



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**VÄHÄHIILINEN KERROSTALORAKENTAMINEN
– OPTIMIRATKAISUT
VIHREÄ KORTTELI -KONSEPTIIN**

Emma-Sofia Härkönen

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö 2020

TIIVISTELMÄ

Vähähiilinen kerrostalorakentaminen – optimiratkaisut Vihreä Kortteli -konseptiin

Emma-Sofia Härkönen

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2020, 104 s. + 1 liite

Työn ohjaajat yliopistolla: Antti Niemi, Tanja Kolli, Ulla Haverinen-Shaughnessy

Diplomityön tavoitteena oli laskea betonirunkoisen asuinkerrostalon hiilijalanjälki ja etsiä keinoja hiilijalanjäljen pienentämiseen. Tutkimuksen kohteena oli Rakennustehon Vihreä Kortteli -konsepti ja laskennassa käytettiin yhtä tulevan Korttelin kerrostaloista.

Laskentaa varten rakennus mallinnettiin Tekla Structures -mallinnusohjelmistolla materiaalmäärien arviointia varten ja energiankulutus arvioitiin Cadmatic HVAC -ohjelmistolla. Hiilijalanjälkilaskenta suoritettiin One Click LCA -elinkaarilaskenta-työkalulla ja laskentamenetelmäksi valikoitui pilotointivaiheessa oleva Ympäristöministeriön menetelmä. Tutkimuksen kohteena olevalle rakennukselle laskettiin hiilijalanjälki Rakennustehon aikaisemmin käytössä olevilla referenssirakennetyypeillä. Laskennan tuloksena referenssikohteen elinkaarenaikaiseksi hiilijalanjäljeksi saatiin 17,59 kgCO₂e/m²/v ja hiilikädenjäljeksi -3,84 kgCO₂e/m²/v. Rakennuksen E-luvun arvoksi saatiin 90. Seuraavaksi rakennetyypit vaihdettiin yksi kerrallaan tutkittaviin vaihtoehtoisiin rakennetyyppeihin ja laskenta suoritettiin uudelleen. Diplomityössä tutkittiin myös energiatehokkuutta parantavia ratkaisuja.

Tulosten perusteella muodostettiin kaksi optimitapausta, Optimi 1 ja Optimi 2. Optimi 1:seen valittiin mahdollisimman pienen hiilijalanjäljen omaavat rakennetyypit ja Optimi 2:seen valittiin rakennetyypit, joilla hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen summa saatiin mahdollisimman pieneksi. Optimi 1 -ratkaisun E-luvuksi saatiin 87, elinkaarenaikaiseksi hiilijalanjäljeksi 12,09 kgCO₂e/m²/v ja hiilikädenjäljeksi -5,09 kgCO₂e/m²/v. Optimi 2 -ratkaisun E-luvun arvoksi saatiin 69, hiilijalanjäljeksi 13,01 kgCO₂e/m²/v ja hiilikädenjäljeksi -9,01 kgCO₂e/m²/v. Suurimmat vähennykset hiilijalanjäljessä saatiin

käyttämällä rakennusmateriaalina betonin sijasta puuta, vaihtamalla massiiviset teräsbetoni laatat ontelolaatoiksi, korvaamalla ainakin osa betonin sisältämästä sementistä vaihtoehtoisilla materiaaleilla, valitsemalla lämmitysmuodoksi kaukolämmön sijaan maalämpöjärjestelmä ja parantamalla ulkopintojen energiatehokkuutta.

Rakennuksen hiilijalanjäljen suuruuteen voidaan vaikuttaa merkittävästi ennen rakentamista tehdyillä päätöksillä ja tässä työssä hiilijalanjälki pieneni lähes 30 % Optimi 1-ratkaisussa referenssikohteeseen verrattuna. Tuleva rakennuksen hiilijalanjäljelle asetettava raja-arvo velvoittaa talonrakennusprosessiin alkavaa huomioimaan rakennuksen elinkaarenaikaisen hiilijalanjäljen ja huolehtimaan, että se asettuu raja-arvon alapuolelle. Kerrostalojen hiilijalanjälki on keskimäärin suuri, sillä niiden yleisin rakennusmateriaali on betoni ja lämmitysmuoto kaukolämpö.

Asiasanat: Elinkaariarviointi, hiilijalanjälki, hiilikädenjälki, asuinkerrostalo

ABSTRACT

Low-carbon apartment building construction – optimal solutions for Green Block concept

Emma-Sofia Härkönen

University of Oulu, Degree Programme in Civil Engineering

Master's thesis 2020, 104 pp. + 1 Appendix

Supervisors at the university: Antti Niemi, Tanja Kolli, Ulla Haverinen-Shaughnessy

The aim of the thesis was to calculate the carbon footprint of a concrete-framed residential apartment building and find ways to reduce the carbon footprint. The subject of the study was Rakennusteho's Green Block concept and one of the apartment buildings of the future Block was used in calculation.

For the calculation, the building was modeled with Tekla Structures modeling software to estimate material quantities and energy consumption was estimated with Cadmatic HVAC software. The carbon footprint calculation was performed with the One Click LCA life cycle calculation tool and the method of the Ministry of the Environment in the pilot phase was selected as the calculation method. First, the carbon footprint of the building under study was calculated using the previously used reference structure types of Rakennusteho. As a result of the calculation, the carbon footprint of the reference building during its life cycle was 17,59 kgCO₂e/m²/year and the carbon handprint -3,84 kgCO₂e/m²/year. The E-value of the building was found to be 90. Then the structure types were changed one by one to the alternative structure types and the calculation was performed again. Solutions to improve energy efficiency were also subject of research.

Based on the results, two optimal cases were formed, Optimum 1 and Optimum 2. Optimum 1 was designed with the smallest possible carbon footprint and the design types were chosen for Optimum 2 to minimize the sum of the carbon footprint and the carbon handprint. The E-value of the Optimum 1 solution was 87, the lifecycle carbon footprint was 12,04 kgCO₂e/m²/year and the carbon handprint was -4,72 kgCO₂e/m²/year. The E-value of the Optimum 2 solution was 69, the carbon footprint was 13,01 kgCO₂e/m²/year

and the carbon handprint was $-9,01 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{/year}$. The biggest reductions in carbon footprint were achieved by using wood instead of concrete as a building material, replacing massive reinforced concrete slabs with hollow core slabs, replacing at least some of the cement in concrete with alternative materials, using geothermal system instead of district heating, by improving the energy efficiency of external surfaces and installing solar panels in buildings.

The amount of a building's carbon footprint can be affected a lot by solutions made before construction. The future limit value for the building's carbon footprint obliges those starting the building process to consider the building's life cycle carbon footprint and ensure that it is below the limit value. The carbon footprint of apartment buildings is still large on average, as their most common building material is concrete and the form of heating is district heating.

Keywords: Life cycle assessment, carbon footprint, carbon handprint, apartment building

ALKUSANAT

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutustua rakennusten hiilijalanjälkilaskentaan ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiskeinoihin. Diplomityön tilaajana toimi Rakennusteho Group Oy ja työ on tehty WSP Finland Oy:n rakennetekniikan talonrakentamisen yksikössä vuoden 2020 kesä-joulukuun aikana.

Työn ohjaajina Oulun yliopistosta toimivat Antti Niemi, Tanja Kolli ja Ulla Haverinen-Shaughnessy. Kiitokset ohjaajille työn sisältöä koskevista arvokkaista neuvoista. Suuret kiitokset Rakennusteholle ja Matti Tarkiaiselle työn mahdollistamisesta, diplomityön tekeminen on opettanut todella paljon tärkeitä taitoja talonrakentamisesta ja tulevista säädöksistä. Kiitokset kuuluvat myös Matti Pruikkoselle WSP:tä työn ohjauksesta ja joustavuudesta diplomityön tekemisen aikana. Tahdon kiittää vielä lämpimästi perhettäni, ystäviäni ja työkavereitani saamastani tuesta diplomityön tekemisen aikana.

Oulu, 09.12.2020

Emma Härkönen

Emma Härkönen

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	6
1 JOHDANTO	10
1.1 Ilmastonlämpeneminen.....	11
1.2 Hiilineutraali Oulu	13
1.3 Rakennustehon Vihreä Kortteli -konsepti	15
2 VÄHÄHIILINEN RAKENTAMINEN	17
2.1 Vähähiilisen rakentamisen tiekartta	19
2.2 Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä.....	22
2.2.1 Rakennuksen elinkaariarvioinnin sisältö	24
2.2.2 Standardit ja luokitusjärjestelmät	26
2.2.3 Elinkaariarvioinnin laskennan rakenne	28
2.2.4 Elinkaariarvioinnin luotettavuuden arviointi	30
3 RAKENTAMISEN PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN	32
3.1 Elinkaariarvioinnin käyttäminen suunnittelun varhaisessa vaiheessa.....	32
3.2 Materiaalien osuus rakennusosien hiilijalanjäljessä.....	35
3.2.1 Betonin ympäristöystävällisyyden kehittäminen	36
3.2.2 Puu rakennusmateriaalina ja mahdollisena betonin korvaajana	38
4 HIILIJALANJÄLKILASKENNAN SUORITTAMINEN	40
4.1 Laskennan kohteena oleva kerrostalo ja laskennan sisältö.....	40
4.2 Laskentaohjelmistojen esittely ja laskentamenetelmän valinta	41
4.3 Laskennan oletukset ja rajaukset.....	44
4.4 Vertailun kohteena olevat rakennetyypit ja materiaaliratkaisut	46
4.4.1 Energiankulutuksen arviointi.....	48
4.4.2 Perustukset, välipohjat, ala- ja yläpohja	49
4.4.3 Seinärakenteet	50
4.4.4 Eristeet	51
4.4.5 Parvekelinjat	53
4.4.6 Muut tavat pienentää hiilijalanjälkeä	54
4.4.7 Vertailulaskelmat	55
4.5 Hiilijalanjälkilaskenta One Click LCA -ohjelmalla.....	56

5 TULOKSET	59
5.1 Energialaskennan tulokset	59
5.2 Hiilijalanjätkilaskennan tulokset.....	59
5.3 Materiaalilaskennan tulokset	60
5.3.1 Perustukset, välipohjat, ala- ja yläpohja	60
5.3.2 Seinärakenteet	64
5.3.3 Eristeet	67
5.3.4 Parvekelinjat	68
5.3.5 Muut tavat pienentää hiilijalanjälkeä	70
5.4 Optimiratkaisut	75
5.4.1 Optimiratkaisujen energialaskennan tulokset	76
5.4.2 Optimiratkaisujen hiilijalanjätkilaskennan tulokset.....	77
5.5 Vertailulaskentojen tulokset	78
5.5.1 Energialaskennan vertailutulokset	78
5.5.2 Hiilijalanjätkilaskennan vertailutulokset	79
6 TULOsten TARKASTELU	84
6.1 Energialaskennan arviointi	84
6.2 Materiaalilaskennan arviointi	85
6.3 Vertailulaskentojen arviointi.....	88
7 POHDINTA.....	91
8 YHTEENVETO.....	97
LÄHDELUETTELO.....	99
LIITE 1. Ulkoseinien rakennetyypit.	

MERKINNÄT JA LYHENTEET

<i>ARK</i>	arkkitehti
<i>CO₂</i>	hiilidioksidi
<i>CO_{2e}</i>	hiilidioksidiekvivalentti
<i>D_{nT,w}</i>	äänitasoeroluku
<i>d</i>	eristepaksuus
<i>EN</i>	Eurooppalainen standardi
<i>GWP</i>	ilmastonlämpenemispotentiaali
<i>K</i>	materiaalikohtainen kerroin eri ympäristövaikutuksille
<i>LCA</i>	elinkaariarviointi
<i>OCL</i>	One Click LCA
<i>ppm</i>	miljoonasosa
<i>R</i>	lämmönvastus
<i>R_m</i>	rakennustuotteen määrä
<i>U</i>	lämmönjohtavuus
<i>v</i>	vuosi
<i>Y</i>	tuotteen elinkaaren ympäristövaikutukset
<i>λ</i>	materiaalin lämmönjohtavuus

1 JOHDANTO

Maapallon ilmasto on lämmennyt noin asteen verran ihmisen teollisen toiminnan seurauksena ja lämpeneminen vaikuttaa voimakkaasti luonnon hyvinvointiin. Lämpeneminen johtuu kasvihuonekaasujen, erityisesti hiilidioksidin (CO₂) määrän lisääntymisestä ilmakehässä. Ilmaston lämpenemiseen suhtaudutaan vakavasti, ja suurin osa maailman valtioista on sitoutunut kasvihuonekaasujen päästövähennyksiin muun muassa Yhdistyneiden Kansakuntien ilmastomuutosta koskevan puitesopimuksen ja Pariisin ilmastosopimuksen avulla.

Suomessa ilmastolämpenemisen hillitsemiseksi on säädetty ilmastolaki. Suomen tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 80 % vuoden 1990 tasolta vuoteen 2050 mennessä ja Suomen nykyinen hallitus on ottanut tavoitteeksi tehdä Suomesta hiilineutraali valtio vuoteen 2035 mennessä. Oulun kaupunki on luonut omat tavoitteet ympäristöohjelmallaan, jonka keskeisin tavoite on Hiilineutraali Oulu2040.

Rakennusteho Group Oy (jatkossa Rakennusteho) haluaa osallistua Oulun kaupungin ympäristöohjelman mukaisiin tavoitteisiin luomalla Vihreä Kortteli -konseptin. Vihreän Korttelin tavoitteena on ympäristöohjelman mukaisesti edesauttaa kestäväää kasvua, toimia resurssiaktiivisesti ja hyödyntää luontoa. Rakennusteho käyttää tiettyjä rakennetyyppejä talonrakennusprosesseissaan. Tämän diplomityön tavoitteena on vertailla erilaisten rakennetyyppien hiilijalanjälkeä ja edistää rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä löytämällä hiilineutraaliutta edistävät rakennetyypit. Vihreän Korttelin rakennusten rakennesuunnittelua ei ole vielä aloitettu tämän diplomityön tekemisen aikana, joten työssä voidaan vertailla useita eri rakennetyyppejä parhaiden vaihtoehtojen löytämiseksi lopullista suunnittelua varten.

Rakennetyyppien vertailu tehtiin mallintamalla kohdetalo Tekla Structures -ohjelmalla materiaalimäärien arvioimiseksi ja hiilijalanjälkilaskenta suoritettiin One Click LCA -ohjelmalla. Mallintamisessa käytettiin Vihreän Korttelin arkkitehtipiirustuksia ja vertailukohteena käytettiin Rakennustehon toisessa vastaavanlaisessa rakennusprojektissa toteuttamia rakennetyyppejä. Rakennukselle laskettiin myös E-luku,

jotta energiankulutus voitiin huomioida laskennassa. Energialaskenta tehtiin Cadmatic HVAC-ohjelmistolla. Pienemmän hiilijalanjäljen omaavia rakennetyyppejä etsittiin alapohja-, välipohja- ja yläpohjarakenteille, parvekelinjoille, ulkoseinille sekä väliseinille. Lisäksi tutkittiin tapoja pienentää rakennuksen energiankäyttöä. Hiilijalanjätkilaskennan laskentatapana käytettiin Ympäristöministeriön menetelmää. Tässä työssä vertailtiin vain rakenneosien hiilijalanjälkiä olemassa olevien standardien mukaisesti. Työn teoria- ja laskentaosioissa ei huomioitu olemassa olevia palomääräyksiä, rakentamisen kustannuksia, rakenneosien suunnittelun määräyksiä tai rakennusfysikaalisia määräyksiä, mutta kaikki valitut rakennetyypit ovat sellaisia, jotka voidaan määräysten osalta toteuttaa oikeanlaisella suunnittelulla.

1.1 Ilmastonlämpeneminen

Ilmasto on muuttunut paljon maapallon historian aikana luonnollisesti lämpimistä ajoista kylmiin jääkausiin merivirtojen ja mannerlaattojen paikkojen muuttuessa. Myös auringon säteilyn määrän muutokset, kasvihuonekaasujen pitoisuuksien muutokset ilmakehässä, maapallon tulivuoritoiminta ja vuoristojen syntyminen ja häviäminen vaikuttavat lämpötilaan pitkällä aikavälillä. Ilmasto-olojen muuttuminen on normaali osa maapallon historiassa ja tulevaisuudessa, mutta ihmistoiminnan myötä muutokset tapahtuvat luonnollista nopeammalla vauhdilla. [1]

Lämpeneminen johtuu kasvihuoneilmiön voimistumisesta. Kasvihuoneilmiö tarkoittaa prosessia, jossa auringon säteily pääsee maapallon ilmakehään ja kasvihuonekaasut estävät säteilyä karkaamasta takaisin avaruuteen ja tämä aiheuttaa ilmakehän lämpenemisen. Ihmisen teollinen toiminta aiheuttaa kasvihuonekaasujen määrän lisääntymisen ilmakehässä, mikä voimistaa ilmakehän ja merien lämpenemistä. [2]

Lämpenemisen aiheuttavat kasvihuonekaasut, erityisesti hiilidioksidi CO_2 . Muita kasvihuonekaasuja ovat vesihöyry (H_2O), typpioksiduuli (N_2O), metaani (CH_4), freonit eli CFC-yhdisteet, otsoni (O_3) ja dityppioksiduuli (N_2O). Hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä on noussut 1800-luvun alkupuolelta lähtien noin 280 ppm:stä [1] jo yli 416 ppm:ään [3] ja jatkaa nousuaan, ellei päästöjä saada tiputettua huomasti [1]. Ilmaston

lämpeneminen johtaa suuriin muutoksiin maapallolla, muun muassa jäätiköiden, roudan ja lumen vähenemiseen, vedenpinnan nousuun ja veden lämpenemiseen, sademäärien muutokseen ja trooppisten myrskyjen voimistumiseen. Suuri määrä eliölajeja on sukupuuttouhan alla, koska elinympäristöjen määrä vähenee ja niiden laatu muuttuu. Ilmastonmuutos, liiallinen luonnonvarojen käyttö ja luonnon monimuotoisuuden heikkeneminen koetaan olevan ihmiskunnan suurimpia ongelmia. Jos ongelmia ei saada pian ratkaistua, lajien sukupuuttojen määrä kiihtyy, ruuantuotanto heikentyy, useat elinalueet muuttuvat asuinkelvottomaksi ja jopa satojen miljoonien ihmisten elinolosuhteet muuttuvat epävakaiksi. [1]

Yhdistyneet Kansakunnat ovat solmineet ilmastonmuutosta koskevan puitesopimuksen. Sopimuksen osapuolet ovat huolestuneita voimistuneesta kasvihuoneilmapiestä ja myöntävät kasvihuonekaasujen kasvun johtuvan teollisuuden päästöistä. Puitesopimuksen tavoitteena on, että kaikki maat tekisivät yhteistyötä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi ympäristölainsäädäntöään kehittämällä ja lopullisena tavoitteena on vakiinnuttaa kasvihuonekaasujen taso ilmakehässä sellaiselle tasolle, ettei maapallon ilmastojärjestelmä olisi vaarassa häiriintyä. [4]

Joulukuussa 2015 hyväksyttiin Pariisin ilmastosopimus, johon Suomi on osana Euroopan unionia sitoutunut. Sopimusta pidetään merkittävänä saavutuksena kansainvälisen ilmastopolitiikan luomisessa. Sopimuksen tavoitteena on pitää keskilämpötilan nousu alle kahdessa celsiusasteessa päästövähennystavoitteilla ja keskeisenä tavoitteena on saavuttaa tasapaino kasvihuonekaasupäästöjen ja päästönien välillä. [5]

Suomessa ilmastonmuutokseen on reagoitu ilmastolain avulla. Laki sisältää ilmastopolitiikan suunnittelujärjestelmän, jonka tarkoituksena on määrittää tavoitteet kasvihuonekaasujen päästövähennyksille ja ilmastonmuutokseen sopeutumiseen. Suomen tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 80 % vuoden 1990 tasolta vuoteen 2050 mennessä. [6]

Suomen hallitus on huolissaan ilmaston lämpenemisen vaikutuksesta maapallon kohtaloon ja tulevien sukupolvien elinolosuhteisiin. Suomen nykyinen hallitus on

hallitusohjelmassaan ottanut tärkeäksi linjaksi ilmastonmuutoksen hillitsemisen ja tavoitteena on tehdä Suomesta hiilineutraali valtio vuoteen 2035 mennessä. Tämä tapahtuu ilmastolakia uudistamalla ja päivittämällä vuoteen 2021 mennessä. Lakiin lisätään muun muassa päästövähennystavoitteet vuosille 2030 ja 2040. [7]

1.2 Hiilineutraali Oulu

Oulun kaupunki on luonut oman Ympäristöohjelma 2026 – kohti hiilineutraalia Oulua -konseptin, jonka tarkoituksena on säilyttää ympäristön tila hyvänä ja kaupunki elinvoimaisena. Kaupunki on sitoutunut ympäristöasioiden edistämiseen kansallisten ja kansainvälisten säädöksiin mukaisesti. Ympäristöohjelman keskeisin tavoite on Hiilineutraali Oulu2040 ja se ohjaa kaupungin henkilöstöä ja yrityksiä toimimaan ympäristövastuullisesti. [8]

Oulun kaupunki on sitoutunut Euroopan kaupunginjohtajien energia- ja ilmastopimukseen sekä kunta-alan energiatehokkuussopimukseen. Energia- ja ilmastopimukseen tavoitteena on pudottaa hiilidioksidipäästöjä 40 % vuoteen 2030 mennessä ja energiatehokkuussopimuksen tavoitteena 10,5 % vähennys energiankulutuksessa vuoden 2014 tasosta vuoteen 2025 mennessä. Oulun kaupungin ympäristöohjelman sisältö on koottu taulukkoon 1. [8]

Taulukko 1. Oulun kaupungin ympäristöohjelman painopisteet ja tavoitteet mukailen lähdettä [8].

<p>1. Kasvamme kestävästi</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kestävä elinympäristö • Elävä kaupunkikeskusta ja moni-ilmeiset keskukset • Ympäristöystävällinen liikkuminen 	<p>2. Toimimme resurssiviisaasti</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tehokas energiankäyttö • Hiilineutraali energiantuotanto • Toimiva kiertotalous
<p>3. Luonto on voimavaramme</p> <ul style="list-style-type: none"> • Luonto on kaikkien saavutettavissa • Ilmastonmuutokseen sopeutuminen • Turvallinen, terveellinen ja viihtyisä elinympäristö • Monimuotoinen luonto ja vesistöjen hyvä ekologinen tila 	<p>4. Edistämme ympäristövastuullisuutta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ympäristövastuulliset Oululaiset • Kestävät toimintatavat kaupunkikonsernissa • Kestävät hankinnat

1.3 Rakennustehon Vihreä Kortteli -konsepti

Rakennusteho haluaa osallistua Oulun kaupungin Hiilineutraali Oulu 2040 -tavoitteeseen luomalla Vihreä Kortteli -konseptin. Keväällä 2020 on käynnistetty asemakaavan muuttaminen 564-2438 Linnanmaan ja Kaijonharjun kaupunginosaan Ouluun Huvilarannantielle. Suunnittelun lähtökohtana käytetään Oulun kaupungin ympäristöohjelman tavoitteita. Vihreän Korttelin kaavoitusalue sijaitsee kuvassa 1 mustalla rajatun alueen sisäpuolella.



Kuva 1. Vihreän Korttelin kaavoitusalue

Konseptissa rakentamisen hiilijalanjälkeä on tarkoituksena pienentää hyödyntämällä kierrätystä käytettävissä materiaaliratkaisuissa ja rakennusjätteissä, sekä vähentämällä rakennustarvikkeiden hukkaa koko rakennusprojektissa. Korttelin suunnitteluvaiheessa rakennuksille simuloidaan energiamalli, jonka avulla etsitään parhaat mahdolliset ratkaisut hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Mahdollisia keinoja hiilijalanjäljen pienentämiseksi on optimoida asuntojen koko hukkaneliöt poistamalla, betonin ja

teräksen määrän mahdollinen vähentäminen ja vaipparakenteiden tarkka valinta. Tutkitaan myös mahdollisuutta käyttää ekologista betonia perinteisen betonin korvaajana. Pihapäällysteissä hyödynnetään kierrätettävää betonia, ulkorakennusten pinnoissa ja rakenteissa on tarkoituksena käyttää kierrätysmateriaalia.

Tärkeässä osassa konseptissa on myös asukkaiden viihtyvyys ja tavoitteena on mahdollistaa asukkaille puitteet kestäville valinnoille arkielämässä. Asukkaita ohjataan vähentämään sähkön- ja energiankulutusta ja korttelissa on tarkoituksena käyttää uusiutuvia energianlähteitä lämmityksessä ja jäähdytyksessä. Asuinrakennusten katoille asennetaan aurinkopaneeleja ja piharakennusten katoille on suunnitteilla aurinkopaneeleja ja viherkattoja.

Vihreässä korttelissa testataan uusia kiertotalousratkaisuja ja osallistutaan Aalto-yliopiston vuonna 2019 pilotoimaan Viherkertoimen Valtavirtaistaminen eli ViVa-hankkeeseen. Viherkerroin on korttelien viherrakenteen ohjaukseen kehitetty työkalu ja ViVa-hankkeen tavoitteena on panostaa kaupunkikorttelien viherrakentamiseen, sillä kaupunkirakenteen tiivistäminen vähentää viheralueiden määrää ja luontopohjaisilla ratkaisuilla voidaan kompensoida rakentamisen johdosta menetettäviä viheralueita. [9] Vihreän korttelin talojen seinille tehdään viherseiniä ja piharakennusten katoille rakennetaan viherkattoja. Pihalle tulee kasvihuoneita ja viljelylaatikoita hyötykasvien viljelyä ja lähiruokatoria varten. Vihreä Kortteli -konseptin mukaisia kohteita on tarkoitus toteuttaa mahdollisesti myös muualla Suomessa tulevaisuudessa.

2 VÄHÄHIILINEN RAKENTAMINEN

Rakennuksen hiilijalanjälki tarkoittaa rakennuksen koko elinkaaren aikana ilmakehään vapautuneiden kasvihuonekaasujen määrää. Hiilijalanjäljen yksikkönä käytetään usein hiilidioksidiekvivalenttia CO₂e, jossa muiden kasvihuonekaasujen määrä on yhteismitallistettu vastaamaan hiilidioksidin ilmastoa lämmittävää vaikutusta. Hiilijalanjälki ilmoitetaan yleensä hiilidioksidiekvivalenttikilogrammoina kgCO₂e. [10]

Rakennusten osuus on noin 40 % maailman energialähteistä ja 36 % energiaan liittyvistä hiilidioksidipäästöistä teollisuusmaissa [1]. YK on käynnistänyt 10 vuotta kestävä Kestävät rakennukset ja rakentaminen -ohjelman, joka on osa kulutuksen ja tuotannon puiteohjelmaa 2012-2022. Rakentamisessa käytettävät ratkaisut ovat pitkäikäisiä ja tärkeässä roolissa ilmastonmuutoksen hillinnässä ja kestävä kehityksen edistämässä. Rakentamisen ratkaisut vaikuttavat suoraan ihmisten elinympäristön terveellisyyteen ja viihtyisyyteen. Rakentaminen ja rakennukset ovat suuri kasvihuonekaasupäästöjen lähde, ja Suomessa rakentaminen aiheuttaa noin 30 % päästöistä. [11]

Kestävät rakennukset ja rakentaminen -ohjelman tavoitteena on jakaa tietoa rakentamisen kestävästä käytännöstä niin kehitysmailla kuin teollistuneille maille ja kehittää käytäntöjä eteenpäin. Pitkän ajan tavoitteena on ilmastokestävä ja materiaalivalinnoiltaan kestävä rakennettu ympäristö. Erityisesti kehittyvissä maissa tavoitteena on lisätä koulutusta ja osaamista kestävästä rakentamisesta. Suomi toimii hankkeen yhtenä pääkoordinaattorina ja toimintaa ohjaa kansainvälinen asiantuntijakomitea. [11]

Euroopan parlamentti ja neuvosto on säätänyt rakennusten energiatehokkuusdirektiivin EPBD:n (Energy Performance of Buildings Directive), jonka määräysten mukaisesti kaikkien uusien rakennuksien tulee olla vuoden 2020 jälkeen lähes nollaenergiarakennuksia [12]. Myös Suomessa rakentamisen kehittäminen on keskittynyt lähinnä energiatehokkuuden parantamiseen ja nollaenergiarakentamiseen. Kun energiatehokkuutta on vaikea enää parantaa, on rakentamisen ohjauksessa alettu kiinnittämään huomiota koko rakennusprosessiin sisältäen myös rakentamisen alku- ja loppuosan eli muun muassa materiaalien valmistamisen ja jätteiden loppusijoituspaikan

ympäristövaikutukset. [13] Ympäristöministeriö on luonut vähähiilisen rakentamisen kriteerit, joita testataan ensin julkisissa hankkeissa. Tavoitteena on, että lainsäädäntö ohjaisi rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjälkeä vuoteen 2025 mennessä. [10]

Vuonna 2017 on julkaistu vähähiilisen rakentamisen tiekartta, joka on luotu rakennusten hiilijalanjäljen ohjausta varten. Rakentamisen hiilijalanjäljen kontrollointi on tärkeä osa Suomen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Osana tiekarttaa on luotu myös rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmä, joka ohjeistaa huomioimaan rakentamisen päästöt erityisesti prosessin alku- ja loppupäästä. [10] Hiilijalanjäljen arviointimenetelmä perustuu eurooppalaisiin standardeihin (EN-standardit) sekä Euroopan Unionin uusiin rakennusten resurssitehokkuuden Level(s)-indikaattoreihin. Ympäristöministeriö sisällyttää Level(s)-indikaattorit osaksi vähähiilisen rakentamisen tiekarttaa. [14]

Euroopan komissio on laatinut Level(s)-menetelmän yhteistyössä jäsenmaidensa sekä kestävän rakentamisen ammattilaisten kanssa mittaamaan rakentamisen resurssitehokkuutta. Menetelmän keskeisin tavoite on yhtenäistää eri maissa käytettäviä rakentamisen resurssitehokkuuden ja ekologisuuden mittareita. Samalla luodaan yhtenäinen käsitteistö kommunikaation helpottamiseksi. Menetelmä on jaettu päätavoitteisiin:

1. Elinkaaren hiilijalanjälki
2. Resurssitehokas materiaalien käyttö
3. Vedenkulutus
4. Terveelliset tilat ja sisäilman laatu
5. Sopeutuminen ilmastonmuutokseen
6. Elinkaarikustannukset

Suurin osa tavoitteista vaatii EN-standardien käyttöä. Arviointi on jaettu kolmeen eri tasoon, jotta menetelmä soveltuisi helposti eri käyttötarkoituksiin. Arviointitasot ovat yksinkertaistettu arviointi, vertaileva arviointi ja yksityiskohtainen arviointi. Level(s)-menetelmä on tarkoitettu rakentamisprosessin eri osapuolien, kuten suunnittelijoiden, sijoittajien, rakennusliikkeiden ja kiinteistöhuollon käyttöön. [14]

2.1 Vähähiilisen rakentamisen tiekartta

Bionova Oy:n julkaiseman Vähähiilisen rakentamisen tiekartan tavoitteena on saada rakennuksen koko elinkaaren aikainen hiilijalanjälki sääntelyn alaiseksi ja sääntelyn halutaan koskevan jatkossa myös rakennusmateriaaleja. Tiekartta sisältää tavoitteet, edellytykset toteuttamiselle sekä vaadittavat toimenpiteet. Rakennuksen hiilijalanjälki koostuu koko sen elinkaaren aikana syntyvien päästöjen summasta. Rakennuksen elinkaari on jaettu viiteen osa-alueeseen: tuotevaihe, rakennusvaihe, käyttövaihe, loppuvaihe ja järjestelmän ulkopuoliset hyödyt ja haitat. [10] Vaiheet on esitelty seuraavan sivun taulukossa 2.

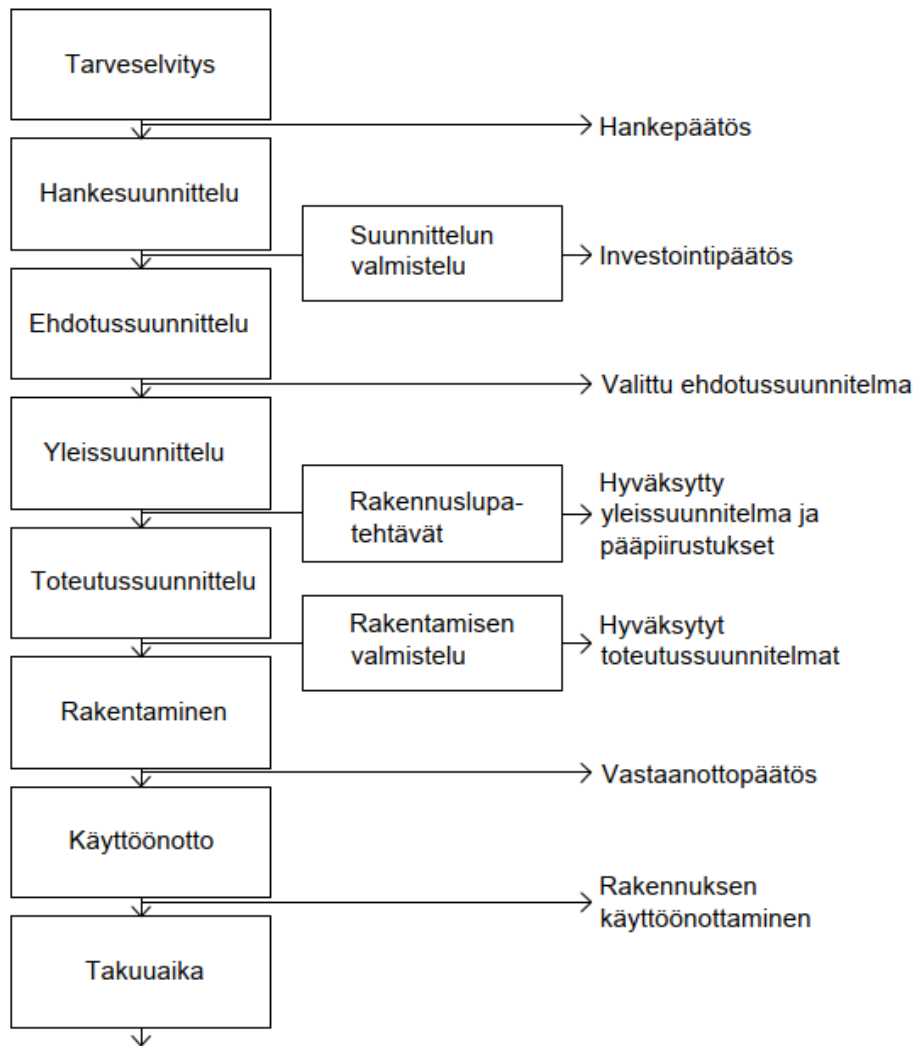
Suurin osa hiilijalanjäljestä syntyy tällä hetkellä rakennuksen käytönaikaisesta energiankäytöstä. Viime aikoina on havahduttu siihen, että myös rakennusmateriaalien osuus päästöistä on merkittävä. Päästöohjauksen avulla saadaan myös tuotekehitystä kehrittelemään ilmaston kannalta parempia ratkaisuja. Rakennustuotteiden päästötietojen laatu on vaihtelevaa, ja tämän vuoksi Rakennustietosäätiö julkaisee Suomessa tuotteille ympäristötuoteselosteita, jotka perustuvat EN-standardeihin ja ovat yhtenäinen tapa kuvata ympäristövaikutuksia. [10]

Tällä hetkellä Suomi ei säännöstele rakentamisen koko elinkaaren päästöjä, vaikka alan standardisointi on luonut tälle laskentamenetelmän. Rakennusten päästölaskenta on toistaiseksi vapaaehtoista ja laskennassa voidaan hyödyntää standardisoitua arviointimenetelmää. Valtion ohjaus voidaan tulevaisuudessa kohdistaa rakentamisen ja rakennushankkeen eri osa-alueisiin. Tiekartassa valittu pääohjauskeino on rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen sääntely. Tarkoituksena on, että menetelmä olisi ensin vapaaehtoinen, sitten velvoittava julkisille hankkeille, myöhemmin ilmoitusvelvollisuus koskisi kaikki rakennuksia ja tiedon kertyessä luodaan velvoittavat raja-arvot rakennustyypeille. [10]

Taulukko 2. Rakennuksen elinkaari CEN/TC-standardiperheen mukaan mukailen lähde [10].

A1-3 Tuotevaihe	Tuotevaiheeseen sisältyy kaikki rakentamisessa käytettävien rakennustuotteiden valmistus- prosessit, eli raaka-aineiden hankinta ja kuljetus, sekä rakennustuotteiden valmistaminen.
A4-5 Rakennusvaihe	Rakennusvaiheeseen sisältyy rakennustuotteiden kuljetus työmaalle ja työmaan rakennustoimet.
B Käyttövaihe	Käyttövaiheeseen lasketaan rakennuksen käytön-aikaiset energian- ja vedenkulutusprosessit, sekä rakennuksen huolto, vaihdot ja korjaukset. Tämä laskentavaihe pohjautuu käyttöskenaarioihin.
C Elinkaaren loppuvaihe	Rakennuksen loppuvaiheelle luodaan skenaario siitä, mitä rakennukselle tapahtuu, kun se puretaan ja rakennustuotteet joko kierrätetään tai loppusijoitetaan kaatopaikalle.
D Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset	Rakennustuotteiden kierrätys ja uudelleenkäyttö voi pienentää seuraavan kohteen ympäristövaikutuksia. Tämäkin vaihe perustuu skenaarioihin.

Rakennushankkeen päästöjen ohjauksen lisäksi ohjausta voidaan tehdä esimerkiksi sijoitusvalinnoilla ja ohjaamalla yhdyskuntarakennetta sekä rakennustuotevalintoja. Päästöjen ohjaus alkaa jo kaavoituksesta ja päästöihin vaikuttaa jopa rakentamisen vuodenaika. [10] Talonrakennushankkeen kulku on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Talonrakennushankkeen kulku mukailien lähdettä [10].

Lopullisiin päästöihin voidaan vaikuttaa monipuolisesti hankkeen eri vaiheissa.

- Tarveselvitysvaiheessa sijoituspaikan valinnalla voidaan vaikuttaa esimerkiksi liikkumisen, energiahuollon ja maarakentamisen vaikutuksiin.
- Hankesuunnitteluvaiheessa suunnittelussa voidaan huomioida kohteen päämateriaali- ja energiaratkaisut, kohteen muunneltavuus ja massoittelevuus.
- Yleis- ja toteutussuunnitteluvaiheessa voidaan optimoida tulevia päästöjä tarkemmilla materiaali- ja rakennevalinnoilla sekä energiasuunnittelulla.

- Rakentamisvaiheessa päästöihin voidaan vaikuttaa vaihtamalla materiaaleja vähäpäästöisempiin sekä hyödyntämällä työmaalla materiaalit ja energia tehokkaasti.
- Käyttöönottovaiheessa tulee varmistaa, että järjestelmät toimivat oikein ja niitä osataan käyttää tarkoituksenmukaisesti.

Kaikkien rakennusprosessin osien taustalla vaikuttavat kaavoitus ja kunnallinen ohjaus, tuote- ja menetelmäkehitys sekä alueelliset energijärjestelmät. [10]

2.2 Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä

Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment eli LCA) on menetelmä tuotteiden tai palveluiden ympäristövaikutusten ja luonnonvarojen kulutuksen arviointiin. Elinkaariarvioinnilla on tärkeä osa rakennusalalla rakennusten ekologisuuden arvioinnissa. Elinkaariarviointi on osa useita kestävän rakentamisen sertifiointijärjestelmiä ja tärkeä osa Suomen maankäyttö- ja rakennuslain kokonaisuudistusta. [15]

Elinkaariarvioinnissa tulisi huomioida kaikki taulukossa 2 esitetyt vaiheet. Ympäristövaikutusten arviointi on helpointa tehdä tuote- ja rakennusvaiheessa, sillä ne tapahtuvat prosessin alussa. Kolme viimeisintä vaihetta sen sijaan perustuvat arvioihin rakennuksen käytöstä, ylläpidosta ja purkamisesta. Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset lasketaan ja ilmoitetaan erikseen. Arvioinnin tarkastelun kohteena voidaan käyttää kaikkia eri prosesseihin liittyviä luonnonvarojen kulutusta ja päästöjä ja tulokset voidaan laskea tiettyjen mitattavien indikaattorien avulla. Rakennusten elinkaariarvioinnissa yleisimmin käytetty indikaattori on hiilijalanjälki, eli ilmaston lämpenemispotentiaali. Muita mahdollisia indikaattoreita ovat esimerkiksi happamoitumispotentiaali, otsonikatopotentiaali, rehevöitymispotentiaali ja fossiilisten luonnonvarojen abiottinen eheytyminen. Jos eri indikaattoreita käytetään, on niiden tuloksia haastavaa vertailla keskenään ja yleensä niiden tulokset ilmoitetaan erikseen. [15]

Elinkaariarvioinnin tuloksena saadaan arvio elinkaaren eri vaiheiden ympäristövaikutuksista. Laskennan perusteella voidaan keskittyä pienentämään hiilijalanjälkeä oikeista elinkaaren vaiheista. Samalla voidaan tehdä materiaalivalintojen optimointia ja vertailla, miten yksittäiset valinnat vaikuttavat rakennuksen koko elinkaareen. Laskelmilla voidaan esimerkiksi vertailla, miten erilaiset materiaalivalinnat vaikuttavat käytönaikaiseen energiankulutukseen, mikä on perinteisesti kaikista suurin hiilijalanjäljen lähde. Tulevaisuudessa tavoitteena on, että energiaa tuotetaan uusiutuvista energianlähteistä ja rakennusten energiankulutus pieneneisi. Tämä nostaa muiden elinkaaren vaiheiden vaikutusta kokonaispäästöihin. Rakennusosavertailulla voidaan vertailla esimerkiksi pohjien, seinien ja katon osuuksia kokonaisympäristövaikutuksiin ja etsiä keinoja optimoida näitä. Myös toiminnallisesti samanlaisia rakennustuotteita ja -materiaaleja voidaan vertailla ja arvioida niiden ympäristövaikutuksia. [15]

Hiilijalanjäljen rinnalle on kehitelty uusi termi hiilikädenjälki, joka kuvastaa positiivisia ympäristövaikutuksia. Hiilikädenjäljellä voidaan kompensoida hiilijalanjäljen muodostamia päästöjä ja näin pienentää kohteen negatiivisia ilmastovaikutuksia. [16] Esimerkiksi hiilinielut, eli itseensä hiilidioksidia tai jotain muuta kasvihuonekaasua sitovat tuotteet kasvattavat rakennuksen hiilikädenjälkeä. Rakennusmateriaaleista puu toimii hiilinieluna ja on suuressa roolissa rakennuksen hiilikädenjäljen muodostumisessa [17]. Myös betonin karbonatisoituminen poistaa hiilidioksidia ilmakehästä. Hiilineutraaliudesta puhutaan silloin, kun rakennuksen toiminnan tuottamat ilmastopäästöt ja sen ilmakehästä poistamat kasvihuonekaasut ovat tasapainossa ja nettoilmastopäästön arvo on tällöin nolla. [18] Hiilineutraalin rakennushankkeen elinkaaren aikaisten nettopäästöjen tulee olla nolla. Hiilineutraali rakennus pyritään saavuttamaan seuraavien vaiheiden mukaisesti:

- 1) Arvioidaan rakennuksen koko elinkaaren aiheuttama hiilijalanjälki.
- 2) Pyritään pienentämään hiilijalanjälkeä raja-arvon alapuolelle.
- 3) Arvioidaan hankkeen tuottamat ilmastohyödyt.
- 4) Kompensoidaan jäljelle jäävät päästöt olemassa olevilla hyväksytyillä mekanismeilla.

Ensisijainen menetelmä ilmastohaittojen vähentämiseksi on siis rakennuksen omien ilmastovaikutusten pienentäminen esimerkiksi energiatehokkuuden lisäämisellä ja materiaalivalinnoilla. Vasta hiilijalanjalan raja-arvon alittamisen jälkeen on sallittua kompensoida loput päästöt ilmastohyötyjen avulla. Ilmastohyötyjä voivat olla esimerkiksi energiaselvityksen ulkopuoliset säästöt, ylijäävä uusiutuva energia, hiilivarastot ja kierrätysyödyt sekä ulkoiset kompensatiot. Rakennusta voidaan kutsua vähähiiliseksi, jos se ei täytä hiilineutraaliuden määritelmää, mutta hiilijalanjälki alittaa määrätyn raja-arvon. [19]

2.2.1 Rakennuksen elinkaariarvioinnin sisältö

Rakennuksen elinkaariarviointiin tarvittavat elementit on koottu taulukkoon 3. Rakennuksen elinkaariarvioinnissa tulee huomioida kaikki käytettävät materiaalit. Tulos on sitä tarkempi, mitä paremmin materiaalimäärät ovat tiedossa. Materiaalimäärät voidaan ottaa helposti esimerkiksi rakennuksen tietomallista. [15]

Elinkaarilaskelma tehdään tietylle ajanjaksolle. Valittu ajanjakso vaikuttaa siihen, kuinka monta kertaa rakennustuotteita vaihdetaan ajanjakson aikana. Yleensä laskenta-ajanjaksona käytetään rakennuksen suunniteltua käyttöikää. Rakennusmateriaalien käyttöiät vaihtelevat, joten kunkin rakennusmateriaalin vaihtokerrat tulee laskea erikseen mukaan. Pitkäikäisiä materiaaleja tarvitsee vaihtaa harvemmin kuin lyhytikäisiä, joten pitkäaikaisten materiaalien käyttö voi pienentää ympäristövaikutuksia huomattavasti. Koska rakennusten koko vaihtelee, ilmoitetaan tulokset yleensä neliometriä kohti vuodessa. Tällöin kokonaistulos jaetaan neliometreille ja tarkastelujakson vuosimäärälle. [15]

Taulukko 3. Rakennuksen elinkaariarvioinnin sisältö mukailten lähdettä [15].

<p>Rakennuksen tiedot</p> <ul style="list-style-type: none"> • Materiaalit ja määrät • Rakennuksen ja rakennustuotteiden käyttöiät • Pinta-alat ja tilavuudet • Käyttövaiheen energiantarve
<p>Välineet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tiedot eri tuotteiden, energianmuotojen ja prosessien ympäristövaikutuksista • Laskentatyökalu
<p>Rajaukset</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arvioitavat elinkaaren vaiheet • Raportoitavat ympäristöindikaattorit

Energiankäyttö on merkittävä osa rakennuksen hiilidioksidipäästöjä, joten käyttövaiheen aikainen oletettu energiantarve on tärkeä osa laskentaa. Energiantarve ilmoitetaan kilowattitunteina (kWh) neliometriä ja vuotta kohden. Energiantarpeen arviointi voidaan tehdä kahdella tavalla:

1. Oletetaan, että valtion energiantuotanto pysyy samanlaisena koko laskennassa käytetyn ajanjakson ajan ja tehdään arvio laskentahetkellä olemassa olevien energiateknologioiden yhdistelmän mukaan. Tämän arviointitavan heikkoutena on, ettei se ota huomioon ilmastolain mukaisia päästövähennyksiä tai energiantuotannon siirtymistä käyttämään enemmän uusiutuvia energianlähteitä.
2. Huomioidaan laskennassa ilmastolain mukaiset päästövähennystavoitteet ja luodaan ennuste tulevaisuudessa käytettävistä energiateknologioista. Tämä on Suomessa käytetty laskentatapa ja se pohjautuu pitkän aikavälin energia- ja ilmastopolitiikkaan. [15]

Materiaalien ja prosessien määrä kerrotaan niiden ympäristövaikutusten kertoimella. Kertoimet voivat olla kullekin tuotteelle määriteltyjä, tai tuoteryhmille laskettuja keskiarvoja. Suomessa kehitellään parhaillaan avointa tietokantaa, josta rakennustuotteiden ja prosessien päästöt olisivat helposti saatavilla. Yksittäisen rakennustuotteen ympäristövaikutukset lasketaan kaavalla (1)

$$Y = K * R_m \quad (1)$$

missä Y = tuotteen elinkaaren ympäristövaikutukset (kgCO₂)

K = materiaalikohtainen kerroin eri ympäristövaikutuksille (CO₂)

R_m = rakennustuotteen määrä (kg)

Kokonaisympäristövaikutus saadaan kaikkien tuotteiden ja prosessien ympäristövaikutusten summana. Elinkaariarviointi on helpointa tehdä tähän tarkoitukseen luodulla ohjelmistotyökalulla. Ohjelmistotyökalu suorittaa laskennan esimerkiksi tietomallista saatavien materiaalimäärälistojen avulla ja työkaluissa on erilaisia vaihtoehtoja tulosten esittämistä ja vertailua varten. Arviointia tehdessä tulee miettiä tarkkaan, mitä laskentaan otetaan mukaan ja mitä rajataan laskennan ulkopuolelle. Rajausten teko on mielekästä laskennan yksinkertaistamiseksi, tai jos taustatietoja puuttuu. Tehdyt rajaukset tulee osoittaa selkeästi tulosten ymmärtämisen ja hyödyntämisen helpottamiseksi. [15]

2.2.2 Standardit ja luokitusjärjestelmät

Elinkaariarviointiin on määritelty viisi standardia. Elinkaariarvioinnin menetelmiä yleisesti käsitteleviin ympäristöjohtamisen standardeihin kuuluvat [20]

- EN ISO 14040 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework
- EN ISO 14044 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and Guidelines.

CEN/TC 350 rakentamisen kestävä kehityksen standardipaketista [21] rakennusten elinkaariarviointia käsitteleviä standardeja ovat

- EN 15643-2 Sustainability of construction works. Assessment of buildings. Part 2 Framework for the assessment of environmental performance
- EN 15978 Sustainability of construction works. Assessment of the environmental performance of buildings. Calculation method
- EN 15804 Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products.

EN ISO 14040 kuvaa elinkaariarvion periaatteet ja EN ISO 14044 elinkaariarvioinnin toteuttamisen vaatimukset. EN 15643-2 kuvaa rakennuksen ympäristövaikutusten vaatimukset ja arvioinnin, EN 15978 rakennusten elinkaariarvioinnin laskentamenetelmän ja EN 15804 rakennustuotteiden ympäristötuoteselosteiden rakenteen, sisällön ja periaatteet. [15]

Rakennuskohteilta voidaan edellyttää ympäristöluokitusta. Suomessa käytössä olevissa ympäristöluokitus- ja arviointijärjestelmissä hiilijalanjälki ja elinkaariarviointi ovat merkittävässä asemassa. Luokitusjärjestelmät ovat suosittuja erityisesti kaupallisissa hankkeissa, sillä ympäristöluokituksen avulla kiinteistön omistaja tai sijoittaja saa varmuuden kohteen myynti- tai vuokrauskelpoisuudesta. [10]

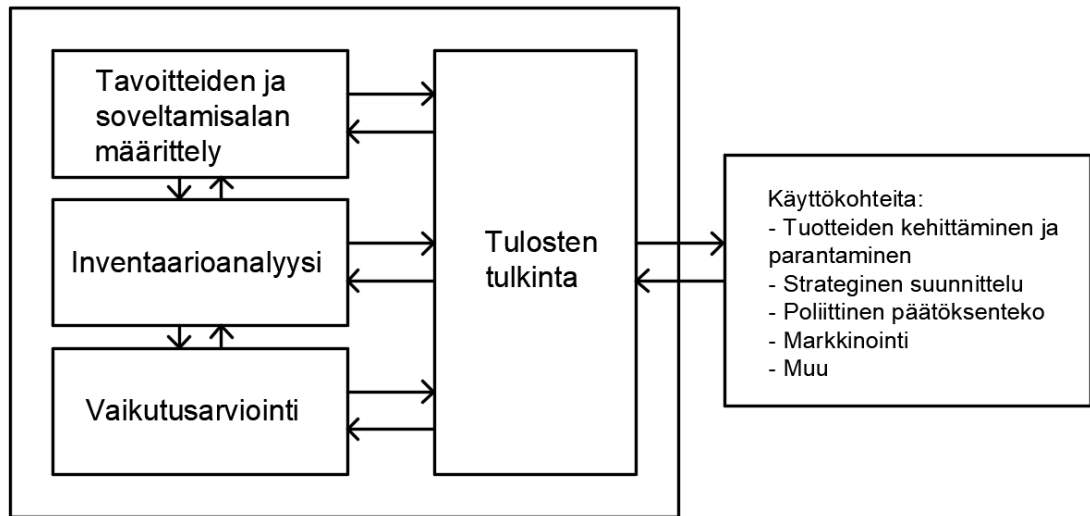
Suomessa on käytössä kaksi kansainvälistä luokitusjärjestelmää, yhdysvaltalainen LEED [22] sekä brittiläinen BREEAM [23]. LEED perustuu standardiin EN 15978 ja helmikuussa 2017 LEED-luokituksen saaneita rakennuksia oli Suomessa 80. BREEAM perustuu standardeihin ISO 14040 ja EN 15804 ja helmikuussa 2017 luokituksen saaneita rakennuksia oli Suomessa 56. Rakennustietosäätiö on julkaissut vuonna 2017 Suomen säädöksiin ja ohjeistuksiin perustuvan kansallisen luokitusjärjestelmän RTS rakennushankkeen ympäristöluokitus. Luokitusjärjestelmä perustuu standardiin EN 15978 sekä Green Building Council Finlandin julkaisemaan standardeja soveltavaan Rakennusten elinkaariarvointi -ohjeeseen. Ohje sisältää opastuksen rakennusten

elinkaaren hiilijalanjäljen ja elinkaarikustannusten laskentaan ja on varsinaisia standardeja helppokäyttöisempi. [10]

2.2.3 Elinkaariarvioinnin laskennan rakenne

Standardin EN ISO 14040 mukaan elinkaariarviointi koostuu neljästä vaiheesta, jotka on esitetty kuvassa 3. Vaiheita ovat tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutusarviointi sekä tulosten tulkinta. Elinkaariarviointi on iteratiivinen menetelmä, joten arvioinnin eri vaiheissa voi olla tarpeellista palata taaksepäin aikaisempiin vaiheisiin. [24]

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely -osiossa esitellään muun muassa elinkaariarvioinnin käyttötarkoitus ja syyt, kohdeyleisö, tutkinnan kohteena oleva tuotejärjestelmä, laajuus, tarkasteltava ajanjakso, oletukset ja rajaukset, laatuvaatimukset sekä käytettävät vaikutusluokat ja menetelmät. Laskettavaa tuotetta käsitellään omana tuotejärjestelmänään, joka jaetaan pienempiin yksikköprosesseihin. Yksikköprosessit liitetään toisiinsa joko välivalmistevirroilla, jätteenkäsittelyyn johtavilla virroilla tai molemmilla, ja toisiin tuotejärjestelmiin tuotevirroilla sekä ympäristöön perusvirroilla. Yksikköprosesseihin jakaminen helpottaa tuotejärjestelmään liittyvien syötteiden ja tuotosten tunnistamisessa ja tavoitteiden edellyttämän mallintamisen yksityiskohtaisuus määrittää rajat yksikköprosesseille. Perusvirrat sisältävät tuotteeseen liittyviä luonnonvarojen käyttöä sekä päästöjä ja nämä tiedot ovat inventaarioanalyysin tulokset. [24]



Kuva 3. Elinkaariarvioinnin vaiheet mukaillen lähdettä [24].

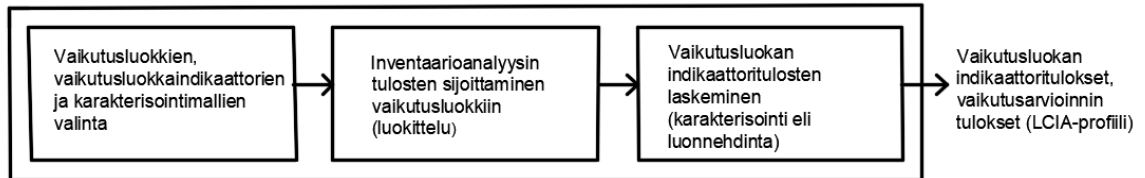
Inventaarioanalyysin osia ovat tiedonkeruu sekä laskenta, jonka avulla tuotejärjestelmän syötteille ja tuotoksille saadaan määrällinen muoto. Analyysi on iteratiivinen, sillä laskennan edetessä saatetaan havaita uusia tietovaatimuksia ja rajoituksia, jotka vaativat tiedonkeruun tapojen muuttamista tai tavoitteiden uudelleen määrittämistä. Yksikköprosesseista kerättäviä tietoja ovat

- energiasyötteet, raaka-ainesyötteet, apusyötteet ja muut fysikaaliset syötteet,
- tuotteet, rinnakkaistuotteet ja jätteet,
- päästöt ilmaan, veteen ja maaperään ja
- muut ympäristönäkökohdat.

Tietojen keruun jälkeen suoritetaan laskenta, jonka tuloksena saadaan järjestelmän jokaisen yksikköprosessin ja mallinnettavan toiminnallisen yksikön inventaariotulokset. [24]

Vaikutusarvioinnin tarkoituksena on arvioida ympäristövaikutusten merkittävyyttä hyödyntäen inventaarioanalyysin tuloksia. Ympäristövaikutuksia pyritään ymmärtämään yhdistämällä inventaariotiedot ympäristövaikutusluokkiin ja vaikutusluokka-indikaattoreihin. Vaikutusarvioinnin pakolliset osat on esitetty kuvassa 4.

Vaikutusarvioinnin valinnaisia osia ovat vaikutusluokan indikaattoritulosten suuruusluokan laskeminen suhteessa vertailutietoon, ryhmittely ja painotus. [24]



Kuva 4. Vaikutusarviointivaiheen pakolliset osat mukailien lähdeä [24].

Vaikutusarvioinnissa ei käsitellä kaikkia mahdollisia ympäristövaikutuksia, vaan pelkästään ne, jotka tavoitteissa on määritelty. Tulosten tulkinta -vaiheessa tarkastellaan inventaarioanalyysin ja vaikutusarvioinnin tuloksia yhdessä. Tulkintavaiheen tulisi tuottaa tuloksia, jotka ovat tavoitteen mukaisia ja joiden perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä. Lopuksi elinkaariarvioinnista luodaan raportti, jossa tulokset ja johtopäätökset esitellään kohdeyleisölle soveltuvassa muodossa. [24]

2.2.4 Elinkaariarvioinnin luotettavuuden arviointi

Elinkaariarvioinnin tuloksissa on havaittu suuria poikkeamia hyvin samankaltaisissa rakennuksissa, mikä on herättänyt kysymyksen voiko LCA antaa luotettavia tuloksia päätöksentekoon. Säynäjoki ym. tutkivat vuonna 2017 116 rakennuksen elinkaariarvioiden tuloksia ennen kuin rakennukset oli otettu käyttöön. Eri tutkimustuloksissa hiilijalanjäljen havaittiin vaihtelevan 0,03 tonnista kahteen tonniin neliömetrille. Erot eivät johtuneet suurista eroista rakennuksissa, vaan niiden todettiin johtuvan eroista elinkaariarvioinnin menetelmissä sekä laskennassa tehdyistä olettamuksista. Suuren eron aiheuttivat myös laskennassa käytettyjen elinkaarien pituuksien sekä materiaalien käyttöikien vaihtelut. Päätöksentekijöillä tulisi olla ymmärrys tutkimuksessa tehdyistä oletuksista ja niiden vaikutuksista lopputulokseen. [25]

Häfliger ym. tutkivat vuonna 2017 kuinka materiaaleihin liittyvät valinnat vaikuttavat elinkaariarvioinnin luotettavuuteen. Tutkimuskohteena oli tietokantavalinnat, laskennan

rajaukset ja korjausennusteet. Näillä tekijöillä oli suuri vaikutus kokonaisarvioon, mutta kaikki materiaalit eivät olleet yhtä herkkiä näille valinnoille. Tietokantavalinnat ja korjausennusteet vaikuttivat eniten eristemateriaalien, ovien ja ikkunoiden tuloksiin. Tutkimuksen mukaan luotettavien tulosten saamiseksi tietokantoja ja rakenteiden käyttöä tulisi yhtenäistää. Sen sijaan tietokannoilla ei ollut käytännön vaikutusta betoni- ja muuraustuotteisiin, mutta laskennassa käytetty elinkaaren pituus vaikutti vahvasti laskentatulokseen ja tutkimuksessa todetaankin, että laskennassa käytetty elinkaaren pituus vaikuttaa huomattavasti lopputulokseen. Lyhyellä laskenta-ajalla suurimman ympäristövaikutuksen aiheuttavat tutkimuksen mukaan betoni- ja muuraustuotteet, mutta pitkällä laskenta-ajalla sen aiheuttavat ovet, ikkunat ja eristeet. [26]

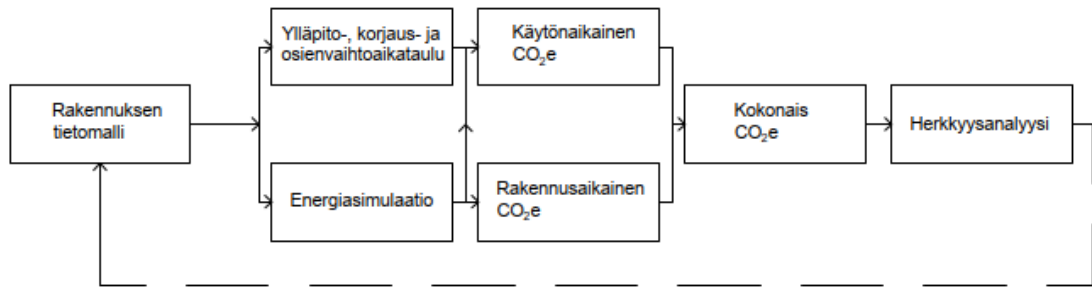
3 RAKENTAMISEN PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN

Merkittävä osa rakennuksen ympäristövaikutuksista syntyy suunnittelun alkuvaiheessa tehdyistä päätöksistä. Valitsemalla ympäristöystävällisempiä materiaaleja voidaan rakennuksen hiilijalanjälkeä laskea merkittävästi. Esimerkiksi rakennuksen muodon tarkalla suunnittelulla on ympäristöpäästöjä saatu pienennettyä jopa 40 %. [27]

Jokainen rakennusprojekti on uniikki, joten elinkaariarviointi tulisi ottaa mukaan suunnitteluun jo heti sen alkuvaiheessa esimerkiksi rakennuksen muodon, materiaalien ja rakennepaksumuksien optimoimiseksi. Haasteena tässä on lukemattomat eri vaihtoehdot ja niistä parhaiden vaihtoehtojen löytäminen. Päätöksenteon tueksi suunnittelijoilla tulisi olla ymmärrystä siitä, miten eri materiaali- ja mittapäätökset vaikuttavat hiilijalanjäljen suuruuteen ja mitkä asiat voidaan rajata päätöksenteon ulkopuolelle. Päätöksenteon tukena voidaan käyttää jo varhaisessa suunnitteluvaiheessa tietomallipohjaista elinkaariarviointityökalua, jolloin nähdään mihin asioihin suunnittelussa tulisi keskittyä hiilijalanjäljen pienentämiseksi ja mistä osista päästöjä ei enää voida pienentää. [27]

3.1 Elinkaariarvioinnin käyttäminen suunnittelun varhaisessa vaiheessa

Basbagill ym. tutkivat vuonna 2012, kuinka elinkaariarvioinnilla suunnittelun aikaisessa vaiheessa voidaan vaikuttaa rakennuksen lopulliseen hiilijalanjälkeen. Aluksi rakennuksesta luotiin ensimmäinen tietomalliversio. Tietomallin luomisen jälkeen alkoi automaattinen suunnittelu-palaute-prosessi. Laskennan osat on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Elinkaariarvioinnin laskennan vaiheet mukaillen lähdettä [27].

Hiilijalanjäljen laskentaprosessissa ensimmäisenä lasketaan rakentamisaikainen hiilijalanjälki. Olennainen osa laskentaa on mahdollisimman realistinen materiaalien määrä. Näiden lisäksi laskentatulokseen vaikuttavat kohteen sijainti, sekä rakennuksen tyyppi ja koko. Hiilijalanjälki kullekin rakennusmateriaalille lasketaan kertomalla materiaalin paino sen hiilijalanjälkikertoimella (kaava 1) ja laskentaan vaikuttavat olennaisesti taulukossa 4 esitetyt rajoitukset, muuttujat ja oletukset. Laskenta suoritetaan kaikilla valituilla muuttujilla, esimerkiksi erilaisilla rakennepaksuuksilla. Energiasimulaatio-ohjelmisto saa tietomallista suoraan taulukon 5 tiedot ja rakennukselle täytyy arvioida ylläpito- ja korjaustoimenpiteiden tarve ja aikataulu. Tiedot syötetään suoraan laskentaohjelmistoon. Käytönaikainen hiilijalanjälki lasketaan energiasimulaation ja korjaussuunnitelman perusteella ja elinkaaren hiilijalanjälki saadaan rakennusaikaisen ja käytönaikaisen laskelman summana. Herkkyyshanalyysiä käytetään etsimään kunkin rakennusosan eri vaihtoehtojen ympäristövaikutusten maksimi- ja minimiarvot. Suunnittelua voidaan näin ohjata ekologisemmaksi valitsemalla pienimmän hiilijalanjäljen aiheuttavat rakennusosat. [27]

Taulukko 4. Tietomallipohjaisen laskennan rajoitukset, muuttujat ja olettamukset mukaillen lähde [27].

<p>Rajoitukset</p> <ul style="list-style-type: none"> Sijainti Rakennuksen tyyppi Bruttopinta-ala <p>Muuttujat</p> <ul style="list-style-type: none"> Rakennusten määrä Lattiapinnan määrä Rakennuksen leveys- ja pituusparametrit Ikkuna-seinä -suhde <p>Olettamukset</p> <ul style="list-style-type: none"> Perustussyvyys Jänneväli Kerroskorkeus Käyttöikä
--

Basbagill ym. tutkimuksen kohteena oli rakennuksen pohjarakenteet, kuorirakenteet, sisätilarakenteet ja talotekniikka. Kolmessa ensimmäisessä tutkimuskohteessa materiaali- ja paksuusvalinnoilla pystyttiin vaikuttamaan hiilijalanjälkeen valtavasti. Suurimmat päästövähennykset saatiin aikaiseksi pintamateriaalivalinnoilla, pintamateriaalien paksuutta pienentämällä, sekä pilarien, lasituksien ja lattioiden materiaalivalinnalla. Materiaalivalinnalla suurimmat päästövähennysmahdollisuudet kohdistuivat verhouksiin, pohjarakenteisiin, väliseiniin ja lattioiden pintoihin. Vähiten materiaalivalinnat vaikuttivat ovien, portaiden ja talotekniikan päästöihin. Paksuusvalinnoilla suurimmat päästövähennykset saatiin aikaiseksi verhouksien, lattioiden pintarakenteiden, kattorakenteiden ja seinien maalipintojen paksuuksia säätämällä. Vähiten paksuusvalinnoilla oli vaikutusta ikkunakokoonpanojen ja talotekniikan päästöihin. Tutkimuksessa materiaalivalinnoilla rakennuksen hiilijalanjälkeä saatiin vähennettyä jopa 63-75 % verrattuna maksimaaliseen hiilijalanjälkeen. Paksuusvalinnoissa vastaava luku oli 20-37 %. [27]

3.2 Materiaalien osuus rakennusosien hiilijalanjäljessä

Chau ym. tutkivat vuonna 2012 korkeiden toimistorakennuksien hiilidioksidipäästöjä Hong Kongissa. Mukana tutkimuksessa oli 13 vuosina 1995-2005 valmistunutta 16-62-kerroksista rakennusta. Rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeen vaikuttaa suuresti niiden valmistamiseen tarvittava energiamäärä ja energian tuottamistapa (esim. öljy, tuulivoima, aurinkovoima, ydinvoima). Hiilijalanjälki kullekin rakennusmateriaalille laskettiin kertomalla materiaalin paino sen sisältämällä energiaintensiteetillä sekä hiilijalanjälkikertoimella. Rakennusmateriaaleja tuotiin Hong Kongiin useista eri maista, ja myös kuljetus ja kunkin maan valmistusolosuhteet huomioitiin laskennassa. Sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt vaihtelevat eri maissa valmistetuille rakennusmateriaaleille niiden sähköntuotantotavan mukaan, joten materiaalien päästöille laskettiin keskiarvo, jota käytettiin laskennassa. [28]

Chau ym. tutkimuksessa havaittiin, että suurimman hiilijalanjäljen aiheuttaa rakennuksen vaipparakenteet, keskimäärin $215 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$. Suurin hiilijalanjälki toimistorakennuksissa on tutkimuksen mukaan ulkoseinillä $75,3 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ sekä yläpohjarakenteella $75,7 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$, näiden jälkeen välipohjien alakattorakenteilla sekä pintakäsittelyillä $30,1 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$. Nämä kaikki muodostivat yhdessä 84,2 % maanpäällisten osien hiilijalanjäljestä. Tutkimuksessa vertailtiin myös viiden eri materiaalivaihtoehdon päästöjä 60 vuoden laskenta-ajalla. Materiaalivertailussa betonin, raudoituksen ja alumiinin todettiin aiheuttavan suurimman osan hiilijalanjäljestä. [28]

Tehokkaimmaksi päästöjä vähennyskeinoksi todettiin olemassa olevien rakenteiden huoltaminen niiden vaihtamisen sijaan. Huoltamalla ja uusiokäyttämällä 15-30 % rakennusosista voidaan hiilijalanjälkeä pienentää jopa 17,3 % ja hiilijalanjälkeä voidaan siis edelleen pienentää huoltamalla vielä suurempaa osaa rakenneosista. Toinen tehokas keino on rakennusjätteiden kierrätys. Vaikka rakennusjätteiden osuus koko rakennusprosessissa on pieni, voi niiden kierrättäminen vähentää hiilijalanjälkeä keskimäärin 5,9 %. Uusiokäyttämällä 5-10 % jo olemassa olevista rakenteista voidaan hiilijalanjälkeä pienentää keskimäärin 3,2 % ja samansuuruiset päästövähennykset saadaan suosimalla lähellä tuotettuja paikallisia materiaaleja, jolloin kuljetuksen

aiheuttamat päästöt vähenevät. Vastaavasti hiilijalanjälki kasvaa, mitä enemmän materiaaleja tuodaan pitkän etäisyyden päästä rakennuspaikasta. [28]

3.2.1 Betonin ympäristöystävällisyyden kehittäminen

Betonin on todettu olevan rakennusmateriaaleista kaikista suurin päästöjen aiheuttaja tuottaen jopa 20-28 % kokonaisympäristövaikutuksesta [28]. Betonin raaka-aineita ovat vesi, sementti ja kiviaines [29]. Suurin osa päästöistä aiheutuu sementin tuotannosta ja se aiheuttaaakin jopa 8 % koko maapallon hiilidioksidipäästöistä. Hiilidioksidia vapautuu sementin valmistamisen kemiallisesta reaktiosta sekä siihen tarvittavasta lämmöntuotannosta. [30]

Betonin ympäristöystävällisyyttä on pyritty kehittämään korvaamalla osa sementistä muilla materiaaleilla, kuten lentotuhkalla, masuunikuonalla ja silikalla. Lentotuhkaa voidaan käyttää betonissa hienoaineksena tai sementin korvikkeena, masuunikuonalla voidaan korvata portlandsementtiä, ja silika tekee betonista lujempaa. [29] Suomessa esimerkiksi Finnsementti on kehitellyt ympäristöystävällisemmän Plussementin, joka sisältää 10-25 % masuunikuonaa ja sementti soveltuu käytettäväksi valmisbetonissa, elementeissä ja muissa betonituotteissa [31].

Vuosina 2002-2004 Suomessa toteutettiin Ympäristöystävälliset ja hyvin säilyvät betonit -tutkimus, jonka tarkoituksena oli löytää ympäristöystävällinen, taloudellinen ja säilyvä betonilaatu. Sementtiä korvaavina ainesosina käytettiin teollisuuden sivutuotteina saatavaa lentotuhkaa ja masuunikuonaa. Koebetoneina käytettiin betonin yleisimmin käytettyjä lujuusluokkia C30/37 ja C45/55. C30/37-betonissa käytettiin seosaineena lentotuhkaa ja sen määrä oli 20, 40 ja 60 % sideaineiden (sementti + lentotuhka) yhteenlasketusta määrästä. C45/55-betonissa käytettiin masuunikuonaa ja sen osuus oli 25, 50 ja 70 % kokonaissideainemäärästä. Tutkimuskysymyksenä oli seosaineiden määrän ja jälkihoidon vaikutukset betonin lujuuden kehittymiseen, lopulliseen lujuuteen ja säilyvyyteen. Vertailubetonina käytettiin vastaavien lujuusluokkien tavallista betonia. Koebetoniin pakkasenkestävyyden todettiin olevan erinomainen 70 % masuunikuonaa sisältävää betonia lukuun ottamatta. Lentotuhkabetonit todettiin sopimattomaksi suolarasitetuun ympäristöön. Kaikki koebetoni olivat laskennallisesti yli 100 vuotta

kestäviä pakkasrasituksessa ilman suolarasitusta. Ympäristövaikutusten tarkastelu osoitti, että mitä enemmän sementtiä korvataan lentotuhkalla tai masuunikuonalla, sitä pienempi ympäristörasitus betoniseoksella on materiaaleissa, energiankulutuksessa ja ilmastonmuutoksessa. Masuunikuonan lisäys pienentää ympäristökuormaa tehokkaammin kuin lentotuhkan. Masuunikuonabetoni todettiin myös edullisemmaksi kuin vertailubetoni, lentotuhkabetoni oli puolestaan vertailubetonin kanssa samassa hintaluokassa. Lentotuhka ja masuunikuona ovat teollisuuden sivutuotteita, joten niiden valmistuksesta johtuvat päästöt ovat jo syntyneet. Suurin osa betonista toimitetaan kohteisiin joissa ei ole säilyvyysvaatimuksia, jolloin uusiomateriaalien käyttöä voidaan huomattavasti lisätä ja samalla säästää energiaa, vähentää päästöjä ja pienentää betonin valmistuskustannuksia. [32]

Kurad. ym. tutkivat vuonna 2017 kierrätysbetonin ja lentotuhkan käyttöä betonin raaka-aineena. Raaka-aineina käytettiin hienoa kierrätysbetonia, karheaa kierrätysbetonia ja lentotuhkaa sekä erikseen, että eri materiaalien kombinaatioina. Osassa tutkimusbetoneista käytettiin myös notkistimia lisäaineena. Vertailukohteena oli perinteinen betoni ja tutkimuskohteena betonien lujuudenkehitys sekä ilmastonlämpenemispotentiaali. Betoniluokka ei vaikuttanut tässä tutkimuksessa millään lailla tuloksiin. Lujuudenkehitykseen suurilla määrillä pelkästään lentotuhkaa tai kierrätysbetonia havaittiin olevan negatiivisia vaikutuksia, mutta näitä yhdistämällä betonin lujuus kehittyi paremmin. Hiilijalanjälki pieneni kaikilla vaihtoehtoisilla materiaaleilla verrattuna tavalliseen betoniin, mutta notkistimien käyttö nosti betonin hiilijalanjälkeä hieman. Suurimman pienennyksen hiilijalanjälkeen aiheutti lentotuhka, toisena tuli hieno kierrätysbetoni ja kolmantena karhea kierrätysbetoni. Paras vaihtoehtoisten materiaalien yhdistelmä sekä lujuudenkehityksen että ilmastonlämpenemispotentiaalin kannalta saatiin, kun kiviaines korvattiin kokonaan karhealla kierrätysbetonilla ja lentotuhkaa käytettiin 60 % betonin notkistimien kanssa. [33]

Suomalainen Betolar on kehittelemässä täysin sementitöntä betonia ja sementin korvikkeena betonissa käytetään muita kuiva-ainekomponentteja, kuten kuonaa ja lentotuhkaa. Betolarin betonin hiilidioksidipäästöt ovat jopa 80 % pienemmät ja

neitseellisten luonnonvarojen kulutus 95 % alhaisempi kuin sementtipohjaisilla materiaaleilla. Uuden betonin koevalut on toteutettu syksyllä 2020 ja Betolarilla on tavoitteena nostaa betoni varteenotettavaksi kilpailijaksi puulle. [34]

3.2.2 Puu rakennusmateriaalina ja mahdollisena betonin korvaajana

Puu on kasvattanut suosiotaan rakennusmateriaalina, kun huoli ilmastonmuutoksesta ja luonnonvarojen riittävydestä on herännyt. Puu on pitkäikäinen rakennusmateriaali ja sitä käyttämällä voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä ilmakehään useista syistä [17]:

- Tuotannossa tarvittavan energian määrä on pienempi kuin teräksen tai betonin tuotannossa.
- Puu sitoo hiiltä rakenteisiinsa koko sen eliniän ajan ja toimii hiilinieluna.
- Puun jätteet ja sivutuotteet voidaan kierrättää tai polttaa ja käyttää kompensaationa energiantuotannossa.
- Suurin osa puun sitomasta energiasta voidaan hyödyntää energiantuotannossa, kun jatkokierrätys ei ole mahdollista.

Tavanomaisten rakennusosien korvaaminen puulla voi auttaa saavuttamaan hiilidioksidipäästöjen tavoitteita keskipitkällä tai pitkällä aikavälillä [17]. Suomessa puuta käytetään paljon pientalojen rakennusmateriaalina. Uusien päästövähennystavoitteiden myötä puu on kasvattanut suosiotaan myös kerrostalojen rakentamisessa ja on osoittautunut kilpailukykyiseksi materiaaliksi ilmastonmuutoksen torjunnassa. [35]

Brittiläisen Kolumbian yliopistossa toteutetussa tutkimuksessa vertailtiin kahden korkean asuinrakennuksen elinkaariarviointeja ja -kustannuksia. Rakennukset ovat muodoltaan samanlaisia, mutta toinen rakenteeltaan pääasiassa puurunkoinen ja toinen perinteinen betonirakenteinen. Elinkaariarvioinnin mukaan puurakenteisen kerrostalon ilmastonlämpenemispotentiaali oli 25 % pienempi ja fossiilisten polttoaineiden ehtymispotentiaali 18 % pienempi, kuin betonirakenteisen kerrostalon. Pelkästään runkorakenteet huomioiden puurakenteisen kerrostalon ilmastonlämpenemispotentiaali oli 36 % pienempi. Sen sijaan puurakenteisen rakennuksen kustannukset olivat 11 %

betonirakenteista suuremmat, mutta tämä johtui lähinnä suurista innovaatiokustannuksista ja kustannusten odotetaan putoavan seuraavissa vastaavissa projekteissa. [36]

Helsinkiin rakennettiin vuosina 2018-2020 kaksi lähes identtistä asuintalokokonaisuutta, joista toinen oli betonirunkoinen ja toinen puurunkoinen. Puurakenteisen rakennuksen hiilijalanjälki todettiin betonirakenteista pienemmäksi. Puurakenteisen talon rakennusmateriaalien päästöt olivat noin 20 % pienemmät kuin betonirakenteisen ja lisäksi puutuotteisiin sitoutuu käytön ajaksi hiilivarasto, mikä vastaa noin puolta sen ilmastopäästöstä. Sadan vuoden laskenta-ajalla 75 % päästöistä olivat asumisen aikaisen energiankulutuksen aiheuttamat ja puurakenteisen talon päästöt todettiin kuusi prosenttia pienemmiksi kuin betonirakenteisen. Betonirakennuksen suunnittelu todettiin nopeammaksi pitkästä suunnittelukokemuksesta johtuen, mutta puurakenteisen talon rakentaminen oli nopeampaa, sillä betoni vaatii aikaa kuivuakseen. Asukastyytyväisyydessä ei todettu suuria eroja, puutalossa sisälämpötila koettiin liian korkeaksi hieman useammin kuin betonitalossa. Rakentamisen kustannustietoja ei julkaistu, mutta puurakentamisen todettiin olevan betonirakentamista kalliimpaa. [37]

4 HIILIJALANJÄLKILASKENNAN SUORITTAMINEN

4.1 Laskennan kohteena oleva kerrostalo ja laskennan sisältö

Vihreä kortteli tulee muodostumaan kolmesta kerrostalosta ja kahdesta rivitalosta. Laskennan kohteeksi valittiin kerrostaloista talo B. Rakennus on 4-kerroksinen ja sen kokonaispinta-alana on käytetty neliömäärää 2384 m² ja lämmitettynä pinta-alana 2368 m². Vihreän korttelin havainnekuva on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Vihreän Korttelin havainnekuva [38].

Laskennan tavoitteena oli vertailla talonrakennuksessa yleisesti käytössä olevien rakennetyyppien hiilijalanjälkiä, jotta lopulliseen rakennesuunnitteluun osattaisi valita aikaisempaa ekologisempia vaihtoehtoja. Koko rakennuksen hiilijalanjälki laskettiin ensin referenssikohteen rakennetyypeillä, minkä jälkeen eri rakennetyyppien vertailu suoritettiin vaihtamalla rakennetyyppejä yksi kerrallaan ja suorittamalla laskenta uudelleen. Vertailu- eli referenssikohteenä käytettiin Rakennustehon vasta rakennuttamaa saman arkkitehtitoimiston suunnittelemaa ja samaa kokoluokkaa olevaa kerrostaloa. Laskennassa huomioitiin myös rakennuksen energiankulutus ja sen muutokset rakennetyyppien vaihtuessa. Lopuksi suoritettiin vielä kaksi koko rakennuksen hiilijalanjälkilaskentaa. Ensimmäiseen laskentaan valittiin rakennetyypit, joilla on pienin

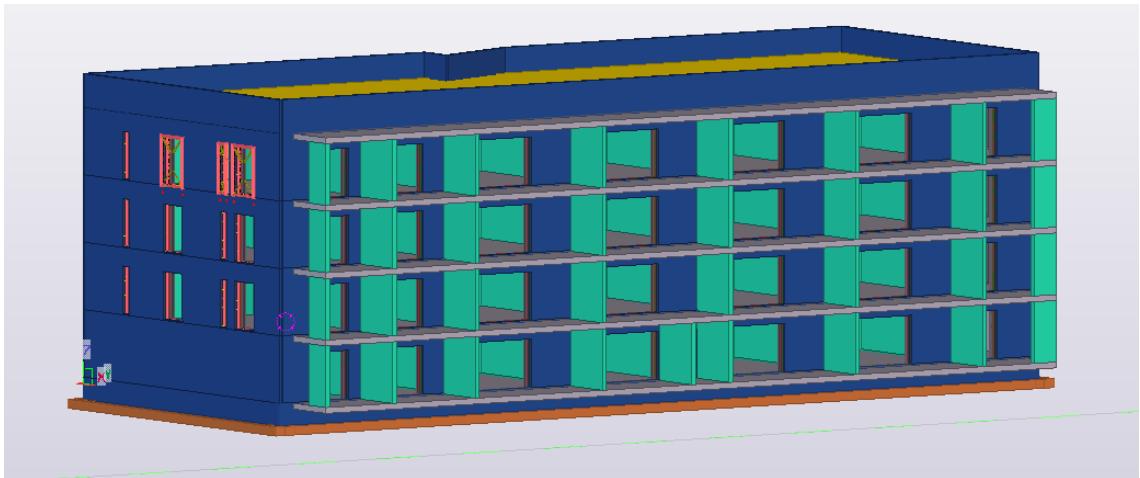
hiilijalanjälki. Tämän laskennan tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon hiilijalanjälkeä olisi teoreettisesti mahdollista pienentää. Toiseen laskentaan valittiin sellaiset rakennetyypit, joilla hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen summa saatiin mahdollisimman pieneksi. Tämän laskelman tulosten perusteella voitiin arvioida, kuinka lähelle hiilineutraaliutta valinnoilla päästiin.

4.2 Laskentaohjelmistojen esittely ja laskentamenetelmän valinta

Hiilijalanjäkilaskenta suoritettiin Bionovan julkaisemalla One Click LCA -linkaarilaskentatyökalulla (myöhemmin OCL). Ohjelmisto on helppokäyttöinen ja sisältää valmiin kattavan materiaalitietokannan, joten rakennusmateriaalien päästötietoja ei tarvitse alkaa yksitellen etsimään. Ympäristöministeriö on käyttänyt myös laskentatyökalua arvioidessaan Suomessa rakennettujen rakennusten hiilijalanjälkiä [39], joten laskennan tulokset ovat vertailukelpoisia. Ohjelmisto on selainpohjainen, eikä laskentaa varten tarvitse ladata erillistä ohjelmaa. OCL tukee LEED- ja BREEAM-sertifiointeja sekä Level(s)-menetelmää. Tiedot voidaan tuoda ohjelmistoon myös rakennuksesta tuotettua valmista tietomallia hyödyntämällä.

Rakennusmateriaalien määrän arviointia varten luotiin tietomalli Tekla Structures -tietomalliohjelmistolla arkkitehti- eli ARK-pohjien perusteella. Ohjelmistolla rakennuksesta saadaan luotua todellisiin mittoihin perustuva kolmiulotteinen malli ja ohjelmiston Organizer-työkalulla voidaan kerätä rakennusmateriaalien tietoja kategorioihin ja viedä suoraan Excel-ohjelmaan jatkokäsittelyä varten. Excelissä rakennusmateriaalien määrät saadaan helposti summattua ja siirrettyä OCL-ohjelmistoon. Tekla Structures -ohjelmistolla luotu kerrostalon malli on esitetty kuvassa 7.

OCL ei sisällä työkalua energiankulutuksen arviointia varten, joten energialaskenta suoritettiin CADMATIC HVAC -ohjelmiston Energialaskenta-työkalulla. Työkalulla voidaan tehdä rakennuksille virallisia energiatodistuksia ja -selvityksiä.



Kuva 7. Laskennassa käytettävä kerrostalo mallinnettuna Tekla Structures -ohjelmalla.

Hiilijalanjälkilaskennan menetelmäksi valittiin Ympäristöministeriön menetelmä, mikä pohjautuu Euroopan Unionin Level(s)-menetelmään sekä kestäväää rakentamista käsitteleviin EN-standardeihin (EN 15643, EN 15978 ja EN 15804). Menetelmä on uusi ja vasta pilotointivaiheessa, joten laskentamenetelmään voi tulla pilotoinnin jälkeen vielä muutoksia. Ympäristöministeriön menetelmällä laskettaessa arviointiin sisältyvät elinkaaren vaiheet on esitetty taulukossa 5.

Ympäristöministeriö on myös listannut arviointiin sisällytettävät osa-alueet. Arviointiin tulee sisällyttää koko rakennus, keskeiset osat talotekniikasta ja tontilla olevat muut rakenteet. Arvioitavat rakennuksen osat on esitetty tarkemmin taulukossa 6. Arviointiin ei sisällytetä muun muassa pihakasvillisuutta, tuotteisiin kuulumattomia kiinnikkeitä kuten nauloja ja saumauksia, pintakäsittelyjä ja maalauksia, tietoteknisiä järjestelmiä ja automaatioita, erillisiä koneita ja työmaan väliaikaisia rakenteita. Jos rakennusprojekti on aikaisessa vaiheessa, voidaan laskennassa käyttää Ympäristöministeriön määrittelemiä taulukkoarvoja muun muassa talotekniikalle ja työmaatoiminnoille. Nämä taulukkoarvot ovat keskiarvoihin perustuvia ja käyttökelpoisia riittäväällä tarkkuudella silloin, kun todennukaisia arvoja ei vielä osata arvioida.

Taulukko 5. Ympäristöministeriön menetelmällä laskettaessa huomioitavat elinkaaren vaiheet mukaillen lähdettä [39].

Ennen käyttöä	
A1-A3	Tuotteiden valmistus
A4	Kuljetukset työmaalle
A5	Rakentaminen
Käytön aikana	
B3-4	Korjaukset ja vaihdot
B6	Energian käyttö
Käytön jälkeen	
C1	Purkuyöt
C2	Kuljetukset käsittelyyn
C3	Jätteenkäsittely
C4	Loppusijoitus

Taulukko 6. Ympäristöministeriön menetelmällä laskettaessa arviointiin sisällytettävät rakennuksen osat mukaillen lähdettä [39].

Tontti	+ Maanosat + Tuennat ja vahvistukset + Päällysteet + Alueen rakenteet
Kantavat rakenteet	+ Perustukset + Alapohjat + Runko + Julkisivut, ovet ja ikkunat + Ulkotasot + Kattorakenteet
Täydentävät rakenteet	+ Väliseinät ja ovet + Portaat + Pintarakenteet + Tyypilliset kiintokalusteet + Hormit ja tulisijat + Tilaelementit
Talotekniikka	+ Lämmitysjärjestelmät + Vesi - ja viemärijärjestelmät + Jäähdytysjärjestelmät + Sprinklerit +Sähköjärjestelmät + Hissit
Työmaa	+ Työmaalla kulutettu energia

4.3 Laskennan oletukset ja rajaukset

Laskenta-aikana on käytetty 50 vuotta. Asukkaiden määrä on arvioitu laskemalla huoneistoala 30 neliömetrille, jolloin kerrostalon asukkaiden määränä laskennassa on käytetty 55 asukasta. Vedenkulutukseksi on arvioitu 155 litraa henkilöä ja vuorokautta

kohden. Korttelin talojen rakennesuunnittelua ei ole vielä aloitettu ja arkkitehtipiirustuksetkin ovat hyvin alustavia, joten laskennassa on pitänyt tehdä paljon oletuksia ja arvioita. Arkkitehtipohjiin ei ole merkitty asuntojen sisäisiä seiniä, joten seinien määrä on arvioitu referenssikohteen arkkitehtipiirustuksien samankokoisten huoneistojen seinämäärien perusteella. Myöskään arkkitehdin tekemää ikkunaluetteloa ei ollut vielä saatavilla, joten laskennassa käytetty ikkunoiden koko on arvioitu alustavan massamallin avulla. Lämmitysmuodoksi on oletettu kaukolämpö. Betonin rauditusmääränä on käytetty OCL:n automaattisia arvioita betonikuutiota kohden ja käytetty betonirauditus vaihtelee $35\text{-}80\text{ kg/m}^3$ välillä rakennusosasta riippuen. Betonin lujuusluokkana on käytetty luokkaa C30/37, vaikka todellisuudessa esimerkiksi ulkorakenteet voivat tarvita lujempaa betonia. Perustustapana on käytetty referenssikohteen perustamistapaa. Rakennusosien käyttöajat tulee määrittää Ympäristöministeriön menetelmällä laskettaessa Rakennustietosäätiön ohjeistuksen mukaan ja suurimman osan rakennusosista oletetaan kestävän rakennuksen koko käyttöiän ajan. Rakennusosia, joille on määritetty koko rakennuksen käyttöiästä poikkeava käyttöikä ovat [40]

- Märkätilojen laatoitus 30 v
- Vesikaton kumibitumikermikate 20 v
- Parvekkeen lasitukset ja lasiovet 40 v
- Porraskäytävien muovimatto 30 v
- Parkettilattia 25 v
- Piha-alueen asfaltointi 20 v
- Hissi 40 v

Vertailun kohteena oleville rakennetyypeille on ilmoitettu laskennassa käytetty käyttöikä Rakennustietosäätiön mukaisesti [40], jos se poikkeaa koko rakennuksen käyttöiästä. Muussa tapauksessa rakenneosan oletettu käyttöikä on sama kuin koko rakennuksen käyttöikä. Osalle materiaaleista OCL:stä löytyy rakenneosan hiilijalanjäljen keskiarvotieto, osalle taas valmistajakohtainen tieto. Jos laskennassa on käytetty valmistajakohtaista tietoa, on valmistaja ilmoitettu kyseisen rakenneosan kohdalla. Muussa tapauksessa laskennassa on käytetty kyseisen rakenneosan keskiarvotietoa.

Rakenteille on määritetty U-arvo eli lämmönläpäisykerroin, joka kuvastaa rakennusosan lämmöneristyskykyä. Mitä pienempi rakenteen U-arvo on, sitä paremmin se eristää lämpöä. Lämmönläpäisykerroimen yksikkö on SI-järjestelmän mukaisesti W/m^2K eli wattia neliometriä ja kelviniä kohden. Referenssikohteessa on käytetty Rakennusmääräyskokoelman mukaisia U-arvojen suurimpia sallittuja arvoja ulkoseinille, alapohjalle ja yläpohjalle ja ne on esitetty taulukossa 7. [41]

Taulukko 7. Ulkopintojen U-arvot [41].

Rakenne	U-arvo (W/m^2K)
Ulkoseinä	0,17
Alapohja	0,16
Yläpohja	0,09
Ikkunat	1,00
Parvekeovet	0,84

4.4 Vertailun kohteena olevat rakennetyypit ja materiaalityypit

Rakennuksen hiilijalanjälki laskettiin ensin referenssikohteen rakennetyyppejä käyttämällä. Referenssikohteen rakennetyypit on kerätty taulukkoon 8.

Taulukko 8. Referenssikohteessa käytetyt rakenteet, materiaalit ja materiaalin määrän arvioinnin lähde.

Rakenne	Materiaalit	Materiaalin määrän arvioinnin lähde
Perustukset ja maanalaiset rakenteet	Betoninen sokkeli- ja seinänturaperustus, teräsbetoninen paaluperustus 10 m EPS-routaeriste	OCL:n keskiarvotieto pinta-alaan perustuen
Alapohja-rakenne	Pumpputasoite 25 mm Erotuskangas Askelääntä eristävä EPS-levy 35 mm Massiivinen teräsbetonilaatta 200 mm EPS-lattiaeriste 200 mm Tiivistetty kapillaarisen nousun estävä kerros + suodatinkangas	Tietomalli
Välipohja-rakenne	Pumpputasoite 25 mm Erotuskangas Askelääntä eristävä EPS-levy 35 mm Massiivinen teräsbetonilaatta 240 mm	Tietomalli
Yläpohja-rakenne	Kumibitumikermikate NR-ristikkorakenne Puhalluskivivilla 450 mm Massiivinen teräsbetonilaatta 240 mm	OCL:n keskiarvotieto pinta-alaan perustuen
Ulkoseinät	Kantava seinä: US1* tiiliverhous 135 mm, tuulensuoja-mineraalivilla 50 mm, lasivilla 175 mm, teräsbetoniseinä 160 mm Ei-kantava seinä: US5* tiiliverhous 135 mm, tuulensuoja-mineraalivilla 50 mm, lasivilla 175 mm, kipsilevy 13 mm. Parvekesivulla US7* puuverhous 23 mm	Tietomalli
Väliseinät	Asuntojen väliset: Teräsbetoniseinä 200 mm Asuntojen sisäiset: Kahi- desibelipontti, teräsrankaseinä mineraalivillaeristeellä ja kipsilevyverhouksella Betoninen porras -ja hissikuilu	Tietomalli Arvio ARK-pohjien perusteella
Välipohjien pintarakenteet	Asunnoissa parkettilattia Porraskäytävässä muovimatto Märkätiloissa laatta	Tietomalli

*Rakennetyyppikuva on esitetty liitteessä 1.

Rakenne	Materiaalit	Materiaalin määrän arvioinnin lähde
Parveke-rakenne	Teräsbetoni-laatta 280 mm Teräsbetoninen parvekepieli 200 mm Parvekelasitus	Tietomalli
Ovet ja ikkunat	Kolminkertaiset ikkunat, puu-alumiinikehys Parvekkeille lasiovet, puu-alumiinikehys Sisäövet puurakenteisia Ulko-ovi teräsrakenteinen	Tietomalli, arvio ARK-pohjien perusteella
Piharakenteet	Puurunkoinen pyöräkatos Puurunkoinen autokatos Asfalttipinta ja pihakivetys	Arvio Vihreän Korttelin havainnekuvioiden perusteella
Talotekniikka	Viemäriputkisto Vesijohtojärjestelmä Sähköasennukset ja -kaapeloinnit Lämmönjakokeskus ja -verkosto Ilmanvaihtojärjestelmä Hissi	Ympäristöministeriön talotekniikan oletusarvot

4.4.1 Energiankulutuksen arviointi

Rakennuksen energiankulutus arvioitiin Cadmatic HVAC:n Energialaskenta 2018-työkalun avulla. Laskentaohjelmiston perustietoihin syötettiin rakennuksen kerrosalat- ja tilavuudet. Tehon laskennassa todellisena säävyöhykkeenä käytettiin luokkaa III Jyväskylä-Luonetjärvi. Johtumistietoihin syötettiin ikkunoiden, seinien, ovien, yläpohjan ja alapohjan pinta-alat ja U-arvot ja näiden osien väliset liitokset määriteltiin kylmäsilloiksi. Ikkunoille määritettiin pinta-alat joka ilmansuuntaan ja ohjelmisto huomioi myös ikkunoiden kautta tulevan ja talon asukkaiden tuottavan lämpöenergian määrän. Lämmönjakotavaksi asetettiin lattialämmitys ja lämmöntuottotavaksi kaukolämpö. Lämmitettävän veden määräksi oletettiin noin 40 % kokonaisvedenkulutuksesta. Rakennuksen sisälämpötilana käytettiin arvoa 21 C° ja ilmanvaihdoksi oletettiin koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto sisältäen lämmön talteenoton.

4.4.2 Perustukset, välipohjat, ala- ja yläpohja

Rakennuksen perustamistavasta ei ole tietoa, sillä diplomityötä aloittaessa kohteelle ei oltu tehty pohjatutkimusten perusteella laadittua perustamistapalausuntoa. Tutkimuksessa selvitettiin, kuinka paljon perustustapa ja maaperän laatu vaikuttavat hiilijalanjälkeen. Perustusten laskennassa käytettiin OCL:n sisältämää keskiarvotietoa eri perustamistavoille ja maaperän laaduille. Vertailtavia perustamistapoja ja alapohjan laattarakenteita olivat

- Maanvarainen laatta paalutuksilla: massiivinen teräsbetoni-laatta 200 mm + teräsbetoni-paalutus 10 m paaluilla
- Tuulettuva alapohja ontelolaatalla ja paalutuksilla: ontelolaatta 320 mm + teräsbetoni-paalutus 10 m paaluilla
- Maanvarainen laatta anturaperustuksella pehmeälle maaperälle: Teräsbetoni-laatta 80 mm + anturaperustus
- Maanvarainen laatta anturaperustuksella kovalle maaperälle: Teräsbetoni-laatta 80 mm + anturaperustus
- Maanvarainen laatta anturaperustuksella kalliolle: Teräsbetoni-laatta 80 mm + anturaperustus

Välipohjien ja yläpohjan laattarakenteiden vertailtavia rakenteita olivat

- Massiivinen teräsbetoni-laatta 240 mm
- Ontelolaatta 320 mm

Kerroksiin sisältyvät eristeet vertailtiin eristeet-osiossa. Vesikatteiden vertailun kohteena olivat

- Kumibitumikermikate 4,4 mm, käyttöikä 20 v
- Ruostumaton teräspeltikate (Outokumpu) 0,5 mm
- Sinkitty teräspeltikate (Ruukki) 0,5 mm
- Savikattotiilikate 10 mm

Välipohja- ja alapohjalaattojen päällysmateriaalien vertailun kohteena olivat

- Massiivipuuparketti 14 mm, käyttöikä 30 v
- Lattialaminaatti 6 mm, käyttöikä 15 v
- Muovimatto 2,25 mm, käyttöikä 25 v

4.4.3 Seinärakenteet

Ulkoseinistä vertailtiin erikseen kantavan seinän ja ei-kantavan seinän rakennetyypivaihtoehdot. Rakennetyypikuvat US1-US7 on esitetty liitteessä 1. Kantavien seinien vaihtoehtoisia rakennetyypivaihtoehtoja olivat

- US1 Tiiliverhous: teräsbetoninen sisäkuori 160 mm, lämmöneriste lasivilla 175 mm, tuulensuojamineraalivilla 50 mm, tiiliverhous 135 mm
- US2 Sandwich: teräsbetoninen sisäkuori 160 mm, lasivillaeriste 230 mm, teräsbetoninen ulkokuori 80 mm
- US3 Puuverhous: teräsbetoninen sisäkuori 160 mm, lämmöneriste lasivilla 175 mm, tuulensuojamineraalivilla 50 mm, ulkoverhouslauta 23 mm
- US4 Hirsiseinä: Kontio Smart Log hirsiseinä rakenne 275 mm

Ei-kantavien ulkoseinien rakennetyypivaihtoehtoja olivat

- US5 Tiiliverhous: Sisäpinnassa kipsilevy 13 mm, höyrynsulkumuovi 0,2 mm, lämmöneriste lasivilla 175 mm, tuulensuojamineraalivilla 50 mm, tiiliverhous 135 mm.
- US6 Sandwich: Teräsbetoninen sisäkuori 80 mm, lasivillaeriste 230 mm, teräsbetoninen ulkokuori 80 mm
- US7 Puuverhous: Sisäpinnassa kipsilevy 13 mm, lämmöneriste lasivilla 175 mm, tuulensuojamineraalivilla 50 mm, ulkoverhouslauta 23 mm
- US4 Hirsiseinä: Kontio Smart Log hirsiseinä rakenne 275 mm

Ulkoseinärakenteista tehtiin kokonaishiilijalanjälkeä laskettaessa yhdistelmät

- Tiiliverhous: Kantavat seinät US1 tiiliverhous, toinen ei-kantava seinä US5 Tiiliseinä ja toinen US7 Puuverhous
- Sandwich: Kantavat seinät US2 Sandwich, ei-kantavat seinät US6 Sandwich
- Puuverhous: Kantavat seinät US3 Puuverhous, ei-kantavat seinät US7 Puuverhous
- Hirsiseinä: Kantavat ja ei-kantavat seinät US4 Hirsiseinä

Väliseinien laskennassa vertailun kohteena oli asuntojen väliset seinät. Kantavien seinien oletettiin olevan teräsbetoniseiniä ja vertailussa etsittiin vaihtoehtoja ei-kantaville asuntojen välisille seinille. Seinille on ilmoitettu myös äänitasoeroluku $D_{nT,w}$, mikä kuvastaa seinän ääneneristyskykyä. Mitä suurempi äänitasoeroluku on, sitä paremmin rakenne eristää ääntä. Väliseinävertailun kohteena olivat

- Teräsbetoniseinä 200 mm, $D_{nT,w} = 52$ dB
- Teräsrunkaseinä 204 mm, kaksinkertainen mineraalivillaeriste ja kaksinkertainen kipsilevyverhous, $D_{nT,w} = 55$ dB
- Kahi-desibelipontti 240 mm, $D_{nT,w} = 55$ dB

4.4.4 Eristeet

Eristelaskelmassa vertailtiin eri eristelaatujen hiilijalanjälkeä. Vertailtavuuden varmistamiseksi eristeiden paksuus määriteltiin niin, että seinärakenteen U-arvo on kaikilla eristeillä sama $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Eristepaksuus on pyöristetty ylöspäin 10 mm tarkkuudella.

Eristeiden paksuus määritettiin kaavalla (2)

$$d = R * \lambda \quad (2)$$

missä d = eristepaksuus (mm)

$$R = \frac{1}{U} = \text{lämmönvastus (Km}^2\text{/W)}$$

$$\lambda = \text{materiaalin lämmönjohtavuus (W/mK)}$$

Vertailtavat eristelaadut, niiden lämmönjohtavuuden kerroin ja laskennassa käytettävä paksuus on esitetty taulukossa 9. Taulukkoon on merkitty myös laskennassa käytetyn eristeen valmistaja, sillä tulokset voivat hieman poiketa eri valmistajilla. Eristystä tarvitaan talon ulkoseinä- alapohja- ja yläpohjarakenteissa. Myös välipohjissa ja väliseinissä käytetään yleisesti eristeitä äänieristystä varten. Talon eri osissa käytetään eri laatuksia eristeitä, eivätkä kaikki eristeet sovellu käytettäväksi jokaisessa eri kohteessa. Tässä vertailussa oli mukana eri rakennuskohteiden eristeitä, ja koko talon vertailulaskelmissa joka kohteeseen valittiin kyseiseen käyttökohteeseen soveltuvien vaihtoehto.

Taulukko 9. Vertailun kohteena olevat eristetyypit

Eristetyyppi	λ (W/mK)	Eristeen paksuus (mm)
Lasivilla (Isover)	0.037	230
Kivivilla (Paroc)	0.037	230
Selluvilla (Ekovilla)	0.038	240
Polyuretaani (Finnfoam)	0.023	140
EPS (Finnfoam)	0.031	190
XPS (Finnfoam)	0.031	190

Lasivillalle tehtiin lisäksi laskelma, jossa vertailtiin eri eristepaksuuksien vaikutusta U-arvoon, energiankulutukseen ja kokonaishiilijalanjälkeen. Rakennepaksuudet määritettiin kaavalla (2). Vertailtavat eristepaksuudet on koottu taulukkoon 10.

Taulukko 10. Lasivillan vertailtavat rakennepaksuudet ja U-arvot.

U-arvo (W/m ² K)	Eristeen paksuus (mm)
0,17	230
0,16	240
0,15	260
0,14	280
0,09	430

4.4.5 Parvekelinjat

Parvekerakenteista tutkittiin vaihtoehtoja parvekkeen välipohjarakenteelle sekä kannatukselle. Parvekevälipohjan vaihtoehtoiset rakennetyypit olivat

- Teräsbetoninen kuppiparvekelaatta, reunat 280 mm
- Hirsirakenteinen parvekevälipohja 280 mm

Parvekkeen kannatuksen vaihtoehtoisia rakennetyyppejä olivat

- Teräsbetoninen parvekepieli 200 mm
- Teräsbetonipilari 280 mm x 280 mm + kevyt puurakenteinen väliseinä 255 mm
- Ulokeparveke Schöck Isokorb -lämmöneristys-elementillä + kevyt puurakenteinen väliseinä 255 mm

Teräsbetoninen parvekepieli toimii rakenteen kannatuksena ja samalla myös väliseinä. Pilarikannatteinen laatta ja ulokeparveke tarvitsevat erilliset kevyet väliseinä-rakenteet. Parvekelaatoista ja -kannatuksista tehtiin yhdistelmät, joita olivat

- Teräsbetoninen parvekepieli + teräsbetoninen kuppiparvekelaatta
- Teräsbetonipilari + kevyt väliseinä + teräsbetoninen kuppiparvekelaatta
- Schöck Isokorb + kevyt väliseinä + teräsbetoninen kuppiparvekelaatta
- Teräsbetoninen parvekepieli + hirsirakenteinen parvekevälipohja

4.4.6 Muut tavat pienentää hiilijalanjälkeä

OCL:ssa voidaan osa betonin sementistä korvata kierrätetyillä sideaineilla. Ohjelma ei määrittele, mitä nämä aineet tarkalleen ovat. Suomessa on saatavilla ainakin 10-25 % masuunikuonaa sisältävää sementtiä, mikä soveltuu käytettäväksi kaikissa rakenteissa. Tutkimuksessa laskettiin, miten hiilijalanjälki muuttuu, jos kaikki rakennuksen betoni korvataan 10-25 % vaihtoehtoisia sideaineita sisältävällä betonilla.

Vihreään Kortteliin on suunniteltu asennettavaksi aurinkopaneeleja rakennusten katolle. Diplomityössä tutkittiin, kuinka paljon energiankulutus ja kokonaishiilijalanjälki muuttuvat, jos rakennuksen katolle asennetaan

- 100 m² aurinkopaneeli
- 200 m² aurinkopaneeli
- 240 m² aurinkopaneeli

Referenssikohteessa oletettiin lämmitysmuotona olevan kaukolämpö. Tutkimuksessa laskettiin, kuinka energiankulutus muuttuu, jos lämmitysmuodoksi vaihdetaan maalämpö. Maalämpöpumpun käyttöiän oletettiin olevan 25 vuotta. Ikkunoiden kautta karkaa lämpöenergiaa, mutta toisaalta auringon säteilyenergia pääsee ikkunoiden kautta myös lämmittämään huoneistoja. Laskettiin myös, kuinka energiankulutus ja kokonaishiilijalanjälki muuttuvat, jos ikkunoiden kokoa pienennetään tai suurennetaan. Laskettavat ikkunaosuudet seinän pinta-alasta olivat

- 15 %
- 20 %
- 22,35 % (referenssi)
- 25 %
- 30 %

Ikkunoiden materiaaliksi muutettiin 4-kertaiset energiansäästöikkunat, joiden U-arvo on 0,7 W/m²K ja laskenta suoritettiin uudelleen samoilla prosentiosuuksilla.

4.4.7 Vertailulaskelmat

Rakennukselle laskettu energiankulutus on vain suuntaa antava arvio, jota tarvitaan hiilijalanjälkilaskentaa varten. Jotta voitiin arvioida, onko laskettu tulos realistinen, vertailua varten valittiin Energiatodistusrekisteristä viisi samaa kokoluokkaa olevaa Oulussa sijaitsevaa kaukolämmöllä lämmitettävää kerrostalokohdetta [42]. Kohteet on esitelty taulukossa 11.

Taulukko 11. Energialaskennan vertailukohteet [42].

Kohde	Rakennuksen lämmitetty nettoala (m²)	Valmistumisvuosi
As Oy Kiulukankaan Terva 2 (myöhemmin Terva)	2529	2020
Oulun Sivakka Oy / Parsikuja B-talo (Myöhemmin Sivakka)	2 002	2020
Asunto Oy Oulun Tervahovin rantatalot (myöhemmin Tervahovi)	2 261	2020
Asunto Oy Toppilansalmen Fyyri, talo A (myöhemmin Fyyri)	2 696	2020
Asunto Oy Oulun Huvilapuutarha (myöhemmin Huvilapuutarha)	2 853	2020

Suomen ympäristökeskus SYKE arvioi taloudellisten ohjauskeinojen käyttöä vähähiilisten asuinkerrostalojen rakentamisessa TALO-hankkeessa, ja Ympäristöministeriö julkaisi hankkeen loppuraportin loppuvuodesta 2019. Hankkeessa on arvoitu keskimääräinen hiilijalanjälki betonirakenteiselle asuinkerrostalolle, joka käyttää kaukolämpöä ja jonka E-luku on määräystasolla. Kohteelle on esitetty hiilijalanjälki elinkaarenvaiheittain, mutta hiilikädenjälki on jätetty huomioimatta [39]. Tässä diplomityössä on käytetty TALO-hankkeen keskimääräistä betonikerrostaloa vertailukohteena referenssilaskelmalle sekä optimiratkaisuille.

4.5 Hiilijalanjälkilaskenta One Click LCA -ohjelmalla

OCL-laskentaohjelmisto sisältää viisi eri välilehteä joille laskennassa käytettävät tiedot syötetään. Ensimmäiselle välilehdelle syötettiin rakennuksen materiaalit osioihin

1. Perustukset
2. Pystyrakenteet ja julkisivu
3. Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit
4. Muut rakenteet ja materiaalit
5. Alue- ja piharakentaminen
6. Rakennuksen talotekniikka

Materiaali etsittiin ohjelmiston sisältämästä tietokannasta nimen, valmistajan tai EPD-numeron perusteella. Materiaalin määrä voidaan syöttää ohjelmistoon kilogrammoina, kuutioina tai neliöinä kerrottuna rakennusosan paksuudella. Rakenteelle määritettiin myös käyttöikä ja rakentamisen aikana syntynyt hukka. Ohjelmisto määrittelee nämä automaattisesti keskiarvotietoihin perustuen, mutta ne voidaan muuttaa myös itse, jos todennukaisempaa tietoa on saatavilla. Tässä laskelmassa käytettiin OCL:n valmiiksi määrittämiä arvoja. Talotekniikalle on käytetty Ympäristöministeriön menetelmän mukaisia taulukkoarvoja ja perustuksille ja vesikaton ristikkorakenteelle OCL:n pinta-alaan perustuvaa keskiarvoa. Muiden materiaalien määrä arvioitiin Tekla Structures -mallin tai ARK-pohjien perusteella.

Toiselle välilehdelle syötettiin arvioitu vuotuinen energiankulutus. Arviointiin sisältyy verkkosähkön, polttoaineiden, kaukolämmön ja kaukokylmän kulutus sekä ulkopuolelle toimitettu energia. Referenssilaskelmassa lämmitysmuotona käytettiin kaukolämpöä ja kaiken sähkön oletettiin olevan ostosähköä. Arvioon ei Ympäristöministeriön menetelmässä sisällytetä laitesähköä. Energian päästöjen oletettiin laskevan tulevaisuudessa energia- ja ilmastostrategian toimenpiteiden seurauksena. Ympäristöministeriö on luonut päästökerroinskenaarion, joka on esitetty taulukossa 12. Energiankulutuksen hiilijalanjäljen laskentaan valitaan päästökertoimet laskennan

arviointijakson pituuden mukaan, eli tämä laskelma tehtiin vuosien 2020-2070 päästökertoimilla.

Taulukko 12. Ympäristöministeriön skenaario energiamuotojen päästökertoimista (gCO₂/kWh) mukaillen lähdettä [43].

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

Kolmannella välilehdellä määriteltiin laskennan arviointijakson pituus. Tässä laskelmassa sekä Ympäristöministeriön menetelmän oletusarvona on 50 vuotta. Laskennassa tulee käyttää rakennuksen tavoitekäyttöikä. Neljäs välilehti sisältää muut päästöt ja vähenemät. Sementtiä sisältävät materiaalit absorboivat hiilidioksidia paljastuessaan ilmalle, mikä nostaa rakennuksen hiilikädenjälkeä. Välilehdelle syötettiin rakennuksen sisältämän betonin määrä ja ohjelmisto laski absorboituneen hiilidioksidin määrän tavoitekäyttöiän ajalle.

Viides välilehti sisältää laskennassa käytettävät valmiit taulukkoarvot. Näitä ovat

A4 Kuljetus työmaalle 10,2 kgCO₂e/m²

A5 Uudisrakennustyömaan toiminnot 27,3 kgCO₂e/m²

B3-4 Korjausten energiankulutus 2,16 kgCO₂e/m²

C1 Purkutyömaan toiminnot	7,8 kgCO ₂ e/m ²
C2 Kuljetus jatkokäsittelyyn	10,2 kgCO ₂ e/m ²
C3-4 Jätteenkäsittely ja loppusijoitus	15,6 kgCO ₂ e/m ²

Arvot voitiin joko ottaa mukaan laskelmaan tai jättää sen ulkopuolelle, mutta pilotointivaiheessa niitä ei vielä voitu itse muuttaa. Laskentaohjelmiston kuudennelle välilehdelle syötettiin laskennan kohteena olevan rakennuksen lämmitetty nettoala ja tässä laskelmassa käytettiin arvoa 2368 m².

5 TULOKSET

5.1 Energialaskennan tulokset

Vihreän Korttelin referenssilaskelman energialaskennan tulokset ovat

- Energiatohokkuusluokka B
- E-luokka 90 (raja-arvot 76-100). E-luku täyttää vaatimuksen.

Laskettu ostoenergia

- Sähkö 88 877 kWh/v, E-energia 44,7 kWh/m²v
- Kaukolämpö 214 898 kWh/v, E-energia 45,1 kWh/ m²v

5.2 Hiilijalanjälkilaskennan tulokset

Hiilijalanjälkilaskennan tulokseksi saatiin Ympäristöministeriön menetelmällä laskettaessa muun muassa kokonaishiilijalanjälki, hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki neliöille ja laskenta-ajalle jaettuna, sekä hiilijalanjälki rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa. Hiilijalanjälki ilmoitetaan positiivisena lukuna ja OCL antaa hiilijalanjäljen lukuarvon neliometriä ja vuotta kohden kahden desimaalin tarkkuudella. Hiilijalanjälki kuvaa ilmastolle negatiivisia vaikutuksia ja hiilikädenjälki positiivisia vaikutuksia, joten hiilikädenjälki ilmoitetaan Ympäristöministeriön ohjeistuksen mukaisesti negatiivisena lukuna kahden desimaalin tarkkuudella [15]. Referenssikohteen hiilijalanjälkilaskennan tulokset ovat:

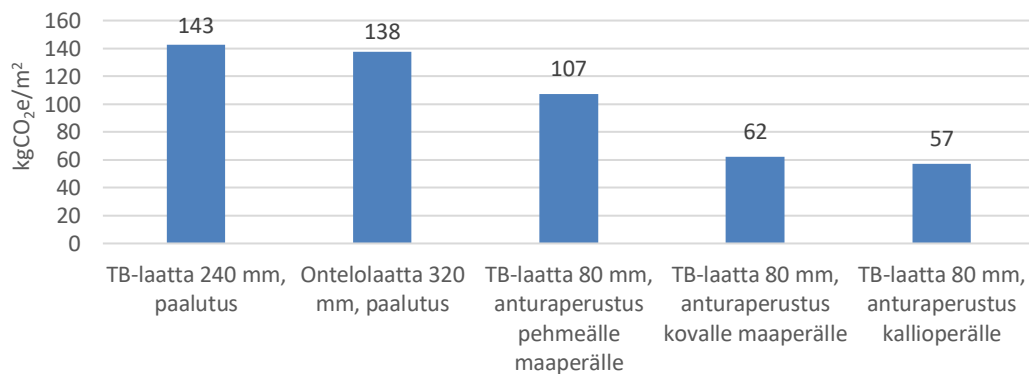
- Hiilijalanjälki 2 082 000 kgCO₂e
- Hiilijalanjälki neliometriä ja vuotta kohden 17,59 kgCO₂e/m²/v
- Hiilikädenjälki neliometriä ja vuotta kohden -3,84 kgCO₂e/m²/v

5.3 Materiaalilaskennan tulokset

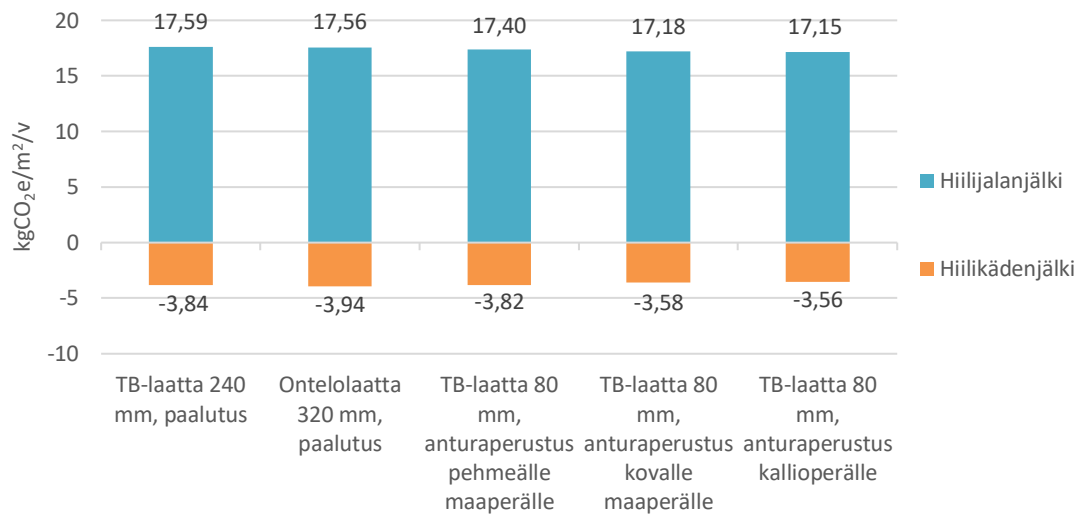
Materiaalilaskennan tulokset esitetään kahdessa osassa. Ensimmäisenä esitetään pelkän materiaalin hiilijalanjälki neliötä kohden. Jos materiaali toimii biogeenisenä hiilivarastona, myös sen osuus on ilmoitettu tuloksissa neliötä kohden ja biogeeninen hiilivarasto on osa hiilikädenjälkeä. Toisena esitetään kokonaishiilijalanjäljen tulos jokaisella materiaaliratkaisulla, jolloin nähdään myös hiilikädenjäljen osuus. Kokonaislaskelmassa esitetään hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliötä ja vuotta kohden.

5.3.1 Perustukset, välipohjat, ala- ja yläpohja

Perustamistapavertailun tulokset on esitetty kuvassa 8. Kuvassa 9 on esitetty rakennuksen kokonaishiilijalanjälki ja -kädenjälki referenssikohteelle eri perustamisvaihtoehdoilla.

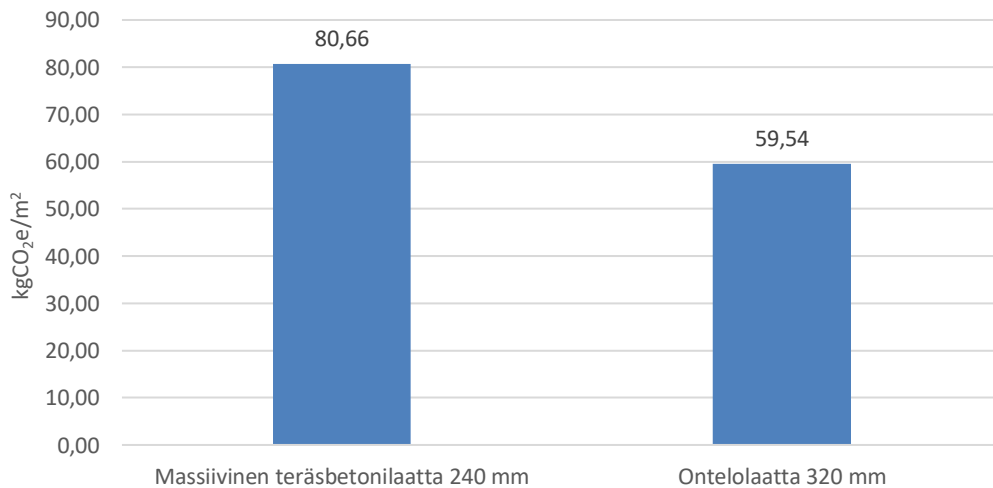


Kuva 8. Perustamistapojen hiilijalanjälki neliometriä kohden.

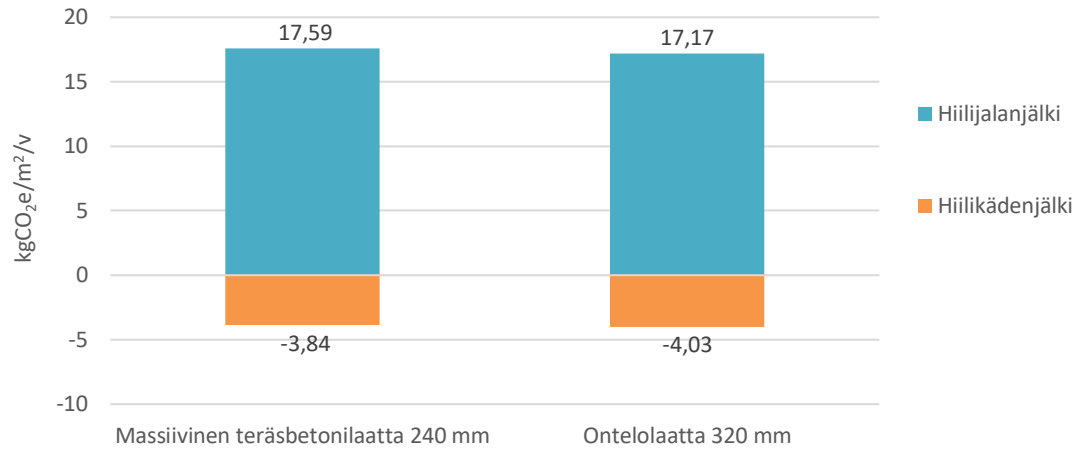


Kuva 9. Perustamistapojen kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden.

Väli- ja yläpohjalaattavaihtoehtojen laskentatulokset on esitetty kuvassa 10. Kuvassa 11 on esitetty koko rakennuksen hiilijalanjälki ja -kädenjälki eri laattavaihtoehdoilla.

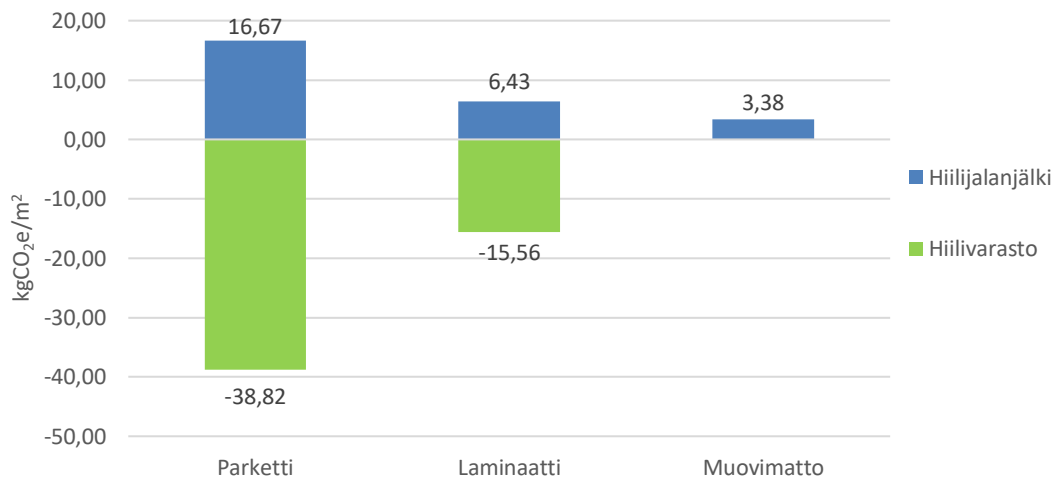


Kuva 10. Väli- ja yläpohjalaattojen hiilijalanjälki neliometriä kohden.

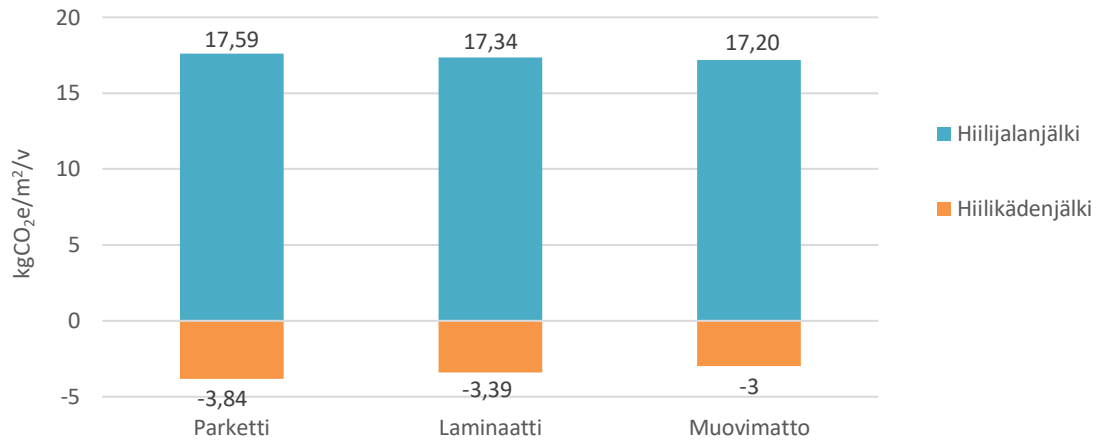


Kuva 11. Väli- ja yläpohjalaattojen kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden.

Välipohjien ja alapohjan pintamateriaalivaihtoehtojen tulokset on esitetty kuvassa 12. Koko rakennuksen hiilijalanjälki ja -kädenjälki eri pintamateriaalivaihtoehtoilla on esitetty kuvassa 13.

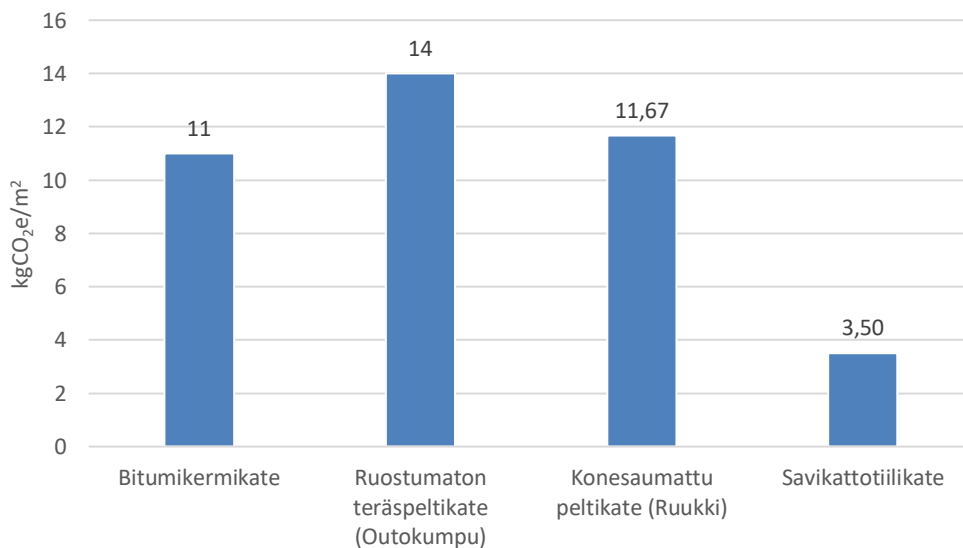


Kuva 12. Välipohjien ja alapohjan materiaalivaihtoehtojen hiilijalanjälki ja hiilivarasto neliometriä kohden.

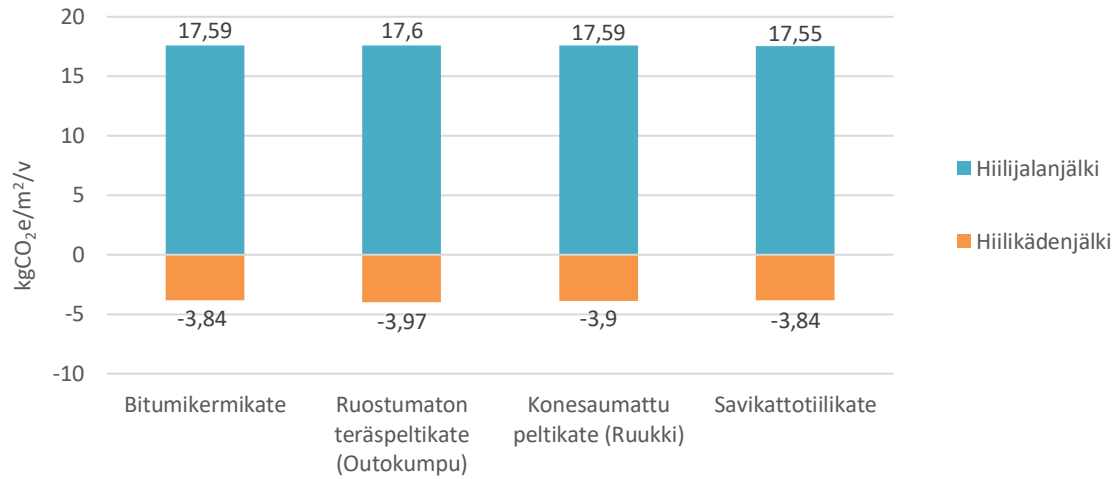


Kuva 13. Välipohjien ja alapohjan materiaalivaihtoehtojen kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden.

Vesikaton vesikatevaihtoehtojen tulokset on esitetty kuvassa 14. Kuvassa 15 on esitetty koko rakennuksen hiilijalanjälki ja -kädenjälki eri vesikatevaihtoehtoilla.



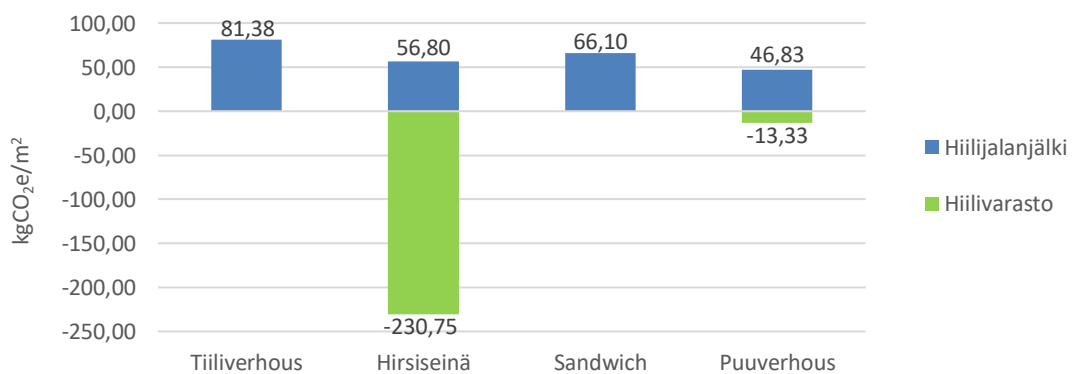
Kuva 14. Vesikatteen materiaalivaihtoehtojen hiilijalanjälki neliometriä kohden.



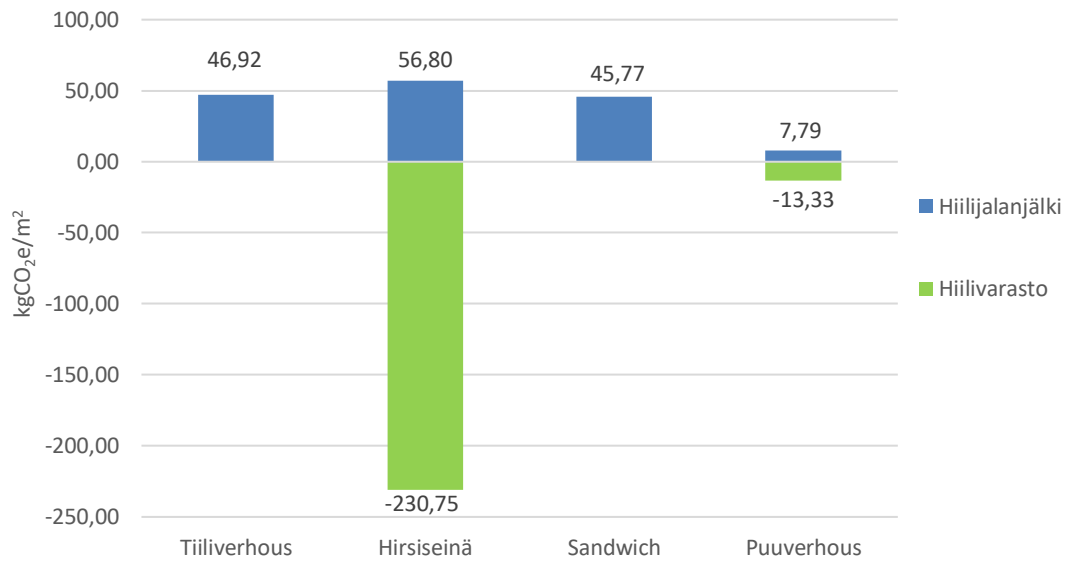
Kuva 15. Vesikatteen materiaalivaihtoehtojen kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden.

5.3.2 Seinärakenteet

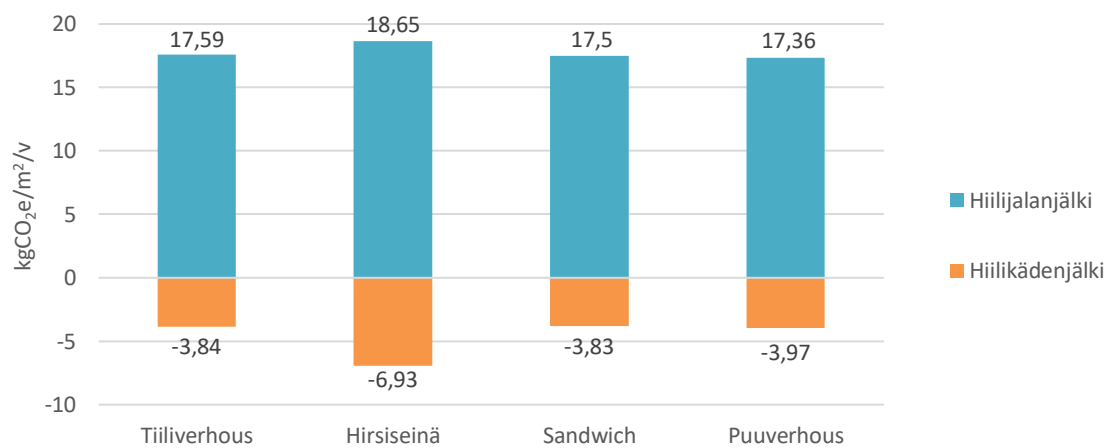
Ulkoseinien kantavien seinien rakennevaihtoehtojen tulokset on esitetty kuvassa 16. Kuvassa 17 on esitetty ei-kantavien seinien rakennevaihtoehtojen laskennan tulokset ja kuvassa 18 ulkoseinävaihtoehtojen kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki.



Kuva 16. Kantavien ulkoseinien vaihtoehtojen hiilijalanjälki ja hiilivarasto neliometriä kohden.

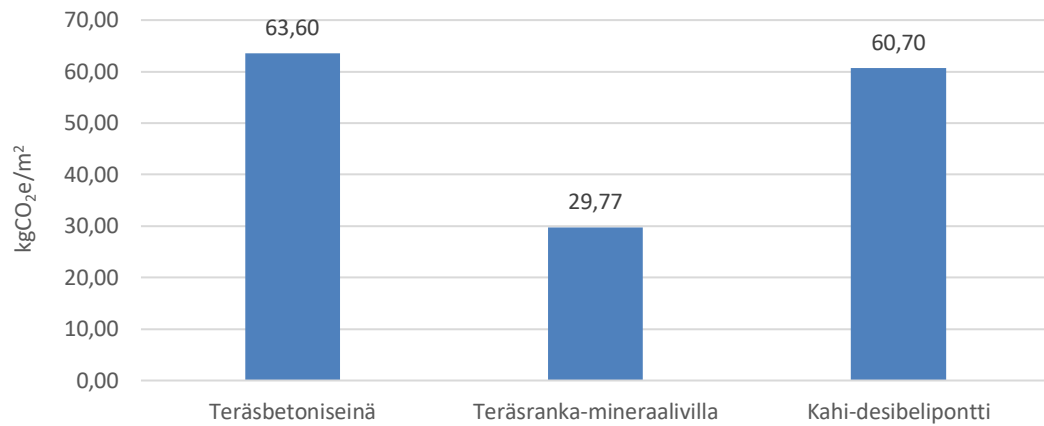


Kuva 17. Ei-kantavien ulkoseinävaihtoehtojen hiilijalanjälki ja hiilivarasto neliometriä kohden.

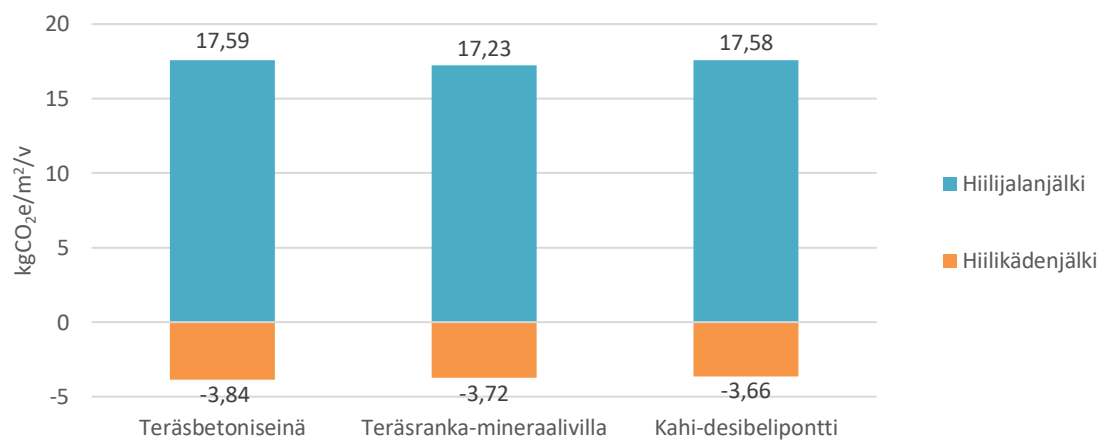


Kuva 18. Ulkoseinävaihtoehtojen kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden.

Väliseinämateriaalien laskennan tulokset on esitetty kuvassa 19. Väliseinien kokonaislaskennan tulokset on kuvassa 20.



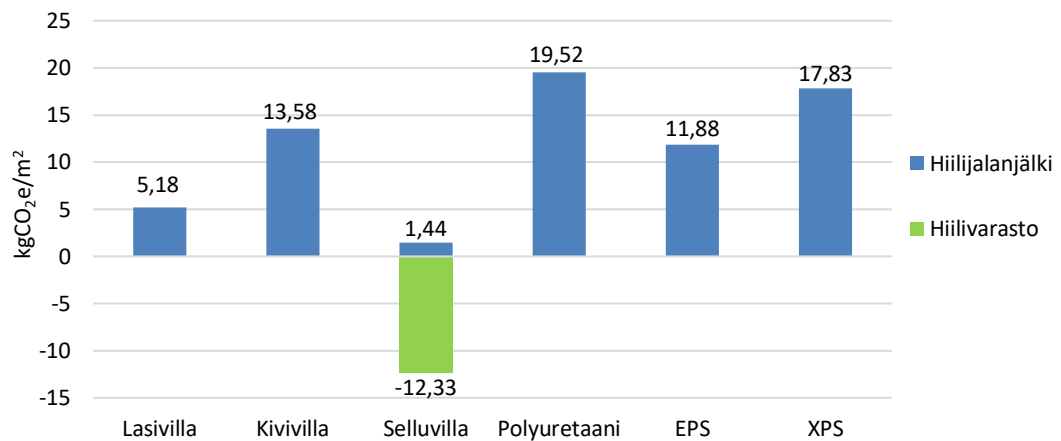
Kuva 19. Väliseinien materiaalivaihtoehtojen hiilijalanjälki neliometriä kohden.



Kuva 20. Väliseinien kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden.

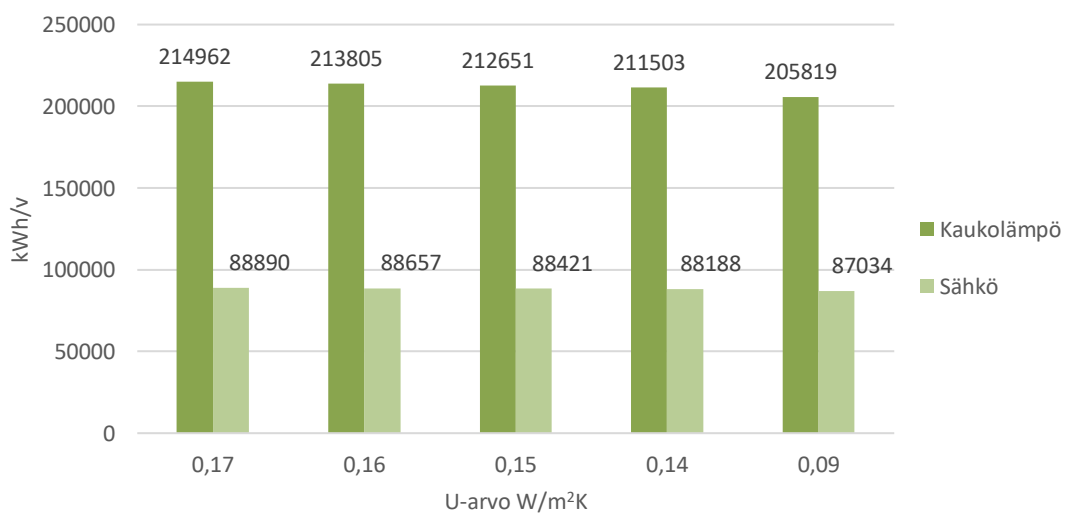
5.3.3 Eristeet

Eri eristemateriaalien laskennan tulokset on esitetty kuvassa 21.

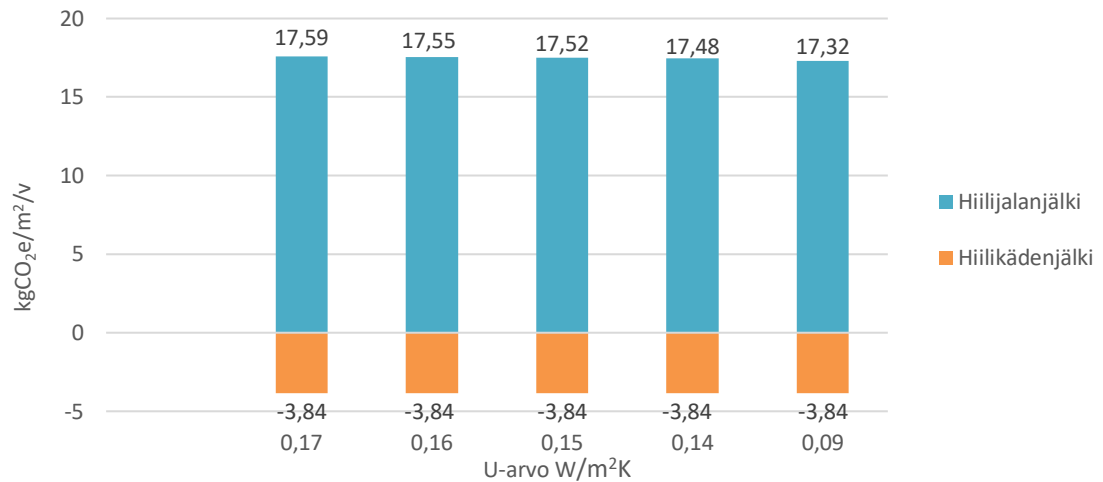


Kuva 21. Eristemateriaalivaihtoehtojen hiilijalanjälki ja hiilivarasto neliometriä kohden.

Eristeen U-arvolla on vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen. Kuvassa 22 on esitetty referenssikohteen sähkön ja kaukolämmön tarve, kun ulkoseinien eristepaksuutta kasvatetaan ja U-arvo pienenee. Kuvassa 23 on esitetty lasivillan kokonaislaskennan tulokset eri U-arvoilla.



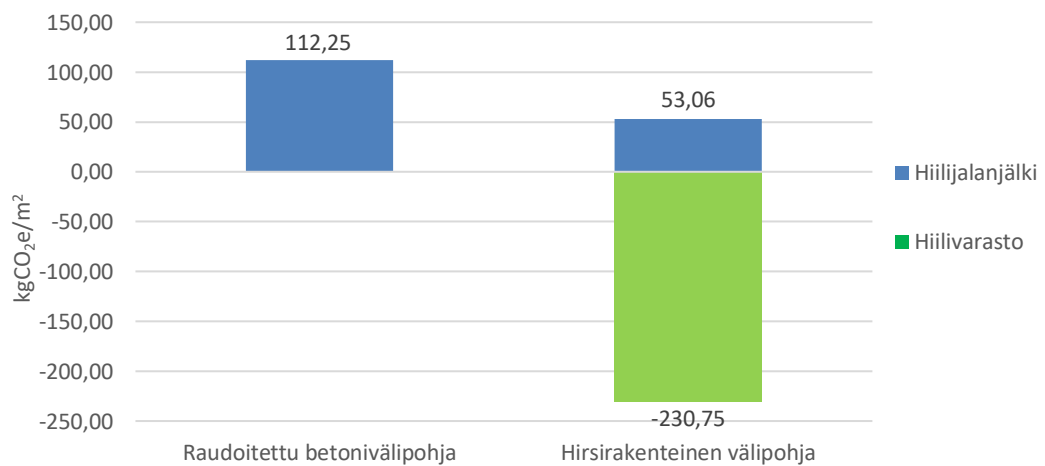
Kuva 22. Kaukolämmön ja sähkön tarve kilowattitunteina, kun eristepaksuutta kasvatetaan ja U-arvo pienenee.



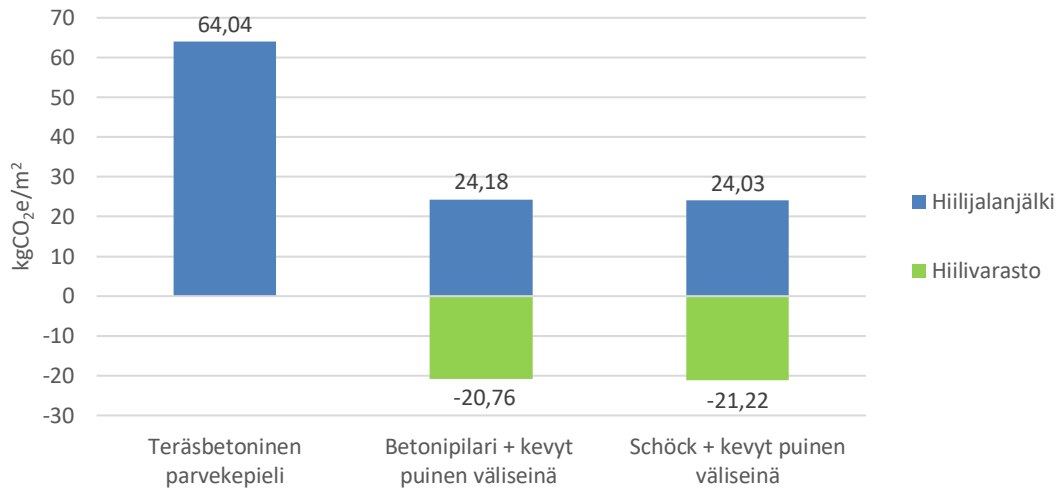
Kuva 23. Lasivillan kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden eri U-arvolla.

5.3.4 Parvekelinjat

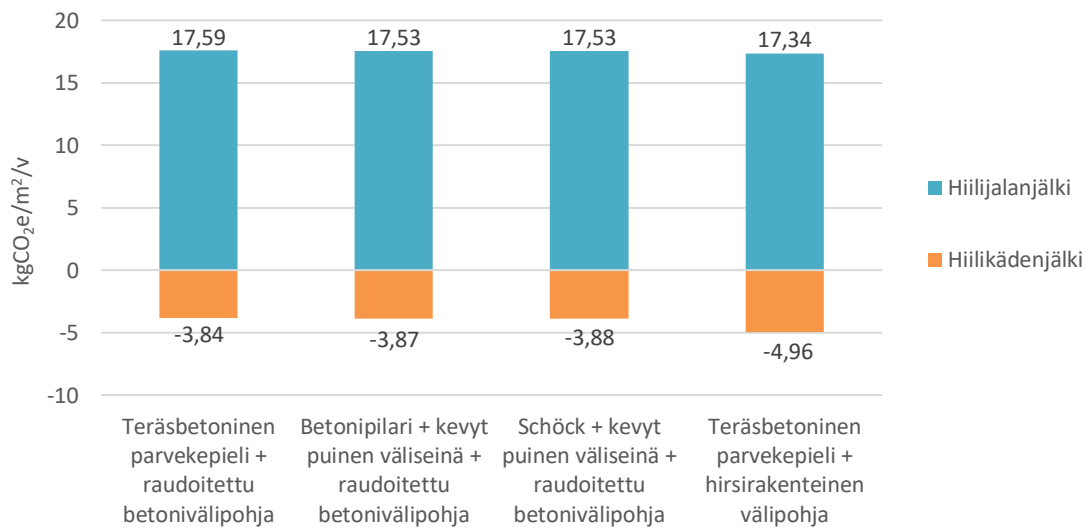
Parvekkeen välipohjarakenteen materiaalivaihtoehtojen tulokset on esitetty kuvassa 24. Parvekkeen kannatusvaihtoehtojen tulokset on kuvassa 25 ja yhdistelmävaihtoehtojen kokonaislaskennan tulokset kuvassa 26.



Kuva 24. Parvekkeen välipohjarakenteen materiaalivaihtoehtojen hiilijalanjälki ja hiilivarasto neliometriä kohden.



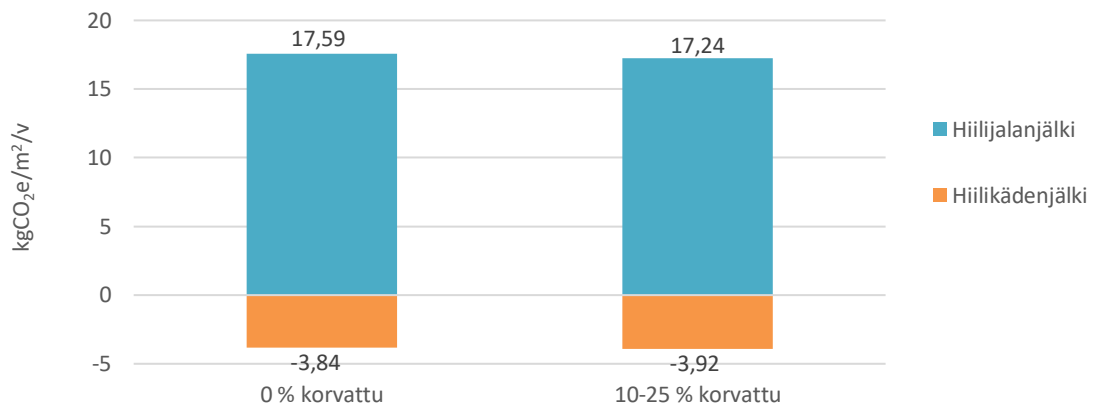
Kuva 25. Parvekkeen kannatusratkaisujen hiilijalanjälki ja hiilivarasto neliometriä kohden.



Kuva 26. Parvekeratkaisujen kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden.

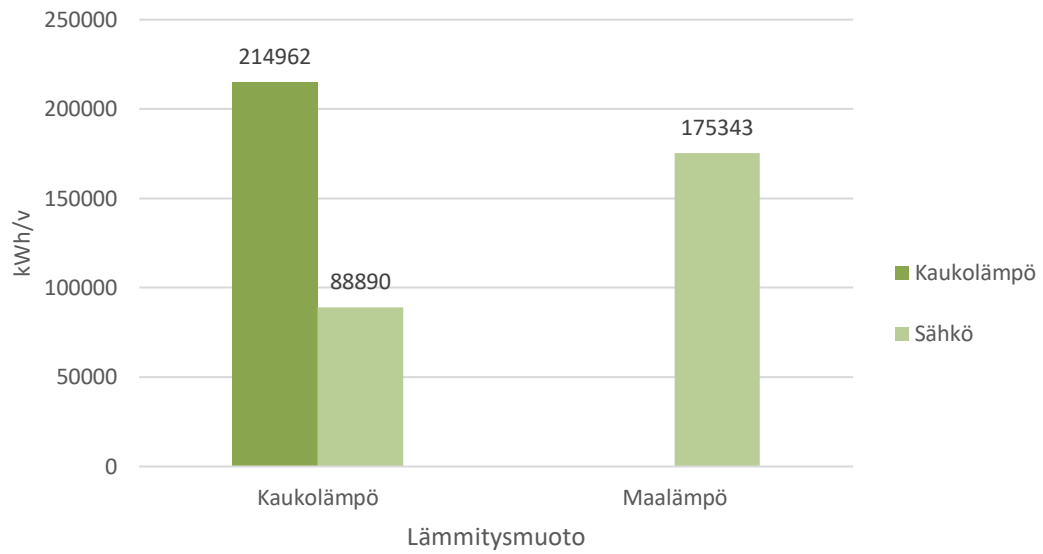
5.3.5 Muut tavat pienentää hiilijalanjälkeä

Betonin sisältämästä sementistä 10-25 % korvattiin vaihtoehtoisilla materiaaleilla ja laskennan tulokset on esitetty kuvassa 27.

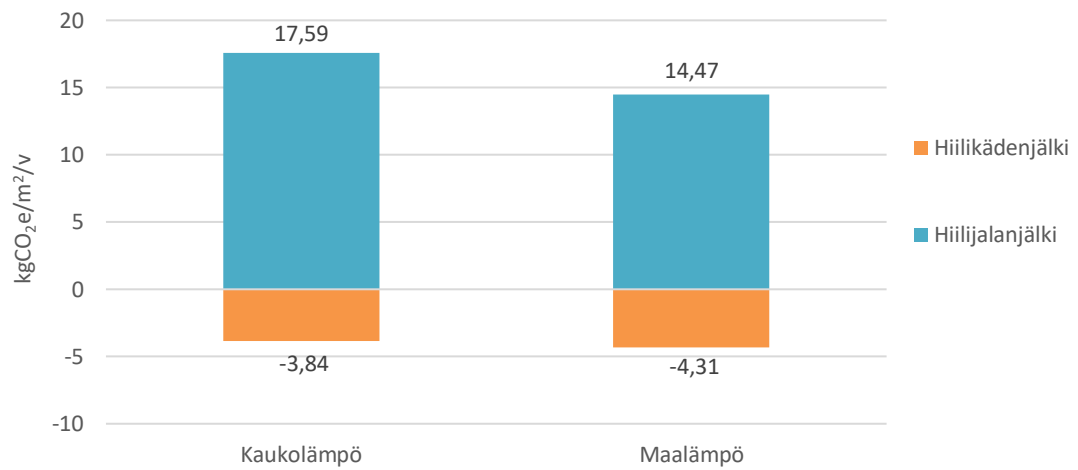


Kuva 27. Kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden, kun sementistä 0 % tai 10-25 % on korvattu vaihtoehtoisilla materiaaleilla.

Lämmitysmuotovertailussa vertailukohteina ovat kaukolämpö ja maalämpö. Lämmitysmuotovertailun energialaskennan tulokset on esitetty kuvassa 28. Kuvassa 29 on kokonaislaskennan tulokset eri lämmitysmuodoilla.

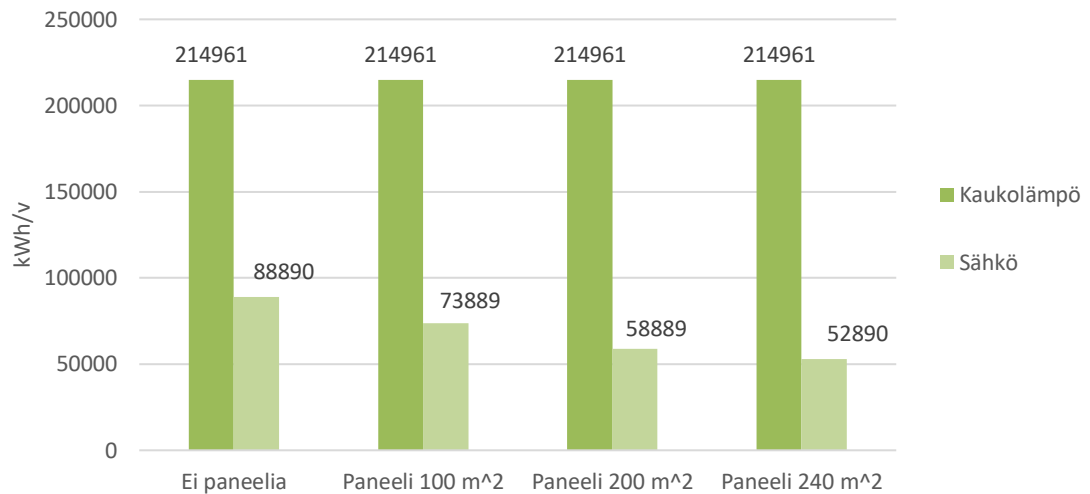


Kuva 28. Eri lämmitysmuotojen kaukolämmön ja sähkön tarve kilowattitunteina.

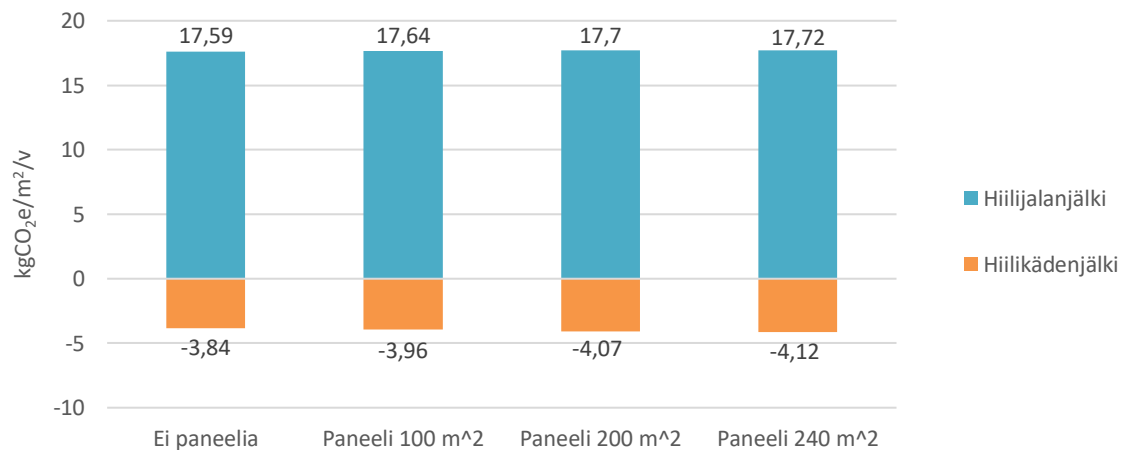


Kuva 29. Kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden, kun vertailun kohteena on kaukolämpö ja maalämpö.

Aurinkopaneelien käytön vaikutusta hiilijalanjälkeen tutkittiin eri kokoisilla paneeleilla. Energialaskennan tulokset on esitetty kuvassa 30. Kuvassa 31 on esitetty kokonaislaskennan tulokset eri aurinkopaneelimäärillä.

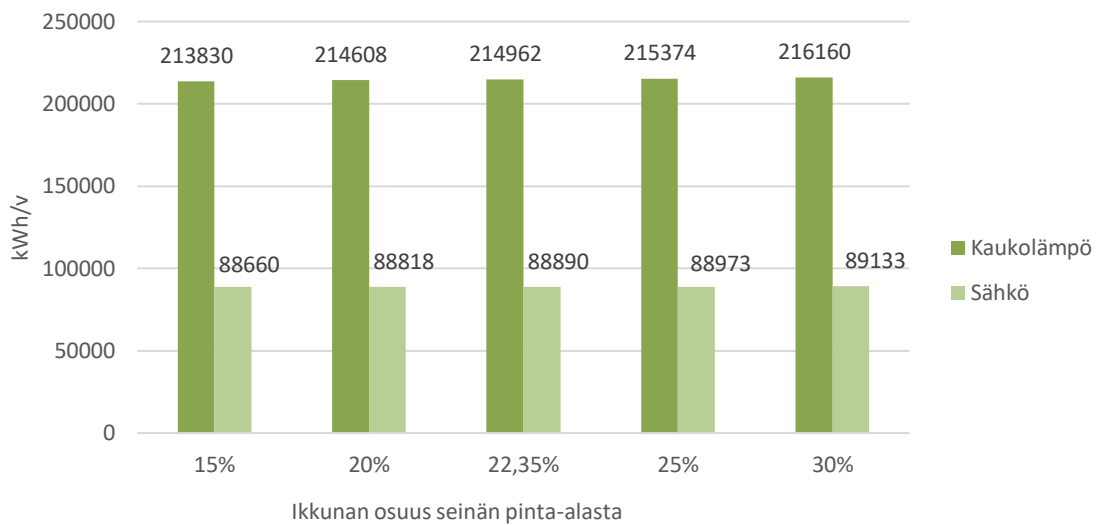


Kuva 30. Energialaskennan tulokset kilowattitunteina eri kokoisilla aurinkopaneeleilla.

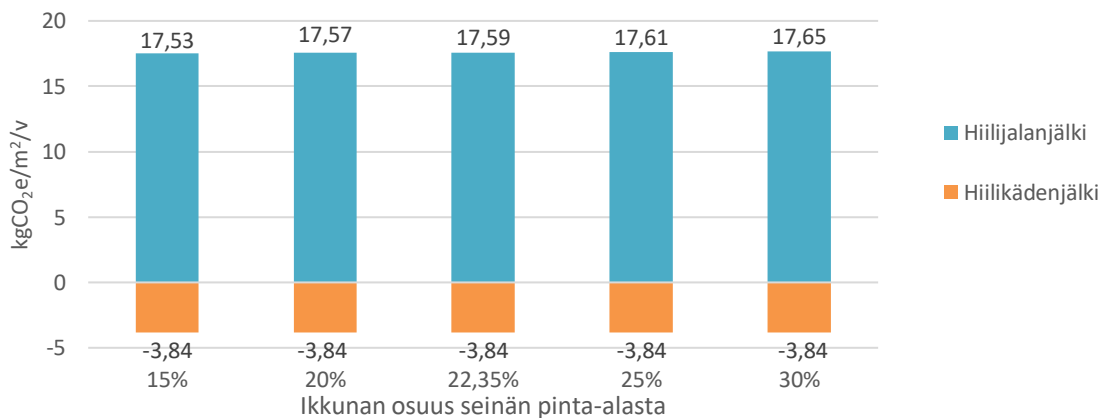


Kuva 31. Kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden eri kokoisilla aurinkopaneeleilla.

Ikkunoiden koolla ja U-arvolla on vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen. Kuvassa 32 on esitetty energialaskennan tulokset ikkunoiden eri prosenttiosuuksilla, kun ikkunoiden U-arvona on 1,0 W/m²K. Kuvassa 33 on kokonaislaskennan tulokset ikkunoiden eri prosenttiosuuksilla.

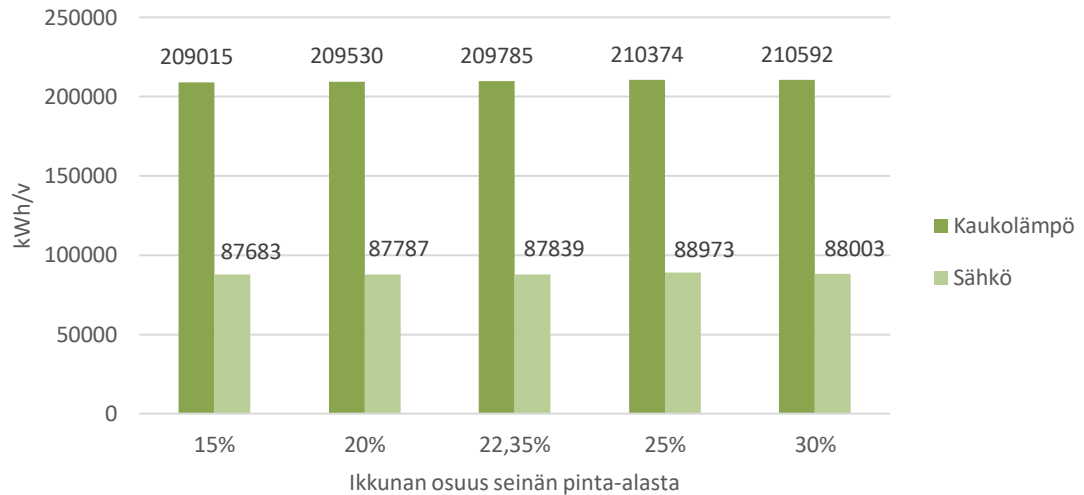


Kuva 32. Energialaskennan tulokset kilowattitunteina ikkunoiden eri prosenttiosuuksilla U-arvolla 1,0 W/m²K.

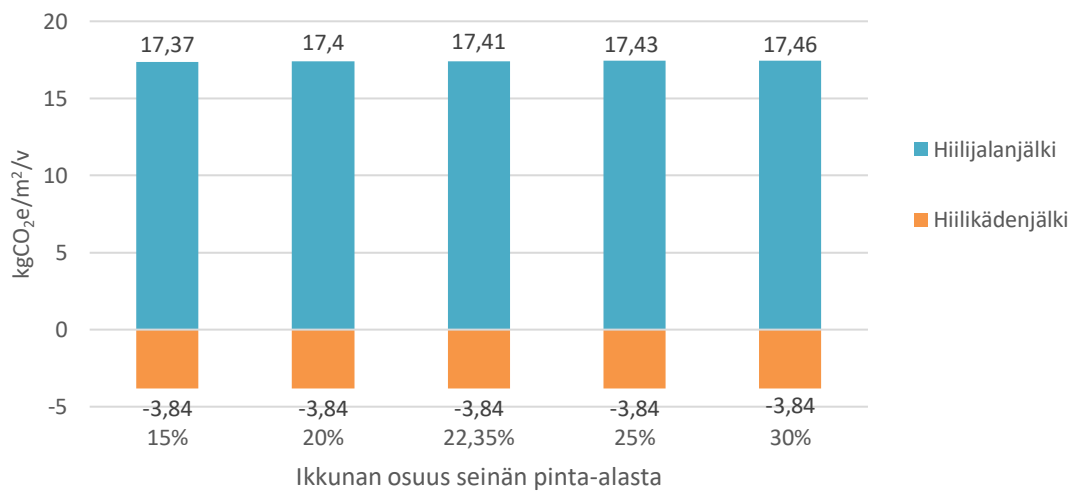


Kuva 33. Kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden ikkunoiden eri prosenttiosuuksilla U-arvolla 1,0 W/m²K.

Ikkunat vaihdettiin 4-kertaisiksi energiansäästöikkunoiksi ja samat laskelmat tehtiin uudelleen. Tämän laskelman energialaskennan tulokset on esitetty kuvassa 34 ja kokonaislaskelman tulokset kuvassa 35.



Kuva 34. Energialaskennan tulokset kilowattitunteina ikkunoiden eri prosenttiosuuksilla U-arvolla 0,7 W/m²K.



Kuva 35. Kokonaislaskelman hiilijalanjälki ja -kädenjälki neliometriä ja käyttövuotta kohden ikkunoiden eri prosenttiosuuksilla U-arvolla 0,7 W/m²K.

5.4 Optimiratkaisut

Materiaalilaskentojen pohjalta luotiin kaksi teoreettista laskelmaa Optimi 1 ja Optimi 2. Vaihtoehtoon Optimi 1 valittiin materiaalilaskentojen tuloksien perusteella rakennetyyppivaihtoehdot, joilla on kaikista pienin hiilijalanjälki. Vaihtoehtoon Optimi 2 valittiin rakennetyypit, joilla hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen summa saadaan mahdollisimman pieneksi. Valitut rakennetyypit on koottu taulukkoon 13. Taulukossa mainitsemattomat rakenteet ovat samoja kuin referenssikohteessa ja esitelty taulukossa 8. Rakennuksen perustamistapaa ei voida valita, vaan se määräytyy maaperän laadun mukaan. Tämän tutkimuksen laskennan alkaessa perustamistapa ei ollut vielä tiedossa, joten optimiratkaisuiden laskennassa on käytetty niihin parhaiten soveltuvaa perustamistapaa. Lopullisen kohteen laskennassa tulee käyttää perustamistapalausnon mukaista perustamistapaa.

Taulukko 13. Referenssikohteeseen sekä Optimi 1 ja Optimi 2 -ratkaisuihin valitut rakennetyypit.

Rakenne	Referenssi	Optimi 1	Optimi 2
Perustukset & alapohja	Paaluperustus 10 m Alapohja Teräsbetoni-laatta 200 mm	Anturaperustus kalliopohjalle Alapohja Teräsbetoni-laatta 80 mm	Anturaperustus pehmeälle maaperälle Alapohja Teräsbetoni-laatta 80 mm
Välipohja- ja yläpohjalaatta	Teräsbetoni-laatta 240 mm	Ontelolaatta 320 mm	Ontelolaatta 320 mm
Lattian pinta- materiaali	Parketti	Muovimatto	Parketti
Vesikate	Kumibitumi- kermikate	Tiilikate	Konesaumattu peltikate (Outokumpu)
Ulkoseinät	Tiiliverhous	Puuverhous	Hirsiseinät
Väliseinät	Teräsbetonia	Kantavat seinät teräsbetonia, muut teräsranka- mineraalivilla	Kantavat seinät teräsbetonia, muut teräsranka- mineraalivilla

Rakenne	Referenssi	Optimi 1	Optimi 2
Parvekelinjat	Teräsbetoninen parvekepieli + teräsbetoninen välipohja	Teräsbetoninen parvekepieli + hirsirakenteinen välipohja	Teräsbetoninen parvekepieli + hirsirakenteinen välipohja
Eristeet:			
-Ulkoseinä	Lasivilla 225 mm	Kantavat seinät: Lasivilla 430 mm Ei-kantavat seinät: Selluvilla 440 mm	-
-Yläpohja	Puhalluskivivilla 450 mm	Puhallusselluvilla 450 mm	Puhallusselluvilla 450 mm
-Alapohja	EPS	EPS	EPS
Betoni	Tavallinen betoni	10-25 % sementistä vaihtoehtoisia materiaaleja	10-25 % sementistä vaihtoehtoisia materiaaleja
Lämmitysmuoto	Kaukolämpö	Maalämpö	Maalämpö
Aurinkopaneeli	Ei paneelia	Ei paneelia	Paneeli 240 m ²
Ikkunat	22,35 % seinäalasta, ikkunoiden U-arvo 1 W/m ² K	15 % seinäalasta, ikkunoiden U-arvo 0,7 W/m ² K	15 % seinäalasta, ikkunoiden U-arvo 0,7 W/m ² K

5.4.1 Optimiratkaisujen energialaskennan tulokset

Optimi 1 ja Optimi 2 -ratkaisujen energiatehokkuusluokka, E-luku, laskettu ostoenergia ja E-energia on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Optimi 1 ja Optimi 2 -ratkaisujen energialaskennan tulokset.

	Energia- tehokkuusluokka	E-luku	Laskettu ostoenergia (kWh/v)	E-energia (kWh/m ² /v)
Optimi 1	B	87	171 827	86,5
Optimi 2	A	69	135 827	68,4

5.4.2 Optimiratkaisujen hiilijalanjälkilaskennan tulokset

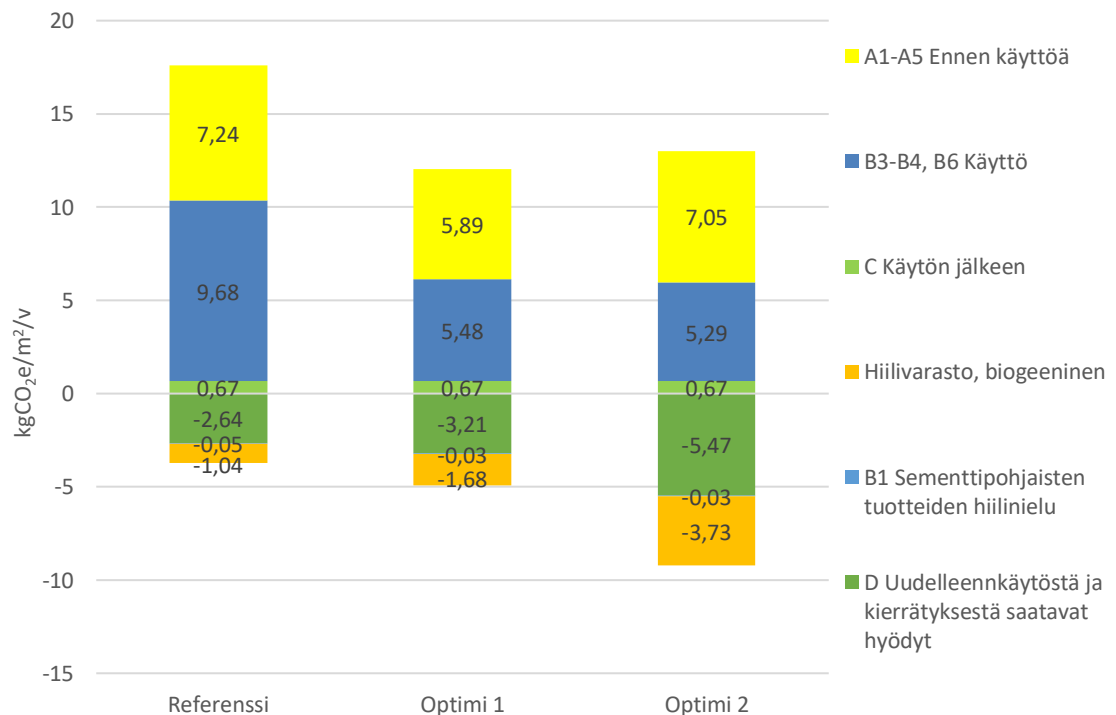
Optimiratkaisu 1:n hiilijalanjälkilaskennan tulokset ovat:

- Hiilijalanjälki 1 431 000 kgCO₂e
- Hiilijalanjälki neliometriä ja vuotta kohden 12,09 kgCO₂e/m²/v
- Hiilikädenjälki neliometriä ja vuotta kohden -5,09 kgCO₂e/m²/v

Optimiratkaisu 2:n hiilijalanjälkilaskennan tulokset ovat:

- Hiilijalanjälki 1 541 000 kgCO₂e
- Hiilijalanjälki neliometriä ja vuotta kohden 13,01 kgCO₂e/m²/v
- Hiilikädenjälki neliometriä ja vuotta kohden -9,01 kgCO₂e/m²/v

Referenssikohteen ja optimiratkaisujen hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki on esitetty kuvassa 36 jaoteltuna elinkaaren vaiheisiin.



Kuva 36. Referenssikohteen, Optimi 1:n ja Optimi 2:n hiilijalanjälki ja -kädenjälki elinkaaren vaiheisiin jaoteltuna neliometriä ja käyttövuotta kohden.

5.5 Vertailulaskentojen tulokset

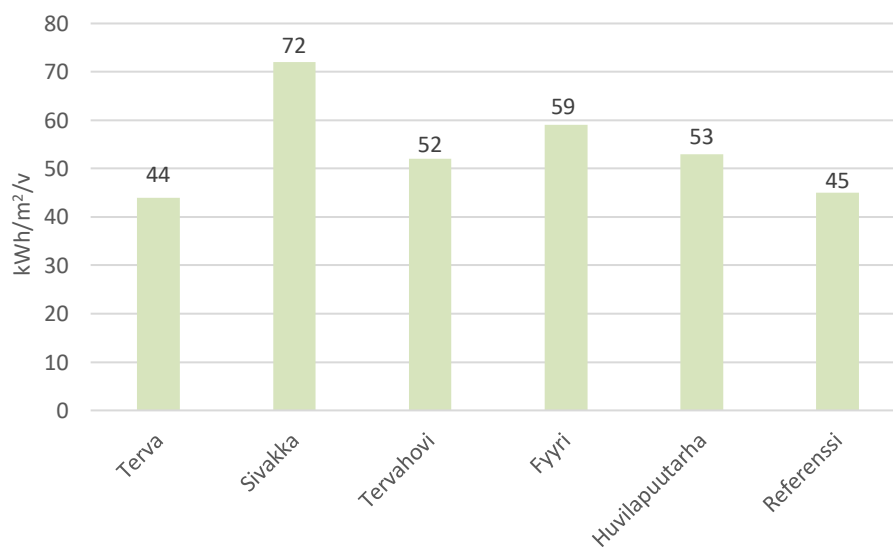
5.5.1 Energialaskennan vertailutulokset

Referenssikohteen energialaskelmaa verrattiin viiteen Oulussa vuonna 2020 rakennettuun kerrostaloon. Laskennan tarkoituksena oli tulosten luotettavuuden arviointi. Vertailukohteiden energiatehokkuusluokat ja E-luvut on kerätty taulukkoon 15.

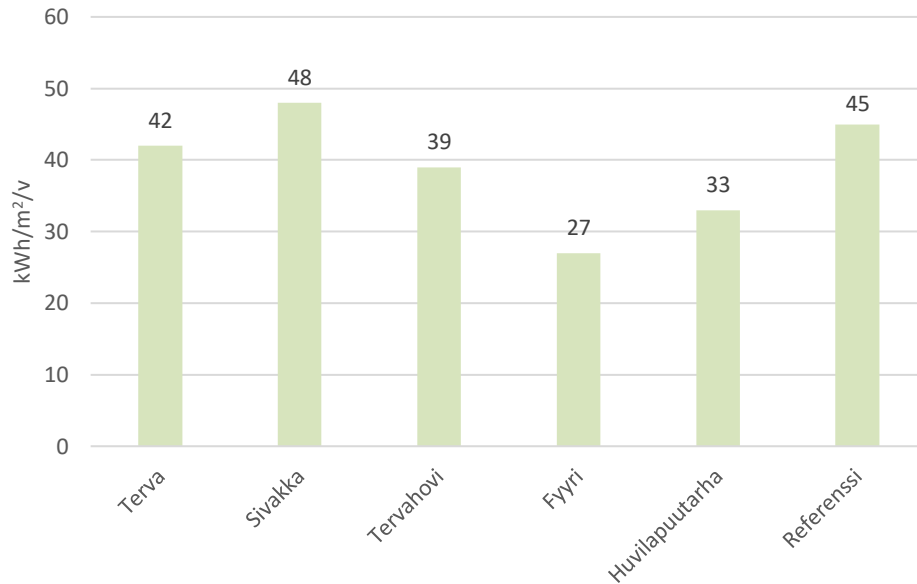
Taulukko 15. Energialaskennan vertailukohteiden energiatehokkuusluokka ja E-luku

Kohde	Energiatehokkuusluokka	E-luku
Terva	B	86
Sivakka	C	119
Tervahovi	B	90
Fyyri	B	86
Huvilapuutarha	B	85

Rakennuksille tehtiin vertailu energiamuodon kertoimella painotetuille energiamäärille, joiden perusteella E-luku määräytyy. Tulokset sähkölle ja kaukolämmölle on esitetty kuvissa 37 ja 38.



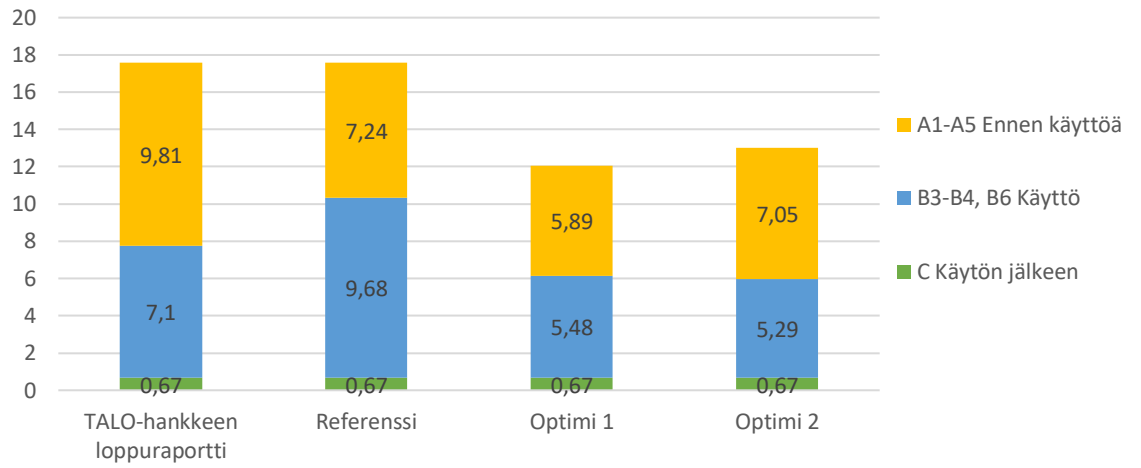
Kuva 37. Vertailukohteiden sähkönkäyttö kilowattitunteina neliometriä ja käyttövuotta kohden.



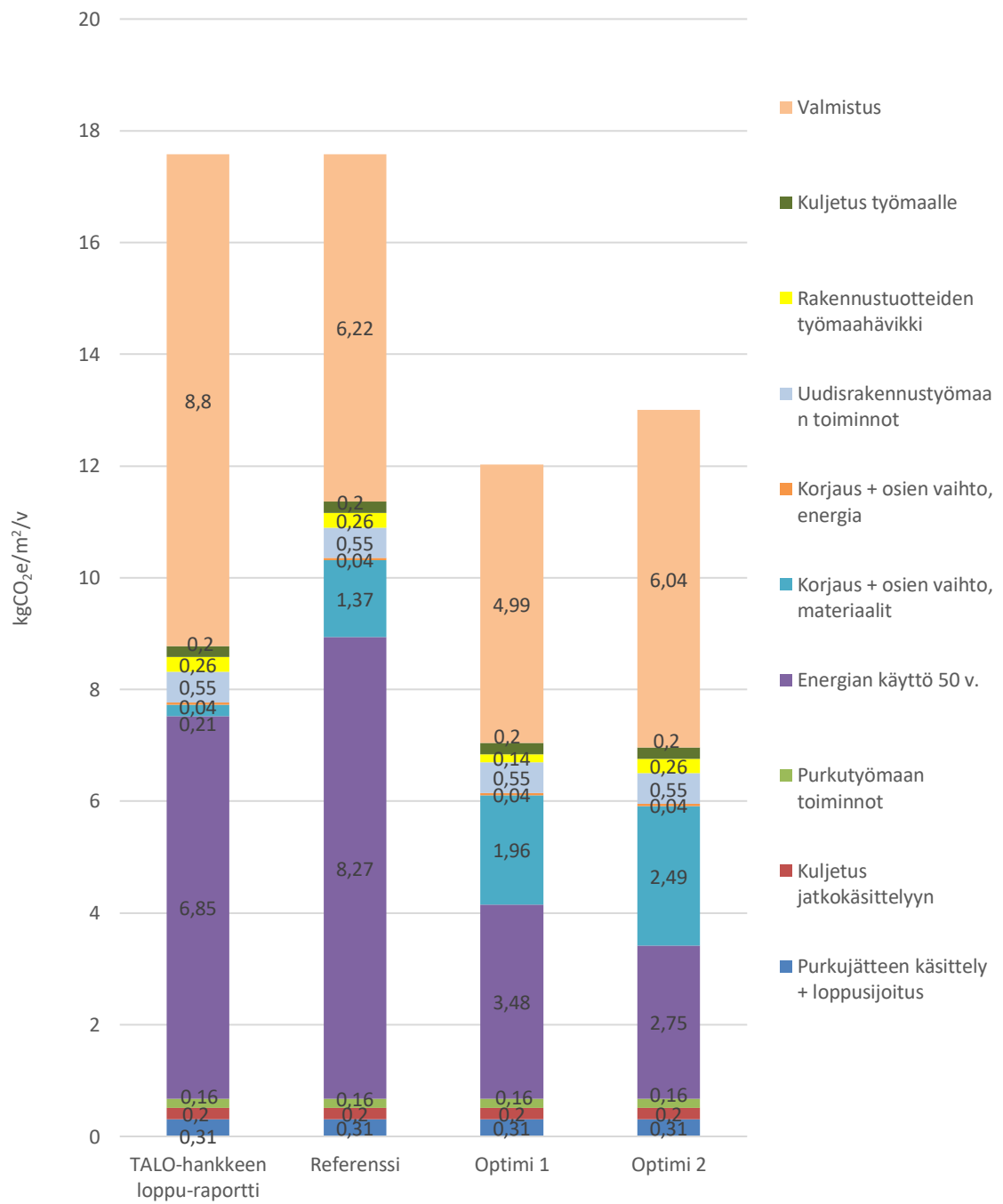
Kuva 38. Vertailukohteiden kaukolämmön kulutus kilowattitunteina neliometriä ja käyttövuotta kohden.

5.5.2 Hiilijalanjätkilaskennan vertailutulokset

TALO-hankkeen loppuraportin keskimääräistä betonikerrostaloa käytettiin vertailukohteena tämän diplomityön laskelmille. Hiilijalanjälki elinkaaren vaiheittain on esitetty TALO-hankkeen loppuraportin keskiarvokohteelle, referenssikohteelle sekä optimiratkaisuille kuvassa 39. Hiilijalanjäljet tarkemmin elinkaaren osa-alueittain on esitetty samoille kohteille kuvassa 40.

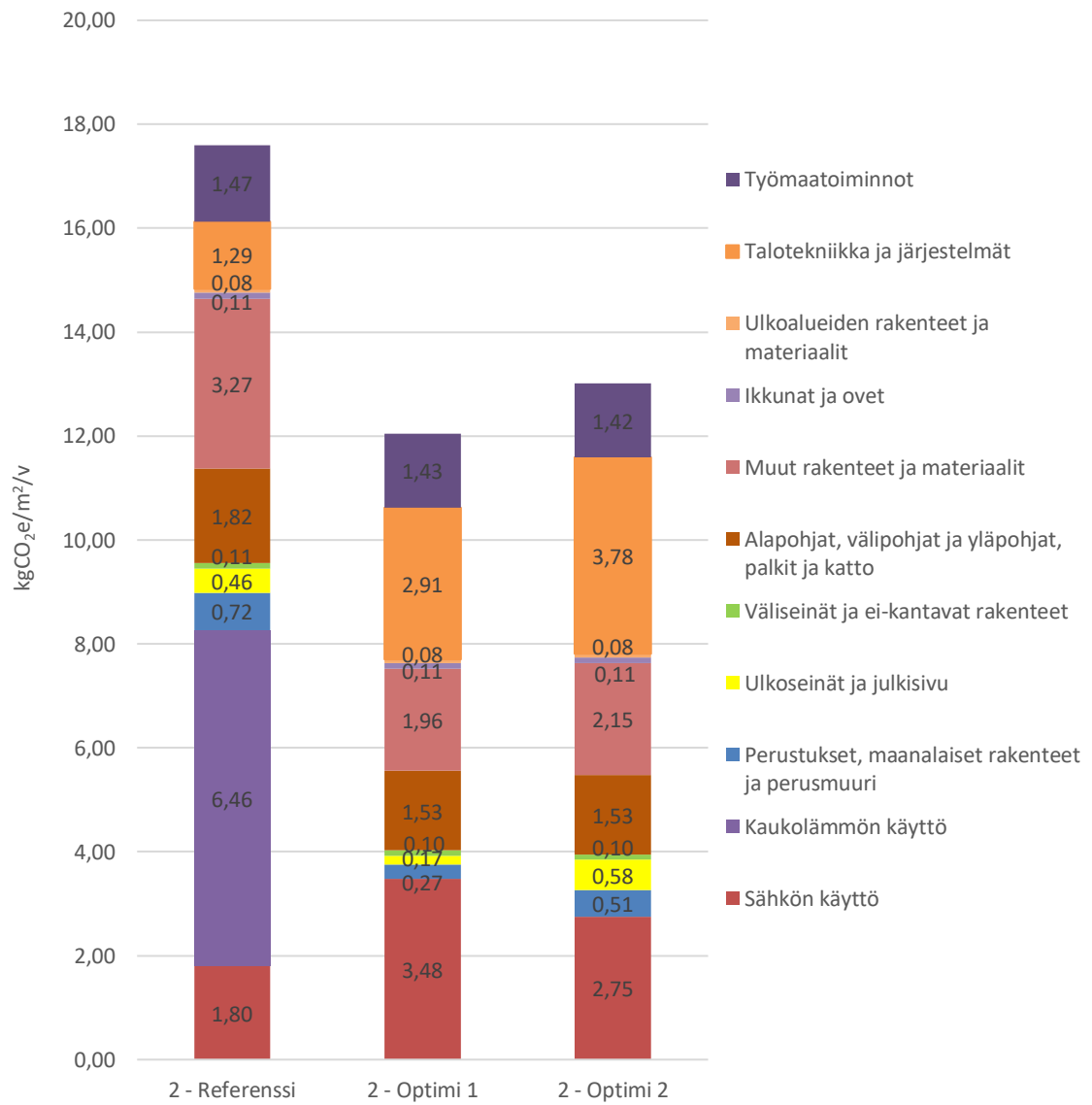


Kuva 39. Vertailukohteiden hiilijalanjälki elinkaaren vaiheittain neliometriä ja käyttövuotta kohden.

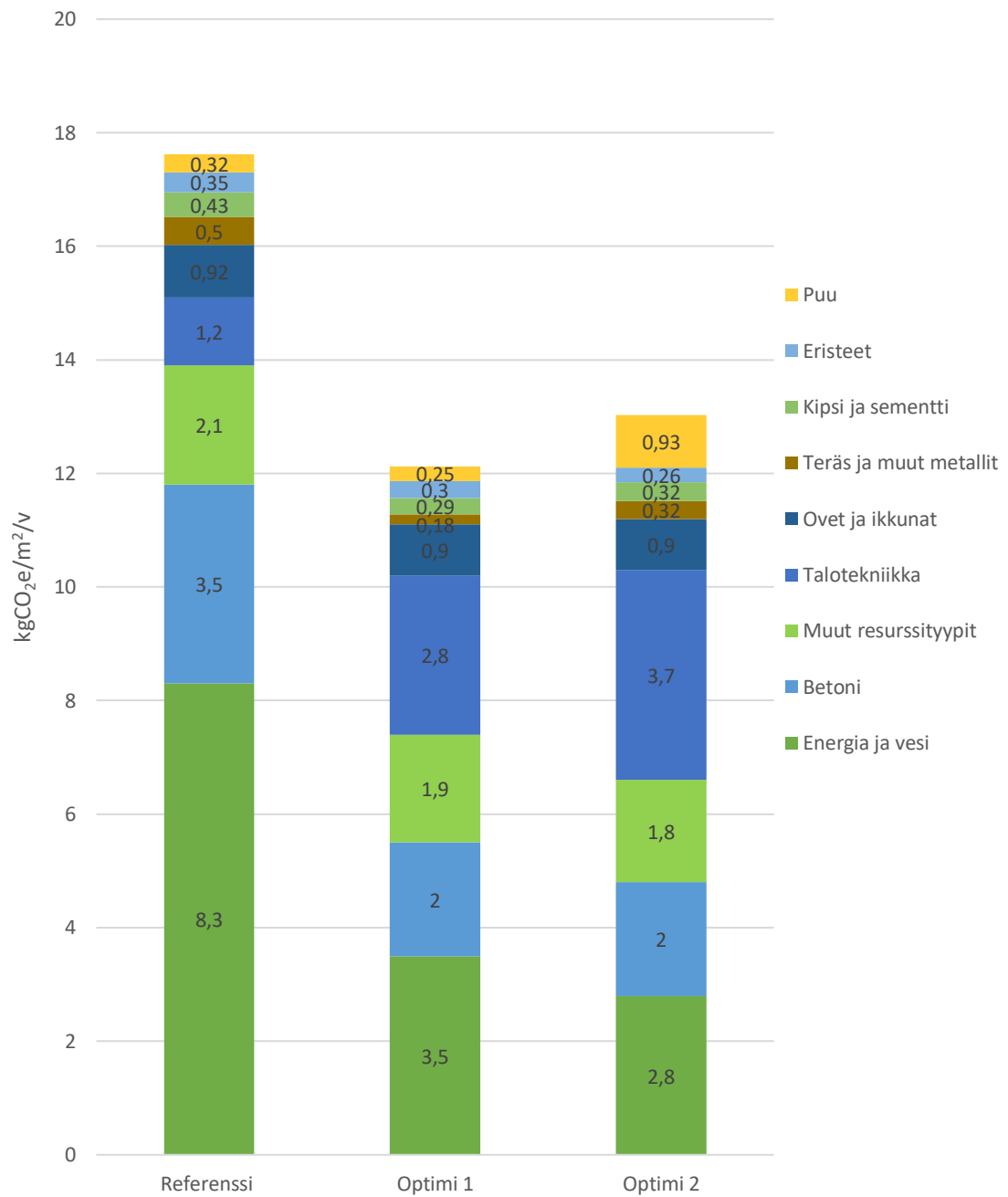


Kuva 40. Vertailukohteiden hiilijalanjälki elinkaaren osa-alueittain neliometriä ja käyttövuotta kohden.

Kuvaan 41 on koottu referenssikohteen ja optimiratkaisuiden hiilijalanjälki rakennusosittain. Kuvassa 42 on esitetty kohteiden materiaalien hiilijalanjälki resurssityypeittäin.



Kuva 41. Referenssikohteen ja optimilaskelmien hiilijalanjälki rakennusosittain ja energiankäyttö huomioituna neliometriä ja käyttövuotta kohden.



Kuva 42. Referenssikohteen ja optimilaskelmien materiaalien hiilijalanjälki resurssityypeittäin neliometriä ja käyttövuotta kohden.

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Energialaskennan arviointi

Ympäristöministeriön tavoitteena on lähes nollaenergiarakentaminen ja vähintään 3-kerroksisen asuinkerrostalon E-luvun raja-arvoksi on määrätty 90 [44]. Referenssikohteeseen valittujen ulkopintojen rakenneosien U-arvot täyttivät juuri vaatimustason eikä kohteessa ollut mukana mitään energiatehokkuutta parantavia ratkaisuja. Laskettu E-luku 90 täyttää siis juuri E-luvun vaatimustason ja tulos vaikuttaa järkevältä. Referenssikohteen energialaskelmaa verrattiin vuonna 2020 Oulussa valmistuneisiin samaa suuruusluokkaa oleviin kerrostalokohteisiin, joiden lämmitysmuotona on kaukolämpö. Vertailukohteiden sähkönkäytön keskiarvo on 56 kWh/m²/a, joten laskettu tulos 45 kWh/m²/v saattaa olla hieman alakanttiin. Vertailukohteissa oli mukana myös saman kokoluokan kerrostalo, jonka sähkönkulutus oli sama 45 kWh/m²/v kuin referenssikohteessa, joten tulosta voidaan pitää laskennassa käyttökelpoisena. Vertailukohteiden kaukolämpötarpeen keskiarvo on 38 kWh/m²/v, joten referenssikohteen laskettu tulos 45 kWh/m²/v on hieman keskiarvoa suurempi. Vertailukohteissa on todennäköisesti mukana energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä, joita referenssilaskelmassa ei ollut.

Optimi 1 -laskelmassa energiatehokkuutta parannettiin vaihtamalla rakennukseen ikkunat, joiden U-arvo on 0,7 W/m²K ja ikkuna-alaa pienennettiin. Lämmitysmuodoksi valittiin maalämpö. Seinän eristeeksi valittiin myös paksumpi selluvilla ei-kantaviin seiniin ja kivivilla kantaviin seiniin, jolloin seinän U-arvo oli 0,09 W/m²K. Ostoenergiantarve kilowattitunteina pieneni näillä muutoksilla 43 % ja E-luku parani ollen 87. Optimi 2 -laskelmassa vaihdettiin myös U-arvon 0,7 W/m²K omaavat ikkunat ja ikkuna-alan määrää pienennettiin. Lämmitysmuodoksi valittiin maalämpö ja laskentaan otettiin mukaan 240 m² aurinkopaneeleja. Näillä ratkaisuilla Optimi 2:n ostoenergiantarve pieneni 55 % referenssiin verrattuna. Vaikka Optimi 2:ssa seinärakenteena oli hirsiseinät, joiden U-arvo on 0,4 W/m²K, kompensoi maalämmön ja aurinkopaneelien käyttö energiankulutusta niin paljon, että E-luku on 69. Rakennuksen rakenteiden suunnittelua ei myöskään ole aloitettu, joten kaikki lähtötiedot laskentaan on

pitänyt olettaa. Energialaskentojen tuloksia ei siis voida pitää todellisina tulevalle rakennukselle, mutta ne ovat suuntaa antavia ja riittävän tarkkoja arvioita hiilijalanjätkilaskentaa varten.

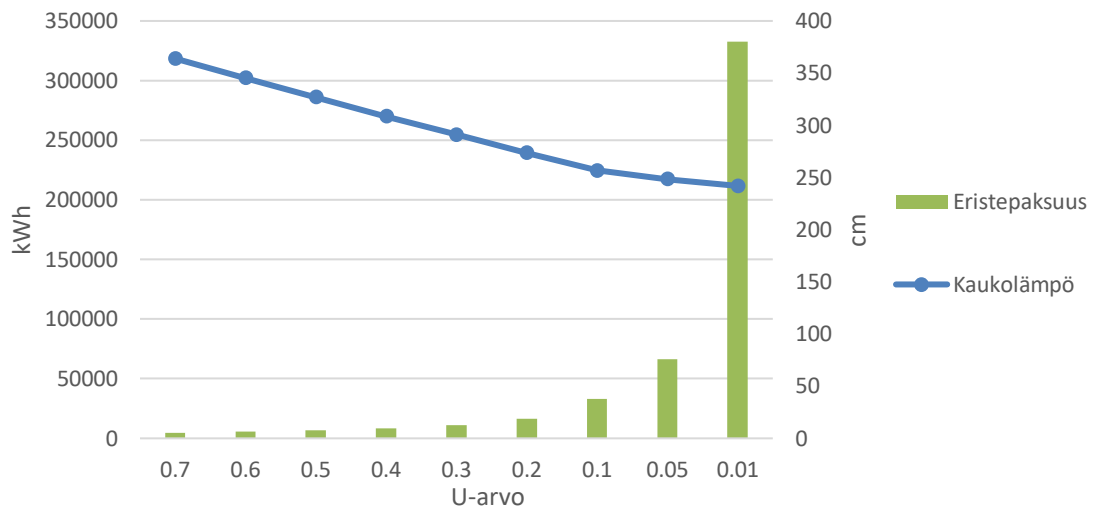
6.2 Materiaalilaskennan arviointi

Perustamistapalaskelman tulosten mukaan paalutusperustuksella hiilijalanjälki on suurempi kuin anturaperustuksella. Tulos on järkevä, sillä paalutus vaatii enemmän betonia kuin anturaperustus ja anturaperustuksessa riittää huomattavasti ohuempi alapohjan teräsbetoni-laatta. Paalutusta käytettäessä ontelolaatan hiilijalanjälki on hieman pienempi kuin teräsbetoni-laatan ja hiilikädenjälki on suurempi. Anturaperustuksilla anturoiden koko ja betonin tarve pieneni maaperän kovuuden parantuessa. Tämä on odotettu tulos, sillä kovemmalle maalle perustettaessa tarvitaan pienemmät anturat kuin pehmeälle maalle kovan maan kantaessa paremmin. Myös ylä- ja välipohjalaatoista ontelolaatalla on pienempi hiilijalanjälki ja suurempi hiilikädenjälki kuin teräsbetoni-laatalla. Tulos on järkevä, sillä ontelolaatta on selkeästi kevyempi rakenne kuin massiivinen teräsbetoni-laatta. Laattojen pintamateriaalivaihtoehdoista parketilla on suurin hiilijalanjälki, sillä rakenne on kaikista paksuin. Muovimaton hiilijalanjälki on puolestaan pienin. Parketti ja laminaatti toimivat hiilinieluna ja sitovat hiilidioksidia yli kaksi kertaa enemmän kuin päästävät ilmakehään kasvattaen koko rakennuksen hiilikädenjälkeä ja ovat tämän vuoksi hiilineutraaliutta edistäviä materiaaleja. Vesikatevaihtoehdoista tiilikatteella on pienin hiilijalanjälki, kun taas Outokummun teräspeltikatteen uusiokäyttömahdollisuudet nostavat sen hiilikädenjälkeä tehden rakenteesta vartenotettavan vaihtoehdon.

Ulkoseinärakennevaihtoehdoista tiiliverhouksella on suurin hiilijalanjälki ja puuverhouksella puolestaan pienin. Tuloksista on nähtävissä, että hiilijalanjälki pienenee, kun betonin määrä vähenee ja muita materiaaleja korvataan puulla. Tulos tukee aikaisempien tutkimusten tuloksia. Hirsirakenteen hiilijalanjälki on suuri erityisesti ei-kantavissa seinissä ja sen U-arvo on muita vaihtoehtoja huomattavasti suurempi, minkä vuoksi hirsiseinäisen rakennuksen lämmitystarve on myös muita suurempi. Hirsirakenne toimii hiilinieluna sitoen itseensä yli neljä kertaa enemmän hiilidioksidia kuin sen

hiilijalanjälki on. Hirsirakenne on siis ulkoseinärakenteista hiilineutraaliutta edistävin vaihtoehto sen suuren hiilikädenjäljen vuoksi. Väliseinärakenteista teräsbetoniseinällä on suurin hiilijalanjälki ja kevyellä teräsranka-mineraalivillaseinällä selkeästi pienin. Tulos on odotusten mukainen, sillä betonilla on tunnetusti suuri hiilijalanjälki.

Eristevertailun eristeistä lasivilla ja kivivilla ovat pehmeitä mineraalivilloja tai puhallusmineraalivilloja. Selluvilla on puhallusvilla ja polyuretaani, EPS ja XPS ovat puolestaan kovia eristemateriaaleja. Yläpohjassa käytetään eristemateriaalina puhallusvillaa. Näistä selluvillalla on pienin hiilijalanjälki ja se toimii myös hiilinieluna. Seinärakenteissa voidaan käyttää mineraalivillaa tai kovaa villamateriaalia. Tutkimuksen suorittamisen aikana saatavilla olevista kantavaan seinään soveltuvista materiaaleista lasivillalla on pienin hiilijalanjälki. Selluvilla osoittautui eristevaihtoehtoista parhaaksi, mutta se ei sovellu ainakaan vielä käytettäväksi kantaviin seiniin. Alapohjarakenteissa käytetään kovia eristemateriaaleja ja näistä pienin hiilijalanjälki on EPS-eristeellä. Eristevertailussa on käytetty valmistajan ilmoittamia arvoja, joten tulosten pitäisi olla todenmukaisia juuri kyseiselle tuotteelle. Lasivillalle laskettiin myös hiilijalanjälkilaskelma, kun eristepaksuutta kasvatetaan. Rakennuksen kaukolämmön ja sähkön tarve pieneni eristepaksuuden kasvaessa, eli sen energiatehokkuus parani. Myös koko rakennuksen hiilijalanjälki pieneni eristepaksuuden kasvaessa, vaikka itse eristeen hiilijalanjälki kasvoi sen määrän lisääntyessä. Kaukolämmön tarve ja lasivillan eristepaksuus ulkoseinien eri U-arvoilla on esitetty seuraavan sivun kuvassa 43. Kuvaajasta nähdään, että lämmitystarve vähenee lineaarisesti U-arvoon $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja väheneminen hidastuu sitä pienemmillä U-arvoilla. Vaadittava eristepaksuus puolestaan alkaa kasvamaan huomattavasti U-arvon $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ jälkeen ja eristepaksuudet kasvavat U-arvon $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ alittamisen jälkeen niin suureksi, ettei rakenteita enää käytännössä voida toteuttaa. U-arvon $0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$ omaavaa rakennusta kutsutaankin passiivitaloksi ja nykyisillä eristeillä tämän U-arvon alapuolelle on käytännössä mahdotonta päästä, sillä seinän paksuutta ei ole järkevää tai suunnittelun kannalta mahdollista enää kasvattaa.



Kuva 43. Kaukolämmön tarve ja eristepaksuuden vaihtelu ulkoseinien eri U-arvoilla.

Parvekelinjoista pienin hiilijalanjälki on teräsbetonisilla parvekepielillä kannatetulla hirsirakenteisella parvekevälipohjalla. Rakenteella on myös suurin hiilikädenjälki hirren hiilinielumuinaisuuden vuoksi. Kannatusratkaisuisista Schöck-ulokeparvekekannatuksella ja betonipilarilla on teräsbetonista parvekepieltä pienempi hiilijalanjälki, mutta nämä eivät sovellu käytettäväksi hirsirakenteisen parvekevälipohjan kanssa.

Koko rakennuksen hiilijalanjälki pieneni 2 %, kun 10-25 % betonin sisältämästä sementistä korvattiin vaihtoehtoisilla materiaaleilla. Tulos on linjassa aikaisempiin tutkimuksiin. Lämmitysmuotovertailussa lämmitysmuodon vaihtaminen kaukolämmöstä maalämpöön pienensi hiilijalanjälkeä 17 %. Maalämpöä käytettäessä sähkön tarve tuplaantui, sillä maalämpöpumppu käyttää sähköenergiaa, mutta kokonaisenergiantarve pieneni yli 40 %. Aurinkopaneelin asentaminen vähensi ostosähkön tarvetta. Aurinkopaneelit kasvattivat hiilijalanjälkeä, sillä ne lisäävät materiaalin määrää rakennuksessa. Paneelit eivät myöskään vähennä rakennuksen kokonaisenergiantarvetta, mutta niiden tuottama energia on uusiutuvaa energiaa ja tämän vuoksi aurinkopaneelien aiheuttama hiilikädenjälki on laskelmien mukaan yli kaksi kertaa suurempi kuin niiden aiheuttama hiilijalanjälki. Esimerkiksi asennettaessa rakennukseen 240 m² aurinkopaneelia kasvoi hiilijalanjälki 0,13 kgCO₂e/m²/v ja hiilikädenjälki -0,28 kgCO₂e/m²/v. Tulokset osoittavat, että hiilijalanjäljen kasvamisesta huolimatta aurinkopaneelit vievät rakennusta kohti hiilineutraaliutta.

Lämmityksen ja sähkön tarve pieneni, kun ikkunoiden kokoa pienennettiin. Samalla myös hiilijalanjälki pieneni, vaikka seinämateriaalien osuus kasvoi. Kaukolämmön kulutus pieneni yhden prosentin verran ikkunoilla, joiden U-arvo on $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ kun ikkunan kokoa pienennettiin 15 %. Luku vaikuttaa pieneltä, mutta laskennassa yläpohjan, alapohjan ja parvekkeiden suurien liukuovien U-arvo pysyy samana ja 15 % ikkunakoon muutos koko rakennuksen ulkopintojen alasta on 1 %. Tulos vaikuttaa koko rakennuksen ulkopintojen ala huomioituna järkevältä. Rakennuksia lämmitetään loppusyksystä alkukesään, eli lämmitykseen tarvittavaa energiaa voidaan säästää vain viileään vuodenaikaan ja kesällä kaukolämpöä tarvitaan lähinnä käyttöveden lämmittämiseen. Selkeästi suurempi pienennys kaukolämmön käytössä saatiin, kun ikkunat vaihdettiin U-arvosta $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ arvoon $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tässä laskelmassa ikkunan koon muuttamisella oli pienempi vaikutus, sillä ero seinän U-arvoon on pienempi. Energiaa kuluu vähemmän U-arvon $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ikkunoilla 30 % ikkunapinta-alalla kuin U-arvon $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ikkunoilla 15 % ikkunaosuudella. Samoin hiilijalanjälki on pienempi ikkunalla, jolla on parempi U-arvo. On siis ekologisesti kannattavampaa käyttää paremman U-arvon omaavia ikkunoita kuin hakea energiansäästöä ikkunoiden kokoa pienentämällä.

6.3 Vertailulaskentojen arviointi

Optimi 1 -ratkaisuun vaihdettiin lämmitysmuodoksi maalämpö, energiatehokkaammat ikkunat ja eristepaksuutta kasvatettiin. E-luku pieneni arvosta 90 arvoon 87. Maalämpöjärjestelmä vaatii sähköä käyttöönsä, mikä kasvattaa ostosähköntarvetta ja lasketun ostoenergian määrä kerrotaan energiamuodon kertoimella E-lukua laskettaessa. Sähkölle tämä arvo on 1,2 ja kaukolämmölle 0,5, mikä selittää sen, että E-luku pysyy suurena. Optimi 2 -ratkaisussa rakennukseen on asennettu maalämmön lisäksi aurinkopaneeleja. Paneelit vähentävät ostosähkön tarvetta ja E-luku pienenee huomattavasti ollen 69. Optimi 1-ratkaisussa pyrittiin minimoimaan hiilijalanjäljen määrä ja referenssikohteeseen verrattuna hiilijalanjälkeä saatiin pienennettyä 32 %. Hiilikädenjälki kasvoi puolestaan 33 %. Optimi 2- ratkaisussa pyrittiin minimoimaan hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen suhde. Tässä laskelmassa hiilijalanjälki pieneni 26 % ja hiilikädenjälki kasvoi 135 %. Elinkaaren vaiheittain hiilijalanjälki pieneni ennen käyttöä Optimi 1:ssä 18 % ja Optimi 2:ssa 2,6%. Käytönaikainen hiilijalanjälki pieneni Optimi

1:ssä 43 % ja Optimi 2:ssa 45,5 %. Uudelleenkäytöstä ja kierrätyksestä saatavat hyödyt kasvoivat Optimi 1:ssä 22 % ja Optimi 2:ssa 107 %. Biogeeninen hiilivarasto kasvoi Optimi 1:ssä 62 % ja Optimi 2:ssa 256 %.

Referenssikohdetta, Optimi 1 ja Optimi 2 -ratkaisuja verrattiin TALO-hankkeen loppuraportin keskiarvokohteeseen. Referenssikohteen ja TALO-hankkeen keskiarvokohteen hiilijalanjäljeksi saatiin sama arvo 17,59 kgCO₂e/m²/v, mutta eroavaisuuksia löytyi elinkaaren vaiheista. Hiilijalanjälki ennen rakennuksen käyttöönottoa syntyy rakennusosien valmistuksesta ja työmaan toiminnoista. Referenssikohteessa tämän vaiheen hiilijalanjälki on arvioitu 26 % pienemmäksi kuin TALO-hankkeen keskiarvokohteessa. Referenssikohteen materiaalmäärä on vain arvio. Käytönaikainen hiilijalanjälki koostuu lähinnä energiankulutuksesta ja rakennusosien vaihtomateriaaleista. Referenssikohteessa käytönaikainen hiilijalanjälki arvioitiin 36 % TALO-hankkeen keskiarvokohdetta suuremmaksi. TALO-hankkeen laskelmassa ei huomioitu käytönaikaisia isoja remontteja. Referenssikohteessa ei ollut mukana mitään energiatehokkuutta edistäviä ratkaisuja ja laskennassa oli mukana käytönaikaiset remontit, joten tulos vaikuttaa järkevältä. Optimi 1- ja Optimi 2-ratkaisuissa lämmitysmuotona oli maalämpö, mikä lisäsi korjauksista johtuvaa hiilijalanjälkeä. Lisäksi aurinkopaneelit lisäsivät vielä Optimi 2:n korjauksista ja osien vaihdosta aiheutuvaa hiilijalanjälkeä.

Referenssikohteelle ja optimiratkaisuille tehtiin vertailu rakennusosittain ja materiaaleittain. Optimi 1 ja Optimi 2 -ratkaisuihin talotekniikan ja järjestelmien osuus hiilijalanjäljestä on suurempi kuin referenssikohteessa, sillä niihin on asennettu maalämpöjärjestelmä ja Optimi 2:ssa aurinkopaneelit lisäävät tämän osion hiilijalanjälkeä. Ala-, ylä- ja välipohjarakenteiden hiilijalanjälki on kummassakin optimiratkaisuissa referenssikohdetta pienempi, sillä massiiviset teräsbetonilaatat vaihdettiin kevyempiin ontelolaattoihin. Ulkoseinärakenteista Optimi 1:llä on 63 % pienempi hiilijalanjälki kuin referenssikohteella kun tiili on vaihdettu puuhun. Optimi 2:lla sen sijaan on 26 % suurempi ulkoseinien hiilijalanjälki kuin referenssikohteella, sillä hirsirakenteella on suuri hiilijalanjälki erityisesti ei-kantavilla seinillä. Optimi 1:ssa puun osuus on pienempi kuin referenssikohteessa vaikka ulkoseinissä on puuverhoilu ja parvekevälipohjat hirsirakenteisia, muuta lattiamateriaalina on muovimatto

parkettilattian sijaan. Optimi 2:ssa puun osuus on suurin, sillä ulkoseinät ovat kokonaan puuta ja ratkaisussa on parkettilattiat ja hirsirakenteiset parvekevälipohjat. Betonin hiilijalanjälkeä on saatu pienennettyä optimiratkaisuissa 42 % vaihtamalla betonirakenteita kevyempiin vaihtoehtoihin ja korvaamalla osa sementistä vaihtoehtoisilla materiaaleilla. Hiilijalanjälkeä on optimiratkaisuissa saatu pienennettyä myös kipsin ja sementin, teräksen ja muiden metallien, energian ja veden, sekä eristeiden osalta. Ainoastaan talotekniikan hiilijalanjälki on optimiratkaisuissa referenssikohdetta suurempi ja tämä selittyy maalämpöjärjestelmällä ja aurinkopaneeleilla.

7 POHDINTA

Tässä työssä laskentamenetelmänä käytettiin Ympäristöministeriön menetelmää. Laskentatapa oli selkeä ja OCL:lla laskettaessa helppokäyttöinen. Menetelmä on vielä pilotointivaiheessa, ja samoilla rakenneosilla saatetaan tulevaisuudessa saada tästä laskelmasta poikkeavia tuloksia. Menetelmä sisältää myös vielä paljon valmiita laskennassa käytettäviä taulukkoarvoja, joita ei itse pysty muuttamaan. Laskennasta saadaan todenmukaisempi, jos taulukkoarvot saadaan tulevaisuudessa itse muuttamaan silloin kun todenmukaista tietoa kohteen päästöistä on tiedossa. OCL antaa laskennan tuloksen 2 desimaalin tarkkuudella. Tulokset on ilmoitettu samalla tarkkuudella myös TALO-hankkeen loppuraportissa ja tässä diplomityössä. Tämän diplomityön laskennan tulokset perustuvat arvioihin materiaalmääristä, joten näin tarkkoihin tuloksiin ei todellisuudessa voida päästä vaan lähimpään kokonaislukuun pyöristetty arvo voisi olla lähempänä oikeaa.

Hiilijalanjälkilaskenta aloitettiin Vihreän Korttelin suunnittelussa juuri oikeassa vaiheessa, sillä ennen lopullista rakennusosien valintaa Rakennusteholla on tiedossa vertailun kohteena olevien rakennusosien hiilijalanjälki. Tässä tutkimuksessa hiilijalanjäljen pienentämiskeinoja löydettiin lähes jokaisesta rakennuksen osasta. Ainoastaan pohjalaattojen eristeenä käytettävän EPS-eristeen tilalle ei löydetty vähähiilisempää vaihtoehtoa. Tulokset tukevat aikaisempien tutkimusten tuloksia, joiden mukaan materiaalivalinnoilla ja energiatehokkuutta kehittämällä rakennuksen hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa huomattavasti.

Rakennuksen perustamistapaa ei voida vapaasti päättää, vaan siihen vaikuttaa maaperän laatu. Jos perustusten hiilijalanjälkeä halutaan pienentää, tulisi rakennuksen sijoituspaikka valita hyvin kantavalle maaperälle. Kaupunkirakentamisessa rakennuspaikan valitseminen on yleensä mahdotonta maaperän laadun perusteella, vaan rakennuspaikat valikoituvat sinne missä niille on tarvetta ja tilaa. Perustukset ovat rakennuksen tukijalka, joten ne eivät ole ensimmäinen kohde josta materiaalia kannattaa alkaa säästämään. Jos perustamistapana on paalutus, tuloksissa todettiin tuulettuva alapohja ontelolaatalla paremmaksi vaihtoehdoksi kuin maanvarainen massiivilaatta.

Tuulettuva alapohja on myös mahdollisen homehtumisen kannalta parempi vaihtoehto, sillä jos maanpinta painuu, paalutukset estävät rakennusta painumasta mukana ja alapohjan alle jää tyhjä tila. Tuulettumattomana tämä tila on otollinen paikka homekasvustoille, mikä on riski sekä rakenteille että asukkaille. Ontelolaatta todettiin joka kerrokseen paremmaksi vaihtoehdoksi kuin massiivinen teräsbetonilaatta. Laskennassa käytettiin joka kerroksessa samaa 320 mm korkeaa ontelolaattaa. Vesikatolla voi olla myös mahdollista käyttää kevyempää 265 mm korkeaa ontelolaattaa, mikä pienentäisi hiilijalanjälkeä entisestään.

Lattia- ja vesikatemateriaaleille on oletettu toisistaan poikkeavat käyttöajat. Arviot perustuvat tekniseen käyttöaikaan ja materiaalien kestävyysvaikutusta huomattavasti asukkaiden elintavat. Hyvällä hoidolla esimerkiksi parkettilattia voi kestää rakennuksen koko käyttöajan, kun taas kovalla käytöllä se voidaan joutua vaihtamaan useampaan kertaan. Todellinen tilanne voi siten poiketa huomattavasti laskennallisesta. Kattorakenteiden laskennassa bitumikermikatteen oletettu käyttöaika oli 20 vuotta ja muilla materiaaleilla 50 vuotta. Oletuksena 50 vuoden käyttöiälle on, että rakenteita huolletaan ja ne pysyvät käyttökelpoisina rakennuksen koko käyttöajan ajan. Jos huoltotoimenpiteitä laiminlyödään ja kattorakenne joudutaan uusimaan, nousee savikkattotiilikatteen hiilijalanjälki lähes bitumikermikatteen tasolle ja peltikatteen hiilijalanjälki huomattavasti sen yli. Käyttöaikojen arviointi hiilijalanjälkilaskennassa on siis haastavaa, kun asukkaiden elintapoja tai talonyhtiön huoltotoimenpiteistä huolehtimista ei voida ennustaa.

Ulkoseinärakennevaihtoehdoista hirsiseinä osoittautui hiilineutraaliuden kannalta parhaaksi vaihtoehdoksi suuren hiilikädenjälkensä vuoksi. Hirsiseinärakenteen valitseminen toteutettavaksi ei ole ongelmatonta. Hirsiseinärakenteita ei ole toteutettu vielä paljoa kerrostalorakentamisessa, joten rakennesuunnittelu voi olla haastavaa ja investointikustannukset suuret. Ongelmia voi tulla myös palovaatimusten toteutuksessa. Muita rakenteita suurempi lämmitystarve nostaa myös käyttökustannuksia. Hirsiseinärakenteissa on käytetty eristeitä pientalorakentamisessa ja myös kerrostalojen hirsiseinien eristäminen pienentäisi lämmitystarvetta. Hirsiseinärakenne ja puinen

ulkokuori vaativat myös enemmän huoltotoimenpiteitä kuin tiili- ja betoniseinä ja vaativat talonyhtiöltä käytönaikaisia investointeja.

Eristeitä vertaillessa käytettiin valittujen valmistajien antamia päästötietoja. Tulokset ovat päteviä juuri kyseisen valmistajan tuotteille, mutta eri valmistajien välillä voi olla suuriakin eroja eivätkä tulokset täten ole yleistettävissä kaikkiin kyseisen tyyppin eristeisiin. Eristeistä selluvilla toimii hiilinieluna ja sen hiilikädenjälki on huomattavasti hiilijalanjälkeä suurempi. Kerrostalorakentamisessa selluvillaa käytetään lähinnä yläpohjarakenteessa, mutta pientalorakentamisessa selluvillaa on käytössä myös ulkoseinien eristämässä ja tulevaisuudessa tuotekehitys onnistunee kehittämään myös kerrostaloseiniin sopivan selluvillaeristeen. Tällä hetkellä selluvillaa voidaan käyttää eikantavissa seinärakenteissa, mutta kantaviin seiniin se ei sovellu. Selluvilla sitoo itseensä huomattavasti enemmän hiilidioksidia kuin sen tuottaminen vapauttaa ilmakehään, joten jos kerrostalon seinärakenteisiin onnistutaan kehittämään soveltuva selluvillatyyppi, eristepaksuuden kasvattaminen lisäisi rakennuksen energiatehokkuutta ja veisi rakennusta selluvillan hiilinielumuinaisuuden ansiosta kohti hiilineutraaliutta.

Ulkoseinärakenteissa tulee huomioida myös rakenteen kosteustekninen toiminta. Seinän tulee suojata sisätiloja rakennuksen ulkopuoliselta kosteudelta ja mahdollistaa vaaditun sisäilman laadun ja lämpötilaolosuhteiden ylläpito. Tiili- ja puuverhoiltuissa talossa tiilen ja eristeen väliin jätetään ilmarako ja pehmeä eriste suojataan kovemmallalla tuulensuojaeristeellä tai -levyllä. Sandwich-elementissä pehmeään eristeeseen tehdään tuuletusuria. Ormiskangas tutki vuonna 2009 tutki diplomityössään ulkoseinärakenteiden kosteusteknistä toimintaa, kun eristepaksuutta kasvatetaan. Tutkimuksessa todetaan, että pehmeää villaa käytettäessä eristepaksuuden kasvattaminen ei vaikuttanut merkittävästi rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Kovia eristeitä käytettäessä eristeen paksuntaminen puolestaan vaikuttaa kosteustekniseen toimintaan, sillä kovat eristeet läpäisevät vesihöyryä huomattavasti pehmeitä eristeitä vähemmän. Rakennuksen kosteustekninen toiminta tulee siis varmistaa, jos rakennukseen ulkoseiniin valitaan paksumpi kova eriste. [45] Eristeen paksuntaminen tuo myös suunnittelullisia haasteita, sillä esimerkiksi elementtien nostaminen vaikeutuu ja ikkunoiden asentaminen paksun eristeen kohdalle voi heikentää seinän lämmöneristyskykyä ikkunan kohdalla.

Parvekelinjoista pienin hiilijalanjälki todettiin teräsbetonipielikannatteisella hirsivälipohjarakenteella. Teräsbetonisella parvekepielellä on suuri hiilijalanjälki. Tässä tutkimuksessa rakennetyyppivaihtoehtona oli vain betonin ja puun yhdistetty rakenne, mutta myös puuväliseiniä on saatavana kantavana rakenteena ja tämä ratkaisu pienentäisi rakennuksen hiilijalanjälkeä ja kasvattaisi hiilijalanjälkeä. Puurakenteet tarvitsevat enemmän huoltamista ja ylläpitoa kuin betonirakenteet, ja myös palomääräykset voivat tuottaa ongelmia.

Sementin vaihtoehtoisten materiaalien vaikutusta hiilijalanjälkeen tutkittaessa vain 10-25 % sementistä korvattiin vaihtoehtoisilla materiaaleilla. Kehitteillä on uusia betonituotteita, joissa 100 % sementistä olisi korvattu kierrätysmateriaaleilla. Jos tällainen betoni saadaan toimivaksi talonrakennuksessa, muuttuu betonirakenteisten talojen rakentaminen huomattavasti ekologisemmaksi. Lämmitysmuodoista maalämpö pienentää rakennuksen energiantarvetta. Maalämpöjärjestelmä voi olla alkuinvestointina suuri ja tarvitsee huoltamista käytön aikana ja jopa koko järjestelmän vaihdon rakennuksen elinkaaren aikana, mikä vaikuttaa taloudelliseen kannattavuuteen. Maalämpöpumppujärjestelmä vaatii myös tilaa, eikä sen asentaminen esimerkiksi tiheästi rakennetulle kaupunkialueelle onnistu. Myös matala vesistö voi soveltua maalämpöpumpun energianlähteeksi ja Vihreän Korttelin tapauksessa voisi selvittää, soveltuisiko Pyykösjärvi energianlähteeksi. Aurinkoenergia on uusiutuva energianlähde ja vähentää rakennuksen ostoenergiantarvetta ja tuo näin ollen säästöjä asukkaille. Aurinkokennojen valmistamisessa käytetään kalliita ja harvinaisia materiaaleja, eli kennot kuluttavat rajallisia ympäristöresursseja. Aurinkopaneelien käyttöikä on 20-30 vuotta, joten myös ne täytyy vaihtaa rakennuksen elinkaaren aikana, mikä aiheuttaa kustannuksia. Ikkuna-alan pienentämisen todettiin pienentävän hiilijalanjälkeä. Ikkunat vaikuttavat asumisen viihtyisyyteen positiivisesti tuomalla tilaan luonnon valoa, ja vähentyneen luonnonvalon määrä voi lisätä valaistuksen tarvetta lisäten tällöin sähkön tarvetta. Asumismukavuuden kannalta järkevämpi tapa olisi käyttää energiatehokkaampia ikkunoita niiden koon pienentämisen sijaan.

TALO-hankkeen loppuraportissa on pohdittu vähähiilisen rakentamisen taloudellisen ohjauksen lähtökohtia. Raja-arvo-ohjauksella on tarkoitus ohjata kaikkea rakentamista kohti vähähiilisyyttä, ja taloudellinen ohjaus kohdistuu erittäin vähähiiliseen rakentamiseen. Energiatohokkuutta parantavat toimenpiteet nostavat rakennuksen investointikustannuksia, mutta pienentävät käyttökustannuksia. Vähähiilisemmät rakennusmateriaalit voivat puolestaan aiheuttaa suuremmat investointikustannukset, mutta eivät pienennä käyttökustannuksia, mikä vähentää innokkuutta niiden käyttöönottoon. Raportissa todetaan, että pientalot ovat jo valmiiksi kohtalaisen vähähiilisiä, sillä niiden yleisin rakennusmateriaali on puu ja lämmitysmuoto maalämpö. Tulevat ohjauskeinot tulisi suunnata siis pääasiassa kerrostalorakentamiseen, sillä niiden yleisin rakennusmateriaali on betoni ja lämmitysmuoto kaukolämpö. Puu on pientalorakentamisessa edullisin vaihtoehto, mutta aiheuttaa kerrostalorakentamisessa yleensä lisäkustannuksia. Uusiutuviin energiamuotoihin perustuvat lämmitysjärjestelmät ovat myös kerrostalorakentamisessa suhteellisesti kalliimpia kuin pientaloissa kaukolämpöön verrattuna. Rakennuksen hiilijalanjäljen raja-arvoja ei ole vielä määritelty, mutta TALO-hankkeen loppuraportissa pakollisena raja-arvona on käytetty arvoa $15 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{v}$. Tämän arvon alittaminen olisi kerrostalossa saavutettavissa vaihtamalla lämmitysmuodoksi kaukolämpö tai päärakennusmateriaaliksi puu. Erittäin vähähiilisen rakennuksen raja-arvona on raportissa käytetty lukua $10 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{v}$. Tämän arvon pystyisi alittamaan puurakenteinen maalämpöä käyttävä kerrostalo, betonirakenteinen maalämpöä käyttävä kerrostalo, jonka materiaalipäästöistä on pudotettu 29 % ja rakennustyömaa on päästötön, tai puurakenteinen kaukolämpöä käyttävä kerrostalo, jonka energian päästöjä on vähennetty 55 % ja työmaa on päästötön. Taloudellisten ohjauskeinojen tavoitteena on ohjata käytäntöjä kohti vähähiilistä ja aikaansaada pilottikohteita, joissa kokeillaan ja opitaan tulevaisuuden rakentamisen käytännöistä ja teknologioista. [39] Jos betonia runkomateriaalina ei olla tulevaisuudessa halukkaita vaihtamaan puuhun, voi esimerkiksi Betolarin kehitystyön kohteena oleva sementin tilalla kokonaan kierrätysmateriaaleja sisältävä betoni olla ratkaisu saada myös betonirunkoisesta kerrostalosta erittäin vähähiilinen tai hiilineutraali.

Tämän tutkimuksen tulokset tukevat TALO-hankkeen tuloksia, sillä optimiratkaisut ovat betonirunkoisia maalämpöä käyttäviä kerrostaloja, ja niiden hiilijalanjälki osuu välille 10-15 kgCO₂e/m²/v. Tutkituilla vaihtoehdoilla ei siis vielä päästä erittäin vähähiiliseen rakentamiseen eikä hiilineutraaliuteen, mutta suunta on oikea. Optimiratkaisu 2 pääsi lähimmäksi hiilineutraalia rakennusta ja tälle rakennukselle kompensoitavaksi jäisi 4 kgCO₂e/m²/v. Kohteen hiilijalanjälkeä olisi vielä mahdollista pienentää käyttämällä vähäsementtisempää betonia ja huomioimalla kierrätysmateriaalit laskennassa. Vihreän Korttelin autokatosten katoille on myös tarkoitus asentaa aurinkopaneeleja. Hiilikädenjälki suurenee, kun myös nämä aurinkopaneelit huomioidaan laskennassa.

8 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tarkoituksena oli laskea betonirakenteisen asuinkerrostalon hiilijalanjälki, etsiä keinoja hiilijalanjäljen pienentämiseen vertailemalla eri rakennetyyppivaihtoehtoja ja löytää keinoja energian säästämiseen. Tutkimuskohteena oli 4-kerroksinen betonirunkoinen asuinkerrostalo. Rakennus mallinnettiin Tekla Structures -mallinnusohjelmalla käyttämällä Rakennustehon aikaisemmin toteuttamia referenssirakennetyyppejä ja käytettyjen materiaalien määrien laskentaan käytettiin Excel 2016 -laskentatyökalua. Rakennukselle tehtiin energiankulutusarvio Cadmatic HVAC -ohjelmistolla ja hiilijalanjälkilaskenta suoritettiin One Click LCA -elinkaarilaskentatyökalulla. Hiilineutraaliutta edistäviä rakennetyyppejä etsittiin alapohjarakenteille, välipohjarakenteille, yläpohjarakenteille, parvekelinjoille, ulkoseinille sekä väliseinille. Lisäksi etsittiin tapoja pienentää rakennuksen energiankäyttöä. Referenssikohteen E-lukulaskennan tulokseksi saatiin 90, elinkaarenaikaiseksi hiilijalanjäljeksi 17,59 kgCO₂e/m²/v ja hiilikädenjäljeksi -3,84 kgCO₂e/m²/v. Yli puolet hiilijalanjäljestä muodostui käytönaikaisesta energiankäytöstä ja 35 % rakennusmateriaalien valmistamisesta.

Eri rakennetyyppejä tutkittiin vaihtamalla rakennusosia yksi kerrallaan vaihtoehtoisten rakennetyyppien mukaisiin ja suorittamalla hiilijalanjälkilaskenta uudelleen. Tulosten perusteella muodostettiin kaksi optimitapausta, joista Optimi 1:seen valittiin mahdollisimman pienen hiilijalanjäljen omaavat rakennetyypit ja Optimi 2:seen rakennetyypit, joilla hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen summa saatiin mahdollisimman pieneksi.

Optimi 1:ssä vaihdettiin perustamistavaksi paaluperustuksesta anturaperustus kalliopohjalle ja alapohjalaataksi 200 mm teräsbetonilaatan tilalle 80 mm teräsbetonilaatta. Väli- ja yläpohjissa teräsbetonilaatta vaihdettiin ontelolaataksi ja pintamateriaali parketista muovimattoon. Vesikate muutettiin kumibitumikermikatteesta savitiilikatteeksi ja vesikaton eriste puhallusmineraalivillasta puhallusselluvillaksi. Ulkoseinien verhoilu vaihdettiin tiilestä puuverhoukseksi ja eristeeksi valittiin 225 mm kivivillan tilalle 430 mm lasivilla kantavissa seinissä ja 440 mm puhallusselluvilla ei-

kantavissa seinissä. Ei-kantavat väliseinät vaihdettiin teräsbetoniseinistä teräsranka-mineraalivillaseiniksi ja parvekkeiden välipohjarakenteet teräsbetonilaatasta hirsirakenteisiksi. Betonin sisältämästä sementistä vaihdettiin 10-25 % vaihtoehtoisiin materiaaleihin, ikkunat muutettiin kolminkertaisista nelinkertaisiin energiansäästöikkunoihin ja ikkuna-ala seinän pinta-alasta muutettiin 22,35 %:sta 15 %:iin. Lämmitysmuoto muutettiin kaukolämmöstä maalämpöön. Näillä toimenpiteillä rakennuksen E-luvuksi saatiin 87, elinkaarenaikaiseksi hiilijalanjäljeksi 12,04 kgCO₂e/m²/v ja hiilikädenjäljeksi -4,72 kgCO₂e/m²/v. Rakentamisen aikainen hiilijalanjälki pieneni 18 % referenssiin verrattuna ja käytönaikainen 44 %. Uudelleenkäytöstä ja kierrätyksestä saatavat hyödyt kasvoivat 22 % ja biogeeninen hiilivarasto 62 %.

Optimi 2 -ratkaisussa perustamistapana oli anturaperustus pehmeälle maaperälle ja alapohjalaattana 80 mm teräsbetonilaatta. Väli- ja yläpohjarakenteena käytettiin ontelolaattaa ja pohjalaattojen pintamateriaalina parkettia. Vesikatteeksi valittiin Outokummun konesaumattu peltikate ja yläpohjan eristeeksi puhallussellulla. Ulkoseinärakenteena käytettiin hirsiseinää ja parvekkeen välipohjarakenteena hirsirakenteista välipohjaa. Ei-kantavana väliseinärakenteena oli teräsranka-mineraalivillaseinä. Betonin sisältämästä sementistä vaihdettiin 10-25 % vaihtoehtoisiin materiaaleihin, ikkunat muutettiin kolminkertaisista nelinkertaisiin energiansäästöikkunoihin ja ikkuna-ala seinän pinta-alasta oli 15 %. Lämmitysmuodoksi valittiin maalämpö ja laskentaan otettiin mukaan 240 m² aurinkopaneeleja. Näillä toimenpiteillä rakennuksen E-luvuksi saatiin 69, elinkaarenaikaiseksi hiilijalanjäljeksi 13,01 kgCO₂e/m²/v ja hiilikädenjäljeksi -9,01 kgCO₂e/m²/v. Rakentamisen aikainen hiilijalanjälki pieneni 2,6 % referenssiin verrattuna ja käytönaikainen 45,5 %. Uudelleenkäytöstä ja kierrätyksestä saatavat hyödyt kasvoivat 107 % ja biogeeninen hiilivarasto 256 %. Parhaimpia tapoja pienentää hiilijalanjälkeä todettiin olevan betonin vaihtaminen puuhun ja lämmitysmuodon vaihtaminen kaukolämmöstä maalämpöön. Nämä ovat yleisimpiä ratkaisuja pientalorakentamisessa, mutta vasta vähän käytössä kerrostalorakentamisessa.

LÄHDELUETTELO

- [1] IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 151 s. ISBN 978-92-9169-143-2.

- [2] Ilmatieteenlaitos 2020. Kasvihuoneilmiö ja ilmakehän koostumus [verkkodokumentti], Saatavissa: https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/420c4ca3-a128-4ae7-882e-3d06e1ea24f5/kasvihuoneilmio-ja-ilmakehan-koostumus.html#cli_authors [Viitattu 4.7.2020].

- [3] NOAA, 2014. Monthly Average Mauna Loa CO [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> [Viitattu 13.7.2020].

- [4] Valtionsopimus 61/1994. Ilmastonmuutosta koskeva Yhdistyneiden Kansakuntien PUITESOPIMUS, Annettu Naantalissa 15 päivänä heinäkuuta 1994.

- [5] Hallituksen Esitys 200/2016. Hallituksen esitys eduskunnalle Pariisin sopimuksen hyväksymisestä ja sopimuksen lainsäädännön alaan kuuluvien määräysten voimaansaattamisesta, Annettu Helsingissä 13 päivänä lokakuuta 2016.

- [6] 609/2015, Ilmastolaki, Annettu Helsingissä 22 päivänä toukokuuta 2015.

- [7] Valtioneuvosto 2020. Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava suomi [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma/hiilineutraali-ja-luonnon-monimuotoisuuden-turvaava-suomi> [Viitattu 31.7.2020].

- [8] Oulun kaupunki 2019. Ympäristöohjelma 2026 - kohti hiilineutraalia Oulua, Oulu: Oulun kaupunki, 32 s.
- [9] Aalto-yliopisto 2020. Viherkertoimen valtavirtaistaminen [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://viherkerroin.aalto.fi/> [Viitattu 31.7.2020].
- [10] Bionova Oy 2017. Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa, Bionova Oy, 72 s.
- [11] Ympäristöministeriö 2020. Kestävät rakennukset ja rakentaminen -ohjelma [verkkodokumentti], Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Kansainvalinen_yhteistyo/Kestavat_rakennukset_ja_rakentaminen_ohjelma [Viitattu 31.7.2020].
- [12] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/844, annettu 30 päivänä toukokuuta, rakennusten energiatehokkuudesta annetun direktiivin 2010/31/EU ja energiatehokkuudesta annetun direktiivin 2012/27/EU muuttamisesta.
- [13] Ympäristöministeriö 2020. Vähähiilinen rakentaminen [verkkodokumentti], Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Rakentamisen_ohjaus/Vahahiilinen_rakentaminen [Viitattu 31.7.2020].
- [14] Ympäristöministeriö 2020. Level(s) - Rakennusten resurssitehokkuuden yhteiset EU-mittarit [verkkodokumentti], Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Kansainvalinen_yhteistyo/Levels__Rakennusten_resurssitehokkuuden_yhteiset_EUmittarit [Viitattu 31.7.2020].
- [15] Ympäristöministeriö 2020. Johdatus rakennusten elinkaariarviointiin, Helsinki: Ympäristöministeriön julkaisuja 18 s.

- [16] Pajula, T., Vatanen, S., Pihkola, H., Grönman, K., Kasurinen, H., Soukka, R. 2018. Carbon Handpront Guide, VTT Technical Research Centre of Finland 27s.
- [17] Ritter, E., De Rosa, M., Falk, A., Chistensen, P., Lokke, S., 2013. Wood As Construction Material: A "Common" Choice for Carbon Management?, Environmental Science & Tecnology, Vol 47, s.11930-11931.
- [18] Green Building Council Finland 2020. Vähähiilisyden sanakirja, vähähiilisen rakentamisen ja kiinteistöliiketoiminnan terminologia, [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://figbc.fi/wp-content/uploads/sites/4/2020/05/GBC-V%C3%A4h%C3%A4hiilisydeen-sanakirja-27.5.2020.pdf> [Viitattu 26.10.2020].
- [19] Green Building Council 2020. Hiilineutraalin rakennuksen määritelmä, Luonnos 7.10.2020, FIGBC vähähiilisen rakentamisen toimikunta 23 s.
- [20] SFS-ISO 14000, 2019. Ympäristöjohtamisen Standardisarja, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- [21] CEN/TC 350 2020. Sustainability of construction works, European Committee for Standardization.
- [22] U.S Green Building Council 2020. LEED rating system [Verkojulkaisu], Saatavissa: <https://www.usgbc.org/leed> [Viitattu 3.12.2020].
- [23] Building Research Establishment Ltd 2020. BREEAM, What is BREEAM? [Verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.breeam.com/> [Viitattu 3.12.2020].
- [24] SFS-EN ISO 14040 2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. 2. painos., Suomen standardisoimisliitto SFS: 1+48 s.

- [25] Säynäjoki, A., Heinonen, J., Junnila, S., Horvath, A. 2017. Can life-cycle assessment produce reliable policy guidelines on the building sector, *Environmental Research Letters* Vol 12 (1).
- [26] Häfliger, I.F., John, V., Passer, A., Lasvaux, S., Hoxha, E., Saade, M., Habert, G. 2017. Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials, *Journal of Cleaner Production* Vol 156 s.805-816.
- [27] Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., Fischer, M. 2012. "Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts," *Building and Environment* Vol 60 s.81-92.
- [28] Chau, K.C., Hui, W.K., Ng, W.Y., Powell, G. 2012. Assessment of CO₂ emissions reduction in high-rise concrete office buildings using different material use options, *Resources, Conservation and Recycling* Vol 61 s.22-34.
- [29] Betoniteollisuus ry, 2020. Sementti ja kasvihuonepäästöt [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/> [Viitattu 5.8.2020].
- [30] CarbonBrief 2020. Q&A: Why cement emissions matter for climate change [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.carbonbrief.org/qa-why-cement-emissions-matter-for-climate-change> [Viitattu 3.8.2020].
- [31] Finnsementti Oy, 2020. Plussementti [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://finnsementti.fi/tuotteet/sementit/plussementti/> [Viitattu 5.8.2020].

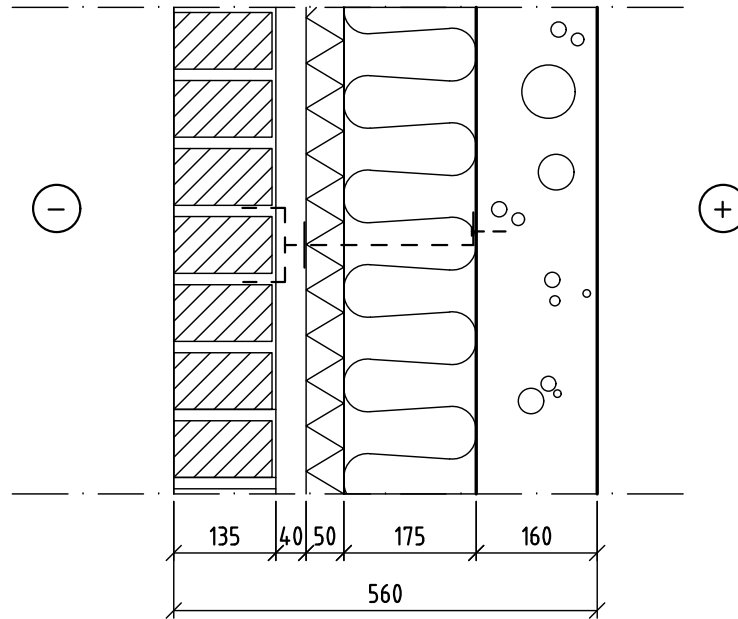
- [32] Tulimaa, M., Wirtanen, L., Holt, E., Kukko, H., Penttala, V. 2005. Ympäristöystävälliset ja hyvin säilyvät betonit, Espoo: Teknillinen korkeakoulu, rakennusmateriaalitekniikan laboratorio. 135 s.+liitteet 22 s.
- [33] Kurad. R., Silvestre, J.D., de Brito, J., Ahmed, H., 2017. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete, *Journal of Cleaner Production* Vol 166 s.485-502.
- [34] Betolar 2020. Tulevaisutta Rakentamassa - Yritysesittely, Oulu: 28.8.2020 Rakennustehon toimisto.
- [35] Tolppanen, J., Karjalainen, M., Lahtela, T., Viljakainen, M., 2013. Suomalainen puukerrostalo, Opetushallitus 194 s.
- [36] Teshnizi, Z., Pilon, A., Storey, S., Lopez, D., Froese, T.M., 2018. Lessons Learned from Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of Two Residential Towers at the University of British Columbia, *Procedia CIRP* Vol 69 s.172-177.
- [37] Mikko Kortelainen 2020. Puu menestyi, kun puu ja betonikerrostaloja vertailtiin - tosin kustannustiedot jätettiin kertomatta, *Rakennuslehti* 5/2020.
- [38] Arkkitehtitoimisto Vauhtiviiva 2020. Rakennusteho Groupin Vihreän Korttelin arkkitehtiaineisto.
- [39] Kangas, H-L., Sankelo, P., Kautto, P., Ruokamo, E., Lazarevic, D., Mattinen-Yuryev M., Turunen, T., Nissinen, A., 2019. Taloudellisten kannusteiden käyttö vähähiilisen rakentamisen ohjauksessa. TALO-hankkeen loppuraportti, Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:32.

- [40] RT 18-10922, 2008. Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot, Rakennustietosäätiö 32 s.
- [41] Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten lämmöneristys, Määräykset 2010, Ympäristöministeriön asetus rakennusten lämmöneristyksestä, Annettu Helsingissä 22 päivänä joulukuuta 2008.
- [42] Motiva Oy 2020. Energiatodistusrekisteri [verkkajulkaisu], Saatavissa: https://www.energiatodistusrekisteri.fi/public_html?command=browse [Viitattu 1.10.2020].
- [43] Ympäristöministeriö 2019. Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä, Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22 Helsinki.
- [44] Ympäristöministeriö 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta, Annettu Helsingissä 20 päivänä joulukuuta 2017.
- [45] Ormiskangas, P. 2009. Betonisandwich-elementin kosteustekninen toiminta paksuilla eristeillä., Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan koulutusohjelma. 127 s. + liitt. 7 s.

LIITE 1. Ulkoseinien rakennetyypit

US 1

KANTAVA ULKOSEINÄ /
TIILIVERHOUS



PINTAMATERIAALI/-KÄSITTELY, ARK-suunnitelman mukaisesti

135 mm	TIILIVERHOUS, rakennusselityksen mukaisesti, sidonta runkoon RST. muuraussiteillä 4kpl/m ² , ikkunoiden ja ovien pielissä k300. Asennetaan ulospäin kaltevaksi
40 mm	TUULETUSRAKO
50 mm	TUULENSUOJAMINERAALIVILLA Eristysten kiinnitys tiiliseiniin kiinnityslaipoilla valm. ohjeen mukaisesti
175 mm	LÄMMÖNERISTE pystyrunko 50x175 -k400
160 mm	TERÄSBETONISEINÄ rakennesuunnitelmien mukaisesti

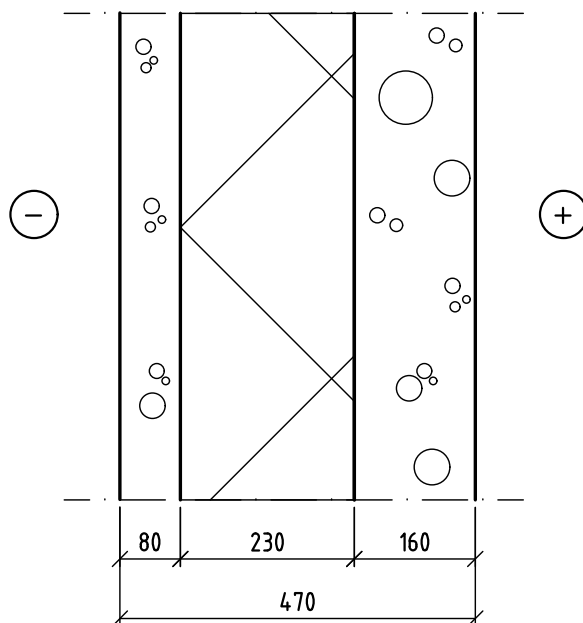
PINTAMATERIAALI TAI KÄSITTELY ARK-suunnitelman mukaisesti

U-arvo=0.17 W/m²K

PALOLUOKKA REI60

US2

KANTAVA ULKOSEINÄ/
SANDWICH-ELEMENTTI



PINTAMATERIAALI TAI KÄSITTELY ARK-suunnitelman mukaisesti

80 mm TERÄSBETONINEN ULKOKUORI,
RAUDOITUS (RST) ELEMENTTISUUNNITELMIEN MUKAAN

230 mm RISTIINURITETTU, URASUOJATTU MINERAALIVILLA

KUORET SIDOTAAN TOISIINSA RST-ANSAIN

160 mm KANTAVA RAKENNE, TERÄSBETONINEN SISÄKUORI ELEMENTTISUUNNITELMIEN MUKAAN

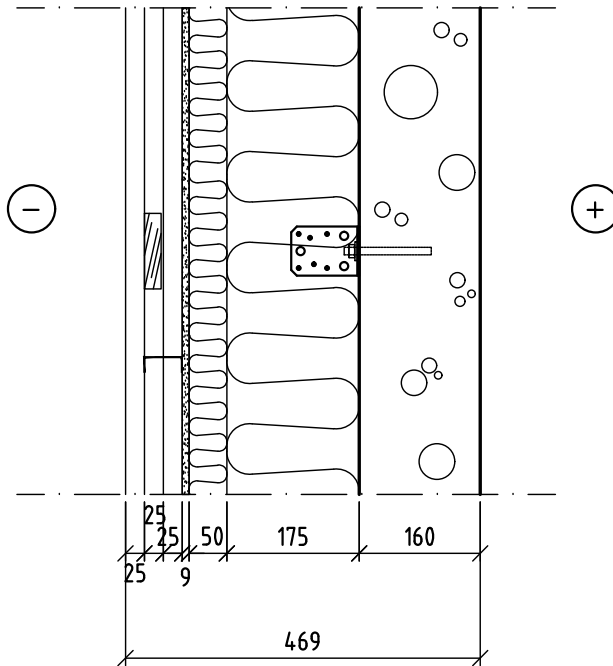
PINTAMATERIAALI TAI KÄSITTELY ARK-suunnitelman mukaisesti

U-arvo=0.17 W/m²K

PALOLUOKKA REI60

US3

KANTAVA ULKOSEINÄ /
PUUVERHOUS



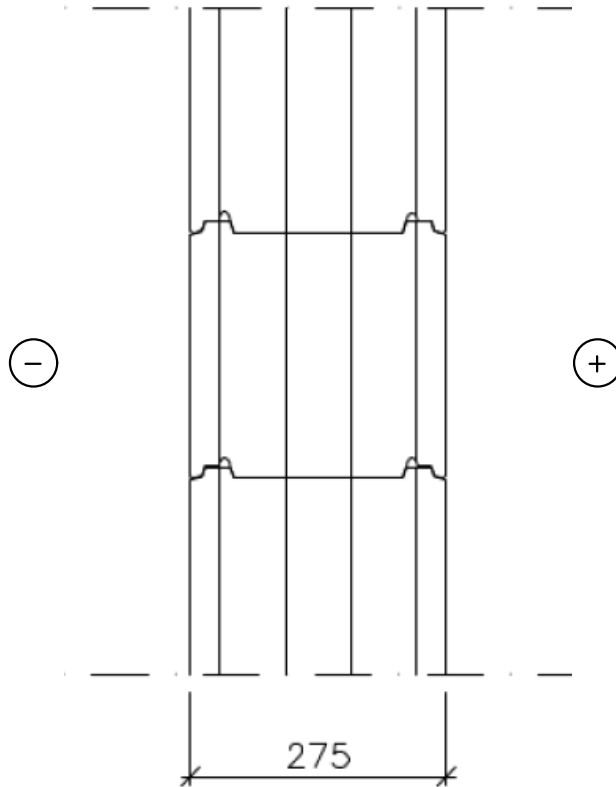
25 mm	PUUVERHOUS, PINTAMATERIAALI/-KÄSITTELY, ARK-suunnitelman mukaisesti
25 mm	VAAKAKOOLAUS 25x100 k600. Kiinnitys 3n 2,8x75 jokaiseen liitokseen
25 mm	TUULETUSRAKO, pystykoolaus 25x100 k600. Kiinnitys 3n 2,8x75 jokaiseen liitokseen
9 mm	TUULENSUOJALEVY, kiinnitys ruuvein valmistajan ohjeen mukaisesti
50 mm	LÄMMÖNERISTE vaakakoolaus 50x50 -k600
175 mm	LÄMMÖNERISTE pystyrunko 50x175 -k600, kiinnitys kuumas. kulmalevyillä k1800 MP.
160 mm	TERÄSBETONISEINÄ rakennesuunnitelmien mukaisesti

U-arvo=0.17 W/m²K

PALOLUOKKA REI60

US4

KANTAVA ULKOSEINÄ /
HIRSISEINÄ



275 mm

PINTAMATERIAALI/-KÄSITTELY, ARK-suunnitelman mukaisesti

HIRSISEINÄ Kontio Smart Log

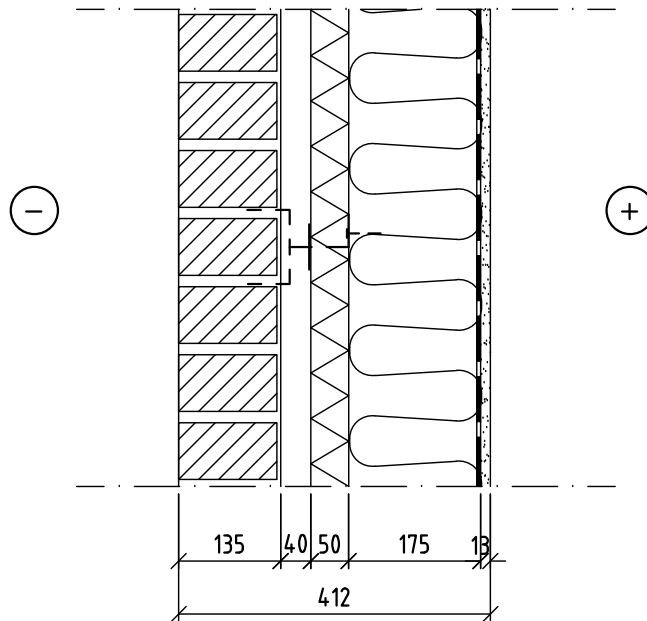
PINTAMATERIAALI/-KÄSITTELY, ARK-suunnitelman mukaisesti

U-arvo=0.40 W/m²K

PALOLUOKKA REI60

US 5

EI-KANTAVA ULKOSEINÄ/
TIILIVERHOUS



PINTAMATERIAALI/-KÄSITTELY, ARK-suunnitelman mukaisesti

135 mm TIILIVERHOUS, rakennuslityksen mukaisesti, sidonta runkoon RST. muuraussiteillä 4kpl/m², ikkunoiden ja ovien pielissä k300. Asennetaan ulospäin kaltevaksi

40 mm TUULETUSRAKO

50 mm TUULENSUOJAMINERAALIVILLA
Eristysten kiinnitys tiiliseiniin kiinnityslaipoilla valm. ohjeen mukaisesti

175 mm LÄMMÖNERISTE
pystyrunko 50x175 -k400

0,2 mm HÖYRYNSULKUMUOVI

13 mm KIPSILEVY
Kiinnitys valm. ohjeiden mukaisin ruuvein

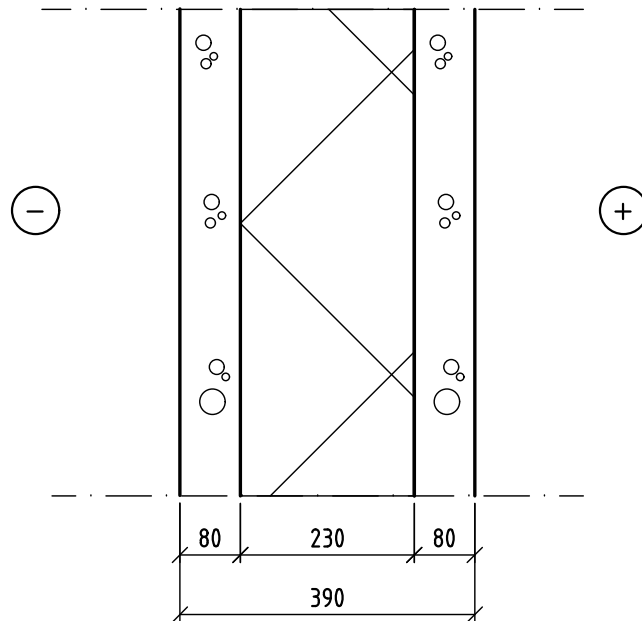
PINTAMATERIAALI TAI KÄSITTELY ARK-suunnitelman mukaisesti

U-arvo=0.17 W/m²K

PALOLUOKKA REI60

US6

EI-KANTAVA ULKOSEINÄ/
SANDWICH-ELEMENTTI



PINTAMATERIAALI TAI KÄSITTELY ARK-suunnitelman mukaisesti

80 mm TERÄSBETONINEN ULKOKUORI,
RAUDOITUS (RST) ELEMENTTISUUNNITELMIEN MUKAAN

230 mm RISTIINURITETTU, URASUOJATTU MINERAALIVILLA

KUORET SIDOTAAN TOISIINSA RST-ANSAIN

80 mm TERÄSBETONINEN SISÄKUORI,
RAUDOITUS (RST) ELEMENTTISUUNNITELMIEN MUKAAN

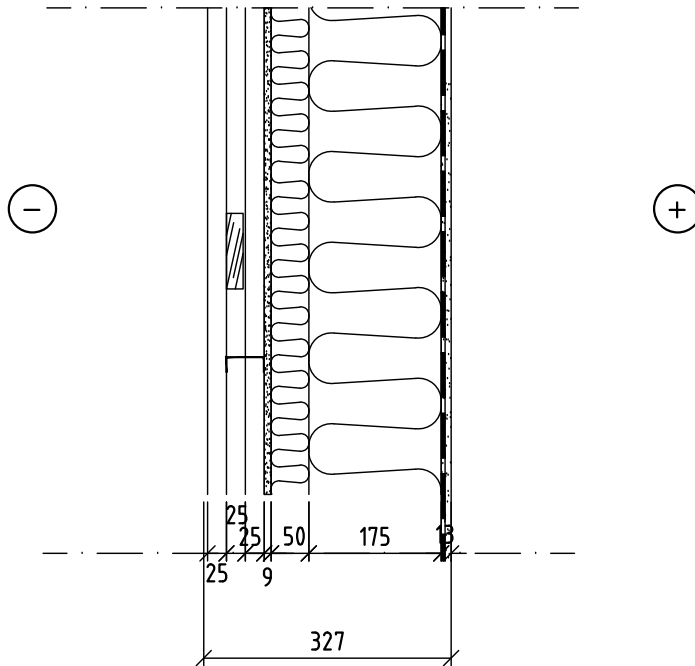
PINTAMATERIAALI TAI KÄSITTELY ARK-suunnitelman mukaisesti

U-arvo=0.17 W/m²K

PALOLUOKKA REI60

US7

EI-KANTAVA ULKOSEINÄ/
PUUVERHOUS



25 mm	PUUVERHOUS, PINTAMATERIAALI/-KÄSITTELY, ARK-suunnitelman mukaisesti
25 mm	VAAKAKOOLAUS 25x100 k600. Kiinnitys 3n 2,8x75 jokaiseen liitokseen
25 mm	TUULETUSRAKO, pystykoolaus 25x100 k600. Kiinnitys 3n 2,8x75 jokaiseen liitokseen
9 mm	TUULENSUOJALEVY, kiinnitys ruuvein valmistajan ohjeen mukaisesti
50 mm	LÄMMÖNERISTE vaakakoolaus 50x50 -k600
175 mm	LÄMMÖNERISTE pystyrunko 50x175 -k600
0,2 mm	HÖYRYNSULKUMUOVI
13 mm	KIPSILEVY Kiinnitys valm. ohjeiden mukaisin ruuvein
	PINTAMATERIAALI TAI KÄSITTELY ARK-suunnitelman mukaisesti

U-arvo=0.17 W/m²K

PALOLUOKKA REI60