- ja rakennuslaki uudistuu, tietoa lakiuudistuksesta n.d.) Pakolliseksi laadittavaksi rakennuksen hiilijalanjäljen laskenta tulee rakennuslupavaiheessa maankäyttö- ja rakennuslain uudistuksen yhteydessä.

Vähähiiliseen rakentamiseen on luotu Ympäristöministeriön toimesta tiekartta vuonna 2017, jonka mukaan rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä sisällytetään rakennusmääräyksiin vuoteen 2025 mennessä vastaten MRL:n uudistuksessa tavoitteena olevaan hiilineutraaliin yhteiskuntaan. Ympäristöministeriön tiekartta koostuu kolmesta vaiheesta; ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan testausta ja luodaan menetelmiä, toisessa vaiheessa luodaan ohjausjärjestelmät ja kolmannessa vaiheessa otetaan vähähiilisen rakentamisen ohjaus käyttöön. Alkuun veloitetaan ainoastaan julkisten hankkeiden hiilijalanjäljen arviointi. Näistä arvioinneista saaduista tiedoista voidaan luoda raja-arvot, joilla saadaan ohjattua myös muuta rakentamista. Tiekartan tavoitteena on edesauttaa alaa valmistumaan tuleviin asetuksiin hankkimalla tarvittavaa osaamista sekä kehit-

tämällä uusia menetelmiä ja konsepteja, joilla tavoitteisiin päästään. Menetelmän taustalla vaikuttaa Euroopan komission Level(s)-menetelmä ja EN-standardit. (Vähähiilisen rakentamisen tiekartta n.d.)



Kuva 2 Vähähiilisen rakentamisen tiekartan aikajana (Vähähiilisen rakentamisen tiekartta n.d.)

Level(s) on Euroopan komission luoma standardoitu ei-kaupallinen menetelmä rakennusten vastuullisuuden maailmanlaajuiseen määrittämiseen. Menetelmän pohjana ovat standardit SFS-EN 15643, SFS-EN 15978 ja SFS-EN 15804 ja sen avulla rakennusten ympäristövaikutuksia voidaan mitata, raportoida ja vertailla maailmanlaajuisesti. Menetelmässä on kuusi päätavoitetta: elinkaaren hiilijalanjälki, resurssitehokas materiaalien käyttö, veden kulutus, terveelliset tilat ja sisäilman laatu, sopeutuminen ilmastonmuutokseen sekä elinkaarikustannukset. Arviointimenetelmässä voidaan tarkkuustaso määrittää kolmeen tarkkuustasoon; yksinkertaistettu arviointi, vertaileva arviointi ja yksityiskohtainen optimointi. Yksinkertaistettu arviointi sisältää yhteisen lähtötason EU:n rakennusten arviointiin. Vertaileva arviointi suoritetaan keskenään samankaltaisille rakennuksille. Yksityiskohtainen optimointi sisältää ympäristöindikaattoreiden laajaa käyttöä. (Level(s), What's in it for architects, designers, engineers and quantity surveyors? 2021.)

3.2 Ohjausmekanismit

Rakentamista ohjataan yleisesti EU:n säädöksillä ja päästökaupalla, valtiohallinnon toimenpiteillä sekä markkinamekanismeilla ja kuntien toiminnalla. Valtion toimenpiteet jaetaan velvoittavaan sääntelyyn, informaatio- sekä talousohjaukseen (Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen

huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa 2017, 25). Ennen vähähiilisuuden laskennan pakollisuutta (velvoittavaa sääntelyä) tulee rakennusten vähähiilisuuden arviointia ohjata erilaisilla ohjausmekanismeilla ja kannustimilla, jotta arviointia rakennushankkeille tehtäisiin. Tehokkaimpina ohjauskeinoina voidaan pitää Suomen kuntien ja kaupunkien sääntelyä, hankkeiden rahoitusta sekä ympäristöluokitusjärjestelmiä.

Suomessa kunnat ja kaupungit toimivat vähähiilisen rakentamisen ohjauksen ja valvomisen keskiössä. Rakennetun ympäristön elinkaaren ohjausta säädellään keskeisesti kunnallisella sääntelyllä eli kaavoituksella. Maankäytön suunnittelussa voidaankin sisällyttää vaatimukseen vähähiiliset energiamuodot, vähäpäästöinen ja sujuva liikkuminen sekä vähäpäästöinen rakentaminen (Vähähiilisuuden mahdollisuuksien tarkastelu 2020, 74). Kuntien rakennusvalvontaviranomaiset myöntävät annettujen määräysten mukaisille rakennushankkeille rakennusluvut ja tarkastavat hankkeiden toteutuksen ennen rakennuksen käyttöönottoa. Rakennusvalvonta voi myös vaikuttaa hankkeiden vähähiilisyyteen epäsuorasti neuvomalla ja ohjeistamalla sekä ohjata kohti vähähiilisempää rakentamista lupamaksujen alennuksilla. Kunnat ovatkin keskeisessä roolissa ilmastonmuutoksen hillinnässä, niillä on suuri mahdollisuus vaikuttaa rakennusten hiilijalanjälkeen kaavoituksesta aina varsinaiseen rakentamiseen asti niin uudisrakentamisessa kuin olemassa olevan rakennuskannan energiatehokkuutta parannettaessa. (Viranomaisnäkökulma rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkihjaukseen 2017.) Yli 80 Suomen kunnista ja viisi maakunnista kuuluvat myös Suomen ympäristökeskuksen SYKE:n luomaan Hiilineutraalit kunnat (Hinku) – verkostoon, jonka päätavoitteena on 80 prosentin päästövähennykset vuoteen 2030 mennessä vuoden 2007 tasosta. Hinku tarjoaa kunnille muun muassa työkaluja ja asiantuntijuutta päästövähennyksissä sekä tilaisuuksia saada ulkopuolista rahoitusta hankkeille. Päästövähennyksiä toteutetaan Hinku-kunnissa energiatehokkuuden parannuksilla sekä lisäämällä uusiutuvan energian käyttöä. (Vähähiilisuuden mahdollisuuksien tarkastelu 2020, 74.)

Vapaaehtoisia laskentoja on Suomessa toteutettu erityisesti julkisen sekä vihreän rahoituksen kannustamana. Julkisia rahoitusmahdollisuuksia on käytettävissä esimerkiksi Ympäristöministeriön, valtioneuvoston Sitran, Kuntarahoituksen, Vake Oy:n ja Business Finlandin kautta vähähiilisille hankkeille (Vähähiilisuuden mahdollisuuksien tarkastelu 2020, 75). Julkisella rahoituksella pyritään kannustamaan yrityksiä luomaan vähähiilisiä ratkaisuja rakentamiseen ilmastonmuutoksen hillinnässä ja siihen sopeutumisessa. Vihreässä rahoituksessa joukkokirjalainat tai yrityksille suunnatut

ympäristölainat ohjaavat rakentamista kohti vastuullisuutta, näille lainoille voidaan asettaa ehtoja ja vaatimuksia hankkeen tavoitteista kestävydessä. Vihreä laina on yritykselle tavallista lainaa edullisempi. (Vähähiilisyden mahdollisuuksien tarkastelu 2020, 76.) Tulevaisuudessa rahoituksen saannille voi hankkeen vähähiilisyys olla myös edellytys. Yksityiset kiinteistösijoittajat ja rahoittajat toimivat myös ympäristövastuullisesti, mutta ennen kaikkea tavoittelevat kustannustehokkuutta muun muassa rakennusten ylläpidon energiakustannuksissa sekä nostamalla kiinteistöjen arvoa sertifikaattien avulla.

Ympäristöluokitusjärjestelmät toimivat rakennusten ympäristötehokkuuden mittaamiseen, todentamiseen ja vertailtavuuden mahdollistamisessa. Rakennusten luokitusprosessin toteuttaminen ulkopuolisella arvioinnilla varmistaa, että hanke on suunniteltu ja rakennettu kestävä kehityksen mukaisesti sekä energia- ja kustannustehokkaasti säästämällä maapallon rajallisia resursseja. Toteututtuaan ympäristöluokitus kertoo luotettavasti kohteen vastuullisuudesta, jolloin sijoittajat ja organisaatiot ympäri maailmaa pystyvät vertailemaan rakennuksen vähähiilisyyttä ja täten hallitsemaan myös riskejä kiinteistökaupan yhteydessä. (Ympäristöluokitukset 2022.)

3.3 Rakennushankkeen hiilijalanjälkeen vaikuttaminen

Rakennuksen vähähiilisyys riippuu sen elinkaaren aikana tehdyistä valinnoista. Tärkeitä valintoja ovat rakentamispäätös, rakennuspaikan valinta, rakentamisen tai korjaamisen suunnittelu, rakennusmateriaalien ja -tuotteiden valinta, rakentamistapa, rakennuksen tai rakenteen ylläpidon ja huollon toteutus, käyttö ja lopulta rakenteiden loppusijoitus tai kierrätys. (Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyden tiekartta 2020–2035–2050 2020.)

Rakennushankkeen hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa monessa eri vaiheessa ja monen eri tahon toimesta. Merkittävimmät päätökset tavoitteiden saavuttamiseen tehdään jo rakennushankkeen suunnittelun alkuvaiheessa, tämän vuoksi hiilijalanjäljen tavoitteiden tiedostaminen tulee tehdä heti projektin aloittamisesta. Hankkeelle määritetään päästöjen minimoimiseksi hiilijalanjälkitavoitteet ja suunnittelua sekä toteutusta ohjataan asetettuja tavoitteita kohti. Tärkeää tavoitteiden saavuttamiselle on, että jokainen hankkeeseen osallistuva tiedostaa asetetut tavoitteet ja toimii tavoitteiden saavuttamisen mukaisesti, toimiva ja jatkuva yhteistyö eri suunnittelualojen välillä korostuu rakennuksen vähähiilisyden tavoittelussa. Erityisesti rakennuksen käyttö-, huolto- ja elinkaariohjeen luonti tulee tehdä yhdessä koko suunnittelutiimin kesken, jotta rakennuksen ja sen

osien käyttöön ja kestävyys sekä elinkaaren lopun toimenpiteet pystytään varmistamaan. Hiilijalanjälkeen keskeisesti vaikuttavat tahot ovat rakennuttaja, arkkitehti, rakennesuunnittelija, talotekninen suunnittelija, urakoitsija sekä epäsuorasti rakennustuotevalmistaja.

Rakennuttaja pystyy vaikuttamaan rakennushankkeen hiilijalanjälkeen monessa eri rakentamisen vaiheessa. Tarveselvityksen ja hankesuunnittelun aikana rakennuttaja voi määrittää tavoitteet rakennuksen hiilijalanjäljelle, tavoitteen määrittelyllä pystytään ohjaamaan jo ennakkoon koko rakennuksen hiilijalanjäljen suuntaa. Tavoite voi olla numeerinen perustuen samankaltaisten rakennusten hiilijalanjälkeen tai hankkeelle voidaan asettaa vaatimuksia, joilla tiedetään olevan merkitystä rakennuksen vähähiilisyteen. Tarveselvityksen ja hankesuunnittelun aikana rakennukselle voidaan tehdä jo alustava hiilijalanjäljen laskenta. Suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa rakennuttaja ohjaa eri suunnittelualoja ja urakoitsijoita rakennushankkeessa kohti asetettua päästötavoitetta, sekä hyväksyy suunnittelun tulokset. Rakennuttaja voi esimerkiksi vaatia rakennusmateriaaleilta vähähiilisyttä ja uusiutuvien energialähteiden käyttöä. Rakennuttajan vastuulla on myös rakennuksen käyttöön määrittely. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 148-165; Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen – rakennuttaja 2022.)

Pääsuunnittelija ja arkkitehti pyrkivät suunnittelutoiminnoillaan asettamaan rakennukselle mahdollisimman pitkän elinkaaren jokaisessa suunnitteluvaiheessa, erityisesti kiinnittämällä huomiota rakennuksen tilatehokkuuteen, massoitteeluun, runkomateriaaleihin, muuntojoustavuuteen ja käyttöjoustavuuteen. Rakennusmateriaalien valinnassa suositaan materiaalitehokkaita, vähähiilisiä ja pitkäikäisiä vaihtoehtoja erityisesti niissä rakenneosissa, joilla on suurin vaikutus hiilijalanjäljessä. Rakennuksen sijoittelulla, muodolla, varjostuksilla ja ikkunapintojen suuntauksilla pystytään vaikuttamaan myös passiivisesti rakennuksen energiatehokkuuteen. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 155-165; Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen – pääsuunnittelija ja arkkitehti 2022.)

Rakennesuunnittelija vaikuttaa rakennushankkeen hiilijalanjälkeen tekemillään suunnitteluratkaisuilla rakennusmateriaalien valinnoissa, materiaalimenekissä ja materiaalitehokkuudessa, sillä suuri osa rakennuksen elinkaaren aikaisesta hiilijalanjäljestä koostuu rakennusmateriaalien tuottamisesta aiheutuvista päästöistä ja tyypillisen rakennuksen runko muodostaa suurimman osan rakennuksen päästöistä. Rakennesuunnittelija myös määrittää rakenteiden suunnitellut käyttöiät perustuen rakennuttajan asettamaan vaatimukseen rakennuksen käyttöiästä. Uudisrakentamisessa

rakenteellinen energiatehokkuus ja korjausrakentamisessa energiatehokkuuden parantaminen ovat rakennesuunnittelijan tehokas tapa vaikuttaa rakennushankkeen hiilijalanjälkeen. Rakennesuunnittelijan tehtävänä on optimoida suunnitteluratkaisut kokonaisuudessaan ja toimia arkkitehdin tukena rakenneratkaisuja tehdessä. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 155-165; Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen – rakennesuunnittelija 2022.)

Talotekninen suunnittelija vaikuttaa rakennushankkeen hiilijalanjälkeen suunnittelemalla hankkeelle mahdollisimman vähähiilisiä energiantuotannon muotoja ja taloteknisiä järjestelmiä, erityisesti energiatehokkuuden näkökulmasta. Energianmuotona vähähiilisissä rakennuksissa korostuu uusiutuvien energian ja hukkaenergian käyttö. Talotekninen suunnittelija suorittaa rakennuksen energialaskelmat ja simuloinnit, joista saadaan tarkkaa tietoa rakennuksen energiatehokkuudesta ja sen kautta energiatehokkuuden parantamisen vaikutukset rakennuksen hiilijalanjälkeen. Suunnittelussa on tärkeää huomioida rakennuksen elinkaaren kannalta ratkaisut mahdollisimman pitkäaikaiskestäviksi, helposti huollettaviksi ja muuntojoustaviksi. Erityisesti ilmastonmuutoksen aiheuttavat muutokset rakennuksen tarpeisiin on tärkeää ottaa suunnittelussa huomioon. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 155-165; Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen – talotekninen suunnittelija 2022.)

Urakoitsija varmistaa, että suunnittelussa asetetut tavoitteet rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä siirtyvät suunnitelmista toteutukseen. Myös työmaa-aikaisen hiilijalanjäljen minimointi suosimalla uusiutuvaa energiaa työmaan kuljetuksissa, koneissa, lämmityksessä ja sähkössä sekä minimoimalla materiaalihukan ja maksimoimalla esimerkiksi lajittelun kautta materiaalin uudelleenkäytön ovat urakoitsijan vastuulla. Vähähiilisyyden tavoitteet tulisivin olla osana jokaista hankintakriteeriä ja sopimusta. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 166-167; Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen – urakoitsija 2022.)

Rakennustuotevalmistaja vähentävät rakennuksen elinkaarenaikaisia päästöjä kasvattamalla materiaalien ja tuotteiden käyttöikää sekä kierrättävyyttä tai uudelleenkäytettävyyttä. Tuotteiden valmistusprosessissa tulisi käyttää uusiutuvia energianlähteitä, hyödyntää tuotannon aikana syntyvää hukkalämpöä sekä pyrkiä suosimaan läheltä saatavia raaka-aineita tuotteissa. Myös pakkausmateriaaleihin ja rakennusmateriaalien kuljetuksiin tulee tuotevalmistajan kiinnittää huomioita. (Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen – rakennustuotevalmistaja 2022.)

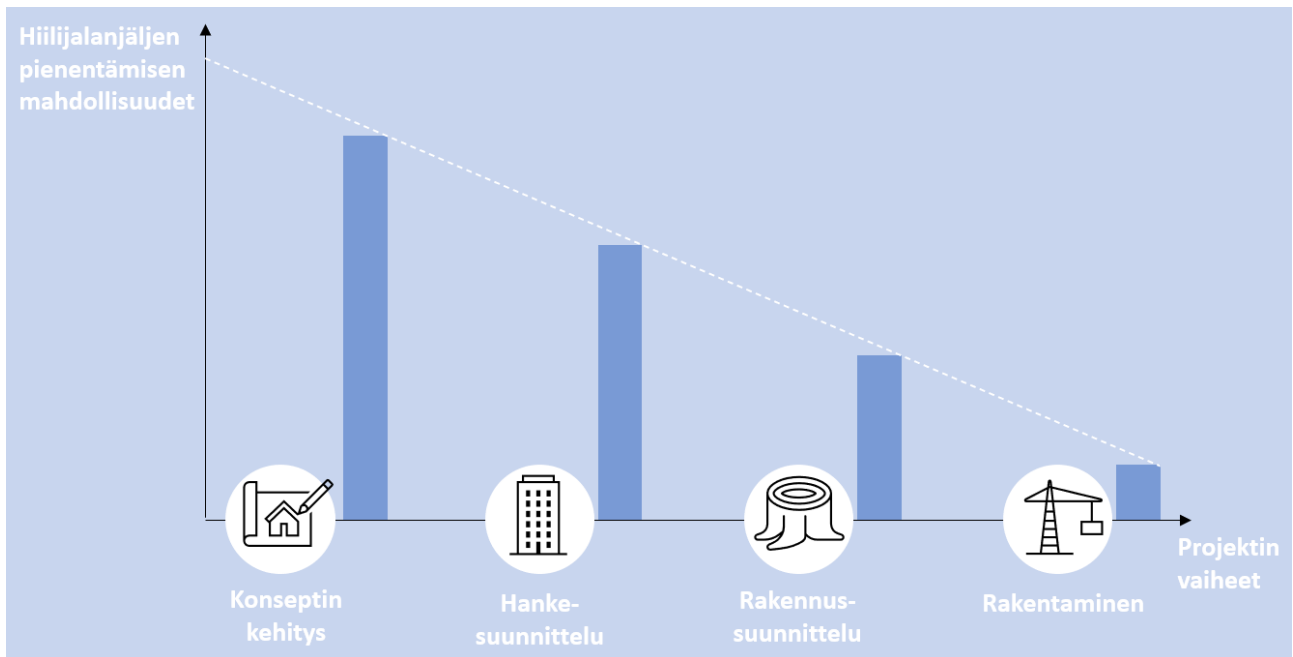
4 Rakennushankkeen hiilijalanjäljen laskennan vaiheet

Elinkaariarviointi (LCA, life cycle assessment) perustuu kaikilla aloilla yleisesti ISO 14040- ja ISO 14044-standardeihin, jotka määrittävät elinkaariarvioinnin yleiset periaatteet ja vaatimukset. Rakennusalalla elinkaariarvioinnin yleiseksi standardiksi maailmanlaajuisesti on muodostunut SFS-EN 15978 Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. (Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa 2017, 23.)

4.1 Rakennuksen elinkaaren eri vaiheiden laskenta

Hiilijalanjäljen arvioinnin tavoitteena on pyrkiä pienentämään huolellisella ennakkosuunnittelulla rakennuksen koko elinkaaren aikana aiheutuvia kasvihuonepäästöjä. Arviointi voidaan toteuttaa rakennuksille niin uudisrakentamisessa, kuin korjausrakentamisessa. Korjausrakentamisessa hiilijalanjäljen laskentaan sisällytetään ainoastaan korjaustoimenpiteessä käytettävät uudet tai toimenpiteen yhteydessä korjattavat rakennustuotteet ja –osat. (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 12.)

Rakennuksen hiilijalanjäljen laskenta voidaan suorittaa monessa eri vaiheessa; tarveselvityksessä, hankesuunnittelussa, rakennussuunnittelussa, rakentamisen aikana, rakennuksen käyttöönotossa tai rakennuksen käytön aikana (Life Cycle Assessment For Buildings - Why it matters and how to use it 2017, 7.) Laskennan tarkkuus paranee, mitä pidemmälle toteutus on viety, rakennuksen käyttöönoton jälkeen suoritettu laskenta on vaiheista tarkin. Kuitenkin mahdollisten muutosten tekeminen rakennusten käyttöönoton jälkeen on kustannustehotonta, joten jos rakennuksen hiilijalanjälkeen halutaan vaikuttaa myönteisesti, on laskenta hyvä suorittaa varhaisessa vaiheessa, milloin ratkaisuja on vielä helppo muuttaa. Laskennan suorittaminen ja päivittäminen useassa eri vaiheessa onkin tehokkain ratkaisu laskea rakennuksen hiilijalanjälki.



Kuva 3 Hiilijalanjäljen pienentämisen mahdollisuudet projektien eri vaiheissa

Vaihe	Mahdolliset keskeiset asiat vähähiilisen rakentamisen näkökulmasta	Tarvittava taustatieto
Tarveselvitys	Strategiset vaatimukset koskien vähähiilistä / hiilineutraalia toimintaa ja tiloja	Yleistietoa rakentamisen merkityksestä ja viitetietoa erityyppisten rakennusten tyypillisistä päästöistä
Hankesuunnittelu	Rakennuksen vähähiilisyyden tavoitteet	Rakennus- ja järjestelmätasoisista tietoa tyypillisistä päästöistä
Suunnittelun valmistelu	Tavoitteet ja vaatimukset koskien vähähiilisen rakennuksen suunnittelua	Viitetietoa erityyppisten rakennusten tyypillisestä päästöarvosta, ymmärrystä mahdollisuuksista ja tarvittavasta osaamisesta
Ehdotussuunnittelu	Arvioi vaihtoehtojen hiilijalanjäljestä	Järjestelmä- ja rakennusosatasoisista tietoa tuotteiden ja palvelujen tyypillisistä päästöistä
Yleissuunnittelu	Kattavampi arvioi vaihtoehtojen päästöistä	Tietoa tuotteiden ja palveluiden tyypillisistä päästöistä ja vaihtelurajoista
Rakennuslupatehtävät	Säännösmenetelmän mukainen hiilijalanjälkilaskelma	Tuotteiden ja palvelujen päästötietokanta, joka täyttää säädöksen vaatimukset

Toteutussuunnittelu	Tarkennettu arvio suunnitelman hiilijalanjäljestä	Tietoa tuotteiden ja palveluiden tyyppillisistä päästöistä ja vaihtelurajoista
Rakentamisen valmistelu	Vähähiilisyiden vaatimukset koskien hankintaa	Tietoa tuotteiden ja palveluiden päästöistä ja vaihtelurajoista
Rakentaminen	Rakennuksen hiilijalanjäljen tarkistuslaskelma	Tietoa vaihtoehtoisten tuotteiden ja palveluiden päästöistä ja vaihtelurajoista
Käyttöönotto	Rakennuksen hiilijalanjäljen tarkistuslaskelma	Tietoa tuotteiden ja palveluiden päästöistä ja vaihtelurajoista
Takuuaika	Rakennuksen hiilijalanjäljen tarkistuslaskelma	Tietoa tuotteiden ja palveluiden päästöistä ja vaihtelurajoista

Taulukko 1 Päästötiedon tarve vähähiilisen rakennussuunnitelun eri vaiheissa (Häkkinen & Kuittinen 2020, 86)

Resurssitehokkaassa rakentamisessa uudisrakentaminen on vaihtoehtoista viimeisenä. Ensisijaisesti tulisikin tutkia, voidaanko olemassa olevia tiloja käyttää tarpeessa olevaan tarkoitukseen. Seuraavana vaihtoehtona pyritään kunnostamaan vanhaa ja vasta viimeisenä vaihtoehtona on mahdollinen purkaminen ja uuden rakentaminen. Uudet rakennukset tulisikin suunnitella monikäyttöisiksi ja muuntojoustaviksi, jotta resurssitehokkaan rakentamisen mahdollisuudet pätevät tulevaisuudessa. Rakenteiden tulisi myös olla helposti ylläpidettäviä, korjattavia ja purettavia, jotta nämä tavoitteet täytyisivät, tulisi rakennukselle laatia elinkaariohje. Uuden rakentamisessa tulisi pyrkiä mahdollisimman pieneen hiilijalanjälkeen ja suureen hiilikädenjälkeen, erityisesti rakennusmateriaalien ja energian käytössä. (Huttunen 2021, 16.)

Uudisrakentamisessa rakennuksen elinkaareen määritellään kuuluvan neljä vaihetta; tuotevaihe, rakentaminen, käyttövaihe sekä elinkaaren loppu. Tuotevaiheeseen kuuluu raaka-aineen hankinta (A1), kuljetus valmistukseen (A2) ja tuotteen valmistus (A3). Tuotevaiheen päästöt saadaan arvioidua helposti, ja niihin liittyvät epävarmuudet ovat pieniä rakennuksen koko elinkaari huomioon ottaen. Rakentamisen vaiheeseen käsittää kuljetuksen työmaalle (A4) ja työmaatoiminnot (A5). Käyttövaiheeseen sisältyy tuotteen käyttö rakennuksessa (B1), kunnossapito (B2), korjaukset (B3), osien vaihto (B4), laajamittaukset korjaukset (B5), energian käyttö (B6) sekä vedenkäyttö (B7). Käyttövaiheen päästöt syntyvät monen vuoden aikana, jolloin tulevaisuuden arviointi on vaikea tehdä luotettavasti. Käyttövaiheen arviointi toteutetaan yleensä rajatulle arviointijaksolle. Elinkaaren lopussa päästöjä syntyy purkamisesta (C1), kuljetuksesta jatkokäsittelyyn (C2), purkujätteen käsittelystä (C3) ja purkujätteen loppusijoituksesta (C4). Edellä mainittujen lisäksi arviointi voidaan

tehdä elinkaaren ulkopuolelle jäävistä hyödyistä tai haitoista (D), joka sisältää rakennusmateriaalien uudelleenkäytön ja rakennusmateriaalien kierrätyksen avulla saavutetut edut. Edut perustuvat oletukseen, että uudelleenkäytöllä tai kierrätyksellä pystytään välttämään vastaavan materiaalin valmistuksesta aiheutuvat päästöt. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 70-71; Rakennuksen vähähiilisyysarviointimenetelmä 2019, 14.)

Vähähiilisyysarviointiin arvioidaan kaikkien näiden vaiheiden materiaalien, energian käytön, kuljetusten ja työmaan toimintojen vähähiilisyys. Materiaalien kirjaamista varten tarvitaan rakennuksen määräluettelo, jonka pohjalta saadaan luotua luettelo rakennuksessa käytetyistä materiaaleista. Materiaaliluettelossa pyritään myös huomioimaan työmaalla syntyvän mahdollisen ylijäämän tai hukkan määrä, sekä materiaalien käyttöiän päätyttyä materiaalien vaihto. Hukkakertoimet löytyvät rakentamisen päästötietokannasta. Materiaalien elinkaaren lopusta huomioidaan mahdollinen uudelleenkäyttö, kierrätys tai loppusijoitus. (Rakennuksen vähähiilisyysarviointimenetelmä 2019, 16.) Kuljetusten hiilijalanjäljen laskennassa otetaan huomioon rakennukselle toimitettavien tuotteiden kuljetusväilyt rakentamisen, korjausvaiheen ja elinkaaren lopussa purkamisen aikana (Rakennuksen vähähiilisyysarviointimenetelmä 2019, 22). Työmaan toiminoista arvioidaan työmaalla kulutetun energian määrä (Rakennuksen vähähiilisyysarviointimenetelmä 2019, 26).

Arviointiin sisällytetään koko rakennus, tontin rakenteet sekä keskeiset osat taloteknisistä järjestelmistä. Ympäristöministeriön menetelmän mukaan (Rakennuksen vähähiilisyysarviointimenetelmä 2019, 38) rakennuksen arviointiin sisällytetään:

- tontista; maatyöt, tuennat ja vahvistukset, päällysteet sekä alueen rakenteet,
- kantavista rakenteista; perustukset, alapohjat, runko, julkisivut, ovet ja ikkunat, ulkotasot sekä vesikatot,
- täydentävistä rakenteista; väliseinät, ovet, portaat, pintarakenteet, kiintokalusteet, hormit ja tulisi-
jat sekä tilaelementit,
- talotekniikasta; energiajärjestelmät, vesi- ja viemärijärjestelmät, ilmastointijärjestelmät, sähkön
jakelu- ja käyttöjärjestelmät, aurinkopaneelit ja -keräimet sekä hissit ja
- työmaasta; kulutettu energia.

Arviointiin ei sisällytetä tontin kasvillisuutta, maaperää tai varusteita. Rakennuksen maanalaisten osien pois jättäminen laskennasta pyrkii tasa-arvoistamaan rakennuttajat, sillä rakennettavan tontin olemassa olevaan maaperään harvoin pystytään vaikuttamaan. Arvioinnista jätetään myös pois erilliset kiinnikkeet kantavista rakenteista, täydentävistä rakenteista listat sekä erilliset kiinnikkeet,

talotekniikasta tietotekniset järjestelmät, varavirrat, liukuportaat sekä erilliset koneet ja laitteet ja työmaan toiminnoista telineet ja suojaukset, väliaikaiset rakenteet, muotit, työmaatilojen elinkaari sekä työmaan henkilöliikenne. (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 38.)

Arvioinnista saadut tulokset ilmoitetaan kokonaislukuna hiilidioksidiekvivalenttien painona jaettuna rakennuksen lämmitetyllä nettopinta-alalla ja arviointiajanjakson pituudella ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$) (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 34).

Hiilijalanjäljen lisäksi rakennushankkeelle voidaan määrittää hiilikädenjälki. Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan rakennuksen elinkaaren ulkopuolisia myönteisiä ilmastovaikutuksia, joita ei syntyisi ilman rakennushanketta, esimerkiksi rakennusmateriaalien uudelleenkäytöllä tai kierrätyksellä ehkäistävät päästöt, pitkäikäiset hiilivarastot sekä rakennuksella tai tontilla tuotettu ylijäävä uusiutuva energia. Hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki muodostuvat siis eri aikoina. Hiilikädenjälki ilmoitetaan absoluuttisena nettoilmastovaikutuksena, eikä sitä vähennetä hiilijalanjäljestä. (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 30.)

4.2 Hiilijalanjäljen laskenta One Click LCA – arviointityökalulla

Bionova on kehittänyt selainpohjaisen One Click LCA arviointityökalun, jonka avulla voidaan tarkastella rakennusten ja materiaalien elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia. Arviointityökalussa on mahdollisuus integroida rakennusten tietomalleja, jolloin laskennasta saadaan tehokasta ja tarkkaa. Laskentatyökalu sisältää omat työkalunsa esimerkiksi hiilijalanjäljen mittaamiseksi ja ympäristösertifioinneille. (Rakennuksen elinkaaren arviointityökalu 2019.) Arviointityökalussa voidaan myös verrata rakennuksen tuloksia vertailuaineistoon, jonka avulla voidaan tehdä muutoksia parempiin materiaaliratkaisuihin. Näillä vertailuaineistoilla on mahdollista pienentää uusien rakennusten elinkaaren aikaisia päästöjä.

Arviointityökalussa voidaan käyttää erilaisia laskentamenetelmiä, jotka perustuvat sertifikaatteihin, säädöksiin tai maakohtaisiin käyttötapauksiin. Tämä opinnäytetyön arviointityökalu käyttö keskittyy Ympäristöministeriön luomaan vähähiilisyyden arviointityökaluun (YM 2021 lausuntoversioon).

Tuloksena arviointityökalusta saadaan rakennuksen rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset hiilidioksidiekvivalenttina neliometriä ja vuotta kohden ($\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$).

Arviointityökalu sisältää myös Carbon Designer-laskentatyökalun, jonka avulla voidaan varhaisessa vaiheessa olevan hankkeen päästöjä arvioida alustavasti. Työkalun avulla hankkeen ympäristövaikutuksia voidaan arvioida nopeasti ja tehdä vertailua esimerkiksi eri energiamuotojen tai runkoratkaisujen vaikutuksista rakennuksen hiilijalanjälkeen. Carbon Designer-työkaluun ei syötetä tarkkoja materiaalmääriä, vaan se toimii arviointityökaluna perustuen rakennuksen geometriaan ja tyyppirakenteisiin. Carbon Designer soveltuu sekä uudishankkeiden että peruskorjausten laskentaan. (One Click LCA n.d.)

4.2.1 Tavoitteen ja laajuuden määrittäminen

Arviointityökalussa määritetään alkuun projektin tavoitteet ja haluttu laajuus. Rakennuksen hiilijalanjäljen laskennan suorittamiseen on monia syitä. Syyt voivat olla laaja-alaisia ja monitahoisia kuten rakennuksen päästöjen määrittäminen ja niiden vähentäminen, ympäristösertifiointien saavuttaminen tai rakennusmääräysten noudattaminen. Laskennan suorittaminen voidaan myös toteuttaa esimerkiksi julkisen hankinnan kriteeristön täyttämiseksi, suunnittelukilpailun tavoitteiden saavuttamiseksi tai halusta kehittää rakentamista vähähiilisemmäksi ja vastuullisemmaksi. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 76.)

Vähähiilisyiden arviointi on tulossa lakisääteiseksi rakennuslupaa haettaessa Suomessa, jolloin yhtenä tavoitteena hiilijalanjäljen laskennalle on rakentamismääräysten vähimmäisvaatimusten täyttäminen. Laskennan tavoite perustuu tällöin Ympäristöministeriön arviointimenetelmään rakennuksen vähähiilisydestä. Kuitenkin nykyhetkellä vähimmäisvaatimuksia ei ole rakennuksille annettu, jolloin vaatimusten täyttäminen ei ole pääasiallinen tarkoitus laskennan suorittamiseen.

Ympäristösertifikaattien vaatiminen voi tulla tilaajalta, sijoittajalta, rakennuksen loppukäyttäjältä tai osana julkisen hankinnan kriteeristöä. Laskennan tavoitteena on tällöin varmistaa toivottu sertifikaatin taso (Häkkinen & Kuittinen 2020, 76). Ympäristösertifikaatit auttavat sijoittajia, viranomaisia ja tilojen käyttäjiä vertailemaan kiinteistön ympäristönäkökohtia eri hankkeiden välillä. Ympäristösertifiointeja voi olla esimerkiksi BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) joka perustuu yhteiseen eurooppalaiseen normistoon, LEED (Leadership

in Energy and Environmental Design), joka on maailman käytetyin globaali luokitusjärjestelmä, RTS-ympäristöluokitus, joka on luotu Suomen rakennusolosuhteet, lainsäädännöt ja kiinteistökan-
nan monipuolisuus huomioiden tai Joutsenmerkki, joka on Pohjoismaiden rakennusympäristöön
luotu ympäristömerkki (Ympäristöluokitukset 2022). Ympäristösertifikaatit voivat muokata lasken-
nan toteuttamista eriävillä vaatimuksillaan, joka vaikuttaa suoraan käytettävään laskentamenetel-
mään ja tulosten raportointiin.

Yleisenä tavoitteena hiilijalanjäljen laskennassa on rakennuksen ympäristövaikutusten mittaus ja
tarvittaessa niiden vähennys, mutta jokaiselle laskennalle voidaan määrittää erityistavoitteita,
joita laskennalla halutaan saavuttaa. Laskennassa voidaan myös määrittää samalle projektille
monta eri edellä mainittua tavoitetta.

4.2.2 Rakennusmateriaalien ja – toimintojen luettelointi

Arviointityökalussa syötetään projektille tiedot rakennusmateriaaleista, rakentamisprosessista,
vuotuisesta energiankulutuksesta, laskentajakson pituudesta, mahdollisista muista päästöistä ja
vähennemistä sekä rakennuksen pinta-alasta. Näiden tietojen perusteella arviointityökalu suorittaa
laskennan ja määrittää rakennuksen hiilijalanjäljen arvon.

Rakennusmateriaalien luettelossa tuodaan ilmi rakennusmateriaalien tyyppi, määrä, käyttöikä,
hukka, rakennusosa, jossa materiaalia käytetään, onko materiaali uudelleenikäytetty sekä raken-
nusmateriaalin kuljetukseen käytetty matka ja kuljetusmuoto. Materiaaleista syötetään määrä
joko massana (kg) tai pinta-alana (m²), sekä rakennusmateriaalin paksuus (mm). Materiaalien
päästötietoina käytetään tuotekohtaisia ympäristöselosteita (EPD, environmental product declara-
tion) tai kansallisen päästötietokannan arvoja. Laskentatyökalu asettaa automaattisesti materiaa-
lien käyttöiän perusteella, kuinka useasti tuote vaihdetaan arviointijakson aikana. Kuljetusetäisyys
voidaan määrittää tarkasti jokaiselle tuotteelle, jos tiedot ovat saatavilla, muulloin työkalu käyttää
kansallisen tietokannan perusteella luotuja keskimääräisiä kuljetusetäisyyksiä (102 km kuljetuse-
täisyys, josta 90 % maantieajoa ja 10 % kaupunkiajoa). Rakennusmateriaalit eritellään perustuksiin,
pystyrakenteisiin, vaakarakenteisiin, muihin rakenteisiin ja materiaaleihin, alue- ja piharakentami-
seen sekä rakennuksen talotekniikkaan. Erittelyn avulla saadaan tulostuksessa näkyviin eri ra-
kennusosien ympäristövaikutukset. Perustuksiin sisältyy kaikki maanalaiset rakenteet ja perus-
muurit. Perustuksissa käytettäviä materiaaleja ei lasketa korvattaviksi, riippumatta arviointijakson

pituudesta. Pystyrakenteet on jaoteltu vielä ulkoseiniin ja julkisivuihin, pilareihin ja kantaviin pystysuoriin rakenteisiin sekä väliseiniin ja ei-kantaviin rakenteisiin. Vaakarakenteisiin kuuluu ala-, väli- ja yläpohjat, sekä palkit ja katto. Muihin rakenteisiin ja materiaaleihin sisällytetään esimerkiksi ikkunat ja ovet, sekä pintamateriaalit. Jos rakennuksen talotekniikasta ei erityisesti suunnittelun alkuvaiheessa ole tarkkaa tietoa, voidaan arvioinnissa käyttää Suomen ympäristökeskuksen SYKE:n luomassa kansallisessa rakentamisen päästötietokannassa julkaistuja taloteknisten järjestelmien taulukkoarvoja. (One Click LCA n.d.)

Rakennusmateriaalien määräluettelot voidaan saada määrälaskelmista, piirustuksista ja BIM mallista. Suunnittelutyökaluja, joista materiaalien määrätieto voidaan helposti integroida laskenta-työkaluun, ovat esimerkiksi Tekla Structures, Trimble Connect, Autodesk Revit ja ArchiCAD. (Life Cycle Assessment For Buildings - Why it matters and how to use it 2021, 16.)

Rakentamisprosessin luettelossa ilmenee lisäkuljetusten yksityiskohdat, materiaalien vaihdot, rakennuksen energian- ja vedenkulutus sekä käyttöiän päättymisestä aiheutuvat skenaariot. Rakennustoimintojen luettelo perustuu suunnittelijoiden, urakoitsijoiden ja rakennuksen omistajien lähtötietoihin. Rakentamisen aikana tai rakennuksen valmistuttua saadaan rakennustoimintoihin lueltua tarkasti rakentamisprosessin aikaiset päästöt, jolloin voidaan laskennassa täyttää arvot liittyen energian- ja vedenkulutuksesta, työmaalla syntyvästä jätteestä ja kuljetuksiin liittyvät lisämatkat. Suunnittelun alkuvaiheessa tarkkaa tietoa ei ole, tällöin käytetään rakennustyömaan skenaarioita, joka sisältää rakennustyömaan sähkön, polttoaineen, jätteen ja kuljetusten vaikutuksia. Skenaarioiden tiedot perustuvat valitun ilmastovyöhykkeen tyyppillisiin päästöihin verrattuna rakennuksen pinta-alaan. Purkamisesta luodaan myös skenaario, joka perustuu SYKE:n luomaan paikalliseen yleiseen dataan, vaihtoehtoista valitaan purettavan rakennuksen tyyppi ja syötetään purettavan rakennuksen pinta-ala. (One Click LCA n.d.)

Vuosittaiseen energiankulutukseen lisätään sähkökulutus, kiinteiden laitteiden polttoaineiden kulutus, kaukolämmön ja -jäähdytyksen kulutus sekä ylijäävä energia. Kuhunkin energiankulutuksen kohtaan lisätään rakennuksen käyttöiän mukainen energiaprofiili, kulutuksen tuloksissa huomioidaan täten tulevaisuuden päästövähennys energiantuotannossa. Arviointityökalussa käytetään kansallisen tietokannan mukaisesti ensisijaisesti hyödynjakomenetelmä-nimettyjä tietojoukkoja. (One Click LCA n.d.)

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

Taulukko 2 Energiamuotojen päästökertoimet (g CO₂/kWh) vuosikymmenittäin (Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä 2019, 46).

Laskentajakson pituudeksi määritetään rakennuksen käyttöikä. Rakennukselle määritetään käyttöikä rakennuksen tilaajan toimesta, jonka perusteella rakennesuunnittelija määrittää rakennosille käyttöiän. Käyttöiällä tarkoitetaan suunnittelussa määritettyä aikaa, jolloin rakennetta tai sen osaa käytetään sen suunniteltuun tarkoitukseen. Ympäristöministeriön menetelmän mukaisesti elinkaarilaskennan ajanjakson pituuden maksimi on 50 vuotta, vaikkakin rakennuksen todellinen käyttöikä voitaisiin olettaa pidemmäksi (Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä 2019, 38). Korjausrakentamisessa säilytettävien rakenteiden käyttöikä perustuu rakenteille tehtävään kuntotutkimukseen (Huttunen 2021, 22).

Muut päästöt ja vähenemät sisältää rakennuksessa yhteensä käytetyn sementtipitoisten materiaalien karbonatisoitumisen rakennekerroksessa (One Click LCA n.d.).

Vähähiilisuuden arviointityökaluun syötetään rakennuksen lämmitetty nettoala sekä rakennuspaikan pinta-ala. Rakennuksen lämmitetty nettoala ja rakennuspaikan pinta-ala toimii laskennan tulosten jakajina, laskentatyökalu antaa tulokset kilogrammoina hiilidioksidiekvivalenttia neliometriä kohden. (One Click LCA n.d.)

4.2.3 Laskennassa käytettävät ohjelmistot

BIM (Building information Model) eli rakennuksen tietomallit ovat tehokas tapa arvioida ja optimoida rakennuksen ilmastovaikutuksia. Yksinkertaisimmillaan hiilijalanjäljen laskenta perustuu ra-

kennusmateriaalien määrien kertomiseen päästöarvoilla. Tietomallit sisältävät lähes kaiken määrätiedon rakennuksessa käytettävistä rakennusmateriaaleista, jolloin laskentaa varten tarvittavat lähtötieto saadaan helposti tietomalleista. Hiilijalanjäljen laskentatyökalussa voidaan materiaali-tietojen saamiseksi käyttää eri ohjelmistojen välistä integraatiota, jolla määrätiedot saadaan tuotua lähes automaattisesti työkaluun. Ohjelmistoihin on ladattavissa lisäosia, joilla määrätiedot saadaan ilman välivaiheita siirrettyä suoraan arviointityökalun käyttöön. Integraation avulla rakennuksen elinkaariarviointi voidaan suorittaa vain muutamassa minuutissa. (BIM for sustainable building design with Model Checker n.d.)

Tietomallien sisällön tarkkuus ja oikeellisuus on tärkeää tuotaessa niitä suoraan laskentatyökaluun. Tietomalleista saadaan paljon tietoa, mutta hiilijalanjäljen laskentaa varten tarvitaan vain osaa tästä tiedosta, tietomallin vaadittu laajuus saadaan selvitettyä käytettävän laskentamenetelmän ohjeista. Tietomalliin on tärkeää syöttää selkeät ja johdonmukaiset materiaalimerkinnät, erityisesti jos tietomallin mallinnuksen ja hiilijalanjäljen laskennan suorittaja ovat eri henkilö. Selkeillä merkinnöillä laskennan suorittaja pystyy havainnoimaan materiaalin tarkoituksen tietomallissa. (How to deliver a Building Information Model for LCA automation n.d.)

Monikerroksissa rakenteissa, kuten ulkoseinissä, tulee eri rakenteet mallintaa omina osinaan todellisina paksuuksina, mukaan lukien tuuletusvälit. Jos monikerroksiset rakenteet mallinnetaan yhtenäisenä osana, tulee rakenteiden nimestä selvittää eri rakennekerrosten osat. Myös ontot rakenteet, kuten ontelolaatat, tulee mallintaa totuudenmukaisilla mitoilla tai nimetä ne kuvaavasti, jotta laskennan suorittaja tietää minkälainen rakenne on kyseessä. Tietomalliin suositellaan sisällyttämään myös raudoitukset tai jos tietomalli ei sisällä raudoitustietoja, voidaan rakennusosien raudoitussuhde lisätä käsin. On myös tärkeää, että tietomallin elementit on luokiteltu oikein IFC-luokituksen suhteen, tällöin vältytään epäselvyyksiltä ja virheiltä mallin käytössä, luokituksessa ja analysoinnissa. (How to deliver a Building Information Model for LCA automation n.d.)

Ohjelmistojen välisten integraation jälkeen arviointityökalun Model Checker:lla saadaan tarkastettua tietomalli ennen laskennan suorittamista. Model Checker havaitsee puutteet ja riskit tietomallissa, joiden avulla laskennan suorittaja voi arvioida, tarvitseeko havaitut puutteet korjata ennen laskennan suorittamista vai ovatko ne merkityksettömiä laskennan kannalta. Tarkistus perustuu kysymyksiin: onko tietomallin materiaalit määritelty siten, että ne voidaan tunnistaa ja tuottaako

tietomalli riittäväällä tarkkuudella määrätiedot suunnitteluvaiheeseen nähden? Nämä kysymykset sisältävät yksityiskohtaisia teknisiä tarkastuksia, jotka koskevat esimerkiksi useasta eri materiaaleista koostuvia elementtejä ja nimeämiskäytäntöjä. Jotta tietomallin laadunvalvonta olisi mahdollisimman laadukasta, tarkistuksen suorittajan on oltava tietoinen tietomallin todellisesta sisällöstä. Mallin tarkastajan on esimerkiksi erotettava todelliset ongelmat häiriöistä, vältettävä väärin positiivisten tulosten ilmoittamista ja korostettava epävarmuustekijöitä, jos niitä esiintyy. Eurooppalaisen standardin EN 15978 mukaan rakennuksen LCA-analyysissä voidaan jättää pois kohteita, joiden kokonaisuudessa on alle 1 % rakennuksen massasta, ja poisjätettyjen kohteiden yhteismäärä saa olla enintään 5 % rakennuksen massasta. (BIM for sustainable building design with Model Checker n.d.)

4.2.4 Tulosten tulkinta ja raportointi

Laskentatyökalusta saatavat tulokset ilmoitetaan Ympäristöministeriön menetelmän mukaisesti rakennukselle ja rakennuspaikalle erikseen. Tuloksista saadaan myös erillisellä kuvaajalla tiedot hiilijalanjäljestä ja hiilikädenjäljestä.

Rakennuksen hiilijalanjäljen laskennan tulokset ilmoitetaan tulosraportissa erikseen rakennuksen elinkaaren vaiheille ennen käyttöä (moduulit A1-5), käytön aikana (B3-4, B6), käytön jälkeen (moduulit C1-4) ja elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset (moduuli D). Jokaisesta vaiheesta saadaan avattua tarkempi erittely päästötiedoista. (One Click LCA n.d.)

Tulosten raportoinnissa tulee ilmetä Ympäristöministeriön vähähiilisyden arviointimenetelmän mukaisesti arviointikohteen perustiedot, elinkaariarvioinnin tulokset sekä arvioinnissa käytetyt tiedot. Perustiedoissa esitetään rakennuskohteen yleiset sekä tekniset tiedot, kuten rakennustyyppi, kerrosala, kerrosten lukumäärä, runkomateriaali sekä energialuokka ja laskennallinen ostoenergian kulutus. Elinkaariarvioinnin tulokset jaotellaan päästövaikutuksiin ennen käyttöä, käytön aikana, käytön jälkeen sekä elinkaaren ulkopuoliset päästövaikutukset. Nämä esitetään hiilijalanjälkenä ja hiilikädenjälkenä rakennukselle. Arvioinnissa käytetyt tiedot sisältävät arvioinnin laatijan tiedot, arvioinnissa käytetyt tiedot kuten arvioinnin suoritusvaihe, käytetyt laskentaohjelmat ja tietojen luotettavuus sekä arvioinnissa käytetyt skenaariot eri moduuleissa. (Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä 2019, 51.)

Laskentatyökalu tarkastaa myös lähtötietojen kattavuuden ja luotettavuuden LCA Checker:n avulla. Työkalu antaa suoritetulle laskennalle arvosanan sen perusteella kuinka kattavat lähtötiedot ovat suhteessa asetettuihin vertailutietoihin. Tarkistus perustuu syötettyihin tietoihin suhteessa asetettuun rakennusalaan, asetettuun projektityyppiin ja valittuun runkotyyppiin. Tarkastuksen avulla voidaan tehdä laskennan lähtötietoihin muutoksia, jolloin laskennan tarkkuus paranee. (One Click LCA n.d.)

Laskentatyökalussa on myös käytössä Carbon Heroes Benchmark, joka vertailee laskennan tuloksien perusteella rakennuksen hiilidioksidipäästöjä samankaltaisten rakennusten hiilidioksidipäästöihin. Vertailussa voidaan valita minkä maan tai alueen rakennuksiin laskentaa verrataan tai vertausta voidaan myös tehdä maailmanlaajuisesti ja jokaiselle rakennustypille on luotu oma vertailuarvo. Materiaalien elinkaaren benchmark lasketaan 60 vuoden ajanjaksolle ja laskennassa otetaan huomioon rakennusmateriaalien ilmastopäästöt, kuljetukset, vaihdot elinkaaren aikana sekä elinkaaren loppu. Carbon Heroes Benchmark:in tulokset koostuvat seitsemästä luokituksesta A-G, jossa A on tuloksista hiilidioksidipäästöiltään pienin luokitus eli paras sijoitus ja G suurin luokitus eli huonoin sijoitus. Vaihteluvälin tulokset perustuvat tuhansista nimettömistä mutta vahvisteista rakennushankkeista, joiden laskennassa on käytetty One Click LCA – ohjelmistoa. (One Click LCA n.d.)

Kehdosta haetaan (A1-A4, B4-B5, C1-C4)	kg CO ₂ e/m ²
(< 280) A	
(280-360) B	
(360-440) C	
(440-520) D	
(520-600) E	
(600-680) F	
(> 680) G	

Kuva 4 Materiaalien elinkaaripäästöjen benchmarkin luokitusvälit A-G (One Click LCA n.d.).

Laskentatyökalu ilmoittaa myös rakennuksen hiilikädenjäljen tuloksen. Hiilikädenjälki muodostuu niistä päästöhyödyistä, joita ei muodostuisi ilman rakennuksen rakentamista. Hiilikädenjälki ilmoitetaan negatiivisena päästötietona ja se koostuu mahdollisista päästövähennyksistä rakennusmateriaalien elinkaaren lopun jälkeen tapahtuvasta kierrätys-, uusiokäyttö- tai energian hyödyntämismahdollisuuksista. Tämän lisäksi hiilikädenjälkeen sisältyy ulkopuolelle toimitetusta energiasta muodostuva päästövähennys, eloperäisten materiaalien hiilivarasto sekä sementtipohjaisten tuotteiden karbonatisoitumisesta sitoutuva hiili. (One Click LCA n.d.)

5 Tutkimuksen toteutus

5.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää toimeksiantajayritykselle, mistä rakennusten hiilipäästöt syntyvät sekä mitä hiilijalanjäljen laskenta vaatii. Yrityksessä on käytetty tähän asti ulkopuolista konsulttia rakennusten hiilijalanjäljen laskentaan, jonka vuoksi ei ole ollut tarkkaa ymmärrystä, miten hiilijalanjälki lasketaan tai mistä rakennuksen hiilijalanjälki koostuu. Tutkimuksen avulla saadaan myös luotua käsitys, miten tulevaisuudessa vaadittava hiilijalanjäljen laskenta vaikuttaa rakennesuunnittelijan työhön käytännössä sekä kannattaako hiilijalanjäljen laskenta sisällyttää osaksi yrityksen palveluita.

Tutkimus selvittää toimeksiantajayritykselle, miten tulevaisuudessa pystytään vastaamaan rakennuksille annettaviin hiilijalanjäljen raja-arvoihin nykyisellä rakennustavalla sekä mitä mahdollisia toimenpiteitä näiden raja-arvojen saavuttamiseksi tulee tehdä, eritellen ne keinoin, joilla saadaan kustannussäästöjä ja keinoin, jotka lisäävät kustannuksia hankkeessa.

Tutkimuksen tavoitteena on myös selvittää laskentatyökalun yhteensopivuus toimeksiantajayrityksen suunnittelussa käytävien suunnitteluohjelmien kanssa. Laskentatyökalulla lasketaan kahden käynnissä olevan hankkeen elinkaaren hiilijalanjälki ja arvioidaan laskennan sujuvuuden pohjalta työkalun soveltuvuutta yrityksen käyttöön. Laskennan pohjalta luodaan selkeät ohjeet toimeksiantajayritykselle, miten laskenta kyseisellä laskentatyökalulla suoritetaan, jotta yrityksessä voitaisiin toteuttaa hiilijalanjäljen laskentaa. Tutkimuksen avulla määritetään myös, tarvitaanko yritykselle erillinen tiimi laskentapalvelujen tuottamiseen, sekä millaista koulutusta ja osaamista kyseinen tiimi tulee tarvitsemaan.

Yhteenvedona voidaan määrittää tutkimukseen sisältyvän kolme konkreettista tavoitetta:

1. Mistä rakennuksen hiilijalanjälki koostuu,
2. Mitä hiilijalanjäljen laskenta vaatii ja
3. Hiilijalanjäljen laskenta osaksi yrityksen palveluita.

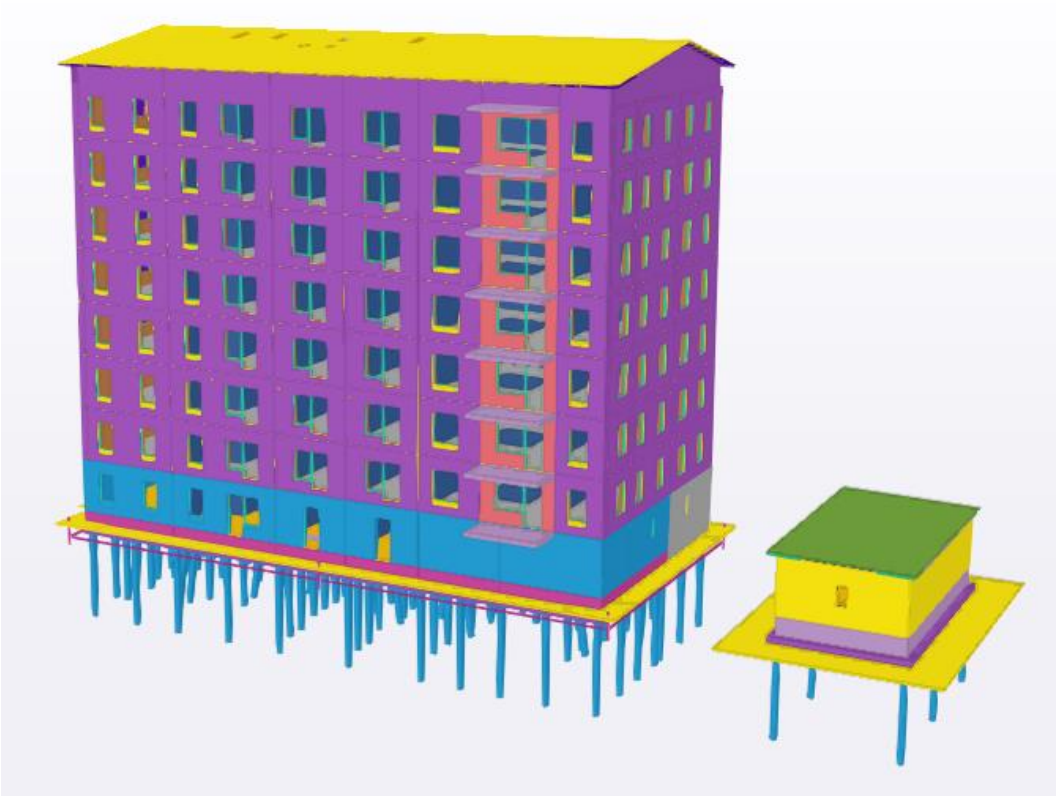
5.2 Tutkimuksen lähtötiedot

Hiilijalanjäljen laskenta suoritetaan kahdelle Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy:n suunnittelemaalle rakennukselle. Rakennukset ovat tyypillisiä toimeksiantajayrityksen suunnittelemaia rakennuksia. Rakennuksen 1 ja 2 suunnittelutilanne on lähes valmis, suunnitelmiin tehdään viimeisiä suunnittelmapäivityksiä.

Rakennuksen hiilijalanjälkilaskennan toteuttamiseksi kohteesta tulee olla tiedossa rakenteet sekä niiden määrät, energiankulutus ja rakennuksen lämmitetty nettoala. Laskennan kohteena olevien rakennusten arkkitehti-, rakenne- sekä LVIS-suunnitelmat ovat lähes valmiita, jolloin laskennan tulosten tarkkuus on kattava. Rakenteiden määrät saadaan tietomalleista suoraan integroitua rakennetyyppejä apuna käyttäen. Energiankulutus saadaan esimerkiksi rakennuksen energiatodistuksesta.

Rakennusten tietomallit on toteutettu noudattaen Yleiset tietomallivaatimukset 2012 (YTV2012) – sekä Betonielementtisuunnittelu 2012 (BEC2012) – ohjeistusta. Arkkitehtisuunnittelu toteutetaan kohteisiin ArchiCad- ja Revit-ohjelmistolla. Rakennesuunnittelu toteutetaan kohteisiin Tekla Structures-ohjelmistolla. LVIA- ja sähkösuunnittelu käyttävät suunnittelussaan MagiCad for AutoCAD-ohjelmistoa.

5.2.1 Rakennus 1



Kuva 5 Rakennus 1 rakennemalli näkymä

Rakennus 1 on uudisrakennuskohde, kahdeksankerroksinen asuinkerrostalo. Ensimmäisessä kerroksessa sijaitsee asuntoja, varastotiloja ja teknisiä tiloja. Kerroksissa 2–8 on pelkästään asuntoja. Rakennuksen kerrosala on 3500 km^2 , huoneistoala on 2800 htm^2 ja bruttoala on 4120 brm^2 .

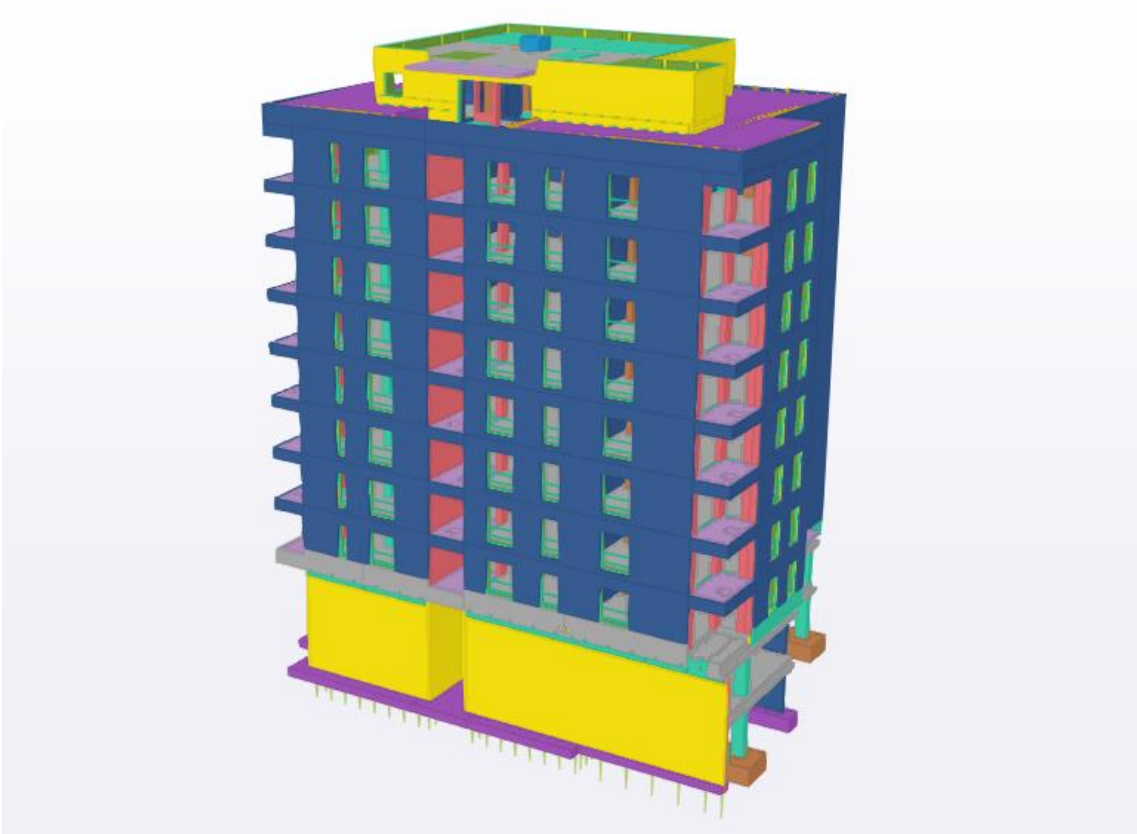
Rakennus perustetaan tukipaalujen varaan, alapohja toteutetaan kantavana paalulaattana, jonka alle on sijoitettu salaojaputkitettava sepelikerros. Rakennuksen kantava runko on betonirakenteinen. Rakennus toteutetaan elementtirakenteisilla väliseinillä, 1.krs ja parvekkeiden ulkoseinät elementtirakenteisina sandwich-elementteinä, ylempien kerrosten seinät paksurapattuina sisäkuorielementteinä. Kohteen välipohjat ovat paikallavalettuja. Vesikatto on puu- tai NR-ristikkorakenteinen harjakatto huopakatteella. Porrashuoneiden kerrostasolaatat ovat massiivibetonielementtejä tai paikallavalettuja teräsbetonilaattoja ja portaat ovat betonielementtiportaita.

Kohteen keittiö- ja kylpyhuoneet ovat esivalmistettuja moduuleja. Sisäpuoliset ei-kantavat väliseinät tehdään levyrakenteisia tai harkkomuurattuina. Kohteen rakennustyyppit (liite 1) ovat salassa pidettävää aineistoa.

Ilmanvaihto toteutetaan rakennuksessa huoneistokohtaisena. Rakennus liitetään kaukolämpöverkkoon ja lämmönjakona toimii vesikiertoinen lattialämmitys. Energialuokka rakennuksella on A. Rakennuksen energiatodistuksen keskeisimmät sivut liitteessä 2.

Huonelattiat ovat laminaattia tai parkettia asukasvalintojen mukaisesti. Pesuhuoneiden lattiat ja seinät laatoitetaan. Kattopinnat ruiskutasoitetaan ja levyrakenteiset kotelot ja kattopinnat tasoitetaan sekä maalataan. Kylpyhuoneiden alakatot ovat puu- tai MDF-paneelirakenteisia. Huoneseinäpinnat ovat maalattuja.

5.2.2 Rakennus 2



Kuva 6 Rakennus 2 rakennemalli näkymä

Rakennus 2 on uudisrakennuskohde, joka koostuu yhdeksästä maanpäällisestä kerroksesta ja kahdesta kellarikerroksesta. Kellarikerroksessa sijaitsee tekniset tilat ja yleisiä tiloja. Kerrokset 1–8 ovat pääosin asuntoja, 1.krs sijaitsee myös asuntoja palvelevia varasto- sekä pesutiloja. Ylin kerros on ullakkotila, jossa sijaitsee talosauna ja IV-konehuone. Rakennuksen kerrosala on 3503,8 kem², bruttoala on 4380,5 brm² ja huoneistoala 2854 htm².

Rakennus perustetaan suoraan kallion varaan, alapohja toteutetaan maanvaraisena betonilaatana, jonka alle sijoitetaan salaojaputkitettava sepelikerros. Kellarien seinät tehdään vesitiiviinä kalliosta saakka pohjaveden yläpuolelle. Kellarien ulkoseinän perustus toteutetaan vesitiiviillä liitoksella kalliota vasten. Rakennuksen rungon muodostavat kantavat ja/tai jäykistävät teräsbetoni-seinät. Väli- ja yläpohjien kantavina rakenteina ovat paikalla valetut teräsbetonilaatat. Porrashuoneiden kerrostasolaatat ovat massiivibetonielementtejä tai paikallavalettuja teräsbetonilaattoja ja portaat ovat elementtiportaita. Kohteen ulkoseinät ovat sisäkuorielementtejä ja paikalla muurattuja tiilijulkisivuja sekä ullakoiden osalta eristerapattavia sisäkuorielementtejä. Sisäpuoliset ei-kantavat väliseinät tehdään levyrakenteisina tai harkkomuurattuina. Kohteen rakennustyypit (liite 3) ovat salassa pidettävää aineistoa.

Huoneistoissa lämmitys on maalämmöllä toteutettu vesikiertoinen lattialämmitys. Asuntojen märkätiloissa on sähköinen mukavuuslattialämmitys. Ilmanvaihtojärjestelmä on keskitetty ja IV-konehuone sijaitsee ullakoilla. Asuntojen tuloilma on varustettu viilennyksellä. Asuinhuoneet varustetaan huoneistokohtaisella sähkön- ja vedenmittauksella ja ne ovat etäluettavissa huoneistokohtaisesti. Energialuokka rakennuksella on A. Rakennuksen energiatodistuksen keskeisimmät sivut liitteessä 4.

Huonelattiat ovat laminaattia tai parkettia asukasvalintojen mukaisesti. Pesuhuoneiden lattiat ja seinäpinnat laatoitetaan. Kattopinnat ruiskutasoitetaan ja levyrakenteiset kotelot ja kattopinnat tasoitetaan sekä maalataan. Kylpyhuoneiden alakatot ovat puu- tai MDF-paneelirakenteisia. Huoneseinäpinnat ovat maalattuja.

5.3 Hiilijalanjäljen laskennan toteutus

5.3.1 Integraatio ohjelmistoista

Tutkimustyön tavoitteena on tarkastella rakennesuunnittelijan nykyisten käytössä olevien työkalujen yhteensopivuutta hiilijalanjäljen laskennassa, jotta laskentaa varten tarvittavat määrätiedot saataisiin tuotua laskentaohjelmaan mahdollisimman tehokkaasti. Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy:llä on käytössään pääasiassa neljä ohjelmistoa, joilla rakennukset suunnitellaan: Vertex puurakenteita varten, Tekla Structures betonirakenteita varten, Trimble Connect projektien tietomallien projektipankkina sekä Solibri tietomallien yhteensovitusta varten. Vertex- integraatiota ei One Click LCA – työkalussa ole. Muita yleisesti Suomessa käytössä olevia ohjelmistoja, jotka mahdollistavat arviointityökaluun suoritettavan integraation, on esimerkiksi Autodesk Revit ja ArchiCad.

Materiaalien määrälaskenta laskennassa suoritettiin tietomallien integraation avulla. Määrälaskentaa varten rakennesuunnittelijan luomat tietomallit kohteista integroitiin suoraan Tekla Structures-ohjelmistosta. Tekla Structures – ohjelmaan on saatavilla lisäosa, jolla tietomallin saadaan suoraan integroitua laskentatyökaluun, joka voidaan ladata Tekla Warehousesta. Rakennesuunnittelijan mallista saatiin arviointityökaluun kantavat rakenteet: perustukset, alapohjat, ulkoseinät, väliseinät, välipohjat ja yläpohja. Tietomallista valittiin integraatioon siirrettävät rakenneosat ”Select assemblies”- tai ”Select objects in assemblies”- valinnalla. Tämän jälkeen avattiin lisäosa ”Send to One Click LCA”. Lisäosassa voidaan valita integraatiossa siirrettävät mukautetut ominaisuudet (user-defined attributes) rakenteista, näillä lisätiedoilla voidaan helpottaa sopivan ympäristöprofiilin valitsemista arviointityökalussa. Tiedot saatiin siirrettyä valitsemalla ”LCA in Cloud”, jolloin verkkoselaimeen avautuu välilehti datan tuomisesta One Click LCA arviointityökaluun.

Trimble Connect – ohjelmaan voidaan asentaa laajennus, jolla tietomallien tiedot saadaan suoraan siirrettyä laskentatyökaluun. Laajennuksen asentamista varten tulee käytössä olla järjestelmävalvoijaoikeudet kyseiseen tietomalliin. Asennuksen jälkeen työkalupalkkiin ilmestyy laajennus, josta löytyy ”Send to One Click LCA”-vaihtoehto, valitsemalla tämän saa näkyvillä olevan tietomallin sisältävän tiedon siirrettyä suoraan laskentatyökaluun.

Solibri:sta suoritettavaa integraatiota varten One Click LCA on luonut informaation talteenottotyökalun ITO:n (Information Takeoff). ITO ladataan One Click LCA:n sivuilta, jonka jälkeen haluttu tietomalli avataan Solibrissa käyttäen joko Solibri Office - tai Solibri Site – tuotetta. Kyseessä on beta-versio integraatiosta, jolloin ohjelman asetuksia tulee säätää ennen integraation suorittamista: lineaariset yksiköt tulee olla yhden desimaalin tarkkuudella millimetreissä ja pinta-alat sekä tilavuudet kuuden desimaalin tarkkuudella neliömetreissä ja kuutiometreissä. Tämän jälkeen ITO lisätään malliin Solibrin ohjeiden mukaisesti ja laskenta voidaan suorittaa informaation talteenotto – välilehdellä valitsemalla ”Laske kaikki”. Laskennan suorittamisen jälkeen tuloksista luodaan Excel-raportti. Excel-tiedosto voidaan tuoda laskentatyökaluun valitsemalla ”Tuo dataa” ja ”Tuo Excel- tai gbXML-tiedostoja”.

Integraation jälkeen valitaan ensimmäisessä tuontiprosessin vaiheessa, asetuksissa, mihin projektiin ja suunnitelmaan tuotu data linkitetään. Tarvittaessa voidaan myös luoda uusi suunnitelma, jos minkään olemassa olevan suunnitelman tietoja ei haluta korvata. Datan tuonnin asetuksissa valitaan myös mitä laskentatyökalua ja filttierasetuksia käytetään tietojen tuonnissa. Oikean työkalun valinnalla varmistetaan, että laskelman vaatimukset vastaavat menetelmää ja materiaalien yhdistäminen ympäristöprofiileihin tapahtuu laskentatyökalun menetelmän mukaisesti. Filttierasetuksella määritetään mitkä materiaaluokat laskentatyökaluun tuodaan, vaihtoehtoina on esimerkiksi kaikki tiedot, runko ja vaippa tai rakennus ilman talotekniikkaa. Ympäristöministeriön vähähiilisyden arviointimenetelmän mukaisesti tuodaan rakennus ilman talotekniikkaa. Viimeisenä valitaan olemassa olevan datan ylikirjoittamisesta: korvataanko olemassa oleva data, lisätäänkö laskelmaan uusia rivejä tuotavalla tiedolla vai päivitetäänkö vain määrätiedot. Asetuksissa on myös valinnat tyhjien kenttien poistamiselle eli poistetaanko tiedot, joihin ei ole määritetty materiaalia tai joissa ei ole määrää, sekä muutetaanko kaikki määrätiedot metrijärjestelmään. (One Click LCA n.d.)

Datan tuomiselle laskentatyökaluun valitaan manuaalisesti tarkistettavat tuontiprosessin vaiheet. Automaattisesti laskentatyökalu valitsee tarkasteluun yhdistämisen sekä datan valinnan, muut vaiheet valitaan manuaalisesti. Kaikki tarkasteluvaiheet ovat kuitenkin valinnaisia, mutta tarkastelujen tekeminen lisää integraation tarkkuutta ja sillä päästään vaikuttamaan integraatiossa tuotaviin tietoihin. Tarkasteluun voidaan sisällyttää: luokitukset, filteri, yhdistä, esikatselu, datan valinta,

sekä päivittäminen, jos päivitetään vain määrätietoja. Sopivien tuontiasetusten valinnan jälkeen voidaan datan tuontia jatkaa. (One Click LCA n.d.)

Luokitus-tarkasteluvaiheessa tarkastellaan BIM-mallista saatavien materiaalien luokitusta. Luokituksia voidaan muokata tai lisätä tarvittaessa tietyille materiaaliryhmille uudet luokitukset. Filtteritarkastelussa valitaan laskennassa käsiteltävät tietoluokat, joiden suodatus perustuu IFC luokitukseen. Laskennan tarkoituksen mukaan voidaan tietyt tietoluokat poistaa tarkastelusta. Seuraavassa yhdistä-vaiheessa valitaan, kuinka samankaltaiset tietopisteet yhdistetään. Yhdistäminen nopeuttaa tiedon tuontia ja yksinkertaistaa laskelmaa. Tietorivit yhdistyvät yhdeksi, jos niillä on sama arvo kaikissa valituissa ryhmittelykriteereissä. Tiedot voidaan jättää myös yhdistämättä valitsemalla "Älä yhdistä". Tietojen suodattamisen ja yhdistämisen jälkeen esikatselu-tarkasteluvaiheessa tarkastella tuotua tietoa. Vaiheessa voidaan myös tehdä muutoksia luokituksiin ja määrätyyppiin. Datan valinta-tarkasteluvaiheessa valitaan tuotavalle datalle sitä vastaava materiaalin päästötietojen tietolähde. Laskentatyökalu tunnistaa automaattisesti materiaaleja aiemmin tuotujen tietojen perusteella tärkeysjärjestyksellä: omat tekemäsi kartoitukset, saman organisaation käyttäjän tekemät kartoitukset, saman maan käyttäjien kartoitukset ja muiden käyttäjien tekemät kartoitukset. Jokaista tietolähdettä voidaan vaihtaa, mikäli ne eivät tuotavaa dataa vastaa. Laskentatyökalu myös ilmoittaa, jos integraatiossa on tunnistamatonta tai ongelmallista dataa. Tällöin työkalu ei automaattisesti tunnista dataa, vaan käyttäjän tulee valita sopiva tietolähde materiaalille käsin. Datan valinnassa voidaan myös valita mihin rakennusosaan materiaali kuuluu. Datan valinnassa kannattaa käyttää mahdollisimman kuvaavaa tietoa materiaalille, esimerkiksi kommenttien avulla, jotta integraatio on helposti tunnistettavissa jälkikäteen laskentatyökalussa. Viimeisessä päivitysvaiheessa nähdään eriteltynä päivitettyt ja päivittämättömät tuontitiedot. (One Click LCA n.d.)

5.3.2 Tietojen kirjaus laskentatyökaluun

Rakennuksen hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki laskettiin käyttämällä Tekla Structures – ohjelmiston lisäosan integraatiota, jonka avulla saatiin rakennemallista kantavat rakenteet ja niiden määrätiedot tarkasti ja tehokkaasti. Integraation nopeuttamiseksi samankaltaiset datapisteet yhdistettiin käyttämällä ryhmittelykriteerinä luokkaa (CLASS), materiaalia (MATERIAL), tuoteryhmää (PRODUCT_GROUP) ja arviointityökalun pakollista kriteeriä materiaalin mittayksiköstä (GTY_TYPE), joka varmistaa laskelmien johdonmukaisuuden. Rakennemallin tukena käytettiin kohteiden rakennetyyppejä, joilla saatiin varmennettua kunkin rakenteen rakennekerroksen paksuus ja materiaali.

Rakennusten tietomallit eivät sisältäneet rakenteiden raudoitustietoja, vaan raudoitustiedot paikallavaluihin ja elementteihin kirjattiin laskentatyökaluun käsin ja ne perustavat keskiarvoon raudoituksesta (kg/m^3).

Päällekkäisyyksien välttämisen vuoksi laskentatyökaluun tuotiin vain yksi tietomalli, jolloin arkkitehdin mallista saatavat tiedot määritetään käsin projektille. Arkkitehti ei mallinna monikerroksisia rakenteita eri kerroksina, jolloin suoraan määrätietoja ei arkkitehdin IFC-mallista saada. Määrätiedot saadaan helpoiten laskettua Solibri-ohjelmistosta, rakennetyyppejä apuna käyttäen. Arkkitehdin mallista haettavat määrätiedot olivat: pintamateriaalit, ikkunat ja ovet, ei-kantavat väliseinät, alas lasketut katot, kiintokalusteet sekä kiinteät parvekelasitukset.

Rakennusten talotekniikassa eli käyttövedessä, viemäroinnissä, lämmityksessä, ilmanvaihdossa ja sähkökaapeloinnissa käytettiin SYKE:n luomaa asuinkerrostalon talotekniikan keskiarvo pinta-alan mukaan. Talotekniikan materiaaleissa on vielä puutteellisia ja vähäisiä tietoja materiaalien ympäristöselosteissa, minkä vuoksi talotekniikan keskiarvo pinta-alan mukaan on luotettavin tapa saada talotekniikan päästötiedot. Kohteiden LVIS-suunnittelu on tehty käyttäen MagiCAD for AutoCAD-ohjelmistoa. Ohjelmisto on 2D piirtämiseen tarkoitettu, mutta sen avulla saa tuotettua myös 3D-mallin. AutoCAD ei ole kuitenkaan tietomallinnusohjelma, joten malli on hyvin karkea tietosisällöltään, se soveltuu visuaaliseen tarkasteluun, mutta ei niinkään automaattiseen tiedon keräämiseen.

Osa talotekniikasta, julkisivun ja katon varusteet kuten tikkaat ja kattoluukut, ovien ja ikkunoiden tiivistys, ynnä muita pieniä massoja on jätetty pois. Laskenta on tehty rakennuslupavaiheen pääpiirustusten perusteella. Betoniraudoitukset paikallavaluihin ja elementteihin on laskentatyökaluun kirjattu käsin perustuen keskiarvoon raudoitettavasta rakenneosasta (kg/m^3). Erillisiä katos- ja varistorakennuksia ja tontin rakenteita ei ole huomioitu laskennassa.

Kuljetuksissa ja työmaatoiminnoissa käytettiin taulukkoarvoja. Rakennusten vuotuisen energiankulutuksen tiedot saatiin kohteiden energiantodistuksista. Laskentajakson pituudeksi määritettiin molemmissa rakennuksissa 50 vuotta. Rakennusten pinta-ala tiedot saatiin arkkitehdin suunnitelmista, rakennuspaikkojen pinta-alaksi määriteltiin sama, kuin rakennuksen lämmitetty nettoala, jolloin laskenta ei ota huomioon rakennuspaikan aiheuttamaa ilmastopäästöä.

5.3.3 Laskennassa käytettyjen tietojen luotettavuus

Laskennan päästötiedot perustuvat One Click LCA:n tietokantaan. Rakennusmateriaalien päästöt on saatu ensisijaisesti suomalaisista ympäristöselosteista (EPD). Mikäli ympäristöselostetta ei rakennusmateriaalille ole, on käytetty vastaavanlaisen materiaalin pohjoismaista selostetta ja viimeisenä vaihtoehtona eurooppalaista. Mikäli rakennusmateriaalista ei ole ympäristöselostetta saatavilla, on käytetty laskentatyökalusta löytyviä keskiarvoja. Energiankulutuksen määrä on saatu energiaselvityksestä. Moduuleissa A4, A5, B3, B4 ja C1-4 on käytetty Ympäristöministeriön taulukkoarvoja.

Laskennassa käytetyt tietomallit on mallinnettu noudattaen Yleiset tietomallimallivaatimukset 2012– ja BEC 2012–ohjeistusta, sekä yrityksen tietomallinnussuunnitelmaa. Tietomallien laadunvarmistus on toteutettu YTV2012 osassa 6 Laadunvarmistus esitettyjä käytäntöjä ja tarkastuslistoja. Tietomalleille on laadunvarmistuksen lisäksi toteutettu tietomallien yhteensovitus, jossa RAK-, ARK-, S- ja LVI-tietomallit tarkastetaan Solibri Model Checker:n avulla mahdollisten törmäyksien havainnoimiseksi. Yhteensovituksella voidaan törmäyksien lisäksi varmistaa eri suunnittelualojen tietomallien yhteensopivuus.

Laskennan luotettavuus varmistettiin laskentatyökalun omalla luotettavuustyökalulla, LCA Checker:n avulla. Työkalun perusteella molemmat laskennat saavat yleisarvosanan A, joka on arvosanoista parhain.

6 Tulokset

6.1 Laskennan tulokset

6.1.1 Rakennus 1 tulokset

Rakennuksen 1 hiilidioksidipäästöiksi saatiin $14,00 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$, eli rakennus 1 aiheuttaa päästöjä $14,00 \text{ hiilidioksidiekvivalenttikiloa}$ lämmitettyä nettoalaneliötä kohti vuodessa. Yhteensä koko rakennuksen elinkaaren aikana aiheuttama kokonaispäästö on $2\,886 \text{ t CO}_2\text{e}$, eli kaikki rakennuksen päästöt arviointijaksolta yhteenlaskettuna on $2\,886 \text{ hiilidioksidiekvivalenttitonnia}$. Rakennuksen 1 hiilijalanjälki ennen käyttöä on $7,08 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$ eli rakennuksen kokonaispäästöt ennen käyttöä ovat $1\,458 \text{ t CO}_2\text{e}$. Käytön aikana hiilijalanjälki on $6,36 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$ eli kokonaispäästöinä $1\,310 \text{ t}$

CO₂e. Käytön jälkeen hiilijalanjälki on 0,57 kgCO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 117 t CO₂e. Suurimmat päästöt rakennukselle 1 aiheutuvat ennen käyttöä tuotevaiheesta ja rakentamisesta (moduulit A1-A5). Taulukossa 4 on esitetty rakennuksen 1 hiilijalanjäljen yhteenveto tuotevaiheessa, rakentamisen aikana, käyttövaiheessa ja elinkaaren lopussa.

Ostatekijät	Rakennuksen hiilijalanjälki kgCO ₂ e/m ² /a
Tuotevaihe (A1-3)	5,71
Rakentaminen (A4-5)	1,37
Käyttövaihe (B4, B6)	6,36
Elinkaaren loppu (C1-4)	0,57
Hiilijalanjälki (elinkaaren moduulien A-C summa)	14,00

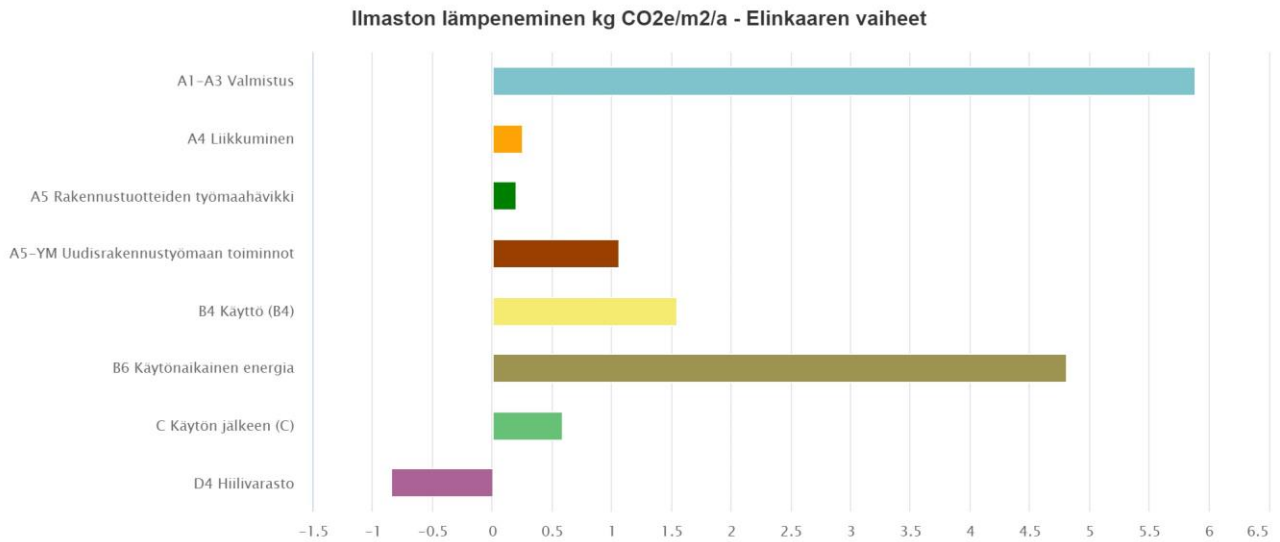
Taulukko 3 Rakennus 1 hiilijalanjäljen yhteenveto

Taulukossa on avattuna rakennuksen 1 hiilijalanjäljen tulokset elinkaaren eri vaiheissa. Laskennan tuloksista saadaan selville, että rakennuksessa 1 käytettävien rakennusmateriaalien valmistus (moduuli A1-A3) tuottaa suurimmat ilmastopäästöt: yli 40 prosenttia koko rakennuksen elinkaaren aikaisista päästöistä. Tuotevaiheen päästöihin sisältyy rakennusmateriaalien raaka-aineen hankinta (A1), kuljetus valmistukseen (A2) ja tuotteen valmistus (A3). Seuraavaksi suurimmat päästöt aiheutuvat rakennuksen energian käytöstä (moduuli B6), yli 25 prosentin osuudella elinkaaren aikaisista päästöistä. Rakentamisvaiheella, korjauksilla ja huolloilla sekä purkamisella on hyvin pieni osuus kokonaispäästöistä.

Ostatekijät	Rakennuksen hiilijalanjälki kgCO ₂ e/m ² /a	Prosenttimäärä %
A1-A3 Tuotteiden valmistus	5,71	41 %
A4 Kuljetus	0,25	2 %
A5 Työmaatoiminnot (taulukkoarvo)	1,12	8 %
B4 Rakennusosien vaihto	1,55	11 %
B6 Energian käyttö	4,81	34 %
C1 Purkutyömaan toiminnot (taulukkoarvo)	0,14	4 %
C2 Kuljetus jatkokäsittelyyn (taulukkoarvo)	0,25	
C3 Jätteenkäsittely ja loppusijoitus (taulukkoarvo)	0,13	
C4 Purkujätteen käsittely (taulukkoarvo)	0,05	

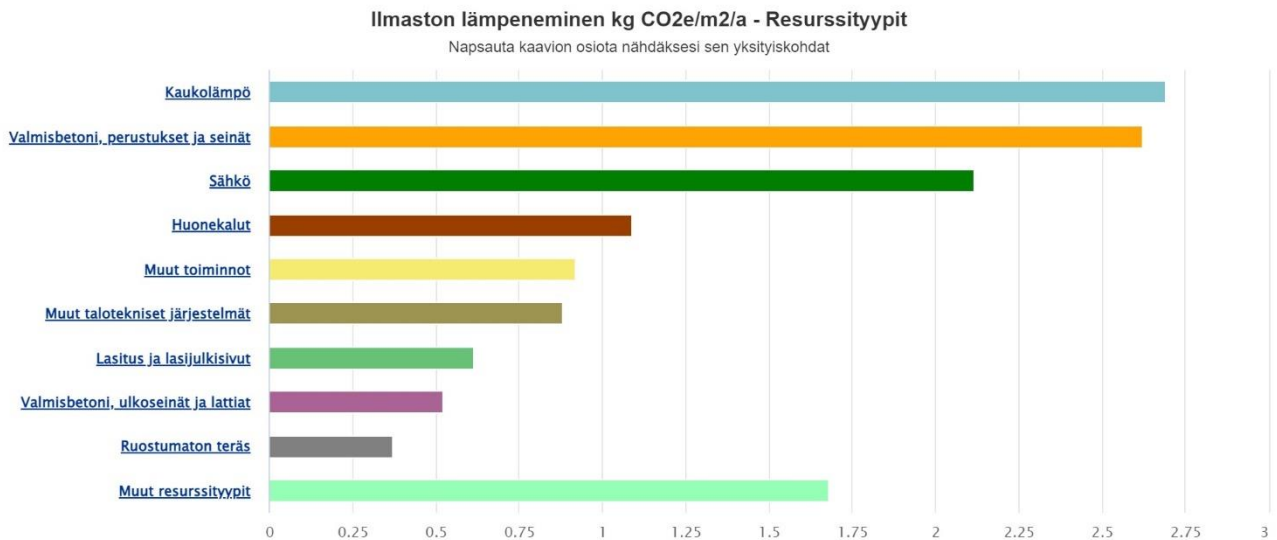
Hiilijalanjälki (elinkaaren moduulien A-C summa)	14,00
---	--------------

Taulukko 4 Rakennus 1 hiilijalanjälki ilmastaselvityksen mukaan



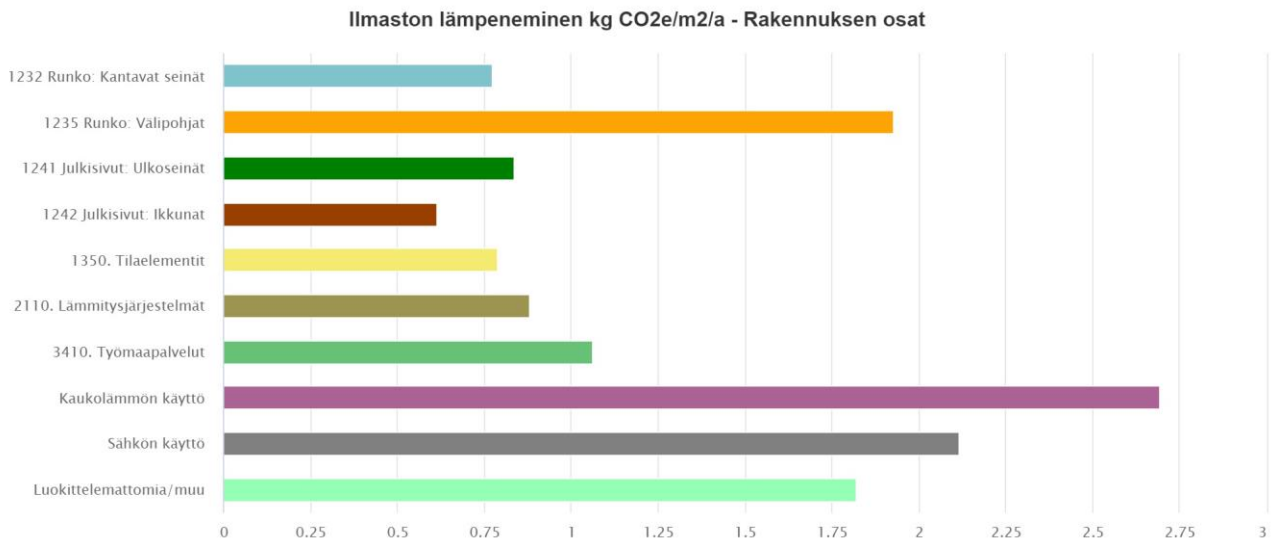
Kuva 7 Rakennus 1 ilmaston lämpeneminen - elinkaaren vaiheet

Tarkasteltaessa Rakennuksen 1 elinkaaren aikana aiheutuneita päästöjä resurssityypeittäin, voidaan huomata, että kaukolämpö, sähkö sekä valmisbetoni perustuksissa ja seinissä aiheuttavat rakennukselle suurimmat päästöt. Vertaillen ilmaston lämpenemistä resurssityypeittäin sisältyy muihin resurssityyppihin iso osa rakennuksen osa-alueista, jolloin vertailu eri resurssityypeittäin on haastavaa.

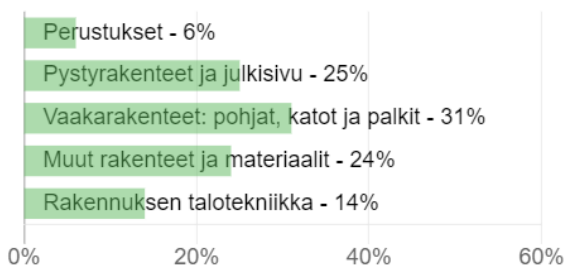


Kuva 8 Rakennus 1 ilmaston lämpeneminen – resurssityypit

Rakenteellisia kokonaisuuksia saadaan arvioitua tarkemmin kuvan 9 mukaan. Tuloksista voidaan päätellä, että kaukolämmön käyttö on rakennuksen osista eniten ilmastopäästöjä aiheuttava. Kaukolämmön käytön hiilijalanjälki on 2,69 kg CO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 554 t CO₂e. Sähkön käyttö on rakennuksen osista toiseksi eniten ilmaston lämpenemiseen vaikuttava tekijä. Sähkön käytön hiilijalanjälki on 2,12 kg CO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 436 t CO₂e. Rakennuksessa välipohjat kattavat suurimman osan rakennuksen massasta, jonka vuoksi välipohjat aiheuttavat kolmanneksi suurimmat päästöt rakennuksen elinkaaren aikana. Välipohjan hiilijalanjälki on 1,93 kg CO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 397 t CO₂e. Rakennuksessa eristeenä on käytetty mineraalivillaa ja muovipohjaisia eristeitä, niiden aiheuttamien päästöjen osuus on pieni. Kuvan 9 perusteella voidaan todeta, että rakennusosat, joissa vaaditaan suuria määriä valmisbetonia, aiheuttavat sähkön käytön ja lämmitysjärjestelmien lisäksi eniten ilmastopäästöjä rakennuksen elinkaaren aikana. Kuvasta 10 nähdään, että koko rakennuksen massasta pystyrakenteet ja julkisivut, sekä vaakarakenteet sitovat eniten hiiltä tuotevaiheessa. Kuvan 10 perusteella pystytään myös todentamaan, että näitä rakenteita rakennuksessa on eniten, mikä on myös yleisesti tiedossa.



Kuva 9 Rakennus 1 ilmaston lämpeneminen - rakennuksen osat



Kuva 10 Rakennus 1 sitoutunut hiili per rakenne moduulit A1-A3

Rakennuksen 1 hiilikädenjälki on $-1,98 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$, eli kun rakennus rakennetaan, jää toteuttamatta päästöjä, joiden laskennallinen määrä on $1,98$ hiilidioksidiekvivalenttikiloa lämmitettyä nettoalaneliötä kohti vuodessa. Rakennuksen elinkaaren positiiviset ilmastovaikutukset ovat $408 \text{ t CO}_2\text{e}$. Tämä saavutetaan muun muassa rakennuksessa käytettyjen rakennustuotteiden kierrättämisellä ja uudelleenkäytöllä. Rakennuksessa on vähän puupohjaisia materiaaleja, joten niiden aiheuttama hiilivarasto on myös pieni.

Ostatekijät	Rakennuksen hiilikädenjälki kgCO ₂ e/m ² /a
D1 Uudelleenkäyttö ja kierrätys	-1,13
D4 Hiilivarasto, biogeeninen	-0,85
Hiilikädenjälki yhteensä	-1,98

Taulukko 5 Rakennus 1 hiilikädenjälki

Rakennusta 1 vertailtiin Carbon Heroes Benchmark:in avulla muihin Suomessa laskettuihin asuinrakennuksiin. Rakennus 1 sijoittui tuloksiltaan luokitukseen E.

6.1.2 Rakennus 2 tulokset

Rakennuksen 2 hiilidioksidipäästöiksi saatiin 12,14 kgCO₂e/m²/a, eli rakennus 2 aiheuttaa päästöjä 12,14 hiilidioksidiekvivalenttikiloa lämmitettyä nettoalaneliötä kohti vuodessa. Yhteensä koko rakennuksen elinkaaren aikana aiheuttama kokonaispäästö on 2 659 t CO₂e, eli kaikki rakennuksen päästöt arviointijaksolta yhteenlaskettuna on 2 659 hiilidioksidiekvivalenttitonnia. Rakennuksen 2 hiilijalanjälki ennen käyttöä on 6,61 kgCO₂e/m²/a eli rakennuksen kokonaispäästöt ennen käyttöä ovat 1 448 t CO₂e. Käytön aikana hiilijalanjälki on 4,91 kgCO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 1 075 t CO₂e. Käytön jälkeen hiilijalanjälki on 0,62 kgCO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 136 t CO₂e. Suurimmat päästöt rakennukselle 2 aiheutuvat ennen käyttöä tuotevaiheesta ja rakentamisesta (moduulit A1-A5). Taulukossa 7 esitetty rakennuksen 1 hiilijalanjäljen yhteenveto tuotevaiheessa, rakentamisen aikana, käyttövaiheessa ja elinkaaren lopussa.

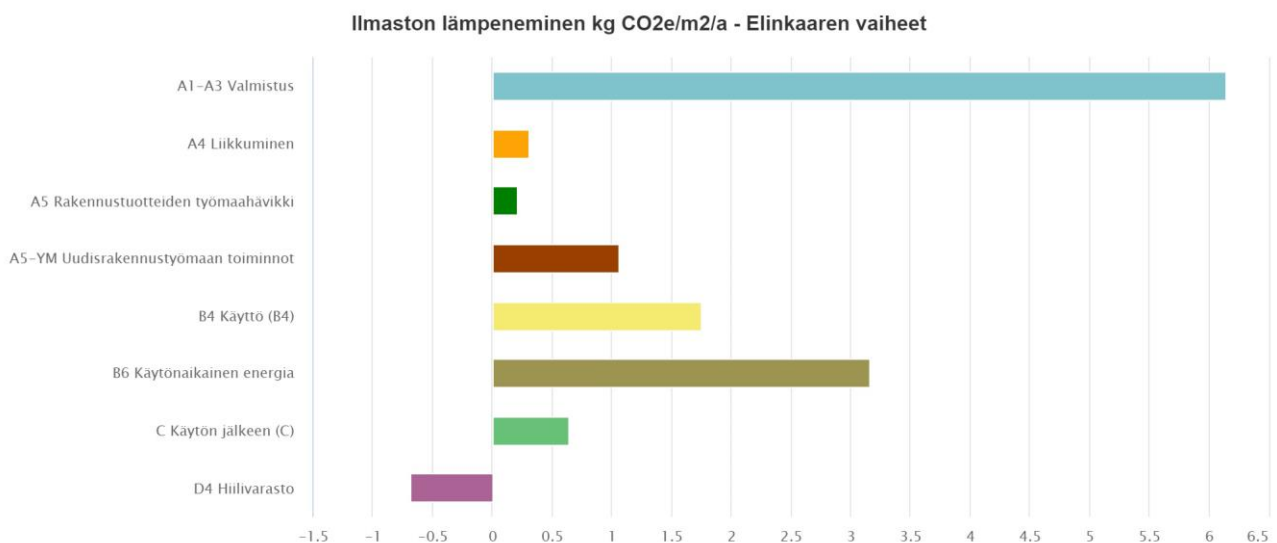
Osatekijät	Rakennuksen hiilijalanjälki kgCO ₂ e/m ² /a
Tuotevaihe (A1-3)	6,61
Rakentaminen (A4-5)	0,63
Käyttövaihe (B4, B6)	4,91
Elinkaaren loppu (C1-4)	0,62
Hiilijalanjälki (elinkaaren moduulien A-C summa)	12,14

Taulukko 6 Rakennus 2 hiilijalanjäljen yhteenveto

Taulukossa 7 on avattuna rakennuksen 2 hiilijalanjäljen tulosten suuruudet elinkaaren eri vaiheissa. Laskennan tuloksista saadaan selville, että rakennuksessa 2 käytettävien rakennusmateriaalien valmistus (moduuli A1-A3) tuottaa suurimmat ilmastopäästöt: 49 prosenttia koko rakennuksen elinkaaren aikaisista päästöistä. Tuotevaiheen päästöihin sisältyy rakennusmateriaalien raaka-aineen hankinta (A1), kuljetus valmistukseen (A2) ja tuotteen valmistus (A3). Seuraavaksi suurimmat päästöt aiheutuvat rakennuksen energian käytöstä (moduuli B6), 26 prosentin osuudella elinkaaren aikaisista päästöistä. Rakentamisvaiheella, korjauksilla ja huolloilla sekä purkamisella on hyvin pieni osuus kokonaispäästöistä.

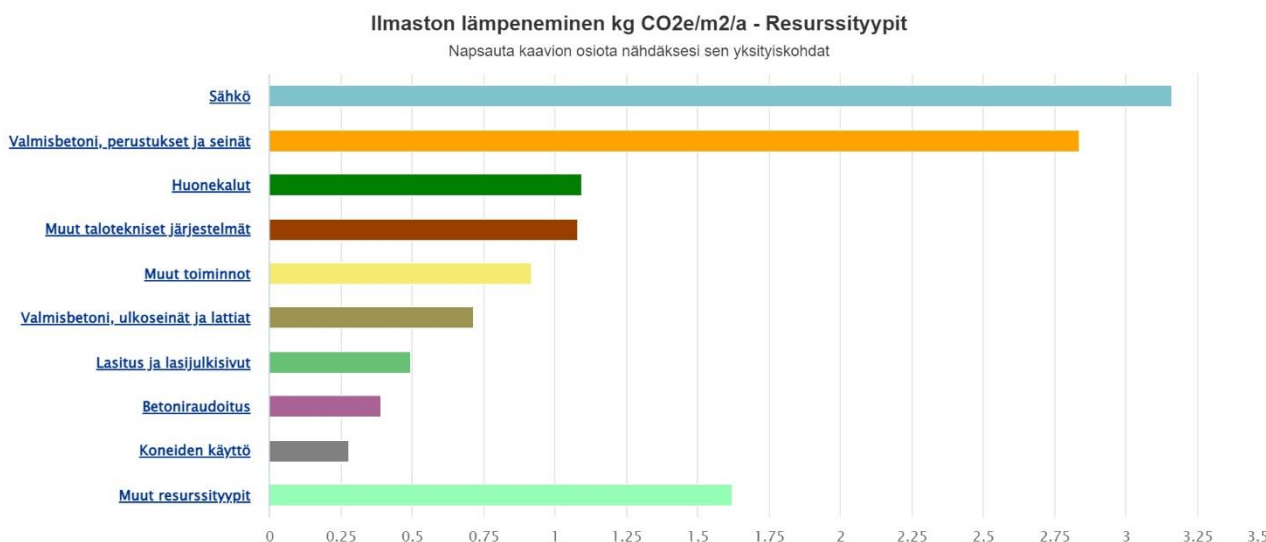
Osatelijät	Rakennuksen hiilijalanjälki kgCO _{2e} /m ² /a	Prosenttimäärä %
A1-A3 Tuotteiden valmistus	5,98	49 %
A4 Kuljetus	0,28	2 %
A5 Työmaatoiminnot (taulukkoarvo)	0,35	3 %
B4 Rakennusosien vaihto	1,75	14 %
B6 Energian käyttö	3,16	26 %
C1 Purkutyömaan toiminnot (taulukkoarvo)	0,14	5 %
C2 Kuljetus jatkokäsittelyyn (taulukkoarvo)	0,28	
C3 Jätteenkäsittely ja loppusijoitus (taulukkoarvo)	0,15	
C4 Purkujätteen käsittely (taulukkoarvo)	0,05	
Hiilijalanjälki (elinkaaren moduulien A-C summa)	12,14	

Taulukko 7 Rakennus 2 hiilijalanjälki ilmastaselvityksen mukaan



Kuva 11 Rakennus 2 ilmaston lämpeneminen - elinkaaren vaiheet

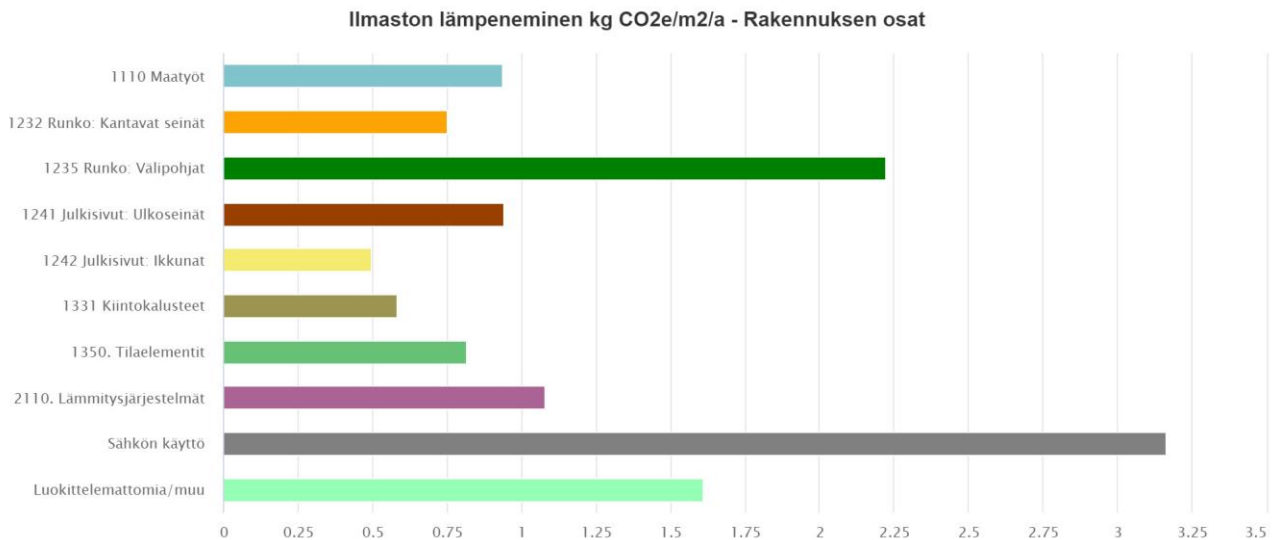
Tarkasteltaessa rakennuksen 2 elinkaaren aikana aiheutuneita päästöjä resurssityypeittäin, voidaan huomata, että sähkö sekä valmisbetoni perustuksissa ja seinissä aiheuttavat rakennukselle suurimmat päästöt. Vertaillen ilmaston lämpenemistä resurssityypeittäin sisältyy muihin resurssityyppeihin iso osa rakennuksen osa-alueista, vertailu eri resurssityypeittäin on tällöin haastavaa.



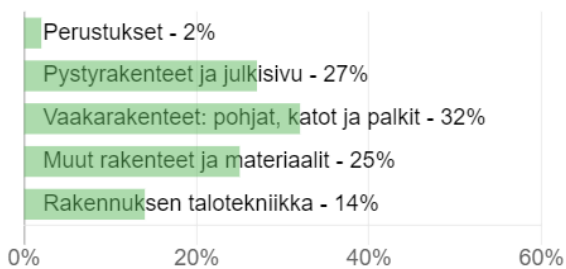
Kuva 12 Rakennus 2 ilmaston lämpeneminen – resurssityypit

Rakenteellisia kokonaisuuksia saadaan arvioitua tarkemmin kuvan 13 mukaan. Tuloksista voidaan päätellä, että sähkön käyttö on rakennuksen osista eniten ilmastoa lämpenemiseen vaikuttava tekijä. Sähkön käytön hiilijalanjälki on 3,16 kg CO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 693 t CO₂e. Toiseksi suurimmat päästöt Rakennukselle 2 aiheutuu rakennuksen välipohjasta. Välipohjan hiilijalanjälki on 2,22 kg CO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 487 t CO₂e. Kolmanneksi suurimpana päästöjen aiheuttajana on rakennuksen lämmitysjärjestelmä. Lämmitysjärjestelmän hiilijalanjälki on 1,08 kg CO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 236 t CO₂e. Kuvan 13 perusteella voidaan todeta, että rakennusosat, joissa vaaditaan suuria määriä valmisbetonia, aiheuttavat sähkön käytön ja lämmitysjärjestelmien lisäksi, eniten ilmastopäästöjä rakennuksen elinkaaren aikana. Rakennuksen lämmitysmuotona on maalämpö, minkä vuoksi lämmitysenergiaa kuluu tavanomaista vähemmän.

Maalämpöjärjestelmässä kaikki ostoenergia on sähköenergiaa. Käytetyllä arviointijaksolla sähköenergian päästöjen oletetaan pienenevän hieman nopeammin kuin kaukolämmön. Rakennuksessa eristeenä on käytetty mineraalivillaa ja muovipohjaisia eristeitä, niiden aiheuttamien päästöjen osuus on pieni. Kuvasta 14 nähdään, että koko rakennuksen massasta pystyrakenteet ja julkisivut, sekä vaakarakenteet sitovat eniten hiiltä tuotevaiheessa. Kuvan 14 perusteella pystytään myös todentamaan, että näitä rakenteita rakennuksessa on eniten, mikä on myös yleisesti tiedossa.



Kuva 13 Rakennus 2 ilmaston lämpeneminen – rakennuksen osat



Kuva 14 Rakennus 2 sitoutunut hiili per rakenne moduulit A1-A3

Rakennuksen 2 hiilikädenjälki on $-1,83 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$, eli kun rakennus rakennetaan, jää toteuttamatta päästöjä, joiden laskennallinen määrä on 1,83 hiilidioksidiekvivalenttikiloa lämmitettyä nettoalaneliötä kohti vuodessa. Rakennuksen elinkaaren positiiviset ilmastovaikutukset ovat 401 t CO₂e. Tämä saavutetaan muun muassa rakennuksessa käytettyjen rakennustuotteiden kierrättämisellä ja uudelleenkäytöllä. Rakennuksessa on vähän puupohjaisia materiaaleja, joten niiden aiheuttama hiilivarasto on myös pieni.

Osatelijät	Rakennuksen hiilikädenjälki kgCO ₂ e/m ² /a
D1 Uudelleenkäyttö ja kierrätys	-1,15
D4 Hiilivarasto, biogeeninen	-0,68
Hiilikädenjälki yhteensä	-1,83

Taulukko 8 Rakennus 2 hiilikädenjälki

Rakennusta 2 vertailtiin Carbon Heroes Benchmark:in avulla muihin Suomessa laskettuihin asuinrakennuksiin. Rakennus 2 sijoittui tuloksiltaan luokitukseen F.

6.2 Tulosten vertailu aiemmin tehtyihin tutkimuksiin

Tämän tutkimuksen tuloksia vertailtiin kahteen aiemmin suoritettuun tutkimukseen, One Click LCA:n ja Ramboll Build AUU – Aalborg Universitet:n suorittamiin tutkimuksiin. One Click LCA:n tutkimus keskittyy Suomen ympäristöministeriön vähähiilisyiden arviointimenetelmään ja sen tarkoituksena oli tuottaa ehdotetut alustavat raja-arvot rakennusten vähähiilisyydelle (Carbon footprint limits for common building types 2021). Ramboll Build AUU – Aalborg Universitet:n tutkimus perustuu rakennusten elinkaariarviointitietoihin viidestä eri Euroopan maasta ja sen tarkoituksena oli parantaa ymmärrystä uusien rakennusten hiilidioksidipäästöistä näissä viidessä eri maassa ja miten päästöjen määrä voitaisiin pienentää (Röck & Sørensen & Steinmann & Horup & Le Den & Birgisdottir 2022).

Rakennuksen hiilijalanjäljestä on Ympäristöministeriön toimesta teetetty tutkimus ”Carbon footprint limits for common building types”, jonka pohjalta osittain määritetään tulevat hiilijalanjäljen raja-arvot. Tutkimuksen laskentatapa ja tulokset perustuvat Suomen ympäristöministeriön vähähiilisyiden arviointimenetelmän vuoden 2019 menetelmään. Tutkimuksen otosmäärä on 482 rakennushanketta, joista suurin osa eli 267 oli Suomeen rakennettuja asuinrakennuksia. Tutkimus toteutettiin käyttämällä One Click LCA:n Carbon designer -ohjelmistoa. Laskennassa otettiin huomioon materiaalien tekninen käyttöikä, 50 vuoden arviointijakso, taulukkoarvoinen purkuskenario sekä energiankulutus sisältäen kaukolämmön päästövähennemän. Laskennassa käytettiin Suomen ympäristökeskuksen määrittämiä päästöarvoja materiaaleille. (Carbon footprint limits for common building types 2021.)

Tutkimuksen laskennasta on perustusratkaisut jätetty kokonaan pois, sillä ne vaihtelevat huomattavasti hankkeiden välillä. Kuitenkin perustuksilla voivat kasvattaa rakennuksen hiilijalanjälkeä jopa 20 prosenttia. Lisäksi maaperänvaihdosta aiheutuvat ympäristöpäästöt saattavat olla jopa kolmannes koko rakennuksen hiilijalanjäljen arvosta. (Carbon footprint limits for common building types 2021, 25.)

Tutkimuksen laskennan tulokset asuinrakennukselle on esitetty taulukossa 10. Tutkimukseen osallistuneiden hankkeiden hiilijalanjäljen viitearvoksi saatiin 14,0 kgCO₂e/m²/a. Viitearvoa tulee tutkimuksen mukaan korottaa hankkeesta riippumattomalla poikkeamalla, joka on kahdeksan prosenttia. Poikkeamalla oikaistu viitearvo on tällöin 15,1 kgCO₂e/m²/a. Tutkimuksen suorittajien perusteella rakennushankkeissa olisi saavutettavissa 25 prosentin hiilidioksidipäästöjen vähennys, jolloin ehdotettavaksi alustavaksi raja-arvoksi tutkimuksen mukaan asuinrakennukselle saatiin 11,5 kgCO₂e/m²/a. Hiilidioksidipäästöjen vähennys potentiaali perustuu kohteen energiamuodon vaihtamiseen maalämpöpumppuun, A-energialuokan saavuttamiseen, vähähiilisen betonin käyttöön tai runkoratkaisujen vaihtamiseen joko puu- tai CLT-runkoon (Carbon footprint limits for common building types 2021, 30).

Tulokset	Asuinrakennus
Hiilijalanjäljen viitearvo	14,0 kgCO ₂ e/m ² /a
Hankkeesta riippumaton poikkeama	+ 8 %
Poikkeamalla oikaistu viitearvo	15,1 kgCO ₂ e/m ² /a
Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen poikkeamalla oikaistusta viitearvosta	25 %
Vähentämisen jälkeinen viitearvo	11,3 kgCO ₂ e/m ² /a
Ehdotettu alustava raja-arvo	11,5 kgCO₂e/m²/a

Taulukko 9 Ehdotettu hiilijalanjäljen raja-arvo rakennustyypeittäin (Carbon footprint limits for common building types 2021, 35.)

Lopullisiin raja-arvoihin on lisättävä menetelmän kiinteät oletusarvot moduuleista A4-A5, B3 ja C1-C4, jotka ovat tällä hetkellä 1,5 kgCO₂e/m²/a. Tämän lisäyksen jälkeen ehdotetuksi raja-arvoksi muodostuu 13,0 kgCO₂e/m²/a. (Carbon footprint limits for common building types 2021, 35.)

Opinnäytetyössä tarkasteltavien rakennusten hiilijalanjäljeksi saatiin Rakennukselle 1 14,00 kgCO₂e/m²/a ja Rakennukselle 2 12,14 kgCO₂e/m²/a. Rakennukset eivät nykyisillä hiilijalanjäljillä tule saavuttamaan ehdotettua alustavaa raja-arvoa. Rakennus 1 jää raja-arvosta 2,5 yksikköä ja Rakennus 2 0,64 yksikköä. Tutkimuksen mukaan rakennushankkeissa olisi saavutettavissa 25 prosentin hiilidioksidipäästöjen pienennys, jos rakennuksille saataisiin toteutettua kyseinen päästövähennys, alittaisivat molemmat rakennukset ehdotetun alustavan raja-arvon selkeästi. Kappaleessa 7

on kirjattuna tarkemmin mahdolliset hiilijalanjäljen optimoinnit ja niiden vaikutukset rakennusten hiilijalanjälkeen.

Ehdotettu alustava raja-arvo ei sisällä kiinteitä oletusarvoja puuttuvista moduuleista, joiden lisäyksen jälkeen ehdotettu alustava raja-arvo olisi 13,0 kgCO₂e/m²/a. Rakennus 2 alittaa kyseisen raja-arvon selkeästi, mutta Rakennus 1 ei raja-arvoa alita. Rakennus 1 ylittää arvon 1,00 yksiköllä ja Rakennus 2 alittaa raja-arvon 0,86 yksiköllä.

Ramboll Build AUU – Aalborg Universitet on Laudes-säätiön tuella teetetty tutkimus ”Towards Embodied Carbon Benchmarks for buildings in Europe”. Tutkimus sisältää tietoa viidessä eri Euroopan maassa rakennettavan rakennusten sisältämän hiilidioksidipäästöjen nykytasosta. Tutkimukseen osallistuneet maat ja niiden asuinrakennusten otanta tapauksista olivat Belgia (105), Tanska (38), Suomi (28), Ranska (434) ja Alankomaat (29). Asuinrakennusten tyypit koostuivat puu-, massiivipu-, betoni- ja tiilirakenteisista omakoti-, rivi- ja kerrostaloista. Tutkimuksen suorittamista varten edellä mainituista maista kerättiin rakennusten elinkaariarvioinnin suoritteita, jotka käsiteltiin siten, että tulokset ovat yhdenmukaistettavissa ja vertailtavissa eri maiden välillä. (Röck ym. 2022.)

Tutkimuksen tuloksena asuinrakennuksen koko elinkaaren aikana syntyvät hiilidioksidipäästöt vaihtelevat 400–800 kgCO₂e/m² välillä, keskiarvona päästöistä on noin 600 kgCO₂e/m². Tanskan ja Alankomaiden arvot vaihtelivat välillä 200–650 kgCO₂e/m², Belgian ja Ranskan 400–850 kgCO₂e/m² ja Suomessa vaihteluväli oli noin 400–650 kgCO₂e/m². (Röck ym. 2022, 15.) Rakennuksen elinkaaren vaiheiden osalta päästöt jakoutuivat tutkimuksen tulosten perusteella alla olevan taulukon 10 mukaisesti.

Valmistus	Rakentaminen	Käyttö	Elinkaaren loppu
A1-A3	A4-A5	B1-B4	C1-C4
56 %	7 %	22 %	15 %

Taulukko 10 Hiilidioksidipäästöjen muodustumisen rakennusten elinkaaren eri vaiheissa (Röck ym. 2022, 13).

Opinnäytetyössä tarkasteltavien rakennusten elinkaaren aikaiseksi hiilijalanjäljeksi saatiin Rakennukselle 1 700 kgCO₂e/m² ja Rakennukselle 2 606 kgCO₂e/m²/a. Rakennuksen sijoittuvat tutkimuk-

sen kaikkien maiden tulosten vaihteluvälille, Rakennus 1 lähemmäs yläarvoa ja Rakennus 2 keskiarvon kohdalle. Tanskan ja Belgian tulokset ovat tutkimuksen parhaat, näihin nähden Rakennus 2 sijoittuu vaihteluvälille, mutta Rakennus 1 ylittää sen. Belgian ja Ranskan tuloksiin nähden molempien rakennusten tulokset asettuvat vaihteluvälille. Suomen vaihteluväliin nähden Rakennus 1 ylittää vaihteluvälin ja Rakennus 2 sijoittuu vaihteluvälin yläpäähän.

Kuten tämän opinnäytetyön tutkimustuloksissa havaittiin, myös Ramboll Build AUU – Aalborg Universitet:n suorittaman tutkimuksen perusteella rakennuksen rakennusmateriaalien valmistus aiheuttaa suurimman osuuden rakennuksen elinkaaren aikaisista päästöistä. Käyttövaiheen päästöt ovat toiseksi suurimmat ja pienimmät päästöt rakennuksen elinkaaren aikana koostuu rakentamisesta ja elinkaaren lopusta. Kuitenkin hieman eroavaisuutta prosenttimäärissä opinnäytetyön ja tutkimuksen välillä on havaittavissa.

6.3 Tulosten vaikutus rakennesuunnitteluun

Rakennesuunnittelija vaikuttaa rakennuksen elinkaaren aikaiseen hiilijalanjälkeen tekemillään suunnitteluratkaisuilla. Rakennesuunnittelussa tulee ottaa huomioon erityisesti rakenteellinen energiatehokkuus, rakenteiden suunnittelu todellisen mitoituskäyttöasteen mukaan sekä rakenteissa vähähiilisten rakennusmateriaalien suosiminen. Myös rakennuksen ja rakennusmateriaalien kestävyys, muuntojoustavuus, ilmastonmuutokseen aiheuttamiin muutoksiin mukautuminen ja materiaalien kierrätettävyydet ovat toimia, joilla rakennesuunnittelija voi vaikuttaa rakennuksen kokonaishiilijalanjälkeen, vaikka näitä ei mitata vähähiilisyden arviointimenetelmässä. Rakennesuunnittelijan vaikutusmahdollisuudet rakennuksen vähähiilisyyteen on tarkemmin esiteltynä kapaleessa 7.3.

Tietomalliin pohjautuva rakennuksen hiilijalanjäljen laskenta on tehokasta. Tietomallien hyödyntäminen rakennuksen hiilijalanjäljen laskennan määrätietojen pohjana on myös mittatarkka, sillä tietojen siirtäminen integraation kautta vähentää määrätietojen vaihtelevuutta eri laskijoiden välillä ja siten määrätiedot voidaan olettaa olevan jokaisessa laskennassa samalla mittatarkkuudella. Tietomallin kautta tehtävä hiilijalanjäljen laskenta on kuitenkin vahvasti riippuvainen tietomallin kattavuudesta, eikä tietomallit aina ole virheettömiä. Tietomallien puutteet ja virheet erityisesti materiaalimerkinnöissä vaikeuttavat tiedon integraatiota ja saattavat jopa väärentää laskennan tulosta.

Eri suunnittelualojen tuottamat tietomallit saattavat sisältää päällekkäistä tietoa, jolloin tulee pohdita, mitä tietomallia integraatiossa tulisi käyttää. Erityisesti rakennesuunnittelijan ja arkkitehtisuunnittelijan tietomallit sisältävät osittain samaa tietoa. Vaihtoehtona on lisätä esimerkiksi rakennesuunnittelijan tietomalliin hiilijalanjäljen laskentaa tukevia rakenteita, joita tavallisesti ei rakenteen tietomallista löydy, esimerkiksi ei-kantavat väliseinät. Toisena vaihtoehtona on myös suorittaa hiilijalanjäljen laskenta käyttäen hyväksi useaa eri määrätietojen kirjaamismenetelmää, esimerkiksi tietomallin integraation lisäksi suoritettavaa käsin laskentaa.

Tässä tutkimuksessa oli käytössä rakennesuunnittelijan laatima IFC-muotoinen tietomalli, joka tuotiin Tekla Structures – integraation kautta laskentatyökaluun. Integraation suorittamisen aikana tietomallissa havaittiin muutamia ongelmakohtia ja puutteita määrätiedon siirtämisessä. Havaitut ongelmat koskivat rakennusosien materiaalitietoa, sekä mallinnustapaa. Materiaalien tiedoissa tulisi käyttää mahdollisimman tarkkoja ja kuvaavia tietoja, eikä ”_undefined” tai ”zeroweight” materiaaleja tulisi käyttää. Mallinnustavassa seinät tulisi mallintaa seininä, palkit palkkeina ja jne. Virheellinen mallinnustapa saattaa aiheuttaa vääristyneen tuloksen tai ainakin lisää tarkastustyötä laskennan suorittajalle integraation aikana. Erityisesti jos laskennan suorittaa eri henkilö, joka on rakennuksen mallintanut, jolla ei täyttä tietoa ole tietomallin sisällöstä. Laskentatyökalun ohjesivuilta löytyy selkeät ohjeet, kuinka nämä ongelmat saataisiin jatkossa vältettyä.

Tietomallien integraatiota varten suunnittelutoimistoon tulisi luoda Tekla Structures – ohjelmistoon käyttäjäympäristöön filtteri, jolla saataisiin tuotua tarvittava tieto laskentatyökaluun riippumatta laskennan suorittajasta. Suunnittelutoimistolla on käytössään mallinnusohjeet, joiden perusteella jokainen suunnittelija mallintaa rakenneosia. Filtterin avulla saataisiin näiden ohjeiden perusteella mallinnetut rakenneosat näkyviin ja piilotettua sellaiset osat, joita laskentatyökaluun ei haluta siirtää.

Arviointityökalu kuitenkin soveltuu rakennusten hiilijalanjäljen laskentaan hyvin ja erityisesti integraation avulla työkalun käyttö on selkää. Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy:n tietomallien sisältö on myös riittävän tarkka laskennan suorittamiseksi.

7 Johtopäätökset

7.1 Hiilijalanjälkilaskeman tuloksien johtopäätelmä

Rakennusten 1 ja 2 laskennan tuloksia vertaillaan kappaleessa rakennuksen hiilijalanjäljen ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$) avulla, jotta vertailu ei ole riippuvainen rakennusten bruttoneliöistä, jotka eroavat rakennuksissa. Molemmissa rakennuksissa elinkaaren arviointijakson pituudeksi määritettiin 50 vuotta. Rakennusten hiilijalanjälki koostuu rakennusmateriaalien valmistuksesta ja kuljettamisesta, työmaan toiminnoista, rakennuksen kunnossapidosta ja korjaustoimenpiteistä, energian ja veden käytöstä ja viimeisenä rakennuksen purkamisesta ja rakennusmateriaalien loppukäsittelystä.

Rakennuksen 1 hiilijalanjäljeksi saatiin laskennalla $14,00 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$ ja Rakennuksen 2 hiilijalanjäljeksi $12,14 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$. Rakennuksen 1 hiilijalanjälki on 15 prosenttia suurempi kuin Rakennuksella 2. Suurin ero rakennuksilla on energiamuodossa, Rakennuksen 1 energiamuotona on kaukolämpö ja Rakennuksen 2 maalämpö. Maalämmön käyttö rakennuksen energiamuotona pienentää huomattavasti elinkaaren aikaisia hiilidioksidipäästöjä. Sähkön käytön osuus rakennuksen osista on molemmissa rakennuksissa huomattava päästöjen lähde, kuin myös rakennuksen kantavan rungon välipohja. Päästöjen suhteiden jakautuminen eri elinkaaren vaiheiden ja rakennusosien välillä on molemmissa rakennuksissa lähes identtiset.

Tutkimuksen tulosten perusteella kuvista 7 ja 11 voidaan havaita, että rakennusten elinkaaren vaiheista merkittävimmät päästölähteet ovat valmistus (moduulit A1-A3) sekä käytönaikainen energia (moduuli B6). Käyttö (moduuli B4) ja uudisrakennustyömaan toiminnot (moduuli A5-YM) ovat seuraavaksi suurimmat päästölähteet valmistuksen ja käytönaikaisen energian jälkeen. Pienimmät päästötekijät rakennuksen elinkaaren aikana ovat liikkuminen (moduuli A4), rakennustuotteiden työmaahävikki (moduuli A5) sekä elinkaaren loppu (moduuli C).

Kokonaisuudessaan rakennusmateriaalien valmistuksesta aiheutuvat päästöt koko rakennusten päästöistä olivat lähes puolet. Tulosten perusteella voidaan siis todeta, että rakennusmateriaalien osuus rakennusten hiilijalanjäljestä on merkittävä. Rakennusmateriaalien osuuden suuruuteen vaikuttaa keskeisesti rakennuksen muoto, pääasiallinen runkomateriaali, rakennuksen julkisivu sekä välipohja ja rakennuksessa käytetyn betonin ja teräksen määrä. Tuloksista voidaan päätellä kuvien

10 ja 14 perusteella, että molempien rakennusten valmistuksen aikaisten päästöjen suurimmat aiheuttajat ovat rakennusten rungot, pystyrakenteet ja julkisivut hieman pienemmällä osuudella kuin vaakarakenteet. Molemmissa laskennan kohteena olevissa rakennuksissa rungon päästöt muodostavat kaikista päästöistä 60 prosenttia.

Tuloksista voidaan todeta, että rakennusosat, joissa vaaditaan suuria määriä valmisbetonia ja terästä, aiheuttavat eniten ilmastopäästöjä rakennuksen elinkaaren aikana. Toimeksiantajayrityksen suunnittelemissa betonirunkoisissa asuinkerrostaloissa tämä tarkoittaa yleisesti kantavia väliseiniä, välipohjia ja ulkoseiniä. Erityisesti rakennusten välipohjien paikallavalulaatta aiheuttaa suuren osan vaakarakenteiden päästöistä, paikallavalulaatta kattaa yli puolet kaikista vaakarakenteiden päästöistä. Rakennusten kantavat väliseinät ja ulkoseinät ovat myös suuri rungon päästöjen aiheuttaja, näissä korostui ulkoseinäelementtien kantavat sisäkuoret ja väliseinäelementit. Rakennuksessa 2 myös julkisivun tiiliverhouksen osuus oli huomattava.

Rakennuksen 2 hiilijalanjälki on selvästi pienempi kuin vastaavan tyyppisillä rakennuksilla. Suurin syy tähän on lämmitysjärjestelmä. Kohteessa käytettävä maalämpö on huomattavasti energiatehokkaampi vaihtoehto kuin yleisimmin vastaavan kokoluokan rakennuksissa käytetty kaukolämpö. Rakennuksen 1 energiamuotona toimiva kaukolämpö kasvattaa rakennuksen hiilijalanjälkeä selkeästi. Maalämmön vuoksi Rakennuksen 2 hiilijalanjälki on yli 30 prosenttia pienempi moduulissa B6 eli energiankulutuksessa kuin Rakennuksessa 1 jossa on käytössä kaukolämpö. Ostoenergian määrä Rakennuksessa 2 on myös maalämmön vuoksi lähes 25 prosenttia pienempi kuin Rakennuksessa 1. Rakennuksessa 2 energiankulutus koostuu pelkästään sähkön käytöstä, kun taas Rakennuksessa 1 yli puolet energiankulutuksesta koostuu kaukolämmön käytöstä.

Rakennusten hiilijalanjäljelle tutkimuksessa ”Carbon footprint limits for common building types” ehdotetut alustavat raja-arvot ovat tällä hetkellä hyvin tiukat. Rakennusten pääasiallisella runkomateriaalilla ja rakennuksessa käytössä olevalla energiamuodolla on suuri vaikutus rakennusten hiilijalanjälkeen. Tutkimustyön laskennan tulosten perusteella voidaan todeta, että jos rakennuksen energiamuotona on maalämpö, alittaa rakennuksen hiilijalanjälki tutkimuksessa esitetyn ehdotetun alustavan raja-arvon. Yleisesti energiamuotona betonirunkoisissa asuinkerrostaloissa käytössä oleva kaukolämpö kasvattaa rakennuksen hiilijalanjälkeä niin huomattavasti, että raja-arvoa ei saada alitettua ilman toimenpiteitä hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Raja-arvojen tiukkuudella

pyritään varmistamaan uudisrakennuskannan kehittymisen kohti vähähiilistä ja hiilineutraalia, jolla ilmastonlämpenemistä saataisiin hillittyä. Raja-arvojen saavuttamiseksi tulee rakennusalalla innovoida lisää vähähiilisiä ratkaisuja, joiden avulla nämä arvot saavutettaisiin tehokkaasti ja taloudellisesti.

Rakennuksen 1 hiilikädenjäljeksi saatiin laskennalla $-1,98 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$ ja Rakennuksen 2 hiilikädenjäljeksi $-1,83 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$. Rakennusten hiilikädenjälki koostuu pääosin rakennusmateriaalien uudelleenkäytöstä ja kierrätyksestä, erityisesti betoniteräksen kierrätyksestä alapohjissa, välipohjissa ja yläpohjissa sekä ikkunoiden ja ovien uudelleenkäytöstä. Betoniteräksen kierrätyksessä teräs erotellaan betonirakenteista murskauksen yhteydessä ja tämän jälkeen se voidaan kuljettaa uudelleen sulatettavaksi. Rakennuksessa on vähän puupohjaisia materiaaleja, joten niiden aiheuttama hiilivarasto on myös pieni. Ylijäävää uusiutuvaa energiaa kohteissa ei ole.

Rakennusten vähähiilisyydelle ei ole asetettu vielä tavoitteita tai raja-arvoja, jolloin hankkeiden vähähiilisyyks tulee perustella muilla tavoilla, hankkeessa tulisikin esittää miten päästöjä on vähennetty ja kuinka paljon verrattuna alkuperäiseen tai yleiseen arvoon. Vertailu voi perustua keskimääräiseen päästötasoon, tyypilliseen ratkaisuun tai vaihtoehtoiseen suunnitteluratkaisuun. Keskimääräisessä päästötasossa vertailu suoritetaan julkaistuun aineistoon perustuvaan keskiarvoon vastaavassa rakennustyyppissä, kuten tässä tutkimuksessa esitettyihin aiemmin tehtyihin tutkimustuloksiin. Tyypillisessä ratkaisussa hankkeen toteutettua ratkaisua vertaillaan yleisesti käytössä ja tiedossa oleviin ratkaisuihin. Vaihtoehtoisessa suunnitteluratkaisussa vertaillaan hankkeen mahdollista suunnitteluratkaisun vaihtoehtoa, joka on todellisesti ollut esillä jossain vaiheessa hanketta. (Bruce-Hyrkäs & Tuominen & Tähtinen 2022, 13.)

7.2 Hiilijalanjälkilaskelman tarkkuus ja todenmukaisuus

Laskennan tuloksen tarkkuus ja oikeellisuus perustuu laskennan tarkkuudesta, millä kattavuudella määrälaskenta on suoritettu, kuinka tarkasti energian käyttö on arvioitu, onko laskenta suoritettu virheettömästi sekä kuinka hyvin määrätiedot kohdistetaan yleisissä ja tuotekohtaisissa tiedoissa niin tuotteissa, suoritteissa kuin palveluissa (Häkkinen & Kuittinen 2020, 86).

Eurooppalaisen EN 15978 periaatteen mukaan hiilijalanjäljenlaskelman tuloksista voidaan jättää pois sellaiset tekijät, joiden vaikutus laskennan kokonaisuudesta on alle yksi prosentti. Kuitenkin

ulosrajattujen tekijöiden summa ei saa olla yli viittä prosenttia rakennuksen elinkaaren kokonaisvaikutuksista. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 79.) Laskentatyökalusta nähdään selkeästi jokaisen rakennusosan vaikutus kokonaisuudesta. Työssä suoritetuista laskentojen tuloksista on jätetty pois ainoastaan betonielementtien valuosat, näiden osuus koko rakennuksen hiilijalanjäljestä oli alle yksi prosentti. Kaikista valuosista ei ole tuotetoimittajilta saatavilla ympäristöselosteita, jolloin tuloksen tarkkuus voisi vääristyä.

Laskennan suorittamisessa tulee huomioida mihin lähtötiedot erityisesti rakennusmateriaaleissa perustuvat, jotta laskennassa saavutetaan riittävä tarkkuus. Laskennan suorittaminen hankkeen varhaisessa vaiheessa perustuu rakennusmateriaalien yleiseen tietoon eli keskiarvotietoon materiaalien päästötiedoista, sillä varhaisessa vaiheessa tarkkaa materiaalitoimittajaa ei vielä ole mahdollisesti tiedossa. Kuljetukset, energiapalvelut, rakentaminen, purkaminen ja jätteenkäsittely voivat myös perustua yleiseen tietoon. Mitä pidemmälle suunnittelu hankkeessa etenee, sitä tarkemmaksi laskennassa käytettävä tieto voidaan määrittellä eli voidaan käyttää tuotekohtaista tietoa, joka saadaan tietyn rakennusmateriaalien ympäristöselostuksesta. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 84-85.) Rakennusmateriaalien päästötietojen kattavuus on myös vielä varhaisessa vaiheessa, kaikille materiaalitoimittajien tuotteille ei vielä päästötietoja laskentatyökalusta löydy. Päästötietojen lisääntyessä, myös laskennan tarkkuus paranee, kun saadaan juuri oikein valmistajan tuotteet käyttöön eikä keskiarvoa kuten nykyisessä laskennassa. Jollain valmistajalla materiaalin ympäristöpäästöt voivat myös olla alhaisemmat, kuin toisella, jolloin rakennuksen vähähiilisyyttä voidaan parantaa ja vertailla eri materiaalitoimittajien tuotteiden välillä. Laskennan tarkkuutta myös lisää, kun tiedetään tarkasti eri tuotevalmistajien rakennusmateriaalien tarkat kuljetusetäisyydet eri vaiheiden välillä. Etenkin varhaisen vaiheen laskennassa tarkkaa tuotevalmistajaa ei ole tiedossa, jolloin kuljetusetäisyyden arvona käytetään taulukkoarvoa.

Hiilijalanjätkilaskelma suoritettiin kohteille, joille ei ollut määritetty päästölaskennan vaatimuksia ja laskennan suoritti yksi suunnitteluala, käyttäen muiden suunnittelualojen lähtötietoja kuitenkin ilman yhteydenpitoa muihin suunnittelualoihin. Suunnittelun varhaisessa vaiheessa olisikin tärkeää määrittää kohteelle vaatimus, miten laskenta suoritetaan ja mitä laskenta vaatii, jolloin jokainen suunnitteluala ymmärtäisi selkeästi laskennan kokonaisuuden. Laskennan tarkkuuden varmistamiseksi tulisi hiilijalanjäljen laskennasta pitää eri suunnittelualojen välillä yhteydenpitoa, jotta lähtötiedoista voitaisiin olla varmoja. Erityisesti, jos kohteiden hiilijalanjälkeä halutaan parantaa,

tulee kaikkien suunnittelualojen osallistua jollain tapaa kohteiden hiilijalanjäljen laskentaan. Määräystason puuttuessa, on hankkeille kuitenkin haastava luoda vaatimuksia laskennan tuloksista. Vertailutason asettaminen perustuu tällöin muihin vastaaviin kohteisiin, joille laskenta on suoritettu.

Laskennan suorittaminen integraatiolla vähentää määräluettelon virheellisyyttä. Kuitenkaan kaikkia materiaaleja ei voitu laskentaan tuoda integraation avulla tietomallien puutteellisuuden vuoksi, jolloin määrätiedot syötettiin laskentatyökaluun käsin. Tällöin inhimillisten virheiden mahdollisuus kasvaa ja laskennan tulosten varmuus heikkenee. Määrätietojen syöttäminen käsin on kuitenkin laskennassa välttämätöntä, sillä kaikkia rakennusmateriaaleja tai -kerroksia ei tietomalleihin mallinnetta.

Toimeksiantajayrityksellä on käytössään kylpyhuonemoduuli, joka esivalmistetaan tehtaalla hallituissa olosuhteissa ja tämän jälkeen toimitetaan työmaalle asennettavaksi. Lähes jokaisessa suunnitellussa rakennuksessa on käytössä tämä kylpyhuonemoduuli. Moduulin valmistukseen vaadittuja tarkkoja määrätietoja ei saatu laskentaan mukaan, vaan laskennassa jouduttiin käyttämään suuntaa antavaa arvoa kylpyhuonemoduulille. Jatkokehityksenä moduulille tulisi laskea tarkan määrätiedon perusteella hiilijalanjälki tai ympäristöpäästöseloste, jolloin laskennan tarkkuus parani.

Laskennan tulosten tarkkuuteen vaikuttaa myös paikallavalu- ja elementtirakenteisten teräsbetonirakenteiden raudoitusmäärien arvioinnin perustuminen keskiarvoon raudoituksista. Keskiarvot perustuvat Insinööritoimisto Mäkeläinen Oy:n tekemiin elementti- ja rakennepiirustuksiin, joista on laskettu keskiarvoiset raudoitteiden kilomäärät kuutiolle betonia. Rakennusten tietomalleissa on myös puutteita paaluissa. Rakennusten paalut mallinnetaan alustavilla pituuksilla, jotka perustavat geoteknisen suunnittelun alustaviin arvioituihin kallion korkoihin. Paalujen todelliset mitat saadaan paalutustyön suorittamisen jälkeen. Betonielementtien valuosat jätettiin laskennan ulkopuolelle, sillä kaikkien valuosien materiaalitoimittajien päästötietoja ei ole vielä saatavilla. Kiintokalusteiden päästöjen määrän arviointi saattaa tuloksissa olla myös puutteellinen, sillä laskentatyökalun päästötietokanta ei sisältänyt täysin sopivia tuotteita verrattuna kohteiden todellisiin kiintokalusteisiin.

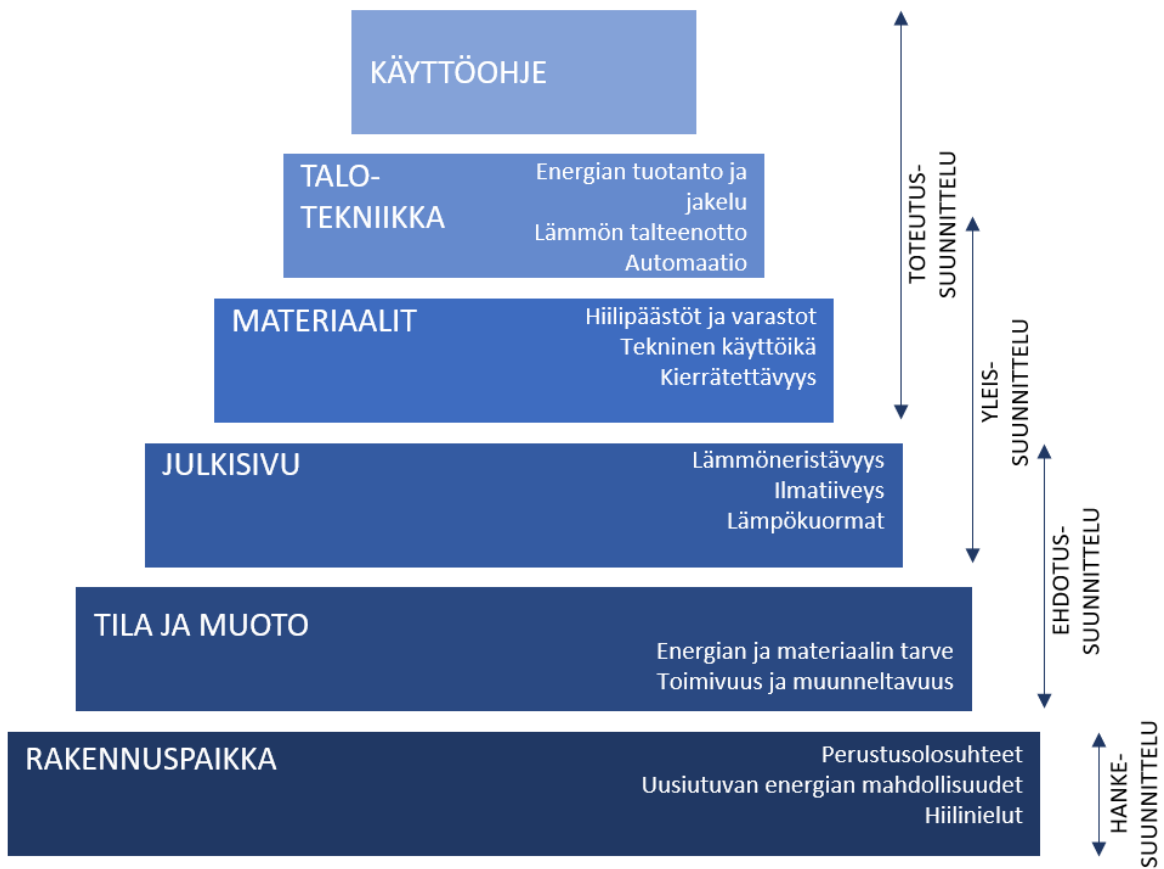
Laskennan suorittajalta ei rakennuksen vähähiilisyiden laskennassa vaadita tällä hetkellä pätevyysvaatimuksia, jolloin tulosten luotettavuus ja tarkkuus heikkenee. Laskentaa voidaan suorittaa monella eri tarkkuudella ja tavoilla, jolloin tulokset eri laskijoiden välillä ei välttämättä ole keskenään vertailtavissa. Tämän tutkimuksen tuloksia voidaan kuitenkin pitää keskenään vertailukelpoisina, sillä laskennat on suoritettu samoilla periaatteilla ja samaa laskentaohjelmaa käyttäen. Tämän lisäksi laskennat on tehty saman henkilön toimesta, jolloin laskennan periaatteet ja toteutus on yhdenmukaiset.

7.3 Hiilijalanjäljen optimointi

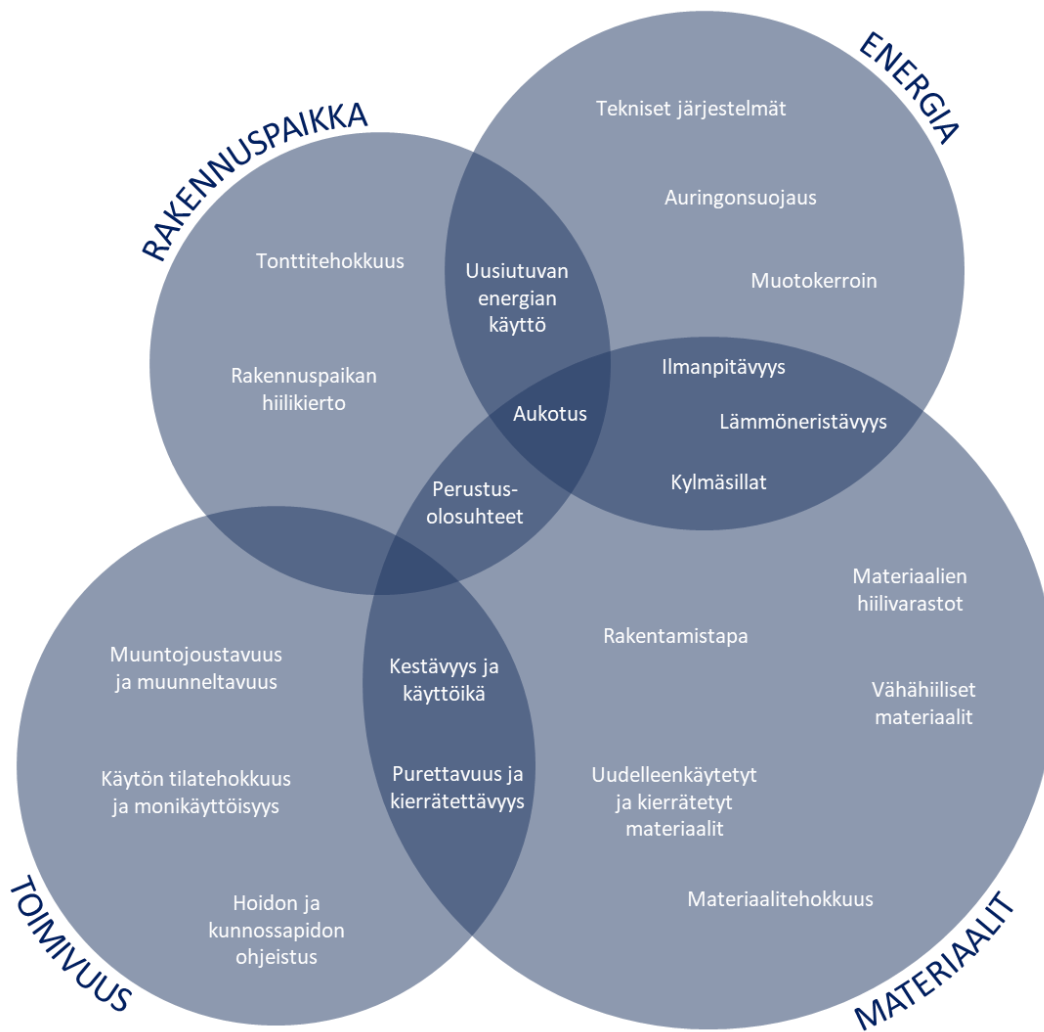
7.3.1 Yleiset periaatteet

Hiilijalanjäljen optimoinnissa pyritään tekemään ratkaisuja, jotka ovat kustannustehokkaita, maltillisia ja mahdollisia tehdä vielä myöhäisemmässä vaiheessa hankkeessa. Tulosten perusteella saatiin käsitys, että rakennuksen elinkaaren aikaisista päästöistä suurin osa muodostuu rakennusmateriaalien valmistuksesta sekä energian käytöstä. Rakennuksen elinkaaren valmistusvaiheen merkittävimmät rakennusosat hiilen sitoutumisen kannalta olivat rakennusten ulkoseinät ja välipohjat. Päästölähteiltään suurimmiksi rakennusmateriaaleiksi osoittautui betoni ja teräs. Optimoinnissa pyritään löytämään ratkaisut tuloksien perusteella tunnistetuille ongelmakohtille rakennuksen vähähiilisydessä. Näiden lisäksi käsitellään vähemmän merkityksellisiä rakennusosia, joiden ilmastopäästöjen määrä saadaan kuitenkin kustannustehokkaasti pienennettyä. Jokaisessa hiilijalanjäljen optimointi vaihtoehdossa tulisi pohtia parannuksen takaisinmaksuaikaa, jotta kustannustehokkuus pysyisi muutoksissa mukana. Rakennuksen energiankulutuksen pienentäminen, lämmitysjärjestelmien tarkastelu, resurssitehokkuus materiaalien käytössä ja kierrätyksessä, vähäpäästöisten materiaalien käyttö ja uusiutuvan energian käyttäminen tai tuottaminen ovat yleisesti rakennushankkeissa kustannustehokkaita keinoja rakennuksen hiilijalanjäljen pienentämiseen.

Rakennuksen hiilijalanjäljen optimointi on sitä tehokkaampaa, mitä aikaisemmassa vaiheessa se tehdään. Hankkeen alkuvaiheessa valitaan rakennuksen käyttötarkoitus, muoto ja materiaalit, jotka määrittelevät rakennuksen elinkaaren aikana syntyvät kasvihuonepäästöt. Pyrkimällä tehokkaaseen tilankäyttöön ja mahdollisimman pieneen ulkovaipan pinta-alaan rakennuksessa, saadaan jo suunnittelun alkuvaiheessa minimoitua rakennuksen hiilijalanjälki.



Kuva 15 Rakentamisen vähähiilisyden vaikutus suunnittelun eri tasoilla ja vaiheissa (Häkkinen & Kuittinen 2020, 153).



Kuva 16 Vähähiilisen rakentamisen osatekijät ja niiden suhde toisiinsa (Häkkinen & Kuittinen 2020, 99).

7.3.2 Rakennuspaikka

Rakennuspaikan valinnalla voidaan vaikuttaa keskeisesti hankkeen vähähiilisyyteen. Vähähiilisyyden kannalta edullisinta on valita rakennuspaikka, jolla ei tarvitse suorittaa massanvaihtoa, stabiilointia tai paalutusta. Pohja- ja perustustyöt huonolla rakennuspaikalla voivat aiheuttaa jopa enemmän ilmastopäästöjä rakennukselle kuin maanpäälliset materiaalit. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 103.) Tontin tarvittavissa massanvaihdoissa ja louhinnassa tulisikin selvittää, voitaisiinko poistettavat maa-ainekset käyttää jotenkin hyödyksi rakennushankkeessa tai lähitöllä sijaitsevalla rakennushankkeella, jolloin kuljetuksesta aiheutuvat päästöt saataisiin pienennettyä.

Tontin valintaan tulisi myös vaikuttaa liikkumisen ilmastopäästöt eli rakennuksen käyttäjän näkökulmasta liikenneyhteydet olisivat toimivat tai alueen liikenne kehittyisi kohti pienempiä ilmastopäästöjä. Rakennuspaikalla, jolla voidaan käyttää energiankäytössä uusiutuvaa energiaa tai liittyä sellaisten piiriin, pienentää rakennuspaikasta aiheutuvia ilmastopäästöjä. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 150.)

Useasti rakennuksen tieltä myös hävitetään rakennuspaikalta kasvillisuutta ja maaperää, jolloin tontin sitoman hiilen määrä pienenee. Palauttamalla rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa rakennuspaikalla maaperään ja kasvillisuuteen sitoutuneita hiilinieluja, saadaan vähennettyä rakennuksen aiheuttamia ilmastopäästöjä. Hiilinieluja saadaan lisättyä rakennuspaikalle luonnollisesti istuttamalla puustoa ja kasvillisuutta tontilla sekä teknisesti esimerkiksi puurakentamisella ja viherkattojen käytöllä.

7.3.3 Energiatehokkuus

Rakennuksen rakenteellisen energiatehokkuuden parantaminen pienentää energiankulutuksen tarvetta rakennuksessa, jolloin myös rakennuksen hiilijalanjälki pienenee. Energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet kasvattavat rakennukseen suoritettavien investointien kustannuksia, mutta pienentävät rakennuksen käytönaikaisia kustannuksia. Ulkovaipan lisälämmöneristämällä, ilmanpitävyyden varmistamisella ja kylmäsiltojen minimoinnilla saadaan vähennettyä ulkovaipan kautta tapahtuvia lämpöhäviöitä rakennuksessa, jolloin rakennuksen lämmittämiseen vaadittavaa energiankulutusta saadaan vähennettyä. Ikkunoiden kautta tapahtuvat lämpöhäviöt ovat huomattavasti suurempia kuin ulkoseinän kautta kulkevat, jolloin ikkunoiden lämmöneristävyyteen, pinta-alaan ja sijoitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota suunnittelussa. Toisaalta ikkunoiden kautta saadaan hyödynnettyä passiivisesti aurinkoenergiaa, kuitenkin huomioiden auringonsuojaus, jottei erityisesti kesäaikaan auringon tuomasta energiasta synny jäähdytystarvetta rakennukselle. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 109-111.)

Taloteknisillä järjestelmillä voidaan vaikuttaa rakennuksen energiatehokkuuteen ja vähähiilisyyteen huomattavasti. Rakennuksen lämmitysjärjestelmän ja energiamuodon, ilmanvaihdon ja lämmöntalteenoton ratkaisuilla vaikutetaan talotekniikan kautta rakennuksen vähähiilisyyteen. Erityisesti uusiutuvan energian käyttämisellä, energiatehokkaiden laitteiden ja järjestelmien

suosimisella, lämmöntalteenoton tehostamisella, rakennusautomaatiolla ja rakennuksessa tuotettavan energian varastoinnilla saadaan saavutettua energiatehokkuus myös taloteknisissä järjestelmissä. Uusiutuvan energian tuotosta ylijäävä osuus voidaan myös myydä jakeluverkkoon, jolloin saadaan niin taloudellista hyötyä kuin kasvatetaan rakennuksen hiilikädenjälkeä. Uusiutuvan energian ratkaisusta kustannustehokkain ratkaisu rakennuksen ostoenergian pienentämiseen on aurinkosähköjärjestelmän asentaminen rakennuksen energiatuotannon hyödyntämiseksi. Aurinkopaneelien asentaminen lisää rakennuksen hiilijalanjälkeä, sillä paneelien materiaalit lisäävät päästöjä. Kuitenkin aurinkopaneeleista saatava energiahyöty pienentää lopputilanteessa rakennuksen elinkaaren aikaisia ilmastopäästöjä. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 120-121.)

Rakennuksessa 1 on lämmitysmuotona kaukolämpö. Vaihdettaessa lämmitysmuoto kaukolämmöstä maalämpöön, saadaan rakennuksen hiilijalanjälkeä pienennettyä $1,68 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$ eli kokonaispäästöinä $346 \text{ t CO}_2\text{e}$. Jos taloteknisillä ratkaisulla saataisiin pienennettyä rakennuksen ostoenergian määrää viidellä prosentilla, vähenisi hiilijalanjälki Rakennuksessa 1 $0,08 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$ eli kokonaispäästöinä $16 \text{ t CO}_2\text{e}$ ja Rakennuksessa 2 $0,16 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$ eli kokonaispäästöinä $35 \text{ t CO}_2\text{e}$.

7.3.4 Materiaalit ja toimivuus

Optimoinnissa tärkeintä on kiinnittää huomiota hiilipäästöjen näkökulmasta merkittävimpiin materiaaliratkaisuihin, asuinkerrostaloissa nämä koostuvat yleensä ulkoseinistä, välipohjasta ja väliseinistä. Rakennuksessa suurina määrinä esiintyvien rakenteiden vaihtamisella mahdollisuuksien mukaan vähäpäästöisempiin materiaaleihin, voidaan saavuttaa huomattavia vähennyksiä hiilijalanjäljessä. Työn rakennuksissa esimerkiksi betonin korvaaminen puulla vähentäisi huomattavasti rakennusten hiilijalanjälkeä.

Rakennusmateriaalien vaihdoissa tulee kuitenkin huomioida, että tekniset ja toiminnalliset vaatimukset täytyvät vaihdon seurauksena, sekä mahdollisten vaihtoehtojen käyttöikä ja menekki. Vaikka rakennusmateriaali olisi päästöiltään alkuperäistä materiaalia vähäpäästöisempi, voi materiaalin menekki olla suurempi tai käyttöikä pienempi, jolloin koko elinkaaren ajalta päästöt saattavatkin olla alkuperäistä materiaalia suuremmat. Vähähiiliset rakennusmateriaalit saattavat myös lisätä rakennushankkeen investoinnin kustannuksia, mutta eivät kuitenkaan pienennä samassa

suhteessa rakennuksen käyttökustannuksia. Rakennusmateriaaleissa tulisi myös suosia rakennustyömaan lähellä tuotettavia rakennusmateriaaleja, jolloin materiaalien kuljetuksesta aiheutuvat päästöt saadaan minimoitua.

Rakennuksessa käytettävät lyhyen käyttöiän rakennusmateriaalit tulisikin suunnitella siten, että ne ovat helposti vaihdettavissa ja kierrätettävissä rakennuksesta. Materiaalien kierrätys ja uusiokäyttö ovat yleistyneet rakennustuotevalmistajilla. Materiaaleja ei kuitenkaan aina voida täysin käyttää sellaisenaan uusiokäytössä, jolloin materiaaleja kierrätetään uudelleen prosessoitavaksi. Tuotteiden raaka-aineiden kierrätyksen ansiosta materiaalien ympäristöpäästöt ovat huomattavasti pienemmät, kun verrataan uudesta raaka-aineista valmistettujen tuotteiden päästöihin. Mahdollisuutena on myös toteuttaa valmistus käyttämällä osittain kierrätettyjä ja osittain uusia raaka-aineita, jolloin saavutetaan helpommin mahdolliset rakennusmateriaaleilla asetetut laatuvaatimukset. Ympäristöystävällisempiä kierrätettyjä materiaaleja voi olla esimerkiksi: betoni, jossa osa sementistä koostuu kierrätetyistä raaka-aineista tai osa betonin kiviaineesta on vaihdettu kierrätetyllä kiviaineksella tai betonilla sekä teräs, jonka kierrätettävyyttä 100 prosenttia ja sitä voidaan kierrättää lähes loputtomiin.

Tutkimuksen tuloksista voidaan havaita, että lähes 30 prosenttia rakennusten hiilijalanjäljestä resurssityypeittäin koostuu valmisbetonista. Betonirunkoisten asuinkerrostalojen kantavan rungon pääasiallista runkomateriaalia ei suoraan pystytä korvaamaan vaihtoehtoisella runkomateriaalilla, jolloin betonin synnyttämiä päästöjä on vähennettävä. Betonivalmistajilta onkin saatavilla vähähiilistä betonia, jossa osa sementistä on korvattu pienipäästöisillä sidosaineilla, kuten lentotuhka, masuunikuona, kalkkikivijauhe ja silika. Vähähiilisen betonin CO₂-päästöt ovat jopa 90 prosenttia pienemmät kuin vastaavalla normaalilla betonilaadulla, betonin päästöluokkia Suomessa on viisi ja ne ovat GWP.REF, GWP.85, GWP.70, GWP.55 ja GWP.40. Vähähiilisyysluokituksen tunnus GWP tulee sanoista Global Warming Potential, pisteen jälkeen ilmoitettu arvo on päästötaso verrattuna referenssitason (GWP.REF). Vähähiilisen betonin saatavuus voi aiheuttaa haasteita rakennushankkeessa, kuitenkin päästöluokat GWP.85 ja GWP.70 ovat todennäköisesti saatavilla yleisesti tai useilta valmistajilta. Vähähiilisessä betonissa lujuuden kehitys on tavanomaista valmisbetonia hitaampaa, mutta loppulujuus on jopa korkeampi kuin tavanomaisella valmisbetonilla. (BY-vähähiilisyysluokitus n.d.; Vähähiilinen betoni n.d.) Käytettäessä vähähiilistä betonia, tulee kohteen aikataulusuunnittelussa huomioida lujuuden kehitys verrattuna tavanomaisen valmisbetonin

lujuuden kehitykseen vaadittavaan aikaan. Myös betonielementeissä on mahdollista käyttää vähähiilistä betonia, ongelmaksi käytössä kuitenkin muodostuu muottikierron pidentyminen ja tällöin tehdään tuotantokapasiteetin pieneminen, joka lisää huomattavasti kustannuksia betonielementeissä.

Työssä laskettaviin rakennuksiin vaihdettiin perustuksien, alapohjan ja välipohjan paikallavalulaa-
tan betoni vähähiiliseksi betoniksi, joka on päästöluokaltaan GWP.70. Vähähiilisen betonin avulla Rakennuksen 1 kokonaispäästöt pienenevät yhteensä 70 t CO₂e, päästöjen pienentymisen jakautuminen rakennusosittain: perustukset 4 t CO₂e, alapohja 8 t CO₂e ja välipohja 58 t CO₂e. Rakennuksen 2 kokonaispäästöt pienenevät yhteensä 99 t CO₂e, päästöjen pienentymisen jakautuminen rakennusosittain: perustukset 11 t CO₂e, alapohja 5 t CO₂e ja välipohja 83 t CO₂e. Vähähiilisen betonin käyttäminen verrattuna tavanomaiseen betoniin lisää kustannuksia noin 15–25 prosenttia riippuen betonin päästötasosta.

Rakenteiden paksuuden optimoinnilla saadaan sekä kustannuksiltaan, että hiilipäästöiltä pienempiä tuloksia. Rakenteiden mitoitus todellisen käyttöasteen mukaan, esimerkiksi kerroskohtaisesti, voi mahdollisesti vähentää materiaalin tarvetta, jolloin myös koko rakennuksen hiilijalanjälki pienenee. Esimerkiksi rakennuksen kantavien väliseinien paksuuden muuttaminen 200 millimetristä 180 millimetriin vähentäisi Rakennuksessa 1 kokonaispäästöjä 12,4 t CO₂e ja Rakennuksen 2 kokonaispäästöjä 21,9 t CO₂e. Rakenteiden paksuuden optimointi saattaa kuitenkin lisätä vaadittavan raudoituksen määrää, jolloin paksuuden muutoksen hyöty häviää. Myös toiminnalliset vaatimukset, kuten ääni- ja palotekniset vaatimukset, tulee täytyä rakenteelle. Suunnitelmien laadunvarmistuksella saadaan ehkäistyä rakennusvirheiden syntyä, jotka useimmiten lisäävät myöhäisemässä vaiheessa tehtäviä lisäyksiä, jotka kasvattavat rakennuksen ympäristöpäästöjä. Rakenteiden optimoinnilla ja laadunvarmistuksella saadaan luotua kustannussäästöjä hankkeessa.

Rakennusten rakenteellisten ratkaisujen optimoinnissa on myös vaihtoehtona käyttää pilari-laattarunkoa. Pilari-laattarungossa rakennuksen kantava pystyrakenne toteutetaan kantavien väliseinien sijasta pilareilla. Pilari-laattarungossa betonimenekin määrä on huomattavasti pienempi kuin kantavilla seinillä rakennettavan rakennuksen rungossa. Betonin määrän vähentyessä, myös rakennuksen hiilijalanjälki pienenee. Pilari-laattarungossa rakennusmateriaaleista aiheutuneiden hiilidioksidipäästöjen suuruus vähenisi noin 10 prosentilla verrattuna kantavilla seinillä tehtävään

runkoon (Mölsä 2021). Kantavien seinien puuttuminen rakennuksen rungosta parantaisi myös muuntojoustavuuden mahdollisuuksia. Runkojärjestelmän valinta tulee tehdä aikaisessa vaiheessa rakennuksen suunnittelussa, jolloin tässä työssä ei otettu kantaa sen tuottamiin päästövähennyksiin.

Julkisivun ratkaisulla voidaan myös vaikuttaa rakennusten hiilijalanjälkeen. Julkisivuverhouksen materiaalivaatimukset tulevat yleensä rakennuspaikan kaavamääräyksistä, jolloin julkisivun aiheuttamaan hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa vain kaavamääräysten sallimilla ehdoilla. Rakennus 2 julkisivuverhouksena on tiiliverhous, joka on ympäristöpäästöiltään suurempi kuin puuverhous tai betoninen ulkokuori. Tiilimuurauksen vaihtaminen ulkokuoreen vähentäisi rakennuksen 2 ympäristöpäästöjä 28,5 t CO₂e. Tiilimuuraus voidaan myös vaihtaa puuverhouksen ja betoni ulkokuoren lisäksi ohut- tai paksurappaukseen. Ulkoverhouksen aiheuttamia päästöjä voidaan pienentää vaihtamalla ulkoverhouksen materiaalia, mutta vaihdossa on kuitenkin huomioitava elinkaari vaikutus ja sen kautta rakennukselle aiheutuvat hiilidioksidipäästöt: tiilimuurauksella on pitkä käyttöikä, etenkin verrattuna puuverhoukseen ja rappaukseen.

Ei-kantavien väliseinien teräsranjan vaihtaminen puurunkoon vähentää ympäristöpäästöjä, sillä materiaalina teräs aiheuttaa enemmän hiilidioksidipäästöjä kuin puu. Kustannuksiltaan puurunko on materiaaleiltaan kalliimpi kuin teräsranka, kustannuseroa on noin 20 prosenttia. Ei-kantavien väliseinien teräsranjan muuttamisesta puurungoksi Rakennuksen 1 kokonaispäästöt pienenevät 14,4 t CO₂e ja Rakennuksen 2 kokonaispäästöt pienenevät 15,3 t CO₂e.

Molemmissa rakennuksissa on yläpohjan lämmöneristeenä puhallusvilla. Puhalluskivivillan vaihtaminen ympäristöpäästöiltään pienemmäksi puhallusselluvillaksi vähentää rakennusten hiilijalanjälkeä. Rakennuksessa 1 saavutettava kokonaispäästöjen pienentyminen vaihtamisen seurauksena on 20,6 t CO₂e ja Rakennuksen 2 kokonaispäästöt pienenevät 13,1 t CO₂e. Kustannuksiltaan puhalluskivivilla ja puhallusselluvilla ovat hyvin samaa luokkaa, joten selluvillan käyttäminen yläpohjan lämmöneristeenä on suositeltavaa päästöjen näkökulmasta.

Rakennuksen muuntojoustavuudella saadaan lisättyä rakennuksen elinkaaren aikaisia käyttötarkeitä. Muuntojoustavuutta varten tulisikin jo varhaisessa suunnitteluvaiheessa määrittää mahdolliset vaihtoehtoiset käyttöratkaisut rakennuksille. Rakenteiden ja tekniikan yhteensopivuuden

sekä rakenteiden ja rakenneosien liitoksien suunnittelu tulisi toteuttaa siten, että ne ovat tarpeen tullaessa helposti purettavissa ja muunneltavissa. Näiden suunnitelmien luominen etukäteen edesauttavat rakennusten muuntojoustavuuden toteutettavuutta. Muuntojoustavuudella voidaan myös mahdollistaa rakennukselle pitkän käyttöiän, joka pienentää rakennuksen elinkaaren ympäristöpäästöjä.

Myös rakennusten mahdollisten perusparannusten ja -korjausten hiilidioksidipäästöjen ennakointi ja niiden minimoiminen tulee ottaa suunnittelussa huomioon, kuin myös rakennuksen elinkaaren lopussa purkamisesta aiheutuvat päästöt. Rakennuksen purettavuus tulee siis suunnitella jo ennen kuin rakennusta on edes otettu käyttöön. Purkamisessa päästöjen minimointiin auttaa tarkat lisätaukset rakennuksessa käytetyistä materiaaleista, jolloin niiden kierrätys saadaan suunniteltua tarkasti. Myös rakennusten eri suunnittelualojen tarkat tietomallit helpottavat purkamisen suunnittelua.

Kiinteistön hoidon ja kunnossapidon ohjeistus ohjaa kohti käytönaikaisen hiilidioksidipäästöjen minimointiin. Ohjeistuksella opastetaan oikeaoppiseen käyttöön, jotta esimerkiksi kiinteistön energiankulutus pysyisi optimaalisena koko rakennuksen käytön aikana. Rakennuksen käyttöönoton jälkeinen päästövaikutusten arviointi tulisikin sisällyttää rakennuksen kiinteistöhuoltoon; rakennuksen käytöstä aiheutuvien ympäristöpäästöjen yhtäjaksoinen seuranta ja energiankulutuksen optimointi vähentävät kiinteistön käytön aikana aiheuttamia päästöjä ja kustannuksia. Rakennuksen käyttöönoton yhteydessä määritettävää arvoa nämä toimenpiteet eivät pienennä, mutta ohjaavat kohti tavoitetta, johon hiilijalanjäljen laskentakin perustuu eli ilmastonlämpenemisen pysäyttämiseen.

7.3.5 Optimoinnin tulokset

Suorittamalla kaikki edellä mainitut optimointi ratkaisut rakennuksille, saadaan rakennusten hiilijalanjälkeä ja siten rakennusten aiheuttamia ilmastopäästöjä pienennettyä. Yhteensä Rakennuksessa 1 hiilijalanjälkeä saadaan vähennettyä toimenpiteillä 2,33 kg CO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 480 t CO₂e. Tällöin Rakennuksen 1 hiilijalanjäljen arvoksi 11,67 kg CO₂e/m²/a ja rakennuksen kokonaispäästöiksi 2 404 t CO₂e. Rakennuksessa 1 tehokkain tapa pienentää hiilijalanjälkeä on vaihtaa kaukolämpö maalämmöksi. Rakennuksessa 2 hiilijalanjälkeä saadaan vähennettyä toimenpiteillä 0,97 kg CO₂e/m²/a eli kokonaispäästöinä 212 t CO₂e. Tällöin Rakennuksen 2 hiilijalanjäljen arvoksi 11,17

kg CO₂e/m²/a ja rakennuksen kokonaispäästöiksi 2 447 t CO₂e. Rakennuksessa 2 tehokkain tapa pienentää hiilijalanjälkeä on vaihtaa vähähiilisen betonin käyttäminen, erityisesti välipohjan paikallavaluissa.

Optimointi	Vaikutus hiilijalanjälkeen kgCO ₂ e/m ² /a		Vaikutus päästöihin t CO ₂ e	
	Rakennus 1	Rakennus 2	Rakennus 1	Rakennus 2
Kaukolämpö → maalämpö	- 1,68	-	- 346,08	-
Perustukset, vähähiilinen betoni	- 0,02	- 0,05	- 4,12	- 10,95
Alapohja, vähähiilinen betoni	- 0,04	- 0,02	- 8,24	- 4,38
Välipohja, vähähiilinen betoni	- 0,28	- 0,38	- 57,68	- 83,23
Rakennepaksuuden optimointi, kantavat väliseinät	- 0,06	- 0,1	- 12,36	- 21,90
Julkisivuverhouksen muutos	-	- 0,13	-	- 28,47
Ei-kantavien väliseinien teräs-ranka → puurunko	- 0,07	- 0,07	- 14,42	- 15,33
Puhallusvilla → puhallusselluvilla	- 0,1	- 0,06	- 20,6	- 13,14
Ostoenergian vähennys 5 %	- 0,08	- 0,16	- 16,5	- 35
Yhteensä vaikutus	- 2,33	- 0,97	- 479,98	- 212,45
Tulokset optimoinnin jälkeen	11,67 kgCO ₂ e/m ² /a	11,17 kgCO ₂ e/m ² /a	2 404 t CO ₂ e	2 447 t CO ₂ e

Taulukko 11 Optimoinnin vaikutukset rakennusten hiilijalanjälkeen ja kokonaispäästöihin

Jos Rakennuksessa 1 ei toteuteta energiamuodon vaihtamista kaukolämmöstä maalämpöön, ei muilla toimenpiteillä saada alennettua hiilijalanjälkeä riittävästi, jotta se alittaisi ehdotetun alustavan raja-arvon. Tällöin Rakennuksen 1 rakenteelliseen tai talotekniseen energiatehokkuuteen tulisi tehdä muutoksia, jotta hiilijalanjäljen määrä saataisiin pienennettyä ostoenergian kulutuksen kautta. ”Carbon footprint limits for common building types” – tutkimuksen suorittajien perusteella rakennushankkeissa olisi saavutettavissa 25 prosentin hiilidioksidipäästöjen vähennys, Rakennuksessa 1 taulukossa 12 mainittujen optimointivaihtoehtojen suorittaminen pienentäisi rakennuksen hiilijalanjälkeä noin 17 prosenttia ja Rakennuksessa 2 noin kahdeksan prosenttia. Päästöjen vähennyspotentiaali perustui tutkimuksessa maalämpöön, A-energialuokkaan, vähähiilisen betonin käyttöön ja runkoratkaisun vaihtamiseen puu- tai CLT-runkoon. Rakennusten hiilijalanjälkeä on jo optimoitu lähes kaikilla näillä tavoilla ja alustava raja-arvo saavutetaan näillä toimilla, joten tutkimuksen 25 prosentin päästövähennystä ei hankkeissa tavoitella.

Rakennusvaiheessa hiilijalanjälkeen voidaan vielä vaikuttaa minimoimalla mahdollisen hukan synty, tehostamalla kierrätystä, optimoimalla työmaan kuljetuksia ja käyttämällä vähähiilistä energiaa työmaan toiminnoissa. Rakennusmateriaalien hukka voidaan optimoida laskemalla menekki riittävällä tarkkuudella ja käyttämällä määrämittäisiä tuotteita mahdollisuuksien mukaan. Hukan minimoinnissa on myös tärkeää kiinnittää huomiota materiaalitoimitusten oikea-aikaisuuteen, tällöin vältetään välivarastoinnilta ja siitä aiheutuville rikkoutumisilta. Materiaalien varastoinnin tulisi olla oikeanlaista jokaiselle materiaalille, erityisesti säänsuojauksen osalta. Rakennusmateriaalien kierrätykseen ja jätehuoltoon tulee koko rakennustyömaan osallistua, riittävän selkeät ohjeet ja mahdollisuudet tehostavat näitä toimia. Ylijäämämaterialit tulee myös kierrättää mahdollisuuksien mukaan. Työmaakuljetusten optimoinnilla pyritään vähentämään kuljetuksista aiheutuvia päästöjä. Rakennusvaiheessa tavoiteltavat ympäristötavoitteet tulisi olla kirjattuina rakennushanketta ohjaavissa dokumenteissa. Rakennusvaiheessa tulee myös kiinnittää huomiota, että rakennusmateriaaleissa käytetään suunnittelijoiden määrittämiä vähähiilisiä materiaaleja tai materiaalien vaihdot tulee hyväksyttää suunnittelijoilla.

8 Pohdinta

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää toimeksiantajayritykselle, mistä rakennusten hiilidioksidipäästöt syntyvät sekä mitä hiilijalanjäljen laskenta vaatii. Yrityksessä on käytetty tähän asti ulkopuolista konsulttia rakennusten hiilijalanjäljen laskentaan, jonka vuoksi ei ole ollut tarkkaa ymmärrystä, miten hiilijalanjälki lasketaan tai mistä rakennuksen hiilijalanjälki koostuu. Tutkimuksen avulla luotiin myös käsitys, miten tulevaisuudessa vaadittava hiilijalanjäljen laskenta vaikuttaa rakennesuunnittelijan työhön käytännössä sekä kannattaako hiilijalanjäljen laskenta sisällyttää osaksi yrityksen palveluita.

Rakennusten vähähiilisyyden laskentaan perehdyttiin aluksi kirjallisuustutkimuksen avulla, jonka jälkeen hiilijalanjäljen laskenta suoritettiin laskentatyökalun avulla. Opinnäytetyössä laskentamenetelmänä pohjana toimi Ympäristöministeriön luomaa vähähiilisyyden arviointityökalua ja laskentatyökaluna One Click LCA. Laskenta toteutettiin kahdelle kohdeyrityksen rakennukselle, kohteiden lähtötiedot erosivat osittain toisistaan, edustaen kuitenkin kohdeyrityksen tyypillisiä rakennuksia. Hiilijalanjäljen optimoinnissa pyrittiin löytämään sellaisia vaihtoehtoja, joilla kustannukset pysyivät maltillisina ja jotka oli mahdollista toteuttaa rakennusten suunnitteluvaiheeseen

nähdän. Optimoinnissa keskityttiin laskennan tulosten perusteella havaittuihin ongelmakohtiin rakennuksen vähähiilisydessä, sekä vähemmän merkityksellisiin rakenneosiin, joilla kuitenkin saatiin hillittyä ilmastopäästöjä kustannustehokkaasti.

Rakennuksen hiilijalanjäljen arviointi kehittyy jatkuvasti, jolloin laskennasta tällä hetkellä saadut tulokset saattavat olla poikkeavia verrattuna tulevaisuudessa tehtäviin laskelmiin. Laskennassa on vielä paljon käytössä Suomen ympäristökeskuksen luomia taulukkoarvoja, ja laskentatyökalussa kaikkia arvoja ei pysty tarkasti määrittämään tai muuttamaan. Myös rakennusmateriaalien päästötiedot ovat tällä hetkellä vielä vajaita. Tuotevalmistajien lisätessä päästötietoja rakennusmateriaaleista, saadaan laskennasta entistä tarkempi ja totuudenmukaisempi. Päästötietojen lisääntyessä voidaan myös enemmän optimoida hiilijalanjälkeä valitsemalla tietty materiaalityyppi, jolta saadaan tarkat tiedot rakennusmateriaalien valmistuksen ilmastopäästöistä.

Tutkimuksen tulosten perusteella saatiin käsitys, että rakennusten elinkaaren vaiheista keskeisimmät päästölähteet ovat rakennusmateriaalien valmistus sekä käytönaikainen energia. Kokonaisuudessaan rakennusmateriaalien valmistuksesta aiheutuvat päästöt koko rakennusten päästöistä olivat lähes puolet. Rakennuksen energiamuodoista erityisesti kaukolämpö kasvattaa rakennuksen hiilijalanjälkeä selkeästi, kun taas maalämpö pienentää rakennuksen hiilijalanjälkeä. Tutkimuksen tuloksista voidaan myös päätellä, että rakennusosat, joissa vaaditaan suuria määriä valmisbetonia ja terästä, aiheuttavat merkittävät ilmastopäästöt rakennuksen elinkaaren aikana.

Optimoinnissa tehokkain tapa pienentää rakennuksen hiilijalanjälkeä oli vaihtaa rakennuksen energiamuoto kaukolämmöstä maalämmöksi. Maalämmön ansioista ostoenergian määrä väheni huomattavasti rakennuksessa, jolloin myös rakennuksen hiilijalanjälki pieneni. Rakennuksen massasta suurin osa muodostuu rakennuksen paikallavalettavasta välipohjasta, jolloin paikallavalun normaalin betonin vaihtaminen vähähiiliseksi betoniksi vähensi myös huomattavasti rakennusten hiilijalanjälkeä. Näiden keinojen lisäksi rakennuksen energiatehokkuuden parantamisella saadaan vähennettyä rakennuksen ilmastopäästöjä, mutta näiden tarkkaa vaikutusta rakennusten hiilijalanjäljen arvoon ei otettu tutkimuksessa huomioon.

Runkorakenteen valinta on rakennushankkeen yksi vaikuttavimmasta hiilijalanjäljen suuruuteen tehtävistä päätöksistä. Valinta tehdään jo hankkeen alkuvaiheessa, jolloin tulisi myös määrittää

hiilijalanjäljen tavoiteltu taso. Betonielementtirunkoinen rakennus aiheuttaa eri runkotyypeistä suurimmat hiilidioksidipäästöt teräsrungon jälkeen. Vaihtoehtona betonielementtirungolle on pilari-laattarunko, rankarakenteinen runko tai CLT-rakenteinen runko. Erityisesti puunkäyttö betonin korvaajan vähentää hiilidioksidipäästöjä rakennuskohteessa. Toimeksiantajayrityksessä on myös suoritettu puurakenteisille kohteille hiilijalanjäljen laskenta, hiilijalanjäljen keskiarvo näille kohteille on 12,25 kg CO₂e/m²/a ja hiilikädenjäljen keskiarvo – 6,31 kg CO₂e/m²/a (otannan suuruus 14 kohdetta). Betonirakenteisille kohteille suoritettujen hiilijalanjäljen keskiarvo on 13,56 kg CO₂e/m²/a ja hiilikädenjäljen keskiarvo – 1,39 kg CO₂e/m²/a (otannan suuruus viisi kohdetta). Näiden arvojen perusteella voidaan havaita, että puurakenteisten kohteiden hiilijalanjälki on lähes 10 prosenttia pienempi kuin betonirakenteisten kohteiden. Erityisesti hiilikädenjälki korostuu puurakenteisissa kohteissa, tähän vaikuttaa kasvattavasti hiilivarastojen suuruus.

Rakennushankkeiden hiilijalanjäljen laskennalle asetetut tavoitteet ja muutokset aiheuttavat haasteita rakennusosalalle, kuten koulutuksen järjestäminen, rakennusalan toimijoiden resurssien riittävyys, ”viherpesun” mahdollisuus ja Suomen sisäisten olosuhde-erojen huomioiminen laskelmissa. Erityisesti rakennusosalalla toimijoiden resurssien riittävyys vaihtelee huomattavasti rakennusalan suhdanteiden välillä, jolloin esimerkiksi ympäristöpäästöjä valvovalla rakennusvalvonnalla riittävien resurssien varmistaminen tulee ottaa huomioon jo ennen hiilijalanjäljen laskennan pakollisuutta. Hiilijalanjäljen laskenta vaatii kouluttautumiseen aikaa ja resursseja, jotka lisäävät kustannuksia yrityksille ja toimijoille, kuten kuitenkin aina kaikki uusi rakennusosalalla. Rakennusalan toimijoiden tulisi aloittaa valmistuminen hiilijalanjäljen laskentaa varten, jotta siirtymä vaapahehtoisuudesta pakollisuuteen toteutuisi mutkattomasti.

Vaatimukset ja tarve tiettyihin päästöarvoihin saattaa aiheuttaa etenkin rakennustuotevalmistajien keskuudessa viherpesua. Viherpesulla tarkoitetaan ympäristölle haitallisten rakennustuotteiden myymistä ympäristöystävällisinä tuotteina, taustalla on yleensä yrityksen toiminnan ja tuotteiden valmistuksen epäkohdat ympäristön näkökulmasta (Viherpesua vai ympäristövastuuta? 2021). Rakennustuotteet, joiden hiilidioksidipäästöt ovat todellisuutta huomattavasti pienemmät, vääristävät hiilijalanjäljenlaskennan tuloksia. Asetetut päästötavoitteet rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentämisestä kärsivät tällöin, kuin myös reilu kilpailutus alalla. Standardisoitu rakennustuotteiden ympäristöseloste kuitenkin vähentää tämän tapahtumista.

Rakennuspaikan hiilijalanjäljen laskentaa voidaan tutkimuksen perusteella pitää haasteena, erityisesti rakennuksen perustamistavan vuoksi. Tonteilla, joiden maaperä on pehmeää ja siten vaaditaan paalutusta, rakennuspaikan hiilijalanjälki on huomattava. Tämä ajaa rakennuttajia valikoimaan tonteista sellaisia, joiden maaperä on kantavaa jo ilman lisätoimenpiteitä. Kuitenkin kasvukeskuksissa rakennuspaikkaa ei yleensä voida valita maaperän perusteella, vaan tontin valinta perustuu tarpeelle ja tarjontaan. Ympäristöministeriön vähähiilisyden arviointimenetelmään ei sisällytetä tontin maaperää, jotta rakennuttajat saataisiin tasoarvoisempaan asemaan, sillä rakennettavan tontin olemassa olevaan maaperään harvoin pystytään vaikuttamaan. Myös rakennuspaikan kaavamääräykset asettavat hiilijalanjäljen laskennalle haasteita. Kaavamääräyksiä tehtäessä tulisikin ottaa huomioon mahdolliset vaikuttimet rakennuksen hiilijalanjäljelle, jotta tulevat raja-arvot voidaan saavuttaa rakennuspaikalla ilman liiallisia investointeja.

Suomen sisäiset olosuhde-erot tuottavat myös ongelmia hiilijalanjäljen laskentaan sillä rakentamisen sijoituksessa talviolosuhteisiin, vaaditaan enemmän energiaa kuin esimerkiksi kesäolosuhteissa. Rakentamisajankohta tulee siis ottaa huomioon laskennassa. Tiekartan (Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa 2017, 52) tavoitteena on laskea rakentamisen todelliset päästöt, mutta rakentamisajankohdan päästöille pohditaan myös taulukkoarvojen käyttöä. Taulukkoarvojen käyttö voi manipuloida tuloksia, sillä ilmasto-olosuhteet voivat muuttua suuresti eri vuosien välillä, esimerkiksi talven lumisuuden ja syksyn sateiden osalta. Rakentamisolosuhteiden lisäksi muuttujia laskentaan tuovat muun muassa rakennustyömaan maantieteellinen sijainti sekä mahdolliset erikoispiirteet. Myös kuljetusten taulukkoarvolla eriarvoistetaan rakennustyömaita. Voidaan olettaa, että pääkaupunkiseudulla rakennettavalle kohteelle kuljetukset voivat olla jopa taulukkoarvoa lyhyemmät, kun taas esimerkiksi Ivaloon rakennettavaan kohteeseen todelliset kuljetusetäisyydet huomattavasti pidemmät. Tällä tavalla voidaan suorittaa hankkeille ilmastopäästöjen pienentämistä ilman todellista päästövähennystä eli pyritään valitsemaan vaihtoehdoista se, jolla saadaan parhaimmat mahdolliset tulokset. Kuitenkin on tärkeää muistaa, että työmaita ei tulisi asettaa liian epätasa-arvoiseen asemaan. Jos tulevaisuudessa asetettavat raja-arvot ovat tiukat, tullaanko Pohjois-Suomeen rakentamaan, jolloin päästöt kuljetuksista ja sääolosuhteissa ovat jo itsessään liian suuret rakennushankkeeseen nähden?

Rakennusten hiilijalanjälki lasketaan ja raportoidaan yleensä suunnittelu- ja toteutusvaiheessa. Käyttöönottoaiheessa tulisikin todentaa rakennuksen hiilijalanjälki toteutuneilla tiedoilla, jotta

hankkeen vähähiilisyyden voitaisiin todentaa olevan suunnitelmien mukainen. Käyttöönottovaiheessa tilojen, laitteiden ja järjestelmien toimivuus tulisi myös tarkastaa sekä kiinteistön omistaja opastaa oikeaoppiseen käyttöön, jotta esimerkiksi kiinteistön energiankulutus pysyisi optimaalisena sekä rakennuksen tavoiteltu käyttöikä saavutettaisiin. Haasteita rakennuksen käytönaikaisen hiilijalanjäljen arviointiin aiheuttaa myös se, ettei rakennuksen asukkaiden elintapaa eikä taloyhtiön suorittamien huoltotoimenpiteiden laajuutta ja oikeellisuutta voida ennustaa. Oikeaoppisella käytöllä rakennuksen käytön aikaista ilmastopäästöä voidaan jopa saada pienennettyä laskennallisesta päästötasosta.

One Click LCA - arviointityökalua käytettäessä tultiin siihen lopputulokseen, että työkalun käyttö soveltuu toimeksiantajayrityksen käyttöön. Tietomallien hyödyntäminen laskennan määrätietojen lähtötietona on tehokasta ja tarkkaa. Laskennan tarkkuuden parantamiseksi ja tehostamiseksi, erityisesti yrityksen sisäisiin mallinnustapaohjeisiin joudutaan tekemään tarkentavia toimenpiteitä. Tarkentavilla toimenpiteillä saadaan varmistettua laskennan yhtenäisyys ja laatu.

Rakennushankkeiden hiilijalanjäljen laskenta on kokonaisuudessaan tavoitteiltaan saavutettavissa oleva. Rakennetun ympäristön osuuden aiheuttamat ilmastopäästöt ovat huomattava tekijä kaikista Suomen ilmastopäästöistä, rakennusalaalla hiilijalanjälkeen voidaan kuitenkin vaikuttaa usealla eri tavalla, ja vaikutuskeinoilla saadaan vähennettyä merkittävästi rakennuksen elinkaaren aikana aiheutuvia ilmastopäästöjä. Huolellisella ennakkosuunnittelulla ja tavoitteiden asettamisella vaikutuskeinot voidaan saavuttaa ja siten hillitä rakennetun ympäristön vaikutusta ilmastonlämmemisessä.

Lähteet

BIM for sustainable building design with Model Checker. N.d. One Click LCA Oy. Viitattu 16.1.2023. <https://www.oneclicklca.com/fi/bim-for-sustainable-building-design-with-one-click-lca-model-checker/>

BY-vähähiilisyysluokitus. N.d. Suomen Betoniyhdistys ry. Viitattu 25.1.2023. <https://vahahiilinen-betoni.fi/>

Bruce-Hyrkäs, T. & Tuominen, T. & Tähtinen, L. 2022. Hiilineutraali rakennus. Green Building Council Finland.

Carbon footprint limits for common building types. 2021. One Click LCA Oy Ltd.

How to deliver a Building Information Model for LCA automation. N.d. One Click LCA Oy. Viitattu 16.1.2023. <https://www.oneclicklca.com/fi/bim-based-life-cycle-assessment-guidelines/>

Huttunen, E. 2021. Kiertotalous rakennetussa ympäristössä. Rakennustieto Oy.

Häkkinen, T. & Kuittinen, M. 2020. Kohti vähähiilistä rakentamista - opas arviointiin ja suunnitteluun. Rakennustieto Oy.

Kansainvälinen ilmasto-politiikka. N.d. Ympäristöministeriö. Viitattu 9.1.2023. <https://ym.fi/kansainvalinen-ilmastopolitiikka>

Kohti vähähiilistä julkista rakentamista. 2017. Ympäristöministeriö.

L 423/2022. Ilmastolaki. Annettu 1.7.2022. Viim. muutos 1.3.2023. Viitattu 1.3.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2022/20220423>

Level(s), What's in it for architects, designers, engineers and quantity surveyors? 2021. European Commission. Viitattu 9.1.2023. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/550618>

Life Cycle Assessment For Buildings - Why it matters and how to use it. 2021. One Click LCA Ltd.

Maankäyttö- ja rakennuslaki uudistuu, tietoa lakiuudistuksesta. N.d. Ympäristöministeriö. Viitattu 20.12.2022. <https://mrluudistus.fi/tietoa-lakiuudistuksesta/>

Mölsä, S. 2021. Pilari-laattarunko voisi vähentää betonirakennuksen ilmastopäästöjä – Kalasataman tornissa se myös nopeutti selvästi rakentamista. Rakennuslehti 22.4.2021. Viitattu 22.2.2023. <https://www.rakennuslehti.fi/2021/04/pilari-laattarunko-voisi-vahentaa-betonirakennuksen-ilmastopaastoja-kalasataman-tornissa-se-mynos-nopeutti-selvasti-rakentamista/>

Ojasalo, K. & Moilanen, T. & Ritalahti, J. 2015. Kehittämistyön menetelmät - Uudenlaista osaamista liiketoimintaan. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

One Click LCA. N.d. One Click LCA Oy. Viitattu 13.1.2023. <https://oneclicklcaapp.com/>

Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen - pääsuunnittelija ja arkkitehti. 2022. A-Insinöörit. Viitattu 21.12.2022. <https://www.ains.fi/oppaat/buildinglife-pikaoppaat-vahahiiliseen-rakentamiseen>

Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen - rakennesuunnittelija. 2022. A-Insinöörit. Viitattu 21.12.2022. <https://www.ains.fi/oppaat/buildinglife-pikaoppaat-vahahiiliseen-rakentamiseen>

Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen - rakennustuotevalmistaja. 2022. A-Insinöörit. Viitattu 21.12.2022. <https://www.ains.fi/oppaat/buildinglife-pikaoppaat-vahahiiliseen-rakentamiseen>

Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen - rakennuttaja. 2022. A-Insinöörit. Viitattu 21.12.2022. <https://www.ains.fi/oppaat/buildinglife-pikaoppaat-vahahiiliseen-rakentamiseen>

Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen - talotekninen suunnittelija. 2022. A-Insinöörit. Viitattu 21.12.2022. <https://www.ains.fi/oppaat/buildinglife-pikaoppaat-vahahiiliseen-rakentamiseen>

Pikaopas vähähiiliseen rakennuttamiseen - urakoitsija. 2022. A-Insinöörit. Viitattu 21.12.2022. <https://www.ains.fi/oppaat/buildinglife-pikaoppaat-vahahiiliseen-rakentamiseen>

Rakennuksen elinkaaren arviointityökalu. 2019. Sitra. Viitattu 7.12.2022. <https://www.sitra.fi/caset/rakennusten-elinkaaren-arviointityokalu/>

Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. 2019. Ympäristöministeriö. Viitattu 3.1.2023. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyyden tiekartta 2020–2035–2050. 2020. Rakennusteollisuus RT ry.

RAKLI:n vähähiilisyyden tiekartta. 2020. RAKLI.

Röck, M. & Sørensen, A. & Steinmann, J. & Horup, L. & Le Den, X. & Birgisdottir, H. 2022. Towards EU embodied carbon benchmarks for buildings – Setting the baseline: A bottom-up approach. Viitattu 20.2.2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5895051>

Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa. 2017. Bionova Oy. Viitattu 19.12.2022. <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>

Toikko, R. & Rantanen, R. 2009. Tutkimuksellinen kehittämistoiminta. Viitattu 5.12.2022. https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/100802/Toikko_Rantanen_Tutkimuksellinen_kehittamistoiminta.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Viherpesua vai ympäristövastuuta? 2021. Joutsenmerkki. Viitattu 16.2.2023. <https://joutsenmerkki.fi/viherpesua-vai-ymparistovastuuta/>

Viranomaisnäkökulma rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkihjaukseen. 2017. RTY ry.

Vähähiilinen betoni. N.d. Betoniteollisuus ry. Viitattu 23.1.2023. <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/vahahiilinen-betoni/>

Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. N.d. Ympäristöministeriö. Viitattu 20.12.2022. <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>

Vähähiiliset tiekartat 2035. N.d. Työ- ja elinkeinoministeriö. Viitattu 20.12.2022. <https://tem.fi/tiekartat>

Vähähiilisyyden mahdollisuuksien tarkastelu. 2020. Rakennusteollisuus RT ry.

Ympäristöluokitukset. 2022. Green Building Council Finland. Viitattu 9.1.2023. <https://figbc.fi/ymparistoluokitukset/>

Liitteet

Liite 2. Rakennus 1 energiatodistus

ENERGIATODISTUS 2018

LUONNOSVERSIO - virallinen todistus ARA:n valvontajärjestelmästä

Rakennuksen nimi ja osoite: **Rakennus 1**
Kaukolampo

Pysyvä rakennustunnus:
Rakennuksen valmistumisvuosi:
Rakennuksen käyttötarkoitusluokka:
Asuinkerrostalot (käyttötarkoitusluokka 2)
Todistustunnus:

Energiatodistus on laadittu:
Uudelle rakennukselle rakennuslupaa haettaessa

	Energiatehokkuusluokka
A	A 2018
B	
C	
D	
E	
F	
G	

Rakennuksen laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluku eli E-luku	kWh _E /m ² vuosi
Uuden rakennuksen E-luvun vaatimus	74
(Huom! Ylläoleva on 2018 säädöksiin vaatimustaso mahdolliset helpotukset huomioiden)	90

Todistuksen laatija:	Yritys:
Sähköinen allekirjoitus:	

Todistuksen laatimispäivä:	Viimeinen voimassaolopäivä:
----------------------------	-----------------------------

Huom! Todistuksessa esitetyt lukuja/lasketatuloksia ei tule käyttää Lämpöpumppujen/lämmitysjärjestelmän valintaan.

YHTEENVETO RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUDESTA													
Laskennallinen ostoenergiankulutus ja energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku)													
Lämmitetty nettoala, m ²	3523												
Lämmitysjärjestelmän kuvaus	Kaukolämpö, vesikiertoinen patterilämmitys, märkätiloissa sähkölämmitys / Kaukolämpö, kiertajohto + jako												
Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus	Huoneistokohtainen ilmanvaihto LTO:lla (Parmair 105 MAC), kaikki tilat LTO:n piirissä												
Käytettävä energiamuoto	Vakioidulla käytöllä laskettu ostoenergia		Energiamuodon kerroin	Energiamuodon kertoimella painotettu energiankulutus									
	kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)		kWhE/(m ² vuosi)									
Sähkö	147649	42	1.20	50.3									
Kaukolämpö	161001	46	0.50	22.9									
Sähkön kulutukseen sisältyvä valaistus- ja kuluttajalaitesähkö	94452	26.8											
Energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku)				74									
Rakennuksen energiatehokkuusluokka													
Käytetty E-luvun luokitteluasteikko	Asuinkerrostalot												
Luokkien rajat asteikolla	<table border="1"> <tr> <td>A: ...75</td> <td>B: 76 ... 100</td> <td>C: 101 ... 130</td> </tr> <tr> <td>D: 131 ... 160</td> <td>E: 161 ... 190</td> <td>F: 191 ... 240</td> </tr> <tr> <td>G: 241 ...</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				A: ...75	B: 76 ... 100	C: 101 ... 130	D: 131 ... 160	E: 161 ... 190	F: 191 ... 240	G: 241 ...		
A: ...75	B: 76 ... 100	C: 101 ... 130											
D: 131 ... 160	E: 161 ... 190	F: 191 ... 240											
G: 241 ...													
Tämän rakennuksen energiatehokkuusluokka	A												
<p>E-luku perustuu rakennuksen laskennallisiin kulutuksiin ja energiamuotojen kertoimiin. Kulutus on laskettu vakioidulla käytöllä lämmitettyä nettoalaa kohden, jolloin eri rakennusten E-luvut ovat keskenään vertailukelpoisia. Vakioidusta käytöstä johtuen E-luku ei sovellu yksittäisen rakennuksen toteutuneen ja laskennallisen kulutuksen vertailuun. E-lukuun sisältyy rakennuksen lämmitys-, ilmanvaihto-, jäähdytysjärjestelmien sekä kuluttajalaitteiden ja valaistuksen energiankulutus. Rakennuksen silloin silloin kulutukset kuten autolämmityspistokkeet, sulanapolttlämmitykset ja ulkovalot eivät sisälly E-lukuun.</p>													
TOIMENPIDE-EHDOTUKSIA E-LUVUN PARANTAMISEKSI													
Keskeiset suositukset rakennuksen E-lukua parantaviksi toimenpiteiksi (ei koske uusia rakennuksia)													
Suositukset on esitetty yksityiskohtaisemmin sivulla 6 ja 7, kohdassa "Toimenpide-ehdotukset E-luvun parantamiseksi".													

E-LUVUN LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT				
Rakennuskohde				
Rakennuksen käyttötarkoituusluokka	Asuinkerrostalot (käyttötarkoituusluokka 2) (Asuinkerrostalot)			
Rakennuksen valmistumisvuosi	Lämmitetty nettoala		3523	m ²
Rakennusvaippa				
Ilmanvuotoluku q50	1.5	m ³ /(h m ²)		
	A m ²	U W/(m ² K)	UxA W/K	Osuus lämpöhäviöstä %
Ulkoseinät	1673.90	0.17	287.84	29.84
Yläpohja	448.30	0.09	40.35	4.18
Alapohja	448.30	0.16	71.73	7.44
Ikkunat	461.52	1.00	461.52	47.85
Ulko-ovet	12.80	1.00	12.80	1.33
Kylmäsiilat	-	-	90.27	9.36
Ikkunat ilmansuunnittain				
	A m ²	U W/(m ² K)	g _{kohtisuora} -arvo	
Pohjoinen	149.10	1.00	0.58	
Itä	60.48	1.00	0.58	
Etelä	178.50	1.00	0.58	
Länsi	73.44	1.00	0.58	
Koillinen	-	-	-	
Kaakko	-	-	-	
Lounas	-	-	-	
Luode	-	-	-	
Ilmanvaihtojärjestelmä				
Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus:	Huoneistokohtainen ilmanvaihto LTO:lla (Parmair 105 MAC), kaikki tilat LTO:n piirissä			
	Ilmavirta tulo/poisto (m ³ /s) / (m ³ /s)	Järjestelmän SFP-luku kW/(m ³ /s)	LTO:n lämpötilasuhde	Jäätymisenesto C
Pääilmanvaihtokoneet	1.409 / 1.409	1.40	78,1	0.90
Erillispoistot	-	-	-	-
Ilmanvaihtojärjestelmä	1.409 / 1.409	1.40	-	-
Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän LTO:n vuosihyötysuhde:	72.03 %			
Lämmitysjärjestelmä				
Lämmitysjärjestelmän kuvaus:	Kaukolämpö, vesikiertoinen patterilämmitys, märkätiloissa sähkölämmitys / Kaukolämpö, kiertojohdo + ja			
	Tuoton hyötysuhde	Jaon ja luovutuk- sen hyötysuhde	Lämpö- kerroin (1)	Apulaitteiden sähkönkäyttö (2) kWh/(m ² vuosi)
Tilojen ja iv:n lämmitys	0.97	84 %		2.35
LKV:n valmistus	0.97	97 %		0.25
	Määrä kpl	Tuotto kWh		
Varaava tulisija				
Ilmalämpöpumppu				
Jäähdytysjärjestelmä				
	Jäähdytyskauden painotettu kylmäkerroin			
Jäähdytysjärjestelmä				
Lämmin käyttövesi				
	Ominaiskulutus dm ³ /(m ² vuosi)	Lämmitysenergian nettotarve kWh/(m ² vuosi)		
Lämmin käyttövesi	510.00	30		
Sisäiset lämpökuormat eri käyttöasteilla				
	Käyttöaste	Henkilöt W/m ²	Kuluttajalaitteet W/m ²	Valaistus W/m ²
Henkilöt ja kuluttajalaitteet	60 %	3.00	4.00	
Valaistus	10 %			6.60

E-LUVUN LASKENNAN TULOKSET				
Rakennuskohde				
Rakennuksen käyttötarkoitusluokka	Asuinkerrostalot (käyttötarkoitusluokka 2) (Asuinkerrostalot)			
Rakennuksen valmistumisvuosi				
Lämmitetty nettoala, m ²	3523			
E-luku, kWhE/(m ² vuosi)	74 (< raja=90)			
E-luvun erittely				
Käytettävät energiamuodot	Vakioidulla käytöllä Laskettu ostoenergia kWh/vuosi	Energiamuodon Kerroin	Energiamuodon kertoimella painotettu energiankulutus	
			kWhE/vuosi	kWhE/(m ² vuosi)
Sähkö	147649	1.20	177179	50.3
Kaukoliämpö	161001	0.50	80501	22.9
YHTEENSÄ	308650		257679	73.1
Rakennuksen ympäristössä olevasta energiasta olettu energia, hyödynnetty osuus (kuukausitason erittely lisätiedoissa)				
		kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	
Rakennuksen teknisten järjestelmien energiankulutus				
		Sähkö kWh/(m ² vuosi)	Lämpö kWh/(m ² vuosi)	Kaukojäähdytys kWh/(m ² vuosi)
Lämmitysjärjestelmä				
Tilojen lämmitys (1)		2.4	8.1	
Tuloilman lämmitys		6.0		
Lämpimän käyttöveden valmistus		0.3	37.8	
Ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiankulutus		4.9		
Jäähdytysjärjestelmä				
Kuluttajalaitteet ja valaistus		26.8		
YHTEENSÄ		40.3	45.9	0
(1) Ilmanvaihtojärjestelmän tuloilman lämpeneminen tilassa ja korvausilman lämmitys kuuluu tilojen lämmitykseen				
Energian nettotarve				
		kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	
Tilojen lämmitys (2)		24144	7	
Ilmanvaihtojärjestelmän lämmitys (3)		21045	6	
Lämpimän käyttöveden valmistus		104809	30	
Jäähdytys		0	0	
(2) sisältää vuotoilman, korvausilman ja tuloilman lämpenemisen tilassa				
(3) laskettu lämmöntalteenoton kanssa				
Lämpökuumat				
		kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	
Aurinko		89972	25.54	
Ihmiset		55551	15.77	
Kuluttajalaitteet		74068	21.02	
Valaistus		20369	5.78	
Lämpimän käyttöveden kierrosta ja varastoinnin häviöstä		12615	3.58	
Laskentatyökalun nimi ja versio numero				
Laskentatyökalun nimi ja versio numero	www.laskentapalvelut.fi, versio 1.4 (01.12.2019)			

Liite 5. Rakennus 2 energiatodistus

ENERGIATODISTUS 2018

Rakennuksen nimi ja osoite: Rakennus 2

Pysyvä rakennustunnus:

Rakennuksen valmistumisvuosi: 2021

Rakennuksen käyttötarkoitusluokka: Asuinkerrostalot, joissa on asuinkerroksia vähintään kolmessa kerroksessa

Todistustunnus: 250842

Energiatodistus on laadittu

Uudelle rakennukselle rakennuslupaa haattaessa

Uudelle rakennukselle käyttöönottoaiheessa

Olemassa olevalle rakennukselle, havainnointikäynnin päivämäärä:

	Energiatehokkuusluokka
A	A 2018
B	
C	
D	
E	
F	
G	

Rakennuksen laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluku eli E-luku: 72

Uuden rakennuksen E-luvun vaatimus: ≤ 90

kWh_e/(m²vuosi)

Todistuksen laatija: _____

Yritys: _____

Sähköinen allekirjoitus:

Todistuksen laatimispäivä: _____

Viimeinen voimassaolopäivä: _____

YHTEENVETO RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUDESTA													
Laskennallinen ostoenergiankulutus ja energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku)													
Lämmitetty nettoala	3908,7 m ²												
Lämmitysjärjestelmän kuvaus	Maalämpöpumppu, Sähkö Vesikiertoinen lattia- ja patterilämmitys, märkät. sähkölattialämmitys												
Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä lämmöntalteenotolla												
Käytettävä energiamuoto	Vakioidulla käytöllä laskettu ostoenergia		Energiamuodon kerroin	Energiamuodon kertoimella painotettu energiankulutus									
	kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	-	kWh _E /(m ² vuosi)									
kaukolämpö	234451	60	0,5	72									
sähkö			1,2										
uusiutuva polttoaine			0,5										
fossiilinen polttoaine			1										
kaukojäähdytys			0,28										
Energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku)				72									
Rakennuksen energiatehokkuusluokka													
Käytetty E-luvun luokittelusteikko	2. Asuinkerrostalot												
Luokkien rajat asteikolla	<table border="1"> <tr> <td>A: ... 75</td> <td>B: 76 ... 100</td> <td>C: 101 ... 130</td> </tr> <tr> <td>D: 131 ... 160</td> <td>E: 161 ... 190</td> <td>F: 191 ... 240</td> </tr> <tr> <td>G: 241 ...</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				A: ... 75	B: 76 ... 100	C: 101 ... 130	D: 131 ... 160	E: 161 ... 190	F: 191 ... 240	G: 241 ...		
A: ... 75	B: 76 ... 100	C: 101 ... 130											
D: 131 ... 160	E: 161 ... 190	F: 191 ... 240											
G: 241 ...													
Tämän rakennuksen energiatehokkuusluokka	A												
<p>E-luku perustuu rakennuksen laskennallisiin kulutuksiin ja energiamuotojen kertoimiin. Kulutus on laskettu vakioidulla käytöllä lämmitettyä nettoalaa kohden, jotta eri rakennusten E-luvut ovat keskenään vertailukelpoisia. Vakioidusta käytöstä johtuen E-luku ei sovellu yksittäisen rakennuksen toteutuneen ja laskennallisen kulutuksen vertailuun. E-lukuun sisältyy rakennuksen lämmitys-, ilmanvaihto-, jäähdytysjärjestelmien sekä kuluttajalaitteiden ja valaistuksen energiankulutus. Rakennuksen ulkopuoliset kulutukset kuten autolämmityspistokkeet, sulanapitolämmitykset ja ulkovalot eivät sisälly E-lukuun.</p>													
TOIMENPIDE-EHDOTUKSIA E-LUVUN PARANTAMISEKSI													
Keskeiset suositukset rakennuksen E-lukua parantaviksi toimenpiteiksi (ei koske uusia rakennuksia)													
Suositukset on esitetty yksityiskohtaisemmin sivuilla 6 ja 7, kohdassa "Toimenpide-ehdotukset E-luvun parantamiseksi".													

E-LUVUN LASKENNAN LÄHTÖTIEDOT				
Rakennuskohde				
Rakennuksen käyttötarkoitusluokka	Asuinkerrostalot, joissa on asuinkerroksia vähintään kolmessa kerroksessa			
Rakennuksen valmistumisvuosi	2021	Lämmitetty nettoala	3908,7	m ²
Rakennusvaippa				
Ilmanvuotoluku q ₅₀	1,0	m ³ /(h m ²)		
	A	U	U×A	Osuus lämpöhäviöistä
	m ²	W/(m ² K)	W/K	%
Ulkoseinät	2045,7	0,19	388,7	25 %
Yläpohja	426,5	0,09	38,4	2 %
Alapohja	426,5	0,41	174,9	11 %
Ikkunat	859,8	1,00	859,8	54 %
Ulko-ovet	14,8	1,00	14,8	1 %
Kylmäsiilat	-	-	106,5	7 %
Ikkunat ilmansuunnittain				
	A	U	g_{substanssi}-arvo	
	m ²	W/(m ² K)	-	
Pohjoinen	160,2	1,00	0,58	
Koillinen	0,0			
Itä	200,8	1,00	0,58	
Kaakko	0,0			
Etelä	263,5	1,00	0,56	
Lounas	0,0			
Länsi	235,3	1,00	0,58	
Luode	0,0			
Ilmanvaihtojärjestelmä				
Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus:	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä lämmöntalteenotolla			
	Ilmavirta tulo/poisto	Järjestelmän SFP-luku	LTO:n lämpötilasuhde	Jäätymisenesto
	(m ³ /s) / (m ³ /s)	kW / (m ³ /s)	-	°C
Pääilmanvaihtokoneet	1,954 / 1,954	1,50	77 %	5,00
Erillispoistot	0,000 / 0,000	0,00	-	-
Ilmanvaihtojärjestelmä	1,954 / 1,954	1,50	-	-
Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän LTO:n vuosihyötysuhde:	72 %			
Lämmitysjärjestelmä				
Lämmitysjärjestelmän kuvaus:	Maalämpöpumppu, Sähkö Vesikiertoinen lattia- ja patterilämmitys, märkätk. sähkölattialämmitys			
	Tuoton hyötysuhde	Jaon ja luovutuksen hyötysuhde	Lämpökerroin¹	Apulaitteiden sähkönkäyttö²
	-	-	-	kWh/(m ² vuosi)
Tilojen ja iv:n lämmitys		85 %	4,2	2,2
Lämpimän käyttöveden valmistus		97 %	2,8	0,5
¹ vuoden keskimääräinen lämpökerroin lämpöpumpulle				
² lämpöpumppujärjestelmissä voi sisältyä vuoden keskimääräiseen lämpökertoimeen				
	Määrä	Tuotto		
	kpl	kWh/vuosi		
Varaava tulisija				
Ilmalämpöpumppu				
Jäähdytysjärjestelmä				
	Jäähdytyskauden painotettu kylmäkerroin			
	-			
Jäähdytysjärjestelmä	30,00			
Lämmin käyttövesi				
	Ominaiskulutus	Lämmitysenergian nettotarve		
	dm ³ /(m ² vuosi)	kWh/(m ² vuosi)		
Lämmin käyttövesi	510	30		
Sisäiset lämpökuormat eri käyttästeilla				
	Käyttöaste	Henkilöt	Kuluttajalaitteet	Valaistus
	-	W/m ²	W/m ²	W/m ²
	10 %			7,0
	60 %	3,0	4,0	

Todistustunnus: 250842, 3/8

E-LUVUN LASKENNAN TULOKSET				
Rakennuskohde				
Rakennuksen käyttötarkoitussuokka	Asuinkerrostalot, joissa on asuinkerroksia vähintään kolmessa kerroksessa			
Rakennuksen valmistumisvuosi	2021			
Lämmitetty nettoala, m ²	3908,7			
E-luku, kWh _e / (m ² vuosi)	72			
E-luvun erittely				
Käytettävät energiamuodot	Vakioidulla käytöllä laskettu ostoenergia kWh/vuosi	Energiamuodon kerroin -	Energiamuodon kertoimella painotettu energiankulutus kWh _e /vuosi kWh _e /(m ² vuosi)	
kaukolämpö		0,5		
sähkö	234451	1,2	281341	72
uusiutuva polttoaine		0,5		
fossiilinen polttoaine		1		
kaukojäähdytys		0,28		
YHTEENSÄ	234451		281341	72
Rakennuksen ympäristössä olevasta energiasta otettu energia, hyödynnetty osuus (kuukausitason erittely lisätiedoissa)				
		kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	
Aurinkosähkö		800	0	
Aurinkolämpö				
Tuulisähkö				
Lämpöpumpun lämmönlähteestä otama energia		158485	41	
Muu ympäristöstä otettu energia, sähkö				
Muu ympäristöstä otettu energia, lämpö				
Rakennuksen teknisten järjestelmien energiankulutus				
		Sähkö kWh/(m ² vuosi)	Lämpö kWh/(m ² vuosi)	Kaukojäähdytys kWh/(m ² vuosi)
Lämmitysjärjestelmä				
Tilojen lämmitys ¹			19,5	-
Tuloilman lämmitys			9,0	-
Lämpimän käyttöveden valmistus			39,7	-
Ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergiankulutus	6,5		-	-
Jäähdytysjärjestelmä	0,1		0,0	-
Kuluttajalaitteet ja valaistus	27,3		-	-
YHTEENSÄ		33,9	68,1	0,0
¹ ilmanvaihdon tuloilman lämpeneminen tilassa ja korvausilman lämmitys kuuluu tilojen lämmitykseen				
Energian nettotarve				
		kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	
Tilojen lämmitys ²		64428	16	
Ilmanvaihdon lämmitys ²		35063	9	
Lämpimän käyttöveden valmistus		116284	30	
Jäähdytys		8037	2	
¹ sisältää vuotoilman, korvausilman ja tuloilman lämpenemisen tilassa				
² laskettu lämmöntalteenoton kanssa				
Lämpökuormat				
		kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	
Aurinko		107372	27	
Henkilöt		61632	16	
Kuluttajalaitteet		82177	21	
Valaistus		23968	6	
Lämpimän käyttöveden kierrosta ja varastoinnin häviöistä		14977	4	
Laskentatyökalun nimi ja versio numero				
Laskentatyökalun nimi ja versio numero	IDA Indoor Climate and Energy, version 4.802			